VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V LETECKÉM PRŮMYSLU

MATERIALS USED IN AEROSPACE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — JIŘÍ VEČEŘA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. SIMONA POSPÍŠILOVÁ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Večeřa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 v leteckém průmyslu

v anglickém jazyce:

Materials used in Aerospace Industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V leteckém průmyslu se používá široké spektrum materiálů; kovové materiály od ocelí po slitiny neželezných kovů, dále kompozitní materiály, konstrukční plasty a keramika. Tato práce bude vypracována formou literární rešerše českých i zahraničních pramenů zabývajících se současnými materiály, které nachází uplatnění právě v leteckém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem této práce je nastudování dané problematiky a vypracování literární rešerše.

Seznam odborné literatury:

[1] Janovec J., Cejp J, Steidl J: Perspektivní materiály. Česká technika, ČVUT v Praze, 2008, 143 s.
[2] Hernas A., Jonšta Z., Tvrdý M., Čížek L., Purmenský J.: Žárupevné oceli a slitiny. ZUSI Žilina, 2002, 392 s.
[3] Michna Š., Lukáč I., Očenášek V. a kol.: Encyklopedie hliníku. Adin s.r.o. Prešov, 2005, 720 s.
[4] ASM specialty handbook, Magnesium and Magnesium Alloys. ASM International, 1999, 314 s.
[5] ASM specialty handbook, Nickel, Cobalt and Their Alloys. ASM International, 2000, 442 s.
[6] ASM Handbook, Volume 21, Composites, ASM International, 2002.
[7] Middletonn D.H.: Composite materials in aircraft structures, Longman Group, 1990.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 6.12.2010

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá současnými materiály, které nachází uplatnění v leteckém průmyslu.

První část práce se zabývá obecně konstrukcí letadla. Popisuje hlavní části draku letadla a letecké pohonné jednotky a jejich podstatu, různá konstrukční řešení, hlavní mechanické požadavky a na závěr i nejčastěji volené materiály pro výrobu těchto částí. Další část práce je věnována jednotlivým materiálům, které se používají na stavbu letadel v posledních letech. Jedná se o hliník a jeho slitiny, slitiny na bázi titanu, niklové, popř. kobaltové superslitiny, žáropevné oceli a kompozitní materiály.

Klíčová slova

konstrukce letadla, slitiny hliníku, slitiny titanu, superslitiny na bázi niklu a kobaltu, žáropevné oceli, kompozity

Abstract

This bachelor's thesis deals with contemporary aerospace materials.

First part of this thesis is engaged in aircraft construction. There is description of the most important components of fuselage and jet engine, its function, various types and materials, which is used to its production. Other part is engaged in these materials. There are aluminum alloys, titanium base alloys, nickel and cobalt base superalloys, heat-resisting steels and composites.

Key words

aircraft design, aluminium alloys, titanium alloys, nickel-base and cobalt-base superalloys, creep resisting steels, composites

Bibliografická citace

VEČEŘA, J. *Materiály používané v leteckém průmyslu*. Brno, 2011. 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma materiály používané v leteckém průmyslu jsem vypracoval samostatně s použitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně 27. května 2011

..... Jiří Večeřa

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Simoně Pospíšilové, Ph.D., za její vstřícnost, odbornou pomoc a věcné připomínky, které mi pomohly vypracovat tuto bakalářskou práci.

Obsah

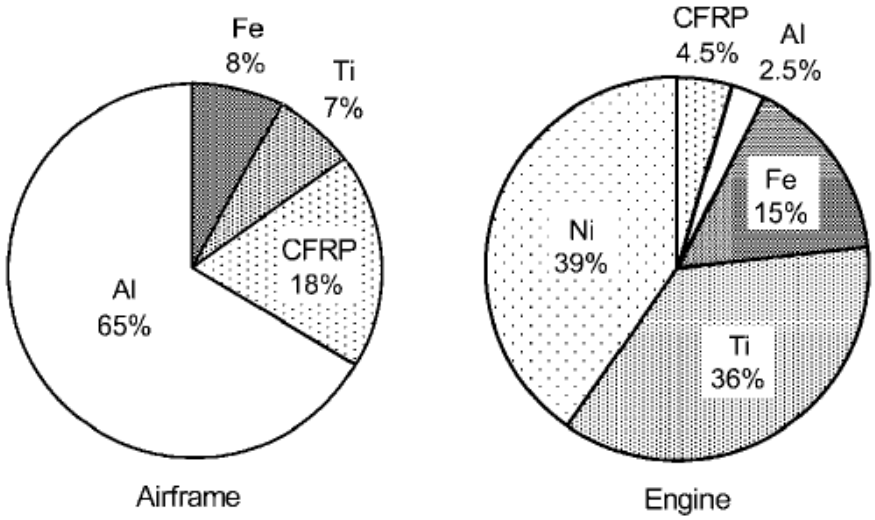
1 Úvod 9
2 Cíle práce 10
3 Části letadla 11
3.1 Drak 11
3.1.1 Nosná soustava 11
3.1.2 Trup 14
3.1.3 Ocasní plochy 14
3.2 Pohonná soustava 15
3.2.1 Vstupní soustava 16
3.2.2 Kompresor 17
3.2.3 Spalovací komora 18
3.2.4 Plynová turbína 19
3.2.5 Výstupní soustava 20
4 Vybrané letecké materiály 21
4.1 Hliník a jeho slitiny 22
4.1.1 Technologické vlastnosti 23
4.1.2 Mechanické vlastnosti 24
4.1.3 Struktura a chemické složení 24
4.1.4 Slitiny hliníku používané v leteckém průmyslu 27
4.2 Titan a jeho slitiny 29
4.2.1 Technologické vlastnosti 30
4.2.2 Mechanické vlastnosti 30
4.2.3 Struktura a chemické složení 30
4.2.4 Slitiny titanu používané v leteckém průmyslu 32
4.3 Niklové a kobaltové superslitiny 34
4.3.1 Nikl a jeho slitiny 34
4.3.2 Niklové superslitiny 35
4.3.3 Kobalt a jeho slitiny 39
4.3.4 Kobaltové superslitiny 39
4.4 Fe a jeho slitiny 40
4.4.1 Žáropevné oceli používané v leteckém průmyslu 41
4.5 Kompozitní materiály 44
4.5.1 Kompozitní materiály používané v leteckém průmyslu 46
5 Závěr 47
6 Seznam použitých zdrojů 48
7 Seznam obrázků 50
8 Seznam tabulek 51

1 Úvod

V leteckém průmyslu se používá široké množství materiálů počínaje kovovými materiály přes plasty, keramiku až po kompozity.

Při stavbě leteckých součástí se musí důkladně volit optimální vlastnosti materiálu. Každý materiál musí splňovat všechny nejen funkční, ale i cenové a technologické požadavky. Funkční vlastnosti materiálů jsou v leteckých konstrukcích využity v největší možné míře. Materiály se volí zejména s co nejnižší měrnou hmotností, ale zároveň s vysokou měrnou pevností. Pevnostní charakteristiky materiálů bývají voleny s ohledem na bezpečnost až na maximální možnou hranici. To však znamená, že hodnoty pevnosti uvedené u materiálu musí být dostatečně spolehlivé. Únavové pevnostní vlastnosti se také nesmí výrazně snižovat při dlouhodobém provozu. S tím je spojena celková životnost letounu. Tu může negativně snižovat koroze. Stále většího významu nabývají také charakteristiky lomové houževnatosti. [1, 2]

Výsadní postavení, hlavně při výrobě draků, měly po dlouhou dobu slitiny hliníku. S nástupem nových materiálů se však jejich využití snižuje. Na jejich místo se dostávají stále častěji hlavně kompozitní materiály. [1-3] Stále více se také používají niklové superslitiny, zejména intermetalika Ni-Al-Ti nebo také kobaltové superslitiny. Jejich odolnost proti vysokým teplotám a korozi je předurčuje jako ideální materiál pro motory letadel. Nepostradatelné jsou také slitiny na bázi titanu, které vynikají především vysokou pevností. Typické zastoupení jednotlivých druhů materiálů v moderním leteckém průmyslu je uvedeno na obr. 1. Obrázek znázorňuje rozložení použitých materiálů na moderním dopravním letadle. [3]



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]

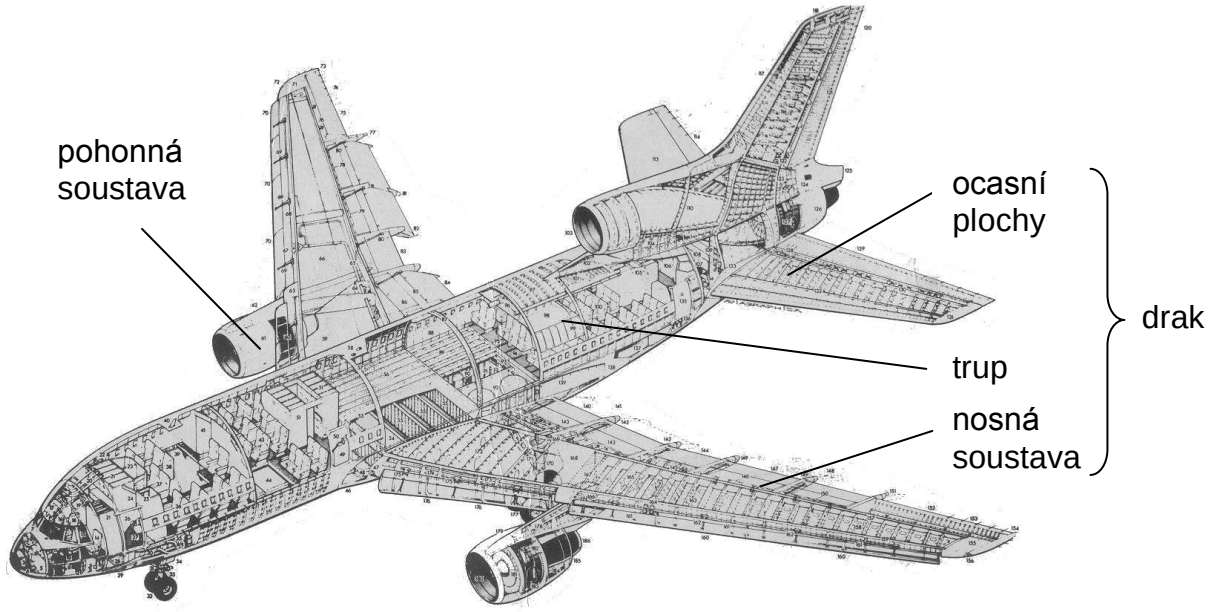
2 Cíle práce

Na součásti leteckých aplikací je kladeno velké množství požadavků, které jsou rozhodující pro volbu materiálu na tyto aplikace. Dle těchto požadavků lze rozdělit materiály do dvou skupin. První skupinou jsou materiály používané na drak letadla. Tyto materiály musí splňovat požadavky, kterými jsou především nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost a odolnost vůči korozi. Zároveň je důležitý i ekonomický aspekt, tedy co nejpříznivější cena. Mezi tyto materiály patří slitiny na bázi hliníku, titanu, kompozitní materiály a oceli. Druhou skupinu tvoří materiály pohonných jednotek. Na ty jsou kladeny hlavně požadavky teplotní, s nimi spojeny požadavky na pevnost za vysokých teplot, a dále pak odolnost proti korozi, oxidaci a erozi. Důležitá je rovněž rozměrová stálost. Těmto požadavkům nejlépe odpovídají niklové a kobaltové superslitiny, žáropevné slitiny titanu a oceli, částečně i hliníkové slitiny a kompozity.

Hlavním cílem bude zpracování rešerše z domácích i zahraničních zdrojů na téma materiály v leteckém průmyslu. Důraz bude kladen především na vlastnosti a strukturu vybraných materiálů. Práce se bude zabývat hliníkem a jeho slitinami, slitinami na bázi titanu, niklovými a kobaltovými superslitinami, ocelovými žáropevnými slitinami a kompozity. Pro lepší pochopení problematiky leteckých materiálů bude dílčím cílem popis základních částí letecké konstrukce, požadavky na vlastnosti jejich materiálů a výčet matriálů, z kterých se nejčastěji zhotovují.

3 Části letadla

Konstrukci letadla můžeme rozdělit do tří základních a relativně samostatných celků (*Obr. 2*). Jedná se o drak, pohonnou soustavu a výstroj. U bitevních letadel se toto členění rozšiřuje ještě o výzbroj. Tyto základní celky by se daly dále dělit prakticky až na úroveň základních dílu a komponent. [2]



Obr. 2: základní rozdělení letecké konstrukce [4]

3.1 Drak

Drak je základní konstrukční podskupinou tvořící až 90% celkové hmotnosti letadla. Drak je tvořen nosnou soustavou (křídla), trupem, ocasními plochami, řízením a podvozkem, viz obr. 2. [2, 4]

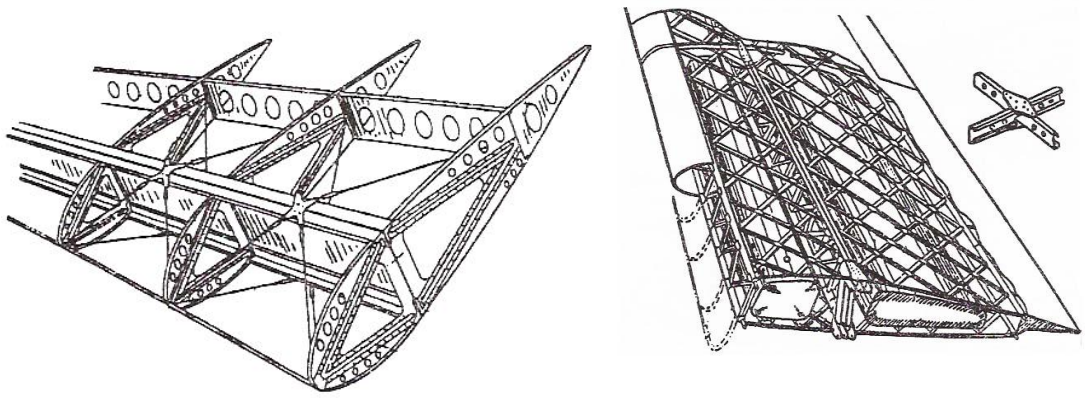
Součásti draku letadla jsou komplexně namáhány (kombinace tah, tlak, ohyb, krut), zároveň jsou některé složky tohoto zatížení časově proměnné. Typickým mezním stavem těchto konstrukcí bývá únava materiálu. [2] Vzhledem k velké rozmanitosti konstrukcí jednotlivých částí draku se pro jejich výrobu používá i široké spektrum materiálů. Požadavkům na mechanické vlastnosti (i za nízkých teplot), hmotnost a ekonomické ukazatele nejvíce vyhovují materiály na bázi Al, Ti, oceli a v posledních letech zejména kompozitní materiály. Konkrétně jde například o slitiny hliníku Cu4-Mg1-Mn nebo Al6151, které se používají kvůli svým dobrým mechanickým vlastnostem, dále slitiny na bázi titanu typu Ti–13V–11Cr–3Al a z kompozitních materiálů se díky nízké hmotnosti a vysoké pevnosti nejčastěji používají kompozity s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny a sendvičové materiály.

3.1.1 Nosná soustava

Nosná soustava je z letového hlediska nejdůležitější částí draku, neboť slouží k vytváření vztlakové síly. Křídla mohou druhotně sloužit také jako nosič zbraňových systémů nebo k nim mohou být uchyceny palivové nádrže, podvozek popř. motorový gondol. [2]

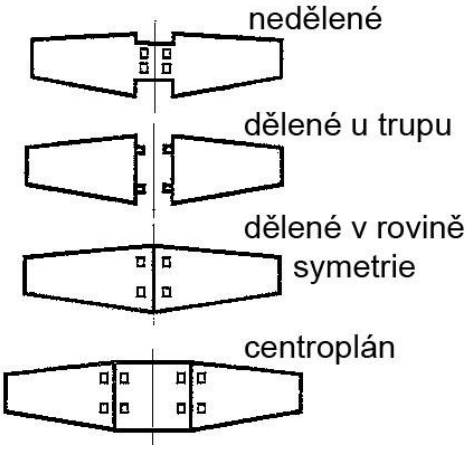
Křídla se zhotovují v několika odlišných konstrukčních řešeních. Podle stupně zapojení přenosu zatížení potahem dělíme křídla do tří skupin. První skupinu představují konstrukce bez nosného potahu. Příklad této konstrukce je na obr. 3 vlevo. [2] Nenosný potah přenáší pouze tlakové síly aerodynamického zatížení do

vnitřní konstrukce křídel. Potah proto může být vyroben z tkanin a pláten. Druhou skupinou je konstrukce s nosným potahem, kdy se na potahy používá hlavně lehkých hliníkových slitin. Potah tak umožňuje přenášet kroutící a ohybové momenty. Největší využití potahu k přenosu zatížení je u skořepin, kdy potah přenáší všechna zatížení. Poslední skupinou jsou geodetické konstrukce, jejichž nákres je na obr. 3 vpravo. [2] Jde o skořepinové konstrukce, které jsou tvořeny systémem křížových táhel a vzpěr. Potah zde má pouze vedlejší pevnostní úlohu. Geodetické konstrukce však nejsou vzhledem ke své technologické náročnosti u civilních letadel prakticky vůbec rozšířeny. [2, 5]



Obr. 3*: vlevo: konstrukce bez nosného potahu; vpravo: geodetická konstrukce [2]*

V několika rozličných konstrukčních podobách se také provádí spojení křídel s trupem. Základní druhy provedení jsou naznačeny na obr. 4. [2] Z hlediska polohy dělící roviny se křídla rozdělují na nedělená, dělená v rovině symetrie, dělená u trupu a křídla s centroplánem. Nedělená křídla najdeme hlavně u menších letadel, kde nám rozpětí umožňuje výrobu a montáž v celku. Hlavní výhodou tohoto spořádání je, že nedělená křídla nepřenáší do trupu ohybové napětí. Dělená křídla u trupu se používají u letadel, kde není výhodné omezit vnitřní prostory trupu. Jejich nevýhodou je, že přenáší zatížením křídel na trup. Z toho plyne, že si spojení s trupem vyžaduje, zesílení a vhodné rozvedení sil. Křídla s centroplánem objevíme hlavně u velkých dopravních letadel. Jejich křídla jsou vysoce zatížená, avšak střední průběžná část vyloučí přenos ohybových zatížení přes konstrukce trupu. [2, 5]



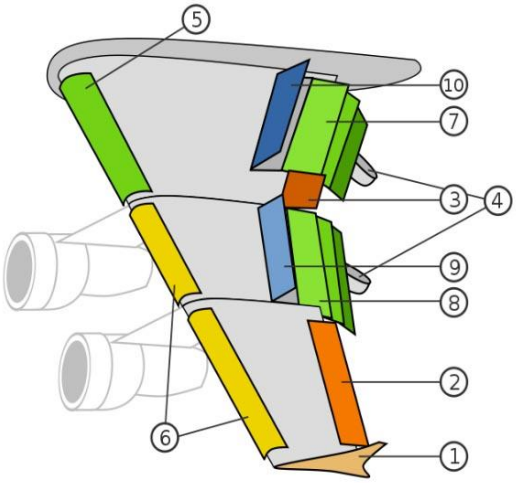
Obr. 4: spojení křídel s trupem [2]

Ohybový moment je u křídel přenášen ve většině případů nosníky. Podle počtu nosníků rozeznáváme konstrukce jednonosníkové, dvounosníkové a vícenosníkové. Jednonosníková konstrukce je nejjednodušším typem konstrukce. Ohybový moment přenáší pouze jeden nosník, který se nachází v největší tloušťce profilu. Od určité hodnoty zatížení je použití jednonosníkové konstrukce nevýhodné. Do přenosu ohybových momentů se proto zapojuje druhý pomocný nosník. Mluvme potom o konstrukci dvounosníkové. Její ohybovou únosnost lze zvýšit podélnými výztuhami, které přenášejí ohyb spolu s částí potahu v okolí výztuh. [2, 5]

Při ještě vyšších zatíženích se jako lepší řešení jeví nepřenášet napětí přes elementy nosníku, ale zapojit celý průřez křídla. Jedná se o poloskořepinové a skořepinové konstrukce. U konstrukcí poloskořepinových je potah zatížen nejen smykovým napětí od krutu, ale i normálovým od ohybu. U skořepinových přenáší potah plnohodnotně jak ohyb, tak i krut. Skořepinové konstrukce lze rozdělit dle vyztužení potahu na konstrukce vyztužené pomocí podélníků, integrálně vyztužené a sendvičové konstrukce. Podélně vyztužené konstrukce jsou poloskořepinové konstrukce, na nichž jsou hustě rozesety podélné výztuhy. Jako integrální konstrukce nazýváme případ, kdy jsou potah i výztuhy vyrobeny monoliticky. Hlavní nevýhodou těchto konstrukcí je vysoká pracnost výroby a vyšší rychlost šíření trhlin. [2, 5, 6] U sendvičových konstrukcí je základním stavebním prvkem panel ze dvou tenkých potahů vyztužený jádrem tzv. sendvič. Hlavní výhodou těchto panelů je vysoká tuhost a lehkost. Sendvičově jsou řešeny nejen potahy, ale i žebra a stojiny. [2]

Na křídle se nacházejí také pohyblivé kontrolní plochy sloužící k ovládání a stabilizaci letu. Jsou to křidélka, klapky, spoilery či brzdy, viz obr. 5 [7]. Křidélka ovládají příčný náklon letadla. Vztlakové klapky zvyšují vztlak, který generuje křídlo. Také ovšem zvyšují tvarový odpor, proto se využívají jen při nízkých rychlostech, především při vzletu a přistání. Brzdící klapky a spoilery se používají ke snížení rychlosti, ale také jako rušiče vztlaku. Zatímco brzdící klapky se používají téměř výhradně při přistávání, spoilery se využívá i za letu. Sloty jsou vysouvací náběžné hrany na křídlech, které mění jeho profil a tím zvyšují vztlak. Někdy se místo nich používají Krügerovy klapky. Winglet je špička křídla zalomená směrem nahoru, která snižuje indukovaný odpor křídla. [2, 5].

