



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VOLBA MATERIÁLU PRO VÝROBU LOPATKOVÝCH KOL PROUDOVÝCH LETECKÝCH MOTORŮ

THE CHOICE OF MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF BLADE WHEELS OF JET AIRCRAFT ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Černý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Němec, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Michal Černý**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karel Němec, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Volba materiálu pro výrobu lopatkových kol proudových leteckých motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude zpracování přehledu o materiálech v minulosti i současnosti používaných k výrobě lopatkových kol proudových leteckých motorů a následné vyhodnocení hledisek vhodnosti jejich volby pro dané účely.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor požadavků kladených na lopatková kola proudových leteckých motorů
Přehled materiálů použitelných pro danou aplikaci
Popis vlastností vybraných materiálů
Zdůvodnění volby materiálů používaných v současnosti na lopatková kola

Seznam doporučené literatury:

Mattingly, J. D., Heiser, W. H., Pratt, D. T. Aircraft Engine Design . Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2002.

Jonšta, Z.: Žárupevné oceli a slitiny. 1. vyd. Žilina, ZUSI, 2002. 389 s. ISBN 80-968605-6-9

Donachie, M. J. : Superalloys. A technical guide. 2nd ed. Materials Park, ASM International. 2002. 437 s. ISBN 0-87170-749-7

Ashby, M. F.: Materials selection in mechanical design. 3rd ed. Oxford, Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 603 s., ISBN 0-7506-6168-2

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca podáva základný prehľad o materiáloch používaných na výrobu lopatkových kolies prúdových leteckých motorov. Letecký motor možno rozdeliť na dve časti – studenú a horúcu. Každá z nich má odlišné požiadavky na materiály v nich použité. Podmienky v studenej časti sú