Na konstrukci křídel se nejčastěji používají slitiny na bázi hliníku, titanové slitiny, ocel a v posledních letech stále více kompozitní materiály.

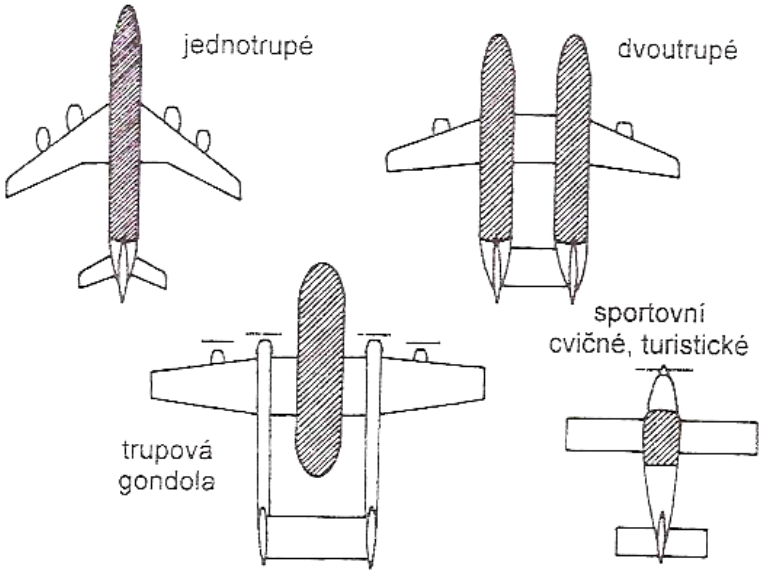


Obr. 5: kontrolní a pohyblivé plochy křídla.
1 - winglet, 2 - křidélka pro nízké rychlosti, 3 - křidélka pro vysoké rychlosti,
4 – vztlakové klapky, 5 – Krügerovy klapky, 6 – náběžné klapky,
7 – štěrbinové klapky vnitřní, 8 – štěrbinové klapky vnější, 9 – spoiler, 10 – brzda [7]

3.1.2 Trup

Trup plní dvě hlavní funkce. První funkce je funkce konstrukční, propojení nosné plochy, ocasních ploch a ostatních částí v jeden celek. Druhou funkcí je funkce přepravní. [5]

Trupy se vyskytují v několika konstrukčních řešeních, viz o*br. 6*. Nejrozšířenějším typem je jednotrupá koncepce letounu. Nejméně totiž zhoršuje aerodynamické charakteristiky křídla a ocasních ploch. Dvoutrupé letouny jsou využívány hlavně u velkých transportních letounů. I zde je však snaha nahradit je jednotrupovým schématem. [2]



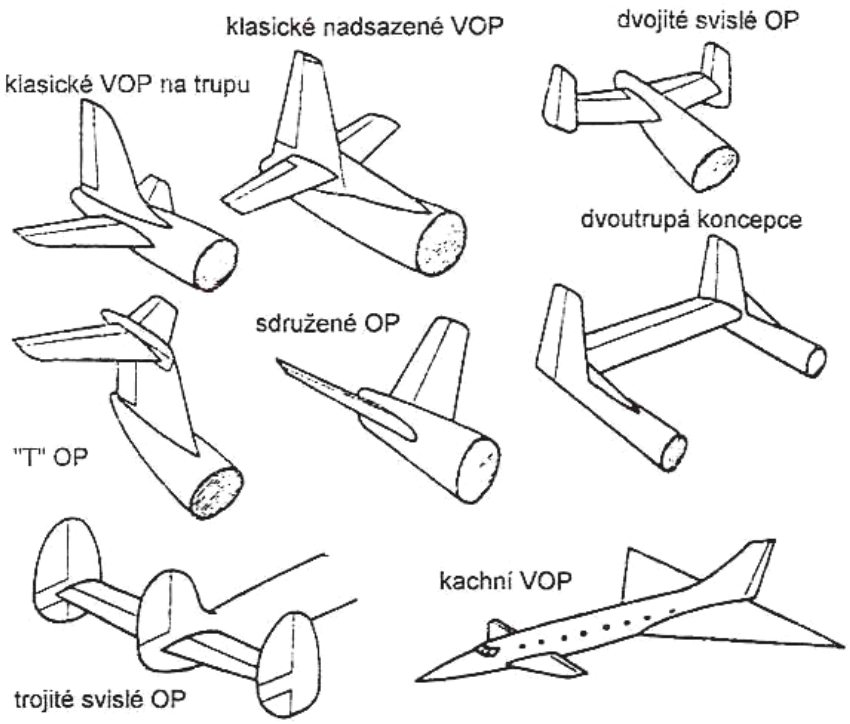
Obr. 6: konstrukční řešení trupu [2]

Obecné požadavky na konstrukci trupu jsou minimální hmotnost a dostatečná pevnost a tuhost, spolehlivost, výrobní a provozní technologičnost a minimální odpor. Z konstrukčně pevnostního hlediska se trupy téměř neliší od křídel či ocasních ploch. Jedná se o prostorově namáhaný nosník s nosnými elementy soustředěnými po obvodě. Rozdílnost od vztlakových ploch je v průřezech, které mají tvar blízký kruhu. V zásadě tak lze pro konstrukci trupů použít tenkostěnná konstrukční schémata použitá u nosných ploch. [2]

3.1.3 Ocasní plochy

Ocasní plochy plní funkci vytváření momentů potřebných k ustáleným letovým režimům a k manévrování letadla. Dle druhu letadla lze použít několik koncepcí ocasních ploch. [2, 5, 6] Jsou to klasické vodorovné ocasní plochy (VOP) na trupu, klasické nadsazené VOP, dvojité svislé ocasní plochy, „T“ ocasní plochy, sdružené ocasní plochy, trojité svislé ocasní plochy, kachní VOP a dvoutrupá koncepce ocasních ploch. Schémata těchto konstrukcí jsou naznačena na obr. 7. [2]. Ocasní plochy lze rozdělit na vodorovné ocasní plochy a svislé ocasní plochy. VOP slouží k vyvažování letounu v podélném směru. Naproti tomu v běžných letových režimech letoun nevyžaduje vyvažování v bočních směrech. Děje se tomu tak z důvodů tvarové symetrie. Svislé ocasní plochy tedy slouží hlavně pro případy, kdy jde o nesymetrické lety. Jsou to situace, kdy například vane boční vítr, nebo když vysadí jedna z pohonných jednotek. [2]

Konstrukční řešení vodorovných i svislých ocasních ploch jsou téměř analogická jako u konstrukcí křídel a to včetně materiálů.



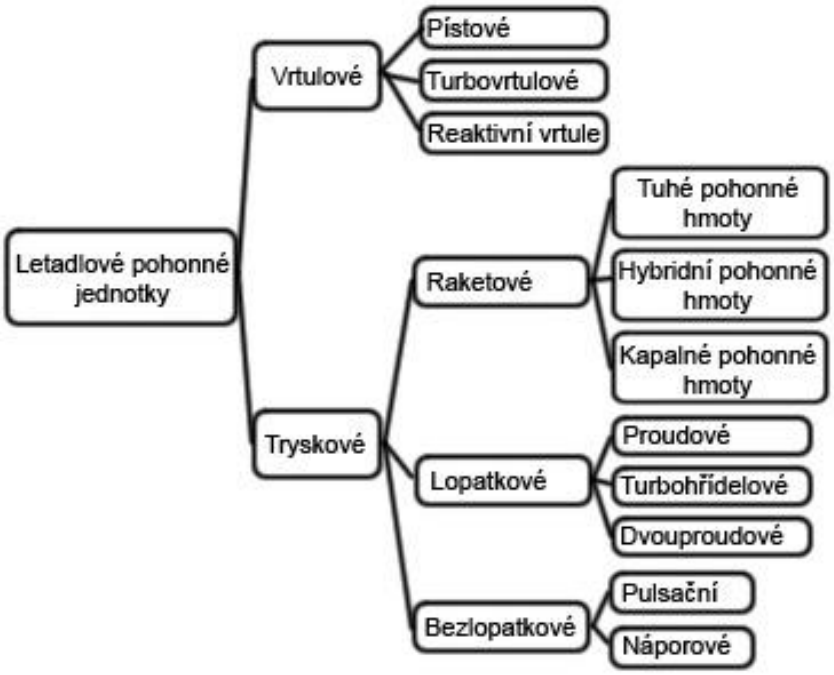
Obr. 7: konstrukční řešení ocasních ploch [2]

3.2 Pohonná soustava

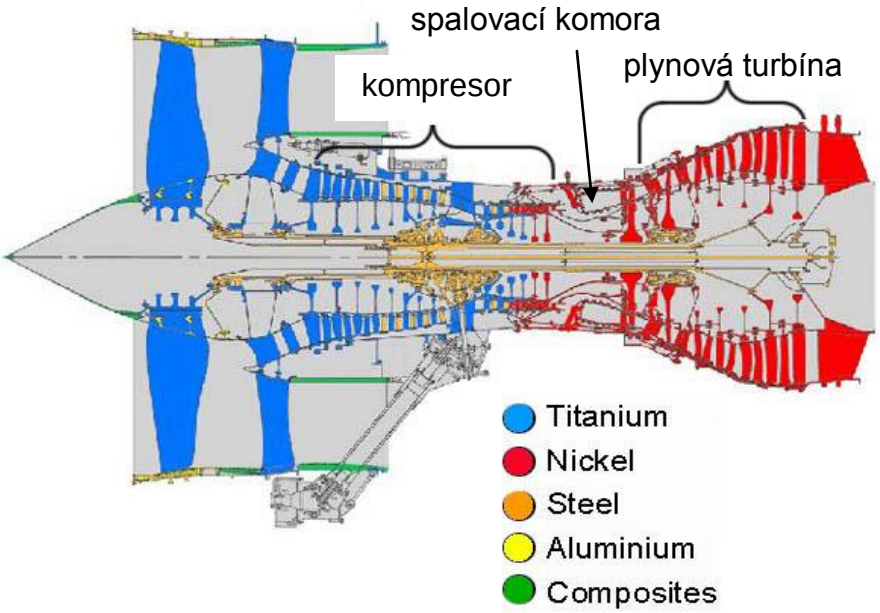
Pohonná soustava má za úkol přeměnu mechanické energie na tahovou sílu nezbytnou k letu. Zdrojem mechanické energie je motor, který se může vyskytovat v několika různých konstrukčních provedeních. Základní rozdělení je uvedeno v diagramu na obr. 8. Nejvíce rozšířený je lopatkový motor (obr. 9). Je tvořen kompresorem, spalovací komorou a plynovou turbínou. U jednotlivých typů lopatkových motorů je dále k těmto částem přičleněna vstupní a výstupní soustava a další pomocné součásti. [10, 11]

Jednotlivé části pohonné soustavy, především turbíny a kompresoru jsou kombinovaně namáhány staticky I dynamicky především na tah, tlak, ohyb a krut vlivem odstředivé síly vyvolané vlastní hmotností, vlivem tepelného pnutí či vibracemi jednotlivých součástí vlivem nerovnoměrnosti toku plynů v motoru, vlivem proudění horkých plynů uvnitř motoru atd. Jedná se tedy o namáhání, které má charakter únavových a creepových procesů za vysokých teplot (cca od 600 – 950 ˚C). Povrch součástí je také vystaven dalším degradačním procesům, jako je vysokoteplotní koroze, oxidace a eroze. [8]. Většina součástí leteckých motorů se vyrábí z niklových, popř. kobaltových superslitin či titanových slitin. Ty po určitou dobu výše uvedeným degradačním procesům odolávají. V poslední době jsou také povrchy součástí, jako jsou rotorové či statorové lopatky plynové turbíny, chráněny ochrannými vrstvami. To zvyšuje životnost a výkon motoru. [9] Konkrétně se vysoce teplotně namáhané součásti vyrábí z niklových superslitin jako Inconel 713LC, Mar-M247 či Hastelloy X popř. z kobaltových superslitin jako je ASTM F75. Na součásti, po kterých se požaduje vysoká pevnost při středně vysokých teplotách, se používají titanové slitiny na bázi Ti-6Al-4V, Ti-7Al-4Mo nebo Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo.

Vstupní ústrojí naopak pracuje za poměrně nízkých teplot, je proto možné ho odlévat z hliníkových slitin na bázi Al-Cu-Li nebo Al-Zn-Mg, někdy se vyrábí i z titanu nebo oceli. [10]



Obr. 8: rozdělení leteckých pohonných jednotek [10]



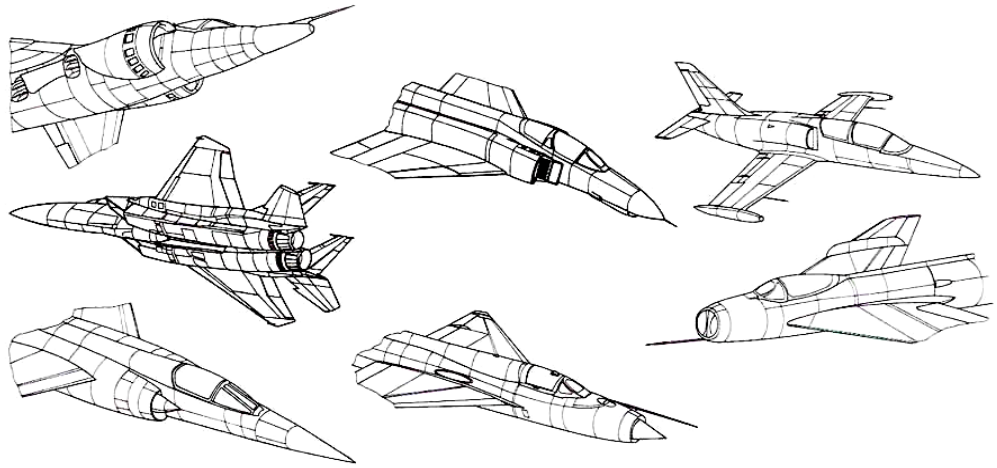
Obr. 9: schéma lopatkového motoru s vyznačením použitých materiálů (Titanium – titanové slitiny, Nickel – niklové superslitiny, Steel – ocel, Aluminium – hliníkové slitiny, Composites – kompozity) [12]

3.2.1 Vstupní soustava

Vstupní soustavou se rozumí několik konstrukčních uzlů, jejichž úkolem je přívod vzduchu z okolního prostředí do kompresoru. Ve vstupní soustavě se zároveň tento vzduch předběžně stlačuje. Z hlediska konstrukce dělíme konstrukční soustavu na dva celky. Vnější (obr. 10), které je součástí draku, a vnitřní, které jsou součástí motoru. [10]. Základním faktorem, který ovlivňuje tvar a požadavky na regulaci je rychlost letu. Pro rychlosti pod Ma=1,4 (Ma je symbol pro Machovo číslo; jde o

bezrozměrnou jednotku, která udává rychlost tělesa pohybujícího se vzduchem v závislosti na rychlosti šíření zvuku ve stejném prostředí. [7]) jde o tzv. podzvukovou vstupní soustavu neregulovanou. Pohybuje-li se však rychlost za touto hranicí, tak mluvíme o tzv. soustavě nadzvukové regulované. Nadzvukových vstupních soustav se musí využívat z důvodu, že při rychlostech nad Ma=1,4, dochází u podzvukových soustav k neúměrně velkým ztrátám vlivem čelních rázových vln. Ty jsou u nadzvukových ústrojí regulovány. Regulace se provádí několika způsoby závisejících na druhu vnější nadzvukové soustavy. U centrálního vstupního ústrojí se regulace realizuje výsuvným kuželem. U bočních a společných soustav pomocí řady klapek ve vstupním ústrojí či naklápěním celého vstupního ústrojí. [10, 11].

Jednotlivé součásti vstupního ústrojí jsou odlévány či svařovány; a to z hliníkových slitin, popř. titanu nebo oceli. [10]

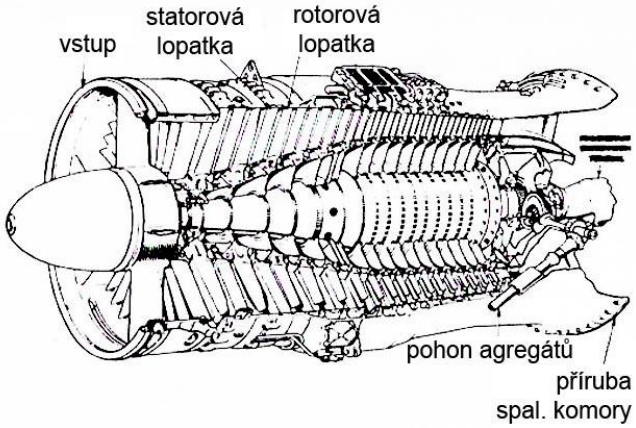


Obr. 10: různá provedení vnější části vstupní soustavy [10]

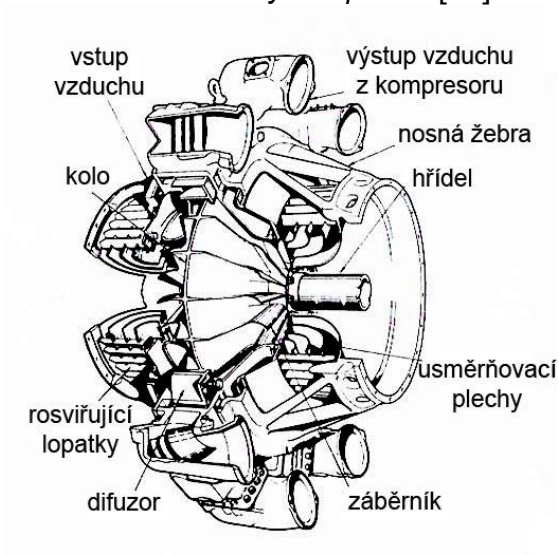
3.2.2 Kompresor

V kompresoru se stlačuje vzduch procházející motorem. Stlačený vzduch musí být poté plynule dodáván do spalovací komory, a to bez pulzací a s maximální účinnosti stlačení. [11]

Rozeznáváme kompresory osové (obr. 11), odstředivé (obr. 12), popř. kombinaci obou. Odstředivé kompresory se používají převážně u motorů nižších výkonů a tahů. Jeho nedílnou součástí je difuzor, což je zařízení, kde se mění kinetická energie vzduchu na energii tlakovou. Oběžná kola odstředivých kompresorů se zhotovují jako výkovky z hliníkových slitin pro obvodové rychlosti do 500 $m \cdot s^{-1}$, nebo z titanu či oceli pro rychlosti vyšší. S hřídelí se oběžná kola spojují drážkováním nebo pomocí stahovacích šroubů a příruby. Osové kompresory jsou tvořeny rotujícími lopatkami (rotor) a lopatkami nepohyblivými (stator). Na výrobu rotorů se využívá hliníkových slitin, ocelí a titanu. Hřídele jsou vždy ocelové. Skříně kompresoru slouží k přenosu sil a momentů do závěsů motoru a draku. Vyrábějí se buď odlévané, nebo svařované. V případě, že jsou odlévané, volíme za materiál lehké slitiny pro nízkotlaké kompresory popř. vysokoteplotní slitiny pro vysokotlaké kompresory. Jsou-li skříně svařované, tak bývají z titanu nebo oceli. U dvouproudových motorů se využívá také tepelně odolných kompozitů. Velice namáhanou součástí jsou lopatky kompresorů. Vyrábí se z lehkých hliníkových slitin, titanu, oceli nebo vysokoteplotních slitin niklu a kobaltu. [10, 11]



Obr. 11: osový kompresor [11]

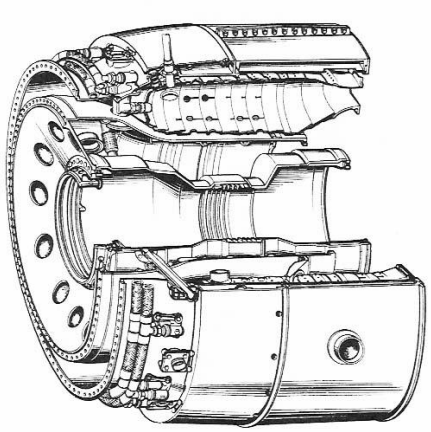


Obr. 12: odstředivý kompresor [11]

3.2.3 Spalovací komora

Ve spalovací komoře se mísí stlačený vzduch s palivem a následně se tato směs zažehne. Poté se převádí takto vzniklá energie do proudu stlačeného vzduchu. Příklad spalovací komoře lze nalézt na obr. 13.

Materiál pro výrobu jednotlivých částí spalovací komory je závislý hlavně na pracovní teplotě. Přední část spalovací komory stejně jako stěny plamence musí vydržet velmi vysoké teploty. Materiál také musí umožnit, aby byla spalovací komora odolná proti korozivnímu prostředí a aby měla dobrou odolnost proti vzniku a šíření trhlin. Ve většině případů jsou spalovací komory svařované ze žáruvzdorných plechů. Hlavice plamenců jsou pak odlitky ze superslitin [10, 11]. Ve většině případů jsou opatřeny ochrannými vrstvami.



Obr. 13: spalovací komora [3]

3.2.4 Plynová turbína

V plynové turbíně se transformuje část energie plynů, které proudí ze spalovací komory na mechanickou energii, jenž se využívá k pohonu kompresoru a motorových a letadlových agregátů. S kompresorem jsou hřídele turbín spojeny drážkovým spojením nebo v menší míře pomocí příruby. Stejně jako kompresor se turbína skládá ze statoru a rotoru [10, 11]

Oběžné lopatky, obr. 14 vlevo, rotoru jsou nejnamáhanější části turbíny i celého motoru. Většinou se vyrábí ze žáropevných superslitin niklu a kobaltu přesným litím. K výrobě disků turbín lze užít i práškové metalurgie. Lopatky statoru jsou zpravidla lité z nikových superslitin nebo duté ze žáropevného plechu. Zvláštním typem jsou chlazené lopatky. Zvyšují životnost a výkon motoru. V praxi používané typy chlazení lopatek jsou uvedeny na obr. 14 vpravo. [10, 11].

Skříně turbín jsou nejčastěji svařence ze žáropevných plechů, do nichž se vkládají vložky ze směsí kovů a grafitu. [10, 11].

Obr. 14: vlevo rotorová lopatka plynové turbíny s kanály pro chlazení; vpravo: různá konstrukční řešení chlazení lopatek [10]

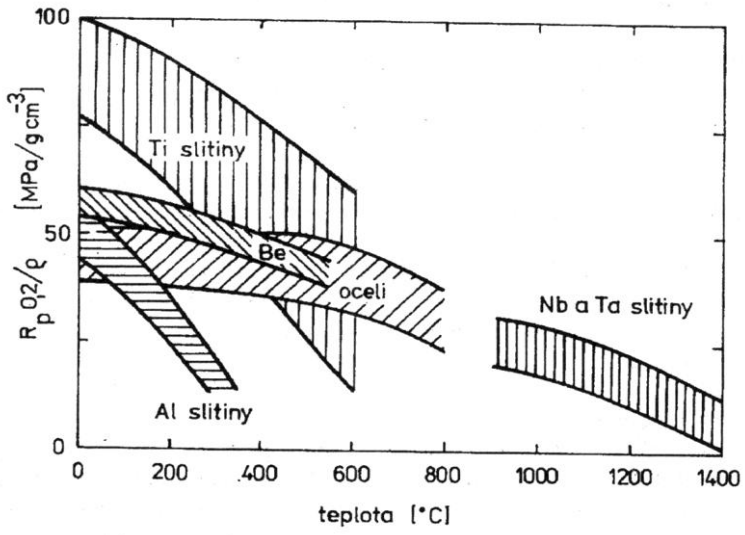
3.2.5 Výstupní soustava

Ve výstupní soustavě se získává požadovaný tah. Výstupní soustava se skládá z několika částí. Z výstupního difuzoru, kde dochází ke zpomalování výtokových plynů, prodlužovací trouby a výstupní trysky, kde nastává transformace zbylé tepelné a tlakové energie plynů na energii kinetickou. Výstupní difuzor a prodlužovací trouba musí být dobře tepelně izolovány, aby nedocházelo k nadměrnému zahřívání potahu letounu. Všechny části výstupní soustavy jsou obecně zhotoveny svařováním ze žáropevných plechů. [7]

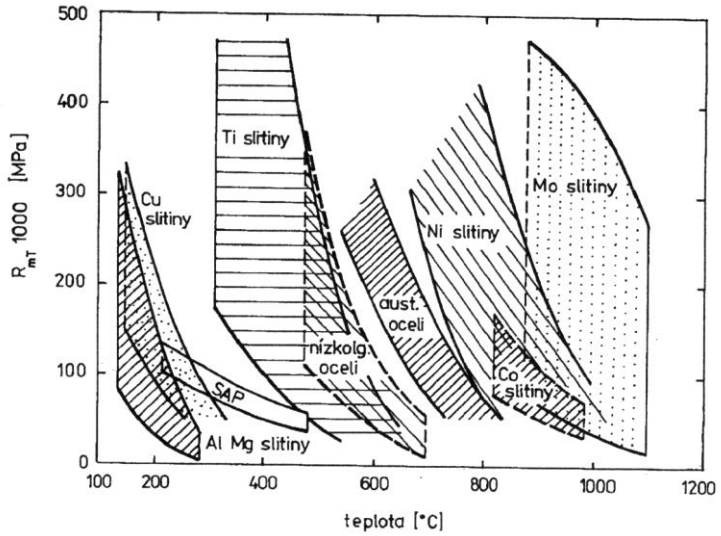
4 Vybrané letecké materiály

V leteckých konstrukcích moderních letounů se využívá velkého množství konstrukčních materiálů. Při výběru materiálu pro jednotlivé součásti je rozhodující funkce dané součásti, zatížení, kterému bude vystavena a prostředí ve kterém se bude nacházet. Obecně se po leteckých materiálech požaduje nízká měrná hmotnost, ale zároveň vysoká pevnost. Dále pak rozměrová stálost a korozní odolnost. Na součásti leteckých motorů se pak používají materiály, které jsou schopné odolat vysokým teplotám, které v některých částech motoru vznikají.

V předchozí kapitole byly popsány požadavky na mechanické a jiné vlastnosti materiálů a vybrané skupiny materiálů, které těmto požadavkům odpovídají a v praxi se používají, viz kap. 3.1 a 3.2. Jedná se o hliníkové slitiny, titanové slitiny, niklové a kobaltové superslitiny, žáropevné oceli a kompozitní materiály. Na obr. 15 a 16 jsou teplotní závislosti vybraných konstrukčních materiálů na měrné mezi kluzu a mezi pevnosti při tečení po 1000 h. Z grafů vyplývá, že nejlepší měrnou pevnost mají slitiny na bázi Ti v porovnání se slitinami na bázi Al. Tyto slitiny jsou však použitelné jenom za nižších teplot. Žáropevné oceli jsou výhodné do teplot cca 650 ˚C při mechanickém namáhání, vysokolegované oceli austenitické však i do teplot vyšších, ale mechanické vlastnosti neodpovídají konstrukčním požadavkům a navíc mají tyto slitiny vyšší hmotnost. Ideální skupinou materiálů, které odolávají mechanickému zatížení za vysokých teplot, jsou niklové a kobaltové superslitiny, popř. slitiny na bázi Mo, viz obr. 15 - 16. [13]



Obr. 15: grafická závislost měrné meze kluzu v tahu na teplotě vybraných konstrukčních materiálů [13]



Obr. 16: *grafická závislost meze pevnosti při tečení (s dobou do lomu 1000 h) na teplotě vybraných konstrukčních materiálů* [13]

4.1 Hliník a jeho slitiny

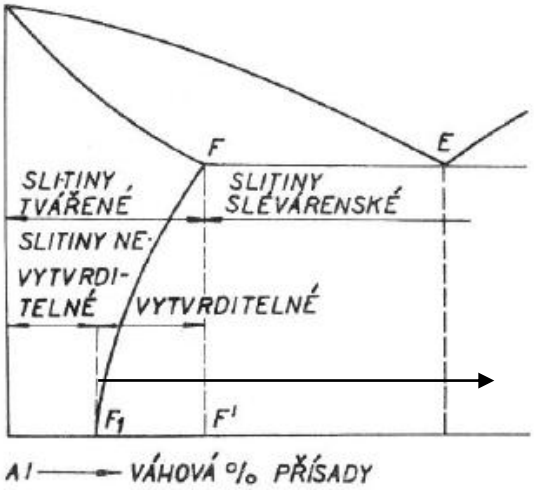
Hliník je stříbrolesklý kov s namodralým nebo našedlým nádechem s kubickou plošně středěnou mřížkou (FCC). Protože má FCC mřížka dostatečné množství (12) skluzových systémů a nízké kritické skluzové napětí, jedná se o vysoce tvárný materiál, je za tepla i za studena dobře tvářitelný a neprojevuje se tranzitní lomové chování. Další výbornou vlastností je nízká hustota a malá teplotní roztažnost (viz tab. 1). [14]. Je po kyslíku a křemíku nejrozšířenější prvek na Zemi. V přírodě se nachází v 250 různých minerálech. Mezi nejvýznamnější patří korund, diaspor, boehmit či spinel. Nejvýznamnější hliníkovou rudou je bauxit, ze kterého se většinou čistý hliník vyrábí. Dříve proběhly pokusy o výrobu hliníku i z minerálů jako je nefelín, seynitit a alumit. Vzhledem k nízkému ročnímu vytěženému objemu se těchto pokusů zanechalo. V posledních padesáti letech významně vzrostla také produkce sekundárního hliníku získaného recyklací. V roce 1999 byl podíl hliníku získaného recyklací 25 % z celkové světové produkce. [13-15] Vzhledem k jeho výhodné kombinaci fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností, je možné aplikovat hliníkové materiály téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Největší procento použitých hliníkových materiálů je v leteckém a automobilovém průmyslu. I přes snahu nahrazovat hliník lehčími materiály na bázi hořčíku, uhlíku a kompozity, má stálé výsadní postavení pokud se jedná o silně namáhané komponenty, jako jsou křídla a trup letadla. Je to především kvůli nízkým výrobním a údržbovým nákladům. [13, 14]

Tab. 1: teplotní roztažnost hliníku [14]

Teplotní interval [°C]	Průměrný koeficient [μm/m·K]
-200 až 20	18,0
-150 až 20	19,9
-50 až 20	21,8
20 až 100	23,6
20 až 200	24,5
20 až 300	25,5
20 až 400	26,4
20 až 500	27,4

Hliník je velice odolný proti korozi a to zejména v atmosférických podmínkách. Tato odolnost má ale řadu omezení, při jejichž překročení hliník degraduje. Nejvyšší odolnost vůči korozi má čistý hliník. Příměsi Na, Ce, Co, Pt, Ag, Th a některé další jeho korozní odolnost snižují. Z hlediska korozní odolnosti je významná hlavně přítomnost Cu, neboť slitiny s mědí mají nízkou korozní odolnost. [13, 14]

Slitiny hliníku se dělí podle několika kritérií. Jedním z nich je, jestli je slitina schopná precipitačního vytvrzování (viz kapitola 4.1.2). Podle toho aspektu se dělí slitiny na vytvrditelné a nevytvrditelné. Další kritériem může být způsob technologického zpracování. Pak dělíme slitiny na slitiny pro tváření a slitiny slévárenské. Jak je patrné z diagramu na obr. 17, slévárenské slitiny mají oproti slitinám určeným k tváření vyšší obsah legujících prvků. Obecně lze říci, že čím je vyšší obsah legujících prvků ve slitině a čím větší jsou její pevnostní charakteristiky, tím je slitina méně vhodná k tváření. To je způsobeno skutečností, že legující prvky vytvářejí ve struktuře křehké a tvrdé fáze. Při působení vnějších sil, které jsou na polotovar při tváření vyvíjeny, by tak při vyšší koncentraci legur vznikaly trhliny. [14]



Obr. 17: přibližné rozdělení slitin hliníku podle rovnovážného stavového diagram Al-Y, kde za Y představuje některý z legujících prvků (Cu, Si, Mg,…) [16]

4.1.1 Technologické vlastnosti

Tvářitelnost

Tvářitelnost je vlastnost materiálu, která vyjadřuje jeho schopnost přetvořit se za působení vnějších sil do požadovaného tvaru. Nesmí při tom však dojít k porušení materiálu. Hlavní činitelé, kteří ovlivňují tvárnost, jsou typ mřížky, chemické složení, teplota tváření a stav tepelného zpracování materiálu. Tvárnost hliníkových slitin je jednou z nejčastěji užívaných vlastností. Využívá se v procesech jako válcování, lisování, kování, tažení a ohýbání. [1, 13, 14]

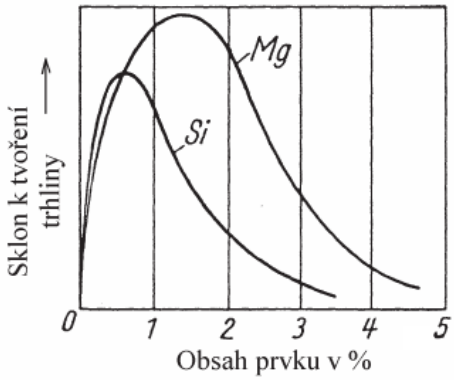
Obrobitelnost

Hliníkové slitiny jsou v porovnání s ostatními kovovými konstrukčními materiály ty lépe obrobitelné, řezné síly jsou ve srovnání se stejně pevnými ocelemi daleko menší. Oproti tomu čistý hliník je velmi špatně obrobitelný. Tento rozdíl je způsoben různou strukturou. Z hlediska obrobitelnosti rozdělujeme slitiny hliníku do třech skupin. První dvě skupiny, automatové a tvářené slitiny, mají výborné charakteristiky obrábění. Slitiny třetí skupiny, slévárenské slitiny, mají ve srovnání s ostatními

skupinami horší obrobitelnost. I přesto je ale relativně dobrá. Občas však u nich dochází k nalepování materiálu na řeznou hranu nástroje. [14, 15]

Svařitelnost

Při tavném způsobu svařování musíme rozlišovat, zda je slitina vytvrditelná nebo nevytvrditelná. Tavným svařováním lze dobře svařovat všechny nevytvrditelné slitiny. Z vytvrditelných slitin jsou pro svařování vhodné slitiny Al-Zn-Mg a Al-Mg-Si. Naopak jako nevhodné pro svařování jsou označovány především slitiny Al-Mg-Cu a Al-Zn-Mg-Cu. Tyto slitiny mají sklon ke vzniku trhlin, což má za následek zhoršení mechanických vlastností svarového spoje. Sklon k tvorbě trhlin závisí na chemickém složení slitiny (obr. 18). [14]



Obr. 18: sklon k tvorbě trhlin v závislosti na obsahu prvků [14]

4.1.2 Mechanické vlastnosti

Pevnost

Pevnost samotného hliníku není příliš velká (mez pevnosti Rm = 70 MPa), což snižuje jeho použití. Existují však možnosti, které pevnostní vlastnosti značně zlepšují, a to tváření (Rm může být zvýšena až na 130 MPa), přidání legujících prvků, či tepelné zpracování (Rm až na 530 MPa). Poslední dvě možnosti způsobí substituční zpevnění mřížky hliníku vytvořením tuhého roztoku α, precipitační zpevnění a disperzní zpevnění. Největší vliv na zvýšení pevnosti má precipitační zpevnění.

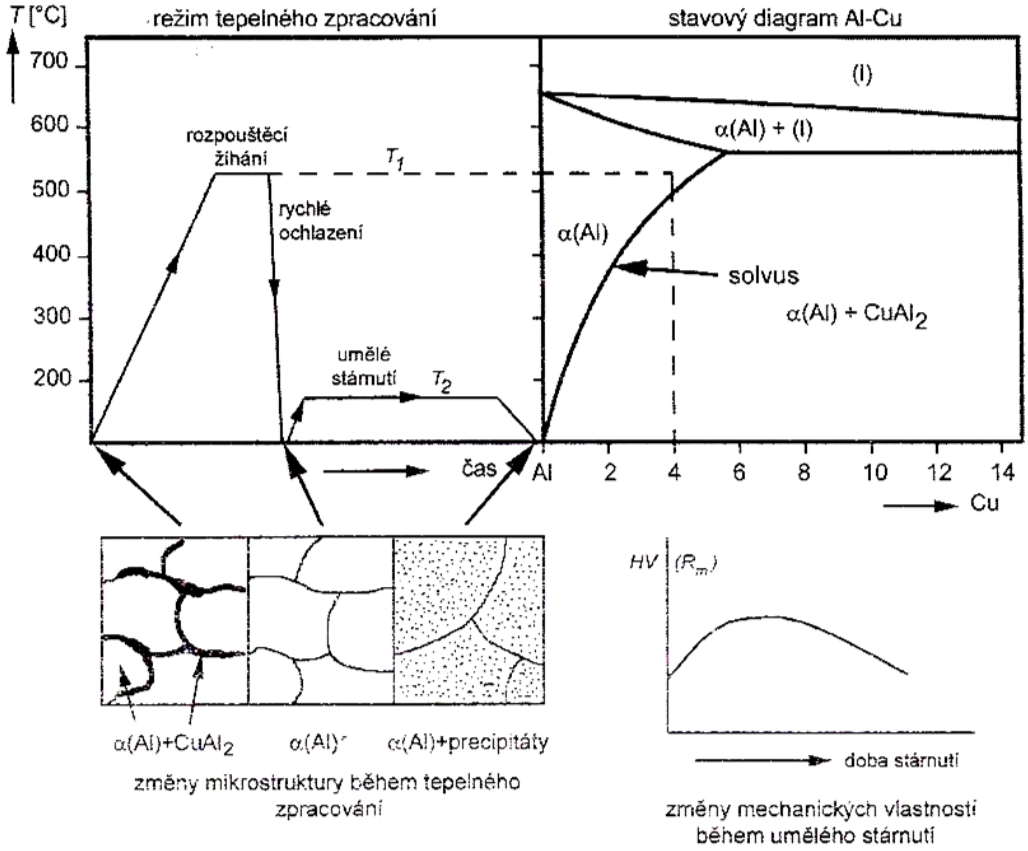
4.1.3 Struktura a chemické složení

V leteckém průmyslu se používá výhradně tvářených vytvrditelných slitin, proto bude další text zaměřen na tyto slitiny. Jedná se především o duraly, což jsou slitiny Al a Cu, Mg, Zn apod. [1, 14, 15]. Pro získání optimálních mechanických vlastností je nezbytné tyto slitiny tepelně zpracovávat tzv. vytvrzováním, které se skládá z ohřevu nad křivku rozpustnosti, viz obr. 19, (F_1-F) a s následným rychlým ochlazováním a vytvrzováním, jinak řečeno stárnutím. Následkem tohoto tepelného zpracování se v materiálu nastartují strukturní změny, které odpovídají precipitačnímu zpevnění. [13, 14].

Tento způsob zpevnění byl nezávisle zjištěn Guinerem a Prestonem na monokrystalech slitiny Al-Cu. Nalezli destičkovité oblasti bohaté na měď, které jsou na jejich počest nazývány Guinier - Prestonovi zóny, zkráceně GP zóny. [9]. Aby byla slitina vytvrditelná, musí obsahovat dostatečně velký podíl legujících prvků, také rozpustnost těchto prvků musí být dostatečně velká a se zvyšující se teplotou musí vzrůstat (tj. s klesající teplotou se mez rozpustnosti v tuhém roztoku snižuje).

Průběh precipitačního zpevnění slitiny Al-Cu je uveden na obr. 19. kde je na obrázku zobrazen postup tepelného zpracování, změna mikrostruktury a průběh změny mechanických vlastností. Za normální teploty je obsah mědi ve slitině větší, než je její rozpustnost. Mikrostruktura slitiny obsahuje kromě tuhého roztoku α(Al) i intermediální fázi $CuAl_2$, která se nachází na hranicích zrn roztoku α(Al). To má negativní vliv na hodnoty pevnosti a plasticity.

V prvním kroku se slitina vyžíhá při teplotě T_1. Intermediální fáze $CuAl_2$ se při tom rozpustí v tuhém roztoku α(Al). Poté se roztok rychle ochladí, nejčastěji do vody. Při dostatečné rychlosti ochlazení lze získat přesycený tuhý roztok α(Al)‘. Poté přijde na řadu umělé stárnutí, které se provádí ohřevem a setrváním na dané teplotě po delší dobu nebo přirozené stárnutí, kdy k následujícímu procesu dojde při pokojové teplotě. [13, 14]. Při něm dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku α(Al)‘. Do tuhého roztoku se vyloučí jemné částice precipitátu, které vedou k významnému zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Rozpad přesyceného tuhého roztoku probíhá v pořadí α(Al)‘ → GPI → GPII → přechodný precipitát → α (Al) + rovnovážný precipitát $CuAl_2$. V první fázi se vytvářejí zhluky mědi v hliníkové matrici, tzv. GP zóny. Zóny jsou koherentní s matricí. Jestliže vznikají, pevnostní vlastnosti se zvyšují. V další fázi se vytváří přechodný precipitát. Ten je svým složením blízký fázi $CuAl_2$. Přechodný precipitát je buď koherentní s α matricí, nebo jen částečně koherentní. Při koherentní variantě nastává další zvýšení pevnostních vlastností. Naproti tomu u částečně koherentního může dojít ke zvýšení ale i ke snížení pevnosti. V poslední fázi se tvoří rovnovážný precipitát $CuAl_2$. Ten je nekoherentní s matricí a jeho vznik přináší zpravidla snížení pevnostních vlastností. Při příliš dlouhé výdrži rovnovážný precipitát zhrubne natolik, že se neúměrně sníží i jeho tvrdost. V takovém případě mluvíme o přestárnutí. [14, 16]



Obr. 19: postup precipitačního vytvrzení u slitiny AlCu4 [16]

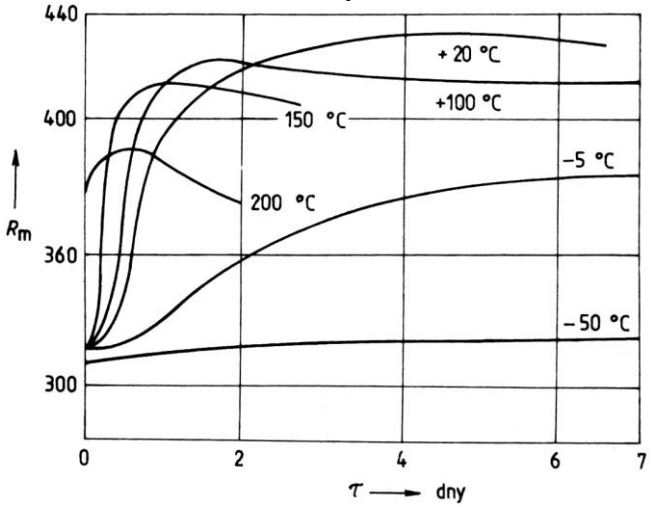
Podle velikosti elastické deformace krystalové mřížky při vytvrzování se tvoří zóny kulové (isotropní), rovinné (diskovité), jehlicovité. Přehled zón, přechodných precipitátů a rovnovážných precipitátů u různých hliníkových slitin je v tab. 2.

Tab. 2: informace o zónách, přechodných a rovnovážných precipitátů vyskytujících se v duralech při a po vytvrzování [14]

slitina	Zóny	Přechodný precipitát			rovnovážný precipitát	
	tvar	označení	tvar	struktura	označení (složení)	struktura
Al-Ag	koule	γ‘	destička	hexagonální stěsněná	γ (Ag_2Al)	hexagonální stěsněná
Al- Zn	koule	α‘	destička	kubická plošně centrovaná	α (Zn)	hexagonální stěsněná
Al-Cu	disk	θ“ θ‘	destička	tetragonální plošně centrovaná	θ ($CuAl_2$)	tetragonální
Al-Mg	jehlice	β‘	destička jehlice	složitá	β (Mg_3Al_2)	složitá
Al-Zn-Mg	koule	M‘	destička	hexagonální	M ($MgZn_2$)	hexagonální
Al-Mg-Si	jehlice	β‘	jehlice	-	β (Mg_2Si)	kubická plošně centrovaná

Mechanické a technologické vlastnosti vytvrditelných slitin na bázi Al jsou ovlivněny jejím chemickým složením a tepelným zpracováním (tvar, velikost a množství intermetalických částic). [14]

Na obr. 20 je uveden vliv tepelného zpracování na pevnost vytvrditelných slitin na bázi Al. Se vzrůstající teplotou stárnutí se rychlost precipitačního rozpadu zvyšuje a maxima tvrdosti je dosaženo po kratší době. Vznik koherentních fází se výrazně urychlí a tím jejich vliv na změnu mechanických vlastností slábne.



Obr. 20: vliv teploty umělého stárnutí na mechanické vlastnosti, tj. Rm [13]

Vliv některých prvků na vlastnosti hliníkových slitin:
B – zjemňuje strukturu a zvyšuje elektrickou vodivost
Cr – zvyšuje kalitelnost u vytvrditelných slitin

Fe – obecně negativní příměs ve slitinách hliníku. U roztoků Al- u snižuje pevnostní vlastnosti. Naopak u roztoků Al–Cu–Ni zvyšuje pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot a creepu.
Li – slitiny s tímto legujícím prvkem patří mezi nejlehčí slitiny hliníku. Tyto slitiny mají rovněž vysoké pevnostní vlastnosti.
Mn – zvyšuje pevnost a teplotu rekrystalizace, zjemňuje zrno a zvyšuje citlivost ke kalení
Si – přítomnost tohoto prvku umožňuje u slitin Al – Si vytvrzování

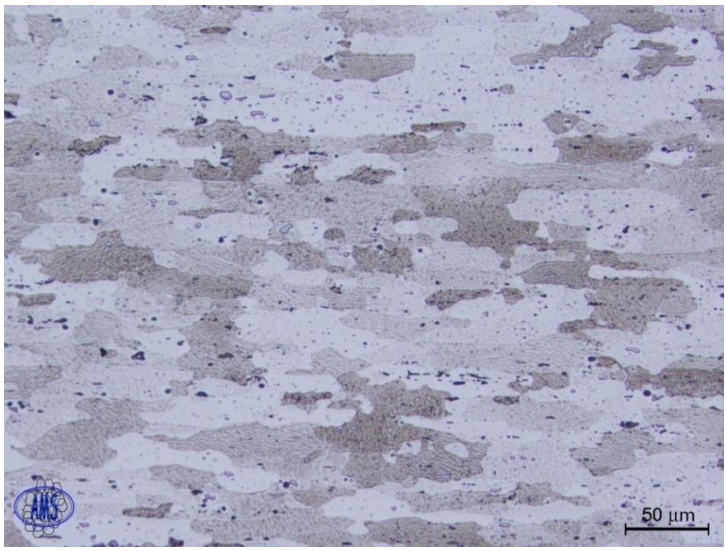
4.1.4 Slitiny hliníku používané v leteckém průmyslu

Slitiny na bázi Al–Cu–Mg

Jedná se hlavně o slitiny skupiny 2xxx, kde je hlavním přísadovým prvkem měď. Tyto slitiny patří k nejpoužívanějším slitinám. Disponují velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, ale mají nižší odolnost proti korozi. Vysoké pevnosti je dosahováno především vytvrzováním. Obsah mědi bývá obvykle udržován mezi hodnotami 4 až 4,8 hm %. Hořčík je přísadou, která zlepšuje možnosti precipitačního vytvrzení a má pozitivní účinky při navyšování pevnosti po vytvrzení. Obsah hořčíku se obvykle pohybuje od 0,4 do 1,8 hm % dle druhu slitiny. Dále se zde objevuje jako také mangan, který zjemňuje zrno slitiny. Největší uplatnění v leteckých konstrukcích mají již řadu let duraly s označením 2017 a 2024. [14, 15]

Ze slitiny Al–Cu–Mg se nejčastěji vyrábějí potahy trupů a křídel, a krycí panely trupu.

Struktura slitiny Al-Cu4-Mg1-Mn je uvedena ve stavu po tepelném zpracování, tj. rozpouštěcí žíhání za podmínek 500 ˚C/2 h/voda a vytvrzování za podmínek 20 ˚C/5dní na obr. 21. Struktura je složena z tuhého roztoku α (zrna) a jemných částic $CuMgAl_2$ a $(Cu,Fe,Mn)Al_6$ (tmavé částice) [17].



Obr. 21: struktura slitiny Al-Cu4-Mg1-Mn po tepelném zpracování (rozpouštěcí žíhání za podmínek 500 ˚C/2 h/voda a vytvrzování za podmínek 20 ˚C/5dní). [17]

Slitiny na bázi Al–Zn–Mg

Slitiny, kde je hlavní přísadový prvek zinek, jsou označovány jako 7xxx. Tato skupina má stejně jako slitiny Al-Mg vysokou odolnost proti korozi, ale větší pevnost. Ta dosahuje nejvyšších hodnot ze všech slitin hliníku. Zinek však snižuje plasticitu

hliníku. Jako přísady se používají titan a zirkon, které snižují sklon ke vzniku trhlin při svařování. [14, 15]

Bývají používány v konstrukcích, u kterých se požaduje vysoká pevnost a houževnatost a odolnost proti korozi. Jsou z nich zhotovovány vzpěry, nosníky, žebra, stabilizátory či potahy křídel a trupu.

Slitiny na bázi Al–Cu–Li

Do této kategorie se řadí skupiny označované 2xxx a 8xxx. Jedná se o slitiny s velmi nízkou měrnou hmotností a vysokým modulem pružnosti v tahu. Těchto vlastností je dosaženo pomocí lithia. Lithium kromě toho také zvyšuje creepovou odolnost. Tyto slitiny je nutno při vytvrzování nechat uměle stárnout. Jako přísada se zde používá zirkonium, které stabilizuje substrukturu a způsobuje obtížnější rekrystalizaci. Tyto slitiny vedly ke vzniku moderních slitin užívaných pod obecným označením Al-Li-X. Jejich optimálních vlastností se dosahuje vytvrzováním. [14, 15].

V leteckém průmyslu našly slitiny Al-Cu-Li uplatnění v částech, u kterých se vyžaduje vysoká houževnatost a střední až vyšší pevnost. Zhotovují se z nich proto rámy, vzpěry, žebra nebo vstupní plechy krytů motorů.

Slitiny na bázi Al – Mg – Si

Tyto slitiny jsou zařazeny ve skupině 6xxx. Někdy jsou uváděny pod označením pandaly popřípadě avialy. Obsah křemíku umožňuje vytvrzení. Jeho tuhé části také zvyšují odolnost proti otěru. Hlavními přednostmi těchto slitin je tvárnost, odolnost proti korozi nebo lepší svařitelnost než u binárních slitin Al-Mg. [14, 15]

Pro svou dobrou pevnost a odolnost proti otěru se používají na spodní části trupu. Také se využívají v hydraulických systémech.

Struktura slitiny Al6151, tj. Al-Si1-Mg je uvedena ve stavu po tepelném zpracování, tj. rozpouštěcí žíhání za podmínek 413 ˚C/2 h/voda a vytvrzování za podmínek 160 ˚C/10 h na obr. 22. Struktura je složena z tuhého roztoku α (zrna) a jemných částic Mg_2Si (tmavé částice) atd. [17].

Obr. 22: struktura slitiny Al6151 po tepelném zpracování (rozpouštěcí žíhání za podmínek 413 ˚C/2 h/voda a vytvrzování za podmínek 160 ˚C/10 h) [17].

Slitiny na bázi Al – Sc

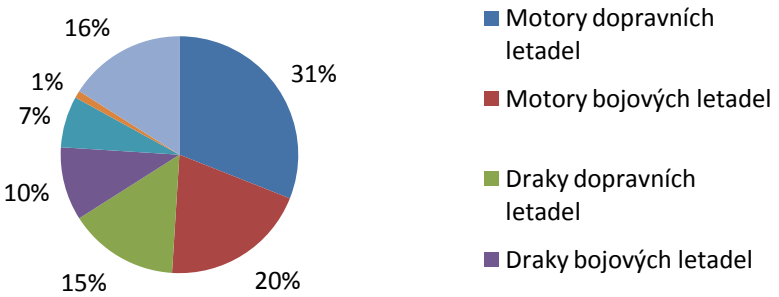
Skandium se používá k legování vysokopevných slitin Al-Li, Al-Mg, Al-Mg-Si a Al-Zn. Legováním malého množství Sc lze zlepšit mechanické i technologické vlastnosti původní slitiny. Optimálních vlastností se dosahuje při současném legování malého množství zirkonu. Kombinace zirkonu a skandia má za následek výrazné potlačení rekrystalizace. To je hlavním faktorem zlepšující mechanické vlastnosti slitin. Ve srovnání se slitinami bez Sc je patrný značný vliv Sc na mez kluzu. U slitin legovaných skandiem lze vytvořit stabilní jemnozrnnou strukturu vhodnou k superplastickému tváření. [14, 15]

4.2 Titan a jeho slitiny

Titan je polymorfní kov bílé barvy. Vyznačuje se především nízkou měrnou hustotou (4500 $kg \cdot m^{-3}$), malou tepelnou roztažností (8,15·10^{-6} $cm/cm \cdot °C$) a výbornou korozní odolností. Mezi jeho další vlastnosti, kterými se titan odlišuje od ostatních kovů, lze zařadit velkou měrnou tepelnou kapacitu, nízká tepelná vodivost (16 $W/m \cdot K$) a vysoký bod tání (1665 °C). Pevnost čistého titanu je srovnatelná s běžně používanými konstrukčními ocelemi, oproti nim má však nižší modul pružnosti (1100 $kg \cdot mm^{-2}$). Titan rovněž disponuje poměrně velkou mezí únavy, jejíž hodnotu si zachovává i v korozním prostředí. [1, 13, 18]

V přírodě se nachází v mnoha minerálech, z nichž mnohé jsou na obsah titanu relativně bohaté. Z průmyslového hlediska se mezi nejvýznamnější řadí rutil a ilmenit. Ilmenit obsahuje 40-60 % TiO_2, rutil dokonce dosahuje koncentrace až 90% TiO_2. I přes velké rozšíření na titan bohatých minerálů v zemské kůře se dlouhou nedařilo tyto rudy zpracovat. Běžně užívané metody hutního zpracování se ukázaly jako neúčinné z důvodu vysoké afinity titanu ke kyslíku, dusíku apod. Z toho důvodu se nejdříve musí vyrobit chlorid titaničitý a z něj pak tzv. titanová houba. V současné době se často titan vyrábí moderními metodami pomocí plasmy či elektronových paprsků. [1, 18]

Vzhledem k dobré měrné pevnosti a korozní odolnosti, našel titan a jeho slitiny uplatnění především v leteckých a raketových konstrukcích. Jedná se o titanové součástky v letadle jak v motoru, tak i v draku. V motoru se jedná o části kompresoru jako disky, rotory, prstence a skříně. Dále pak kompresorové lopatky, písty či ojnice. Na draku našel své využití jako potahový materiál křídel a ocasních ploch. Mimo letectví se vlastností titanu využívá i v chemickém průmyslu a v energetice. Procentuální zpracování titanu v USA z roku 2005 ukazuje Obr. 23. [18, 19]



Obr. 23: aplikace titanu v průmyslu USA z roku 2005 [19]

4.2.1 Technologické vlastnosti

Tvářitelnost

Z technologického hlediska je hlavní negativní vlastností titanu jeho velký součinitel tření. Ten způsobuje velký otěr a náchylnost k zadírání. Plechy z čistého titanu lze do tloušťky 1,25 mm tvářet za studena. Pro tlustší plechy je nutné tvářet za tepla. Titanové slitiny se tvářejí pouze za tepla. [16, 18]

Obrobitelnost

Charakteristiky třískového obrábění titanových slitin jsou srovnatelné s charakteristikami nerezových ocelí nebo žáropevných slitin. Doporučuje se volit nízké otáčky, vyšší rychlosti posuvu a dostatečný přísun chladícího média. Nejlepšími způsoby třískového obrábění titanových slitin je soustružení a frézování. Broušení titanu není příliš užívanou operací. Je poměrně nákladné a rozmezí optimálních podmínek je úzké. [18]

Svařování

Čistý titan lze bez větších problému svařovat elektrickým obloukem v argonové ochranné atmosféře. Požaduje se však vysoká čistota argonu až 99,995%. Čistý titan lze rovněž dobře svařovat i odporově. Svařovaná místa přitom nevyžadují ochrannou atmosféru jako při svařování elektrickým obloukem. [18]

Tavné svařování slitin titanu se provádí obtížněji než v případě čistého titanu. Nejlépe lze svařovat jednofázové slitiny α a β. Naopak obtížně svařitelné jsou slitiny α+β s vyšším obsahem β-stabilizátorů. V leteckém průmyslu se často užívá svařování plasmou, laserem a elektronovým paprskem. [18]

4.2.2 Mechanické vlastnosti

Obecně platí, že mechanické vlastnosti titanových slitin závisejí na obsahu nečistot a na pracovní teplotě. Oproti ocelím a hliníkovým slitinám jsou vlastnosti titanu daleko více závislé na rychlosti zatěžování. Při nízkých rychlostech zatěžování, které se mohou pohybovat od 0,01 do 1 mm/min, lze dosáhnout zvýšení hodnot meze pevnosti a meze kluzu o 15 % až 20 %. Velikost meze pevnosti a kluzu se však významně snižují s teplotou. Většina slitin titanu by se proto měla zatěžovat za nižších teplot. [18]

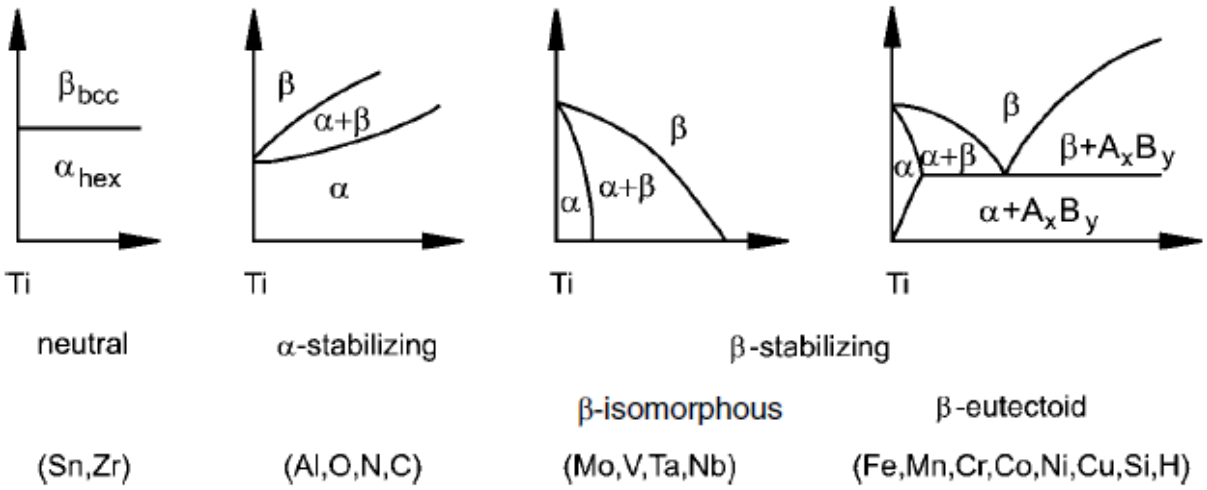
Únavová odolnost titanu při cyklickém zatěžování je poměrně dobrá. U vzorků bez vrubů bývá větší než 50 % meze pevnosti v tahu. Při výskytu vrubů se v závislosti na jejich tvaru mez únavy snižuje zhruba o 25 až 30 %. Hodnoty meze únavy významně závisejí na teplotách tepelného zpracování. Negativní vliv má zejména tváření za studena a tváření nad teplotou 950 °C. [18]

4.2.3 Struktura a chemické složení

Vzhledem k nižší pevnosti čistého titanu se průmyslový vývoj soustřeďuje především na slitiny titanu, které mají lepší mechanické vlastnosti, ale srovnatelné fyzikální vlastnosti. Titan má dvě alotropické modifikace. Jde o α fázi a β fázi. Fáze α se vyskytuje do teploty okolo 880 °C a má HCP mřížku. Fáze β se pak vyskytuje v teplotách od 880 °C až po 1670 °C a má BCC mřížku. O velikosti obsahu jednotlivých fází v binárním rovnovážném diagramu velkou měrou rozhodují legující prvky ve slitině. Vliv vybraných prvků na binární rovnovážný diagram je na *Obr. 24*. Podle výskytu fází α a β v rovnovážném diagramu lze rozdělit slitiny titanu do 3 základních skupin:

- slitiny α
- slitiny α+β
- slitiny β

U slitin α a β pak ještě rozeznáváme pseudo α slitiny resp. pseudo β slitiny.
[13, 16, 18]



Obr. 24: vliv některých prvků na binární diagram
(Neutral-neutrální, stabilizing-stabilizující, isomorphous-izomorfní, eutectoid-eutektoidní) [3]

Slitiny α

Jedná se o velmi strukturně stabilní slitiny s výbornými mechanickými vlastnostmi až do 600 °C. Vysoké strukturní stability se dosahuje prvků stabilizujících α fázi. Mezi ně patří uhlík, kyslík, dusík a především hliník, který je jediný prvek, kterým je tyto slitiny možné legovat. Kromě stabilizujících prvků lze nalézt v těchto slitinách rovněž neutrálně působící prvky Sn a Zr. Slitiny α jsou také dobře svařitelné, hlavně pomocí laseru nebo svazku elektronů, a nejsou choulostivé na tepelné zpracování. Mezi vlastnosti, které naopak příliš vítány nejsou, patří omezená tvářitelnost za studena.

Hliník je v titanu velmi dobře rozpustný. Tvoří spolu tuhy roztok až do 26 hm% Al. Obsah hliníku je však v praxi omezen hranicí 7 hm%. Při překročení této hranice se slitina stává křehkou a špatně tvářitelnou jak za tepla, tak i za studena. Optimálních vlastností je dosaženo zhruba při obsazích 5 hm% Al a 2,5 hm% Sn. [3, 16, 18]

Jako pseudo α slitiny jsou označovány slitiny α, v kterých je přidáno malé množství prvků, které stabilizují β-fázi. Z toho plyne, že v těchto slitinách je obsažena i malá část fáze β v rovnovážném stavu. Jedná se ale pouze o obsah od 2 do 8 %. Tyto slitiny mají podobné vlastnosti jako slitiny α, ale obsah β-fáze zlepšuje jejich plasticitu a citlivost na poškození vlivem vodíku. [16, 18]

Slitiny α+β

Tato skupina slitin je nejrozšířenější ze všech typů slitin titanu. Je to zapříčiněno skutečností, že dvoufázová struktura vzniká velice snadno. Mechanické vlastnosti těchto slitin jsou do velké míry ovlivněny podmínkami tváření a tepelného zpracování. Hlavní ceněnou vlastností dvoufázových slitin titanu je velká pevnost za normálních teplot. Některé slitiny jsou rovněž dobře tvářitelné za studena. Při zvýšených např. nad 400 °C se pevnostní vlastnosti značně zhoršují. Tyto slitiny jsou také citlivé na obsah nečistot, z nichž hlavně vodík nepříznivě zvyšuje křehkost. Do této skupiny patří i nejrozšířenější titanová slitina Ti-Al6-V4. [16, 18]

Ve dvoufázových slitinách působí prvky jako uhlík, kyslík a dusík jako α stabilizující. To může mít nepříznivý vliv na strukturu slitiny a tím pádem i na mechanické vlastnosti. Obsah těchto prvků, proto musí být značně omezen. Obsah uhlíku by neměl překročit 0,1 hm%, obsah kyslíku by pak neměl být větší než 0,15 až 0,2 hm%. β-fáze v rovnovážném stavu se u těchto slitin pohybuje v rozmezí od 5 do 50 %.[18]

Slitiny β

Slitiny β vznikají zvyšováním obsahu β stabilizujících prvků až do stavu, kdy se v slitině nachází pouze β fáze. Docílit obsahu pouze fáze β ve struktuře i za normálních teplot není jednoduché. Hlavním předpokladem je, aby se snížila teplota fázové přeměny α -> β nebo aby se průběh této transformace výrazně zpomalil. Toho lze dosáhnout, pokud slitina obsahuje vysoký podíl přídavných prvků (až 30 %). β struktury je možno dosáhnout zakalením nebo i normálním ochlazením. [16, 18]

Jednou z pozitivních vlastností slitin β je dobrá tvářitelnost a vysoká pevnost až do teplot 500 °C. Tyto slitiny také patří mezi ty, které se dají dobře svařovat a nepotřebují dlouhodobější vytvrzování. Hlavní nevýhoda je způsobena velkým obsahem legujících prvků (V, Mo, Cr), které značně zvyšují měrnou hmotnost oproti ostatním titanovým slitinám. [18]

Rozdíl mezi slitinami, které jsou označovány jako pseudo β slitiny, a β slitinami je obsah β stabilizujících prvků. Zatímco pseudo β slitiny mají obsah β stabilizátorů do 20 %, slitin β je to více než 20 %. [16]

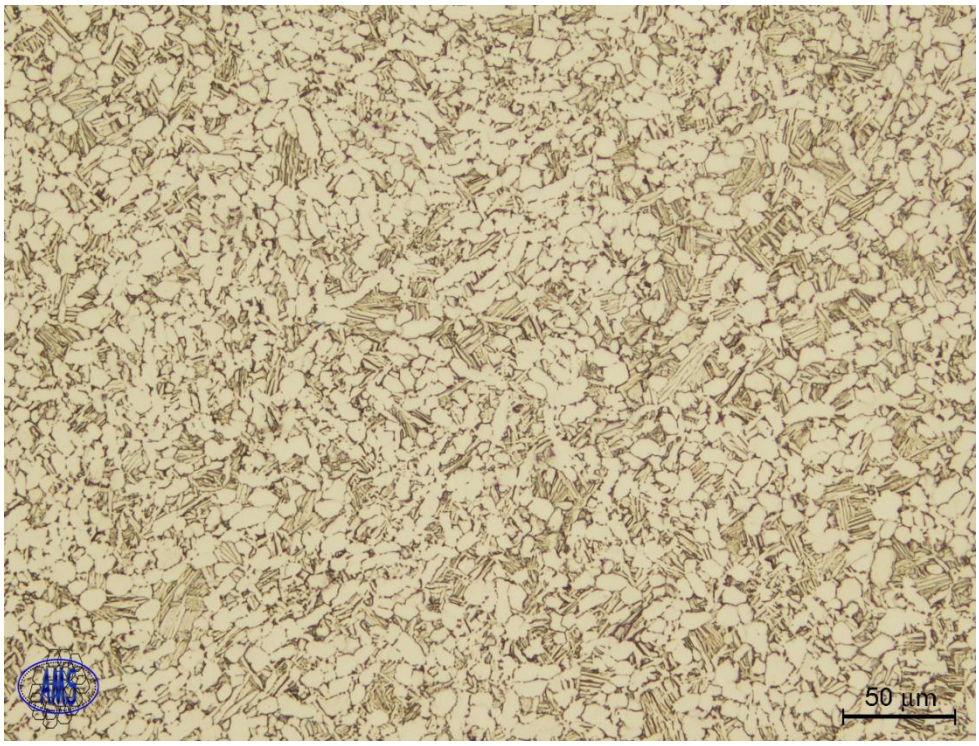
4.2.4 Slitiny titanu používané v leteckém průmyslu

Ti–6Al–4V

Slitina Ti–6Al–4V je nejrozšířenější slitinou titanu. Na výrobu této slitiny se spotřebuje až 50 % roční produkce titanu. Hlavní využití této slitiny je v leteckém průmyslu, na který připadá 80 % jejího objemu. Jde o slitinu α+β. Hliník v její struktuře působí jako stabilizátor fáze α, naproti tomu vanad stabilizuje fázi β. Ve struktuře se kromě hliníku, jehož obsah je přes 6,75 %, a vanadu, který dosahuje koncentrací přes 4,5 %, vyskytuje i kyslík a dusík. Obsah kyslíku bývá v rozmezí od 0,08 do 0,2 %. Obsah dusíku nepřesahuje hranici 0,05 %. Zvýšený obsah těchto prvků, především kyslíku a dusíku vede ke zlepšení pevnosti. Naopak při jejich nižším obsahu se zlepšuje tažnosti, houževnatosti, korozní odolnosti a odolnosti proti iniciaci trhlin. Tyto slitiny jsou vhodné jak pro tváření, tak pro odlévání. Používají se i k výrobě součásti pomocí práškové metalurgie. Způsob zpracování má vliv na mechanické vlastnosti. Obecně lze říci, že tvářené slitiny mají vyšší pevnost, např. válcované slitiny dosahují pevnosti 760 až 895 MPa. [20]

Struktura slitiny Ti-6Al-4V je uvedena ve stavu po tepelném zpracování na obr. 25, která je složena z tuhého roztoku α (světlá zrna) a jehlic fáze α a v matrici fáze β. [17].

V leteckém průmyslu se z těchto slitin zhotovují lopatky kompresorů, jejich disky a části konstrukce draku. Z odlitků se rovněž zhotovují skříně motorů. Tyto slitiny mají rovněž vysokou biokompatibilitu a používají se v medicíně (kostní šrouby, fixační destičky aj.). [20]



Obr. 25: struktura slitiny Ti–6Al –4V po tepelném zpracování (homogenizační žíhání za podmínek 950 ˚C/1 h/vzduch a žíhání za podmínek 700 ˚C/2 h/vzduch) [17]

Ti–7Al–4Mo

Jsou to tepelně zpracované α+β slitiny. Jejich pevnost je o 10 % větší než pevnost slitin Ti–6Al–4V. V žíhaném stavu mají také zvýšenou odolnost vůči creepu při teplotách do 480 °C. V praxi se však slitiny používají do teplot 455 °C, to je způsobeno nahrazením vanadu molybdenem a přídavkem 1 % hliníku. Tyto přídavné prvky rovněž vedou k vyšší odolnosti proti deformaci při kovací teplotě. Obsah molybdenu, který stabilizuje fázi β, zlepšuje tepelné zpracování a substituční zpevnění. Pevnost je o 100 MPa větší než u slitin Ti–6Al–4V. [20]

V leteckých konstrukcích se používají na odlévané součásti, které vyžadují pevnost a stabilitu při vysokých teplotách jako jsou lopatky kompresorů a disky leteckých motorů. [20]

Ti–13V–11Cr–3Al

Jde o první β slitiny, kde byla fáze β stabilní za pokojové teploty. Tyto slitiny jsou známé také pod označením B120VCA. Jejich pracovní teploty se pohybují v rozmezí od -54 do 315 °C. Mezi jejich přednosti patří dobrá tažnost a velmi vysoká pevnost, které se dociluje vytvrzením pomocí stárnutí. Lze dosáhnou pevnosti až 825 MPa. Vysoká pevnost a poměrně nízká hustota dělá z těchto slitin vynikající konstrukční materiál. Jako většina β slitin obsahují tyto slitiny velké množství β stabilizátorů, v tomto případě vanadu. Kromě toho se v nich vyskytuje okolo 11 % Cr a malé množství α stabilizátorů a kyslíku. [20]

Hlavní využití těchto slitin v leteckých aplikacích je na součásti konstrukce draku, jako jsou výztuhy apod. [20]

Ti–6Al–2Sn–4Zr–6Mo

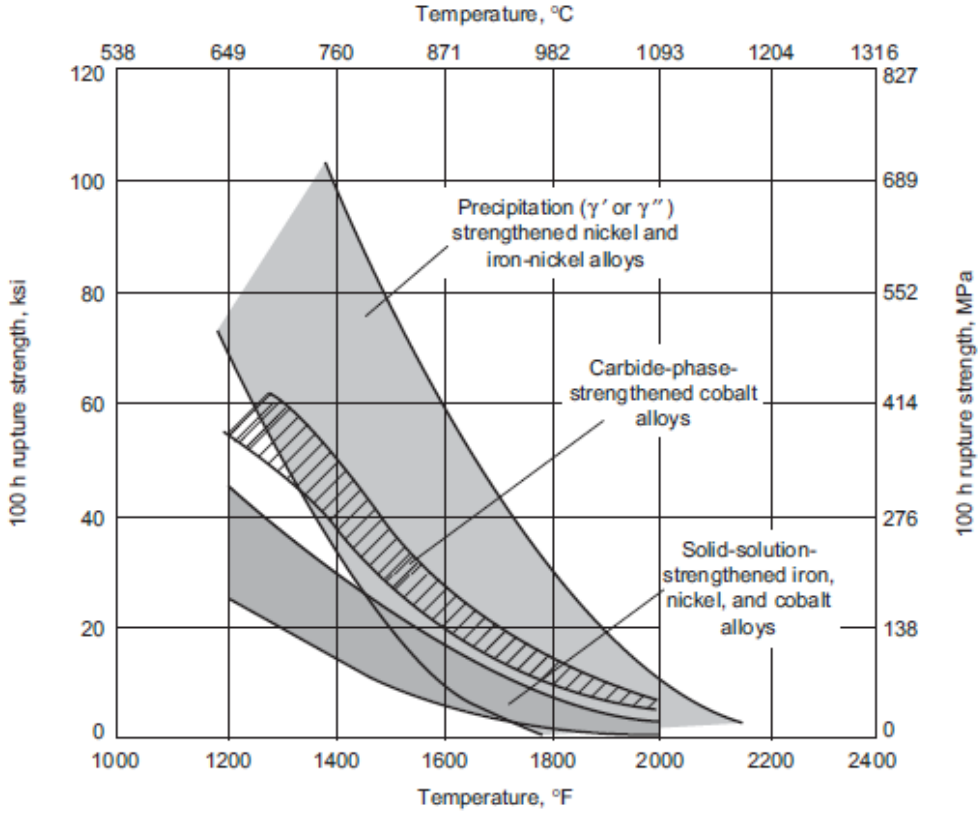
Jedná se o tepelně zpracované α+β slitiny. Vznikly jako kombinace slitin Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo–0,08Si, o dlouhodobé pevnosti za vysokých teplot, a vytvrzených slitin

α+β. Používají se při teplotách do 400 °C na dlouhodobě zatížené součásti. Při krátkodobém zatížení mohou být použity až do teplot okolo 540 °C. Tyto slitiny jsou substitučně zpevněné v důsledku přítomnosti molybdenu, stabilizujícího β fázi. Obsah křemíku v těchto slitinách zvyšuje odolnost proti creepu. [20]

Jsou používány při středně vysokých teplotách na součásti proudových motorů, jako jsou především disky kompresorů a jejich lopatky. [20]

4.3 Niklové a kobaltové superslitiny

Niklové a kobaltové superslitiny jsou slitiny, které se používají v teplotně extrémních podmínkách. Pro práci v těchto podmínkách disponují žáruvzdorností a žáropevností. Průběh mezí pevnosti při tečení superslitin je na obr. 26. Rovněž se jedná o korozně odolné materiály. Dle druhu základního materiálu je lze rozdělit do tří skupin. Jde o superslitiny na bázi niklu, na bázi niklu a železa a na bázi kobaltu. V praxi se používají především pro výrobu součástí v plynových turbínách lopatkových motorů.



Obr. 26: průběh meze pevnosti při tečení v závislosti na teplotě u různých druhů superslitin.
(Precipitation strengthened nickel an iron-nickel alloy – precipitačně zpevněné slitiny na bázi niklu a na bázi niklu a železa, Carbide-phase strengthened cobalt alloys-slitiny kobaltu zpevněné karbidy, Solid-solution-strengthened iron, nickel, and cobalt alloys-substitučně zpevněné slitiny železa, niklu a kobaltu, Temperature – teplota, 100 h rupture strength – mez pevnosti při tečení s dobou do lomu 100 h) [21]

4.3.1 Nikl a jeho slitiny

Nikl je drahý, feromagnetický kov bíle barvy. Feromagnetickými vlastnostmi disponuje až do Curieho teploty, která je rovna 357 °C. Je tvořen kubickou plošně centrovanou mřížkou. Krystalová struktura niklu má za následek dobré plastické vlastnosti a zpevnění při tváření za studena. Hustota niklu je 8,9 $g \cdot cm^{-3}$. V tuhém

stavu se vyskytuje až do teploty 1455 °C. Nikl je velmi odolný nejen proti působení atmosférické koroze, ale odolává i korozi ve vodě a v alkalických roztocích. Stejně jako ocel je i nikl dobře kujný a tažný. Pevnost niklu v tahu dosahuje hodnot až 317 MPa. Tvrdost niklu je poměrně nízká (okolo 64 HV), dá se však zvýšit tvářením za studena. [13, 16, 21]

Nikl je sedmým nejrozšířenějším kovem. V přírodě se čitý nikl prakticky nevyskytuje, vyskytuje se však v mnoha minerálech, z nich je pouze zlomek průmyslově využitelný. Jde především o sloučeniny nazývané laterity a sulfidické a arsenikové rudy. Výroba niklu z rud bohatých na nikl je poměrně složitá a u jednotlivých rud se liší. Obecně se ruda s dalšími přídavky praží a taví a následně se rafinuje. Rafinace probíhá buď elektrolýzou, nebo Mondovým způsobem, kterým lze získat nikl o čistotě až 99,9 %. Z těchto důvodů je získání čistého niklu velice drahé a samotný kov tak prodražuje. [21, 22]

Hlavní využití niklu je založeno na jeho odolnosti proti atmosférické korozi. Používá se jako legující prvek, především do korozivzdorných ocelí. Tato oblast zpracování představuje okolo 70 % roční produkce niklu. Okolo 12 % produkce připadá na niklové slitiny a slitiny na niklovém základu. Zbytek pak připadá na pokovování, mincovnictví a další. [21, 22]

Slitiny niklu jsou stejně jako čistý nikl odolné proti korozi. Jsou také velice houževnaté a žáropevné. Dle použití se dělí do několika skupin. První skupinou jsou konstrukční slitiny. Jde především o slitiny s mědí známé tzv. monely a slitiny s molybdenem označované jako Hastelloy apod. Dále jsou to slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi. Do této skupiny patří slitiny s chrómem, které se využívají v termočláncích. Poslední skupinou jsou žáropevné a žáruvzdorné slitiny, které jsou obecně nazývány superslitiny. Jde o slitiny využívané především v leteckém průmyslu na výrobu oběžných kol a lopatek plynových turbín, proto se tato kapitola zaměří především na ně. [13, 21]

4.3.2 Niklové superslitiny

Jde o vytvrditelné materiály, jejichž hlavní předností je žáropevnost a žáruvzdornost. Obecně mají FCC strukturu. Vlastnosti jednotlivých slitin jsou závislé na chemickém složení, struktuře a tepelném zpracování. Niklové superslitiny se dělí podle několika hledisek; podle technologie výroby na tvářené a odlévané a podle hlavní vytvrzující fáze ve struktuře slitin na slitiny zpevněné karbidy (nebo také substitučně zpevněné slitiny) a na slitiny zpevněné koherentní vytvrzující fází, viz obr. 26. [13, 21, 23]

Mechanické a technologické vlastnosti

Niklové slitiny bývají běžně používány v prostředích, kde jsou vystaveny teplotám dosahujících až 80 % teploty tavení. Tyto teploty jsou horní hranicí, při které se z hlediska dlouhodobé pevnosti a bezpečnosti, mohou niklové superslitiny využívat. Spodní teplotní hranice niklových superslitin je dána ekonomickým aspektem. Obvykle se pohybuje okolo teploty 650 °C. Pod touto teplotou lze namísto drahých niklových superslitin použít lacinější žáruvzdorné či žárupevné oceli a jiné konstrukční materiály. [13, 21, 23]

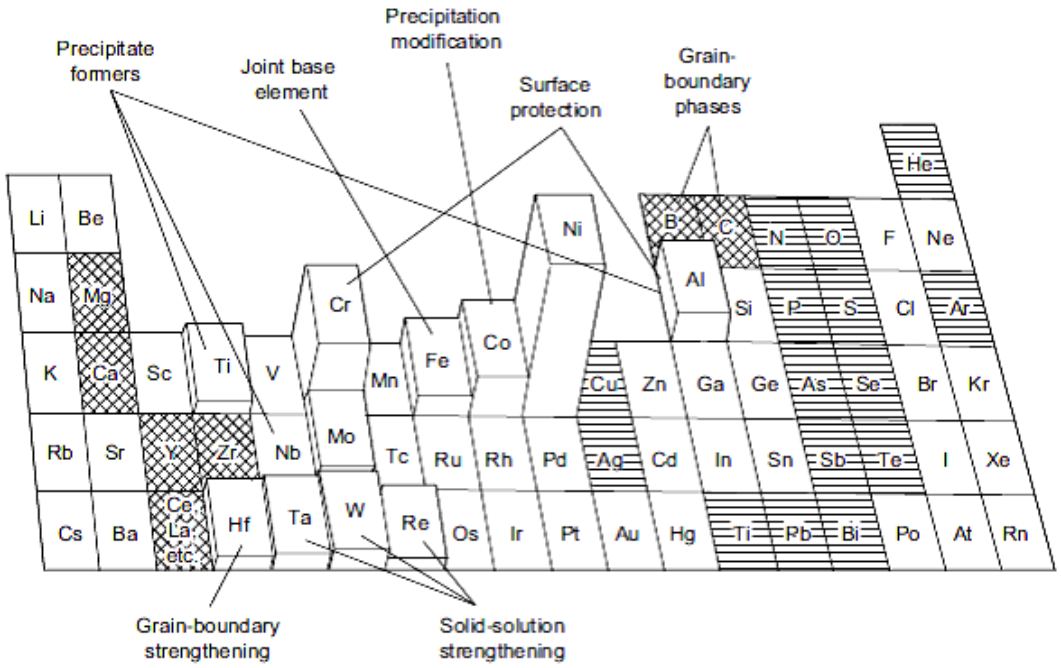
V průmyslu se používá substitučně i precipitačně zpevněné superslitiny. Pouze substitučně zpevněné slitiny se někdy označují jako žáruvzdorné slitiny, zatímco precipitačně zpevněné se nazývají žáropevné. Pro letecké konstrukce se však používají ve větší míře precipitačně zpevněné slitiny. Oproti pouze substitučně zpevněným slitinám totiž nemají za zvýšených teplot tak velkou rychlost tečení. Do

této skupiny se řadí slitiny na bázi Ni-Cr a Ni-Fe-Cr. Chrom zvyšuje odolnost vůči oxidaci za zvýšených teplot. Jeho koncentrace se pohybuje v rozmezí 10 až 30 %. Pro vytvoření intermetalické fáze $Ni_3(Al, Ti)$ se do těchto slitin přidává hliník a titan. [13, 21, 23]

Z technologického hlediska se niklové slitiny téměř výhradně odlévají. Vzhledem k obsahu sloučenin hliníku a titanu, které jsou náchylné na oxidaci, se musí používat složitá a nákladná metoda vakuového lití, metodou vytavitelného modelu. [13]

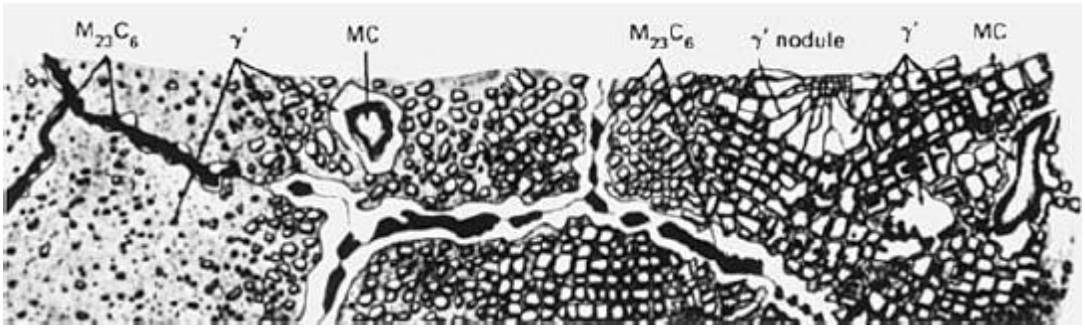
Struktura a chemické složení

Vedle základního prvku niklu se vyskytuje ve struktuře superslitin množství přísad. Mezi nejvýznamnější patří chrom, kobalt, železo, hliník, titan, wolfram, niob a molybden. Příklady prvků přidávaných do niklových superslitin a jejich vliv na strukturu je na obr. 27. Dle působení legujících prvků na strukturu je lze rozdělit na prvky tvořící a zpevňující matrici, tvořící intermetalickou fázi γ‘, karbidotvorné, ostatní a nežádoucí. [21, 23]



Obr. 27: prvky v niklových slitinách a jejich vliv na strukturu.
Výška bloku prvku ukazuje množství, ve kterém se ve slitině vyskytují. Vodorovnými pruhy jsou označeny škodlivé prvky. Překříženými čárami jsou vyšrafovány prvky, jejichž vliv je pozitivní.
(Precipitate formers - tvořící precipitáty, Joint base element - spoluvytvářející matrici, Precipitation modification - ovlivňující tvorbu precipitátů, Surface protection - chránící povrch, Grain-boundary phase - fáze vyskytující se na hranicích zrn, Grain-boundary strengthening - zpevňující hranice zrn, Solid-solution strengthening - zpevňující tuhý roztok)
[21]

Ve struktuře niklových superslitin, kde hlavní zpevňující fází jsou pouze karbidy, se vyskytují 2 základní fáze, a to, matrice a karbidy. Ve struktuře žáropevných niklových superslitin, které jsou navíc precipitačně zpevněné se vyskytují 3 základní mikrostrukturní složky; matrice, uspořádané fáze a karbidy. Výskyt jednotlivých složek v mikrostruktuře precipitačně zpevněných niklových superslitin se postupem času měnil. Tento vývoj ilustruje obr. 28. [21, 23]



Obr. 28: vývoj struktury niklových superslitin. Zleva od nejstarší po nejnovější. Pod obrázkem je příklad konkrétní slitiny [21]

Matrice v niklových superslitinách tvoří substituční tuhý roztok γ, který má FCC mřížku. Ten je tvořen niklem a legujícími prvky. Nejčastěji se v matrici vyskytují legury Cr, Co, Fe, Mo, Nb a W. Při jejich volbě je třeba brát v potaz především velikostní požadavky. Atom legujícího prvku se nesmí velikostně lišit od atomu niklu o více jak 13%. Velmi výrazné účinky na zpevnění mají prvky W a Mo, jejichž rozpustnost v Ni je však poměrně malá. Větší význam na zpevnění má proto chrom, jehož účinek na zpevnění sice není tak výrazný, ale v niklu je daleko rozpustnější. Žáropevné vlastnosti se dají zlepšit zvýšením rekrystalizační teploty. Toho lze docílit přidáním kobaltu. V některých slitinách se nahrazuje část niklu železem. Děje se tak hlavně z ekonomických důvodů, protože železo je nepoměrně levnější než nikl. Ovšem obsah železa zhoršuje žáruvzdornost slitiny a podporuje vznik nežádoucí σ fáze, jejíž přítomnost ve struktuře vede ke zkřehnutí. [21, 23]

Mezi uspořádané fáze patří zejména zpevňující fáze γ‘ (Ni_3Al, Ti), fáze γ‘‘ (Ni_3Nb, Ta) a dále nežádoucí fáze TCP, tj. η (Ni_3Ti), π (Ni_3Al, Ta), δ (Ni_3Ta) či ε (Ni, Fe, Co_3Nb, Ti). [23]

Fáze γ‘, tj. je tvořena niklem spolu s Al (Ni_3Al), popř. Al a Ti (Ni_3Al,Ti). Má FCC mřížku a je koherentní k matrici. Vzniká při ochlazení tuhého roztoku při výrobě nebo po tepelném zpracování, skládající se z rozpouštěcího a precipitačního žíhání. Může se vyloučit ve 3 různých tvarech, buď ve tvaru globulí, krychlí nebo tyčinek. O tvaru rozhoduje velikost deformační a povrchové energie, které jsou dány především chemickým složením slitiny a tepelným zpracováním. Tvar má spolu s velikostí a množstvím částic fáze γ‘ vliv na vlastnosti superslitin. Se zvyšujícím se obsahem této fáze roste žáropevnost, ale na druhou stranu rychle klesá tvárnost. S rostoucí teplotou, při které slitiny pracují, nebo teplotou tepelného zpracování zvětšují částice svůj objem a spojují se. Tento proces hrubnutí vede ke snížení pevnosti. [23, 24]

Topologicky uspořádané TCP (Topologically Close – Packed) fáze se tvoří při tepelném zpracování. Mezi tyto nežádoucí fáze patří σ fáze, μ fáze nebo Lavesovy fáze. Tyto fáze zhoršují mechanické, creepové a žáruvzdorné vlastnosti. Rovněž mohou způsobovat vznik a šíření trhlin. [23]

Uhlík spolu s prvky W, Mo, Ta, Ti, Hf a Nb tvoří primární karbidy typu MC. K jejich vzniku dochází při krystalizaci taveniny v důsledku eutektické reakce. Během tepelného zpracování mají tyto karbidy tendenci přecházet na sekundární karbidy typu $M_{23}C_6$ nebo M_6C. Výskyt karbidů ve struktuře slitin má pozitivní i negativní charakter. Závisí na jejich typu, velikosti, tvaru, rozložení. Hrubé karbidy MC mohou iniciovat únavovou trhlinu a navíc snižují žáruvzdornost slitiny. Vyloučí-li se sekundární karbidy na hranicích ve formě souvislého filmu, dochází ke snížení

tažnosti a mohou iniciovat trhliny po hranicích zrn. Jsou-li však drobné, ve formě globulí a pravidelně rozmístěny uvnitř zrn i a zejména na jejich hranicích, mohou zvyšovat odolnost vůči creepu. [21, 23, 25]

Přítomnost prvků Ti a Al má spolu s prvkem Cr pozitivní vliv na korozní odolnost, neboť tyto prvky vytvářejí na povrchu oxidický film, který brání další oxidaci. Mezi další přísady, které mají pozitivní vliv na vlastnosti, patří prvky B, Z, Hf, které zpevňují hranice zrn a Ca, Mg, Ce, La. Mezi další nežádoucí prvky patří např. O, H, P, S, Pb, Bi nebo Cu. [23]

Niklové superslitiny používané v leteckém průmyslu

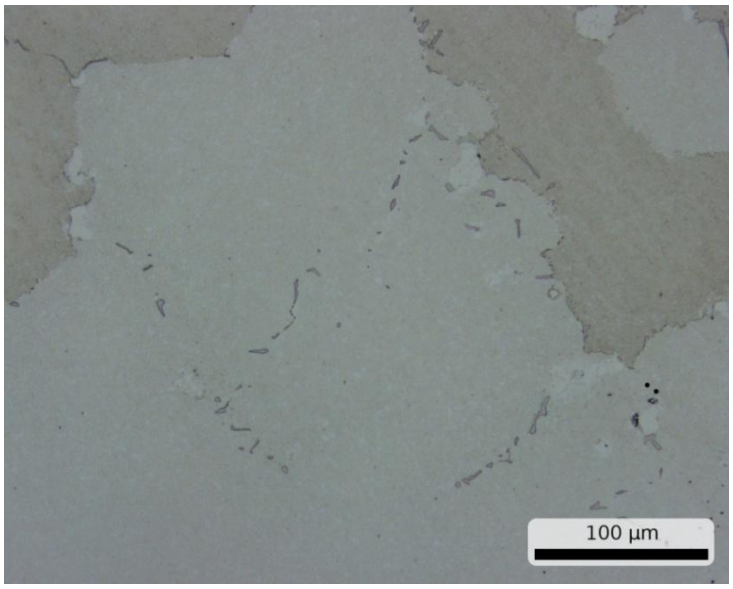
Inconel 713LC

Jde o precipitačně zpevněnou slitinu se sníženým obsahem uhlíku. Obsah uhlíku nepřesahuje hranici 0,05 hm%. Hlavními legujícími prvky v této slitině jsou chrom (13 hm%), hliník spolu s titanem (6 hm%) a molybden (5 hm%). Dalšími přísadami jsou niob, bor nebo zirkonium.

Využití této slitiny je především na součásti, které jsou vystavené vysokým teplotám a musejí odolat korozi. Horní mez pracovních teplot dosahuje 700 °C. Obrobitelnost této slitiny je velmi obtížná, součásti se tedy vyrábí především vakuovým odléváním. [26]

Struktura slitiny je na obr. 29. Je složena hlavně z tuhého roztoku γ, vytvrzující fáze γ‘ a karbidů typu MC a $M_{23}C_6$. [26]

V leteckých aplikacích se z této slitiny zhotovují oběžná kola a lopatky plynových turbín nebo komponenty turbodmychadel. [17]



Obr. 29: struktura slitiny Inconel 713LC [26].

Mar-M247

Slitina, která nese obchodní název Mar-M247, je precipitačně zpevněná slitina. Úspěšně se používá při výrobě součástí metodou řízené krystalizace. Hlavními legujícími prvky jsou kobalt, chrom, wolfram a hliník. [26]

Tato slitina vyniká velkou pevností a korozní a teplotní odolností. Při aplikaci řízené krystalizace, kdy vznikají kolumnární krystaly v jednom směru, dochází rovněž ke zlepšení odolnosti vůči creepu. [26]

Struktura je tvořena tuhým roztokem γ, vytvrzující fáze a γ‘ karbidy sloučenin W, Ta, Mo a Ti. [26]

V leteckém průmyslu našla tato slitina uplatnění při výrobě statorových kol, rotorových lopatek, plynových turbín apod.

Hastelloy X

Tato slitina známá pod obchodním názvem Hastelloy X, patří do skupiny superslitin na bázi Ni, které jsou zpevněny především karbidicky. Tomu odpovídá poměrně vysoký obsah uhlíku, který se pohybuje okolo 0,15 hm%. Dalšími přísadovými prvky této slitiny jsou chrom, železo nebo molybden. Slitina je vhodná jak pro odlévání, tak pro tváření. [26]

Pracovní teploty této slitiny dosahují hodnot až 1200 °C, ovšem bez mechanického namáhání. Dalšími vlastnostmi těchto slitin je dobrá odolnost vůči oxidaci a korozi při namáhaní. [26]

Ve struktuře této slitiny nalezneme poměrně velké množství karbidů. Jsou to hlavně karbidy typu MC (na bázi W, Mo), M_7C_3 (Cr), $M_{23}C_6$ (Cr, Mo, W) a M_6C (Mo, W). [26]

Z této slitiny se vyrábějí součásti plynových turbín, statorové části turbíny apod. Díky vysokým pracovním teplotám se rovněž využívá této slitiny na části spalovacích komor.

4.3.3 Kobalt a jeho slitiny

Kobalt je drahý, feromagnetický stříbrolesklý s namodralým nádechem. Vyskytuje se ve 2 alotropických modifikacích. Za běžných teplot je stabilní hexagonální modifikace α. Ta se při teplotě 417°C rekrystalizuje na modifikaci β s mřížkou kubickou plošně středěnou. Hustota kobaltu je téměř shodná jako niklu. Je rovna 8,85 $g \cdot cm^{-3}$. Ani teplota tání těchto 2 kovů se příliš neliší. Kobalt se rozpouští při 1493°C. I kobalt dobře odolává atmosférické korozi. Co se týká mechanických vlastností, tak např. tvrdostí a pevností předčí kobalt železo. Za běžných teplot se jeho tvrdost pohybuje mezi 140 a 250 HV. S rostoucí teplotou však klesá. [13, 16]

V přírodě lze nalézt kobalt v některých rudách. Nejvýznamnější z nich jsou rudy obsahující arzenidické minerály. Často se kobalt nachází v nalezištích niklových rud. K získání kobaltu z těchto rud se používá pyrometalurgického a hydrometalurgického zpracování. [13, 22]

Kobalt se podobně jako nikl používá často jako legující prvek, je to jeden z hlavních legujících prvků nástrojových a rychlořezných ocelí. Odolnosti kobaltových slitin se používá při galvanickém pokovování. Oxidy kobaltu se také používají k barvení skla a keramiky. Z kobaltových slitin se také vyrábějí magnety nebo části baterií. Čtvrtina roční produkce připadá na výrobu superslitin. [13, 16]

4.3.4 Kobaltové superslitiny

Základ těchto slitin je tvořen tuhým roztokem Co-Cr-Mo-Ni. Kobaltové žáropevné slitiny se precipitačně nevytvrzují. Mechanismy zpevnění jsou v tomto případě substituční zpevnění matrice rozpuštěnými prvky a disperzní zpevnění hrubých částí karbidů. Oproti niklovým slitinám tak mají kobaltové žáropevné slitiny za střední teploty nižší žáropevnost. Při teplotách okolo 800 °C je však jejich žáropevnost již srovnatelná. Je to způsobeno snižováním pevnosti niklových žáropevných slitin díky nevratným změnám ve struktuře materiálu. [13]

Obrábění kobaltových žáropevných slitin je obtížné, proto se vzhledem k dobré slévatelnosti součásti a polotovary odlévají. Při tváření je nezbytné provést mezižíhání. [13]

Kobaltové žáropevné slitiny se používají jako alternativa namísto niklových žáropevných slitin. Důležité jsou především na místech, kde niklové slitiny být použity

nemohou např. v prostředích, kde přijde součást do kontaktu se sírou nebo sodíkem. V těchto prostředích totiž niklové slitiny podléhají korozi, která je provázena tvorbou eutektika o nízké teplotě tání a varu. Používají se tak např. v motorech, kde je palivem ropa nebo u tepelných strojů pracujících v mořském prostředí. [13]

Kobaltové superslitiny používané v leteckém průmyslu

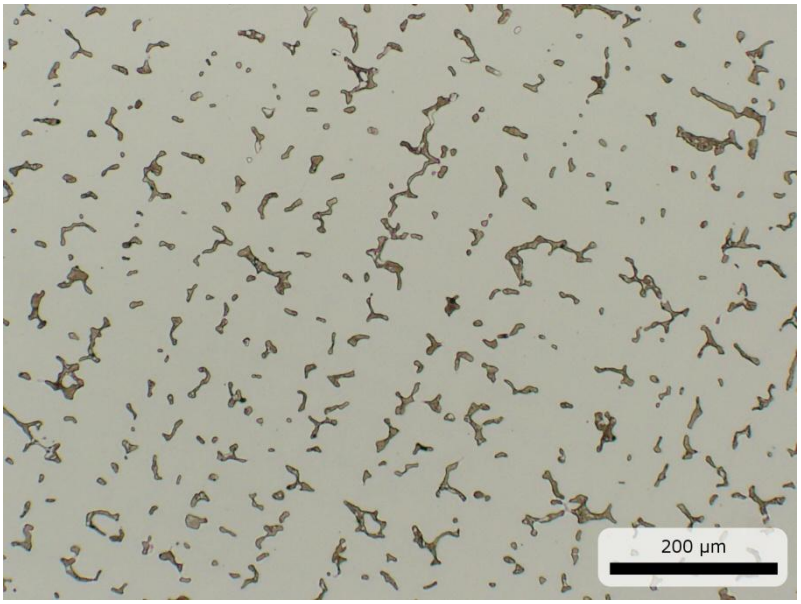
ASTM F75 (CoCrMo)

Slitina ASTM F75 je kobaltová nemagnetická žáropevná slitina s hlavními legující prvky chromem a molybdenem. [26]

Vyniká výjimečnými mechanickými vlastnostmi a odolností vůči opotřebení. Slitina je rovněž biokompatibilní, proto se z ní vyrábějí ortopedické součásti a zubní implantáty. [26]

Mikrostrukturu tvoří tuhý roztok Co α a karbidy typu $M_{23}C_6$. Ty se vyskytují v lamelární nebo blokové morfologii. Někdy se ve struktuře vytváří σ fáze. Mikrostruktura je zachycena na obr. 30. [26]

V leteckých konstrukcích se využívají především její příznivé korozivzdorné vlastnosti a creepová odolnost. Odlévají se z ní proto části leteckých turbínových motorů.



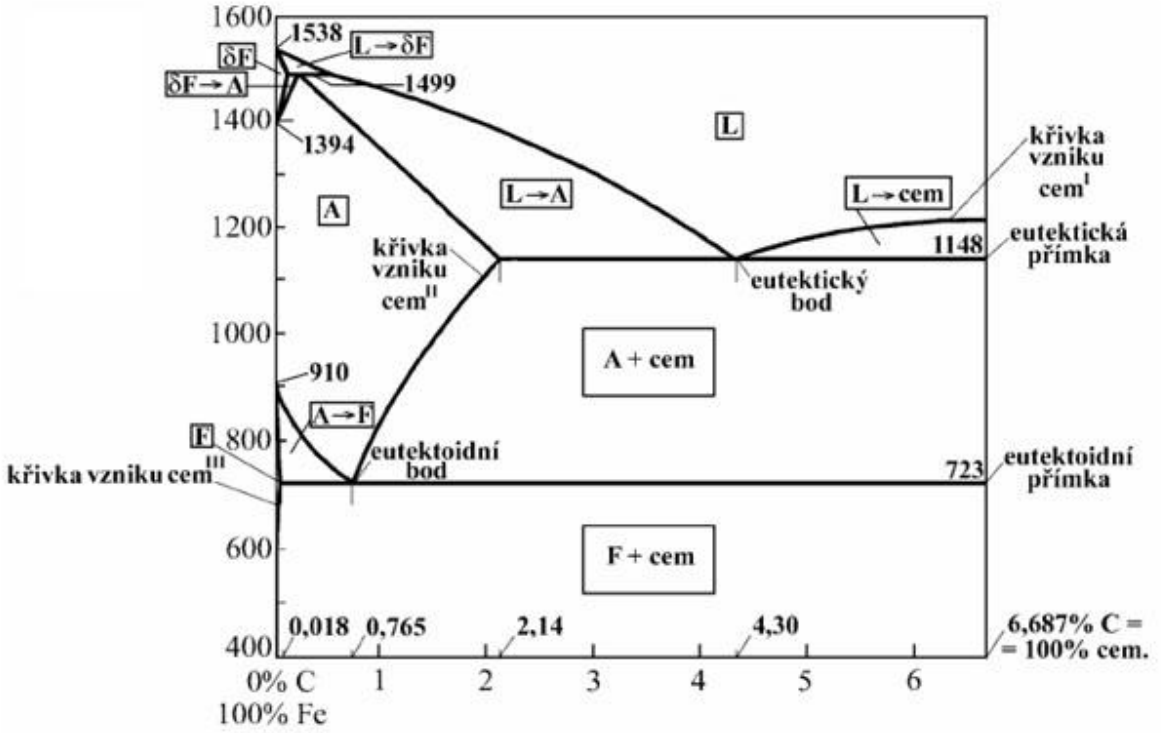
Obr. 30: struktura slitiny ASTM F75 [26].

4.4 Fe 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 α(Fe). α(Fe) 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 rekrystalizace, která činí 910°C tak hovoříme o β(Fe). Při teplotě 910 °C se mění struktura mřížky z BCC na kubickou plošně středěnou (FCC) a vzniká γ(Fe). Tato modifikace je stabilní až do teploty druhé rekrystalizace 1394 °C, kdy se struktura vrací na BCC. Od teploty 1394 °C až do bodu tání (1538 °C) se železo vyskytuje jako δ(Fe). [1, 13, 16]

Železo se v přírodě vyskytuje ve formě železných rud, ze kterých se, ve většině případů, vyrábí. Železo o vysoké čistotě se vyrábí redukcí čistého oxidu nebo hydroxidu vodíkem nebo zahříváním železa v atmosféře oxidu uhelnatého CO při zvýšeném tlaku a následným rozkladem vzniklého pentakarbonylu železa $Fe(CO)_5$ při teplotě 250 °C na práškový kov. Surové železo se vyrábí ve vysoké peci redukcí oxidů železa koksem nebo oxidem uhelnatým CO. Rudy se do vysoké pece střídavě naváží se struskotvornými látkami (vápenec, popř. oxidy křemíku) a koksem. [1]

Čisté železo má v praxi minimální využití. Daleko větší význam mají jeho slitiny, zejména s uhlíkem. S ním tvoří slitiny, které se nazývají oceli a litiny. Uhlík bývá ve slitinách železa přítomen v tuhé fázi ve formě intermediální fáze - intersticiální sloučeniny Fe_3C (cementit) nebo ve formě grafitu. Chování soustav železo-uhlík lze popsat pomocí stavových (binárních) diagramů. Dle způsobu přítomnosti uhlíku rozeznáváme 2 diagramy; metastabilní (obr. 31), kde je uhlík přítomen ve formě karbidu Fe_3C a stabilní, kde je uhlík ve formě grafitu. [13, 16]



Obr. 31: metastabilní binární rovnovážný diagram Fe-Fe_3C [27]

Podle metastabilního diagramu rozdělujeme slitiny železa s uhlíkem na oceli a bílé litiny. Ve stabilním diagramu Fe-C se nachází grafitické litiny. [16]

Nejvýznamnější z těchto slitin jsou oceli, které tvoří až 90 % všech slitin železa. Oceli se dále dělí podle několika různých aspektů. Vzhledem k využití oceli v leteckém průmyslu se tato práce bude zabývat pouze žáropevnými ocelemi, které se používají mimo jiné na součásti leteckých pohonných jednotek. [13, 16]

4.4.1 Žáropevné oceli používané v leteckém průmyslu

Jak je z názvu patrné, žáropevné oceli jsou slitiny, které jsou vhodné na součásti namáhané za vyšších teplot. Hlavní požadavek, který je kladen nejen na žáropevné oceli, ale obecně na všechny žáropevné materiály, je, aby se s vyšší teplotou nezhoršovaly jejich mechanické vlastnosti. Mimoto je po žáropevných ocelích požadována vysoká dlouhodobá pevnost při tečení, vysoká mez kluzu a pevnost

v tahu, dobrá tvárnost, tažnost a odolnost proti křehkému porušení. Dále by měly být tyto materiály odolné proti tepelné a tepelně-mechanické únavě při zatěžování. Vzhledem k tomu, že součásti ze žáropevných materiálů přijdou často do přímého kontaktu s plamenem, je optimální, aby byly také žáruvzdorné a odolné proti korozi v prostředí spalin. [23, 28]

Žáropevné oceli lze rozdělit podle struktury na feritické a austenitické. Podle chemického složení pak rozlišujeme žáropevné oceli na oceli nelegované, nízkolegované, vysokolegované chromové oceli a chrom-niklové oceli. [23, 28]

Uhlíkové a legované oceli s feritickou strukturou

Do skupiny žáropevných ocelí na feritickém základu spadá široká škála typů ocelí, které mají rozličné chemické složení, strukturu po tepelném zpracování a použití. Rozmezí pracovních teplot ocelí s feritickým základem je určeno především žáruvzdorností a korozní odolností materiálu. Samotná žáropevnost závisí na mikrostruktuře žáropevné oceli. Její podobu determinují podíly přítomných mechanismů zpevnění. Mezi nejvýznamnější druhy zpevnění feritických ocelí patří precipitační a substituční zpevnění. [23, 28]

Nelegované oceli

Horní hranice pracovních teplot u těchto ocelí je omezena především hodnotou meze tečení. Ta není konstantní, ale mění se s působícím napětím, a to tak, že se snižujícím se napětím se její mez zvyšuje. Obecně se nízkolegované oceli používají do teplot mezi 350-400 °C. Do této skupiny patří především podeutektoidní oceli třídy 11 a 12, např. 11 364, 11 366, 11 375, 11 418, 11 474, 11 531, 12025 či 42 2633, 42 2643. [23, 28]

Nízkolegované oceli

Dle použití se oceli patřící mezi nízkolegované dělí na dvě skupiny. První jsou oceli pro použití v oblasti meze kluzu a druhé jsou oceli používané v oblasti meze tečení. V prvním případě se mez kluzu zaručuje jak za normální, tak za zvýšené teploty. V druhém případě nízkolegovaných ocelí se požaduje mez tečení. Rozsah pracovních teplot nízkolegovaných ocelí dosahuje teplot až 500 °C nebo dokonce 550°C. Základními legujícími prvky v těchto ocelích, které zvyšují žáropevnost, jsou Mo, W, V, Ti, B a Nb. Dále se tato skupina leguje také chromem, při obsahu do 2,5 % zvyšuje odolnost proti tečení. V tomto obsahu se vyskytuje téměř ve všech nízkolegovaných ocelích. [23, 28]

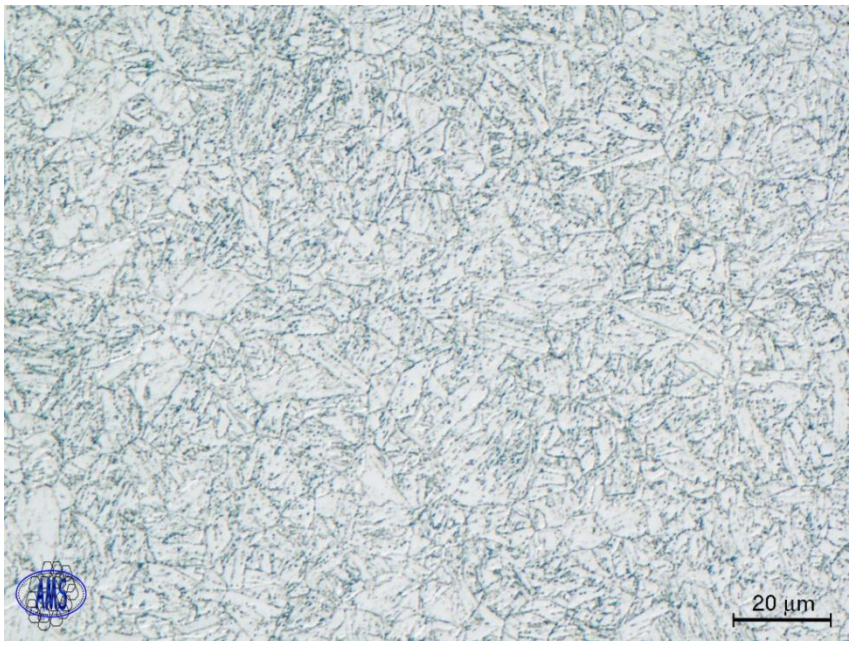
Obsah uhlíku a legujících prvků má spolu s různými druhy tepelného zpracování vliv na strukturu oceli. Mohou tak vznikat ferticko-pertitické, feriticko-pertitické-bainitické, feriticko-bainitické nebo bainitické struktury. Do této skupiny patří oceli třídy 13, 15 a 16. Typickými zástupci ocelí pro použití v oblasti meze kluzu jsou 13 030, 13 220, 15 221, 15 422, 16 343 atd. a oceli na použití v oblasti meze tečení jsou 15 313, 15 229, 15 112, apod. [23, 28]

Vysokolegované chromové oceli

Do skupiny vysokolegovaných žáropevných ocelí řadíme oceli s obsahem Cr od 8 do 12 %, neboť tento rozsah se ukázal být optimální z hlediska žáruvzdornosti, korozní odolnosti, zpevnění za zvýšených teplot a pevnosti při tečení. Vyšší obsah chromu není vhodný, jelikož se materiál stává „křehčí při 475 °C“ a již se nezvyšuje pevnost při tečení. Maximální teploty pro součásti z vysokolegovaných žáropevných ocelí jsou v rozmezí od 600 °C do 620 °C. V některých nových ocelích této skupiny byla omezena koncentrace uhlíku na 0,05 - 0,15 %, což způsobuje dobrou

svařitelnost a tvárnost při udržení požadované pevnosti. Prvky molybden a wolfram zpevňují tuhý roztok zvýšením stability matrice během zatěžování za zvýšené teploty. Optimálních vlastností se dosahuje při celkovém obsahu Mo+0,5W do 1,5%.Vyšší koncentrace vedou ke snížení houževnatosti. Významným legujícím prvkem je rovněž vanad, který zvyšuje žáropevnost. Dalšími legujícími prvky jsou niob, dusík, bor či nikl. Struktura těchto slitin je v závislosti na chemickém složení a tepelném zpracování feriticko-karbidická (viz obr. 32), popř. feriticko-martenzitická s karbidy typu MC a $M_{23}C_6$ apod. [23, 28]

Mezi vysokolegované oceli patří oceli třídy 17 jako 17 116, 17 126, 17 134 a další speciální slitiny, např. Eurofer 97, Eurofer ODS, T91, P91, P92 apod.



Obr. 32: feriticko-karbidická mikrostruktura oceli P91 po kalení za podmínek 1040 ˚C/20 min/voda a popouštění 760 ˚C/2 h/vzduch. [17]

4.4.1.1 Austenitické oceli

Změnou feritické struktury oceli na strukturu austenitickou (viz obr. 33) lze získat zlepšení žáropevných a žáruvzdorných vlastností. Oproti feritickým ocelím mají sice nižší hodnoty meze kluzu, ale na druhou stranu mají lepší hodnoty pevnosti při tečení. Austenitické oceli nemají příliš dobré fyzikální vlastnosti, jde především o vyšší tepelnou roztažnost a nižší součinitel tepelné vodivosti. Mají však větší odolnost proti koroznímu praskání a mezikrystalové korozi. Použití austenitických ocelí je možné při intervalech teplot od 550 do 700 °C. [23, 28]

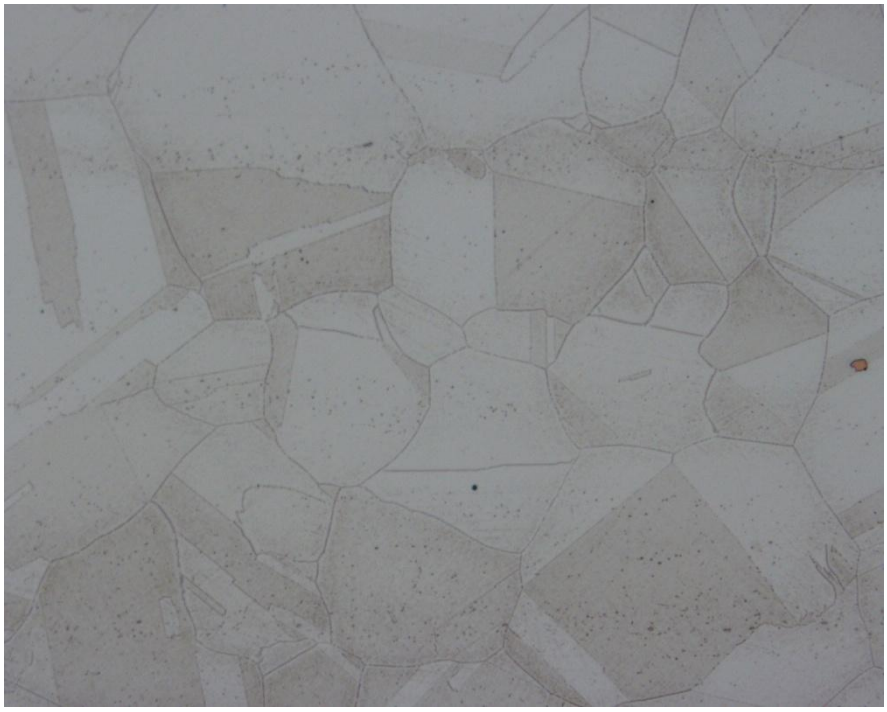
Do skupiny těchto ocelí patří kromě chromniklových ocelí, také oceli Cr-Mn-Ni, oceli bez niklu tzv. manganchromové a skupina vytvrditelných austenitických ocelí. Hlavními legujícími prvky v používaných austenitických žáropevných ocelích je Cr a Ni. Jejich koncentrace se pohybuje ve velkém rozpětí. Nejčastěji odpovídá relaci Cr/Ni: 18/10, 17/13, 23/18, 25/20, 15/15 a 15/27. Pro zvýšení žáropevnosti se používají prvky jako Mo, Nb, Ti, V, W, N, B, Co. Legující prvky lze dle vlivu na strukturu rozdělit do šesti skupin. [23, 28]

- Prvky tvořící austenitickou fázi (Ni, Cr)
- Prvky zpevňující matrici a tvořící sekundární fáze (C, N)
- Prvky rozpouštějící se v austenitu se zpevňujícím vlivem (Mo, W, V, Co)

- Prvky stabilizující uhlík a dusík (Ti, Nb, Ta, Zr)
- Prvky zvyšující rozklad sekundárních fází (B a Zr)
- Prvky zajišťující zpevnění intermediálních fází (Ti, Al)

U chromniklových ocelí je obsah niklu vyšší než u ostatních austenitických ocelí. Jeho obsah se může pohybovat až do meze 38 %. Vyšším obsahem niklu se zabraňuje tvorbě sigma fáze, která snižuje houževnatost. Manganchromové oceli mají podobné vlastnosti jako chromniklové jako chromniklové. Z důvodu snížení nákladu se do nich nepřidává nikl, jehož cena je poměrně vysoká. Nepřítomnost niklu může vést ke vzniku poruch, proto se místo niklu přidává malé množství dusíku, který stabilizuje austenit. Austenitické vytvrditelné oceli se používají v aplikacích, které pracují za teplot, kde již nevystačují běžné austenitické chromniklové oceli. Jde o teploty 650 až 750 °C. Tato skupina austenitických ocelí má vysokou mez pevnosti při tečení, dobrou strukturní stabilitu a dobré plastické vlastnosti. Žáropevnost zde zvyšují přísady, Ti, Al, B a Mo. [23, 28]

Jedná se o slitiny 17 331, 17 248, 17 347, 17 483 apod.



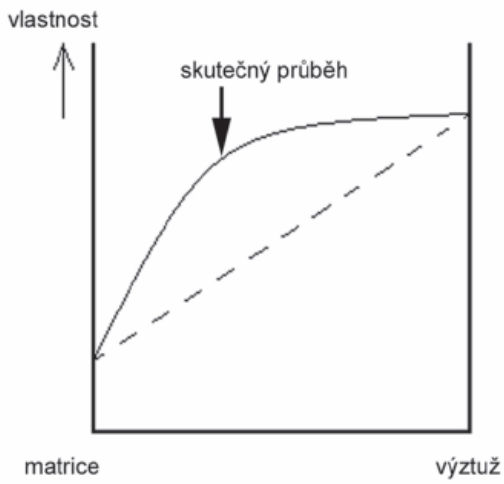
Obr. 33: austenitická mikrostruktura oceli 17 248

4.5 Kompozitní materiály

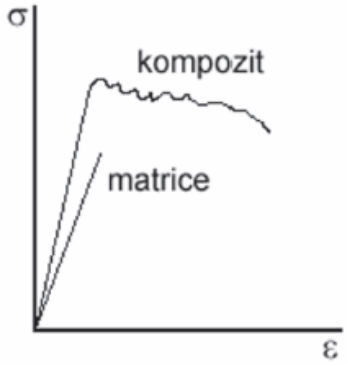
Kompozitními materiály se rozumí heterogenní materiály, které se skládají ze dvou a více fází. Jednotlivé fáze se liší svými mechanickými, chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Běžně se fáze v kompozitech rozeznávají na spojitou fázi tzv. matrici a nespojitou fázi dispergovanou v matrici tzv. výztuž. Zatímco matrice je spojitá, výztuž je nespojitá a oproti matrici má výrazně lepší mechanické vlastnosti jako jsou modul pružnosti, pevnost a tvrdost. Nejvýznamnějším kompozitem vyskytujícím se v přírodě je dřevo. [16]

Umělé kompozity se běžně vyrábějí metodou mísení nebo spojování jednotlivých složek. V tomto aspektu se kompozity výrazně liší od slitin. U slitin vznikají jednotlivé fáze především fázovými přeměnami. Charakteristickým jevem u kompozitů je tzv. synergismus. Synergismus znamená, že vlastnosti kompozitů jsou lepší než sečtení vlastností jednotlivých složek. Příklad synergismu je na obr. 34. Přestože jsou např.

vlákna kompozitního materiálu samostatně křehká, výsledný kompozit je charakteristický jistou mírou houževnatosti viz obr. 35. Houževnatost je způsobena především tím, že lomová trhlina je zpomalena rozhraním matrice a vláken. [16]

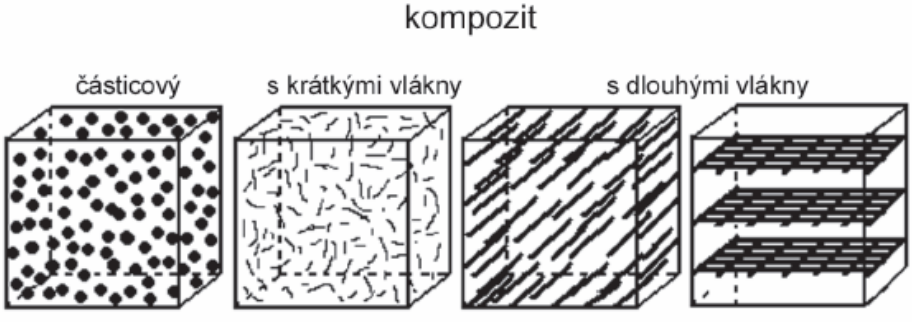


Obr. 34: synergické chování složek kompozitu [16]



Obr. 35: porovnání tahových diagramů matrice a kompozitů složeného z této matrice a keramických vláken [16]

Kompozitní materiály, mohou být děleny podle povahy výztuže a podle povahy matrice. Dle tvaru výztuže mohou být kompozity děleny na kompozity částicové nebo vláknové, které se dále dělí na kompozity s vlákny dlouhými nebo krátkými. U částicových kompozitů nepřekračuje jeden rozměr výztuže rozměry v ostatních směrech. Oproti tomu u vláknových kompozitů mají částice výztuže v jednom směru výrazně větší rozměr než ve směrech ostatních. Dělení kompozitů dle délky a uspořádání výztuže kompozitu je na *obr. 36*. [16]. Dle povahy matrice jsou kompozity s matricí kovovou, polymerní (termoplasty, reaktoplasty, síťovaný polymer), keramickou, skleněnou nebo uhlíkovou. [16, 29]



Obr. 36: dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže [16]

4.5.1 Kompozitní materiály používané v leteckém průmyslu

Hlavní přínos, jenž vede k tomu, že kompozity často nahrazují běžně používané materiály, je především redukce hmotnosti letecké konstrukce. Například při aplikaci 681 kg kompozitních dílců na drak dopravního letadla Boeing 737, byla hmotnost konstrukce letadla snížena o 272 kg. Znamená to, že při náhradě kovových dílců kompozitními materiály lze zredukovat hmotnost o 20 až 30 %. Obecně se také většinou jedná o tvrdé, otěruvzdorné materiály, které jsou odolné proti vysokým teplotám. [16, 29, 30]

Kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí

Mezi nejpoužívanější kompozity používané v leteckých konstrukcích patří především kompozity s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny, tzv. CFRP (Carbon-fiber-reinforced polymer). Tyto materiály, jak už z názvu vyplývá, jsou složeny z výztuže z uhlíkových vláken a z matrice na bázi epoxidových pryskyřicí.

Uhlíková vlákna patří mezi nejpoužívanější druh vláken používaných v leteckých aplikacích. Uhlíková vlákna vynikají oproti ostatním druhům výztuží především nízkou hustotou, která se pohybuje v rozmezí 1800 až 2200 $kg \cdot m^{-3}$, a vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Nevýhodou uhlíkových vláken je jejich křehkost. [29]

Nejčastěji se uhlík vyskytuje ve formě grafitu. Jeho anizotropní hexagonální struktura stojí za výbornými mechanickými vlastnostmi. Atomy uhlíku jsou v bazálních hexagonálních rovinách spojeny kovalentními vazbami. Tyto roviny jsou pak mezi sebou vázány pouze slabými Van der Waalsovými vazbami. Orientace hexagonálních rovin a míra jejich uspořádání ovlivňuje mechanické i fyzikální vlastnosti uhlíkových vláken. Pro příklad ve směru vláken je modul pružnosti 500 GPa, zatímco v kolmém směru je modul pružnosti pouze 6 GPa. [29]. Z fyzikálních vlastností je dobrá teplotní roztažnost. Ta dosahuje ve směru vláken záporných hodnot. Naopak v kolmém směru jsou její hodnoty kladné. [29]

Epoxidové pryskyřice patří mezi reaktoplasty. Má dobrou odolnost proti únavě a tečení a dobrou chemickou odolnost. Problémem epoxidů je především malá odolnost proti šíření trhlin. Mechanické vlastnosti těchto materiálů lze dobře modifikovat vhodnou úpravou pryskyřice, volbou vytvrzovacích činidel a anorganických plniv. Touto volbou lze změnit i teplotu skelného přechodu.

Zlepšení mechanických vlastností kompozitních materiálů lze dosáhnout i pomocí nanočástic, které zlepšují tvrdost a modul pružnosti. Tyto vlastnosti jsou u polymerů, na rozdíl od kovů, ve vzájemné souvislosti. V současné době se jako nanočástice používá především materiálů na bázi jílů. Na zkušební úrovni se objevují i diamantové nanočástice či nanočástice oxidu křemičitého a dalších prvků. [29]

Sendvičové materiály

Jde o zvláštní druh kompozitů, které se skládají z jádra a dvou povrchových vrstev. Hlavní funkcí jádra je odlehčení sendvičového materiálu. Pro splnění této funkce je jádro tvořeno co nejlehčími materiály. Obvykle je tvořeno voštinami nebo kovovými či polymerními pěnami. Povrchové vrstvy dodávají výslednému materiálu hlavně tuhost v ohybu. Na jejich výrobu se používají kompozitní materiály nebo kovy jako hliník a ocel. Vhodnou kombinací materiálu jádra a potahu lze modifikovat výsledné vlastnosti. Na ty má vliv ještě lepidlo, které se používá na jejich spojení. [29]

Kompozitní materiály s uhlíkovými vlákny a polymerní matricí a sendvičové materiály se v leteckém průmyslu používají především na části draku. Jde především o řídící a potahové části křídel a trupu, kde často nahrazují slitiny hliníku.

5 Závěr

Hlavním cílem práce bylo vypracování rešerše na dané téma, kterým bylo materiály používané v leteckém průmyslu.

Konstrukci letadla lze rozdělit do tří základních celků. Jedná se o drak, pohonnou soustavu a výstroj popř. ještě výzbroj. V rámci práce jsme se zabývaly jen materiály, které se používají na drak letadla a pohonnou soustavu.

Drak letadla je složen z nosné soustavy, trupu, ocasních ploch, řízení a podvozku. Materiály používané na drak letadla musí splňovat požadavky, kterými jsou především nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost, odolnost vůči korozi a také cena. Na konstrukci křídel se nejčastěji používají slitiny na bázi hliníku (slitiny Al–Cu–Mg, např. Al-Cu4-Mg1-Mn), titanové slitiny (např. Ti–6Al–4V, Ti–13V–11Cr–3Al) , vybrané oceli (např. oceli třídy 13, 15, 16 a 17) a v posledních letech stále více kompozitní materiály (CFRP). Díky velice podobné konstrukci se tytéž materiály používají i na ocasní plochy. Na části trupu se používají slitiny hliníku (Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al- Mg-Si), slitiny titanu (např. Ti-13V-11Cr-3Al), oceli (např. oceli tříd 13, 15, 16 a 17) nebo kompozity s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny.

Pohonnou soustavu u nejběžnějších leteckých motorů tvoří kompresor, spalovací komora, plynová turbína a vstupní a výstupní soustava. Na výrobu vstupní soustavy postačí hliníkové slitiny (např. Al-Cu-Li nebo Al-Zn-Mg), titanové slitiny (např. Ti-13V-11Cr-3Al) a oceli (např. oceli třídy 13, 15 a 16), které se běžně používají i na části draku. Na kompresorové součásti se používají především slitiny titanu (např. Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sr-4Zr-6Mo), mohou se použít i oceli (oceli třídy 15, 16 a 17) nebo hliníkové slitiny (např. Al-Cu-Li). U vysokotlakých kompresorů se používají i niklové a kobaltové superslitiny (např. Inconel 713LC nebo ASTM F75). Spalovací komora je teplotně nejnamáhavější části motorů, zhotovuje se proto výhradně z niklových a kobaltových superslitin (např. Hastelloy X) nebo žáropevných ocelí (hlavně oceli třídy 17). I na plynovou turbínu se používá především niklových a kobaltových superslitin (např. Inconel 713LC, Mar-M247 nebo ASTM F75) a žáropevných ocelí (např. oceli třídy 15, 16 a 17). Na výstupní soustavu se používají především žáropevné oceli (oceli třídy 15, 16 a 17).

6 Seznam použitých zdrojů

[1] USTOHAL, V. Letecké materiály. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1988. 130 s.

[2] SLAVÍK, S. Stavba letadel. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. 129 s.

[3] LEYENS, Ch., PETERS, M. *Titanium and titanium alloys*. Weinheim: WILEY-VCH, 2003. 513 s.

[4] http://www.flightsim.com/feature/l1011-1/CutAwayMod.jpg

[5] MIKULA, J.: Konstrukce a projektování letadel II. Praha: Česká technika, 2005. 246 s.

[6] http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/construction.php#10.8

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/

[8] REED P.A.S., WU X.D., SINCLAIR I. Fatigue Crack Path Prediction in UDIMET 720 Nickel- Based Alloy Single Crystals. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 31A No. 1, pp. 109-123, 2000.

[9] TAMARIN, Y. Protective Coatings for Turbine Blades. ASM International, 2002.

[10] ADAMEC, J.; KOCÁB J. Letadlové motory. Praha: Nakladatelství Corona spol. s r. o., 2008. 176 s.

[11] KŘÍŽ, J. Letouny a jejich systémy

[12] http://www.thomas-sourmail.org/coatings/single-page.html

[13] PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu II. Brno: Nakladatelství Cern, 1999. 350s.

[14] MICHNA, Š.; LUKÁČ, I.; OČENÁŠEK, V.; KOŘENÝ, R.; DRÁPALA, J.; SCHNEIDER, H.; MIŠKUFOVÁ, A., a kol. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, s. r. o., 2005.

[15] USTOHAL, V. Současný stav a trendy vývoje lehkých slitin v konstrukci draků letadel. Brno: Klub české společnosti pro nové materiály a technologie při VUT v Brně, 2000. 120 s.

[16] VOJTĚCH, D. Kovové materiály. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2006. 185 s.

[17] Multimediální atlas materiálů,dostupné na http://ime.fme.vutbr.cz/atlas/index.php

[18] SEDLÁČEK, V.: Titan a jeho slitiny. Praha: Státní nakladatelství technické literatuy, 1963. 203 s.

[19] MOISEYEV, V. N. Titan Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Application. Boca Raton: T&F Group, 2006. 206 s.

[20] BEYER, R.; WELSH, G.; COLLINGS, E. W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloy. USA: ASM, 1994.

[21] DAVIS, J. R. ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys. USA: ASM, 2000.

[22] http://www.nom.wz.cz/

[23] HERNAS, A.; JONŠTA, M.; TVRDÝ, M.; ČÍŽEK, L.; PURMENSKÝ, J. Žárupevné oceli a slitiny. Žilina: Vydavatel'stvo ZUSI, 2002.

[24] BROOKS, Ch.R. *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*. USA: ASM Ohio, 1995. 419 s.

[25] DURAND-CHARRE, M. *The Microstructure of Superalloys*. Amsterdam: Gordon & Breach Science Publishers, 1997. 121 s.

[26] Příprava a hodnocení materialografických vzorků http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/index.html

[27] MOLLIKOVÁ, E. Slitiny železa a uhlíku – přednáška předmětu 3SV

[28] FREMUNT, P.; PODHORSKÝ, T. Konstrukční oceli. Brno: CERM, 1996.

[29] JANOVEC, J.; CEJP, J.; STEIDL, J. Perspektivní materiály. Praha: Česká technika, 2008.

[30] ASM Handbook volume 21, Composites. ASM International, 2001. 2605 s.

7 Seznam obrázků

Obr. 1 9
Obr. 2 11
Obr. 3 12
Obr. 4 12
Obr. 5 13
Obr. 6 14
Obr. 7 15
Obr. 8 16
Obr. 9 16
Obr. 10 17
Obr. 11 18
Obr. 12 18
Obr. 13 19
Obr. 14 19
Obr. 15 21
Obr. 16 22
Obr. 17 23
Obr. 18 24
Obr. 19 25
Obr. 20: 26
Obr. 21 27
Obr. 22 28
Obr. 23 29
Obr. 24 31
Obr. 25 33
Obr. 26 34
Obr. 27 36
Obr. 28 37
Obr. 29 38
Obr. 30 40
Obr. 31 41
Obr. 32 43
Obr. 33 44
Obr. 34 45
Obr. 35 45
Obr. 36 45

8 Seznam tabulek

Tab. 1 22
Tab. 2 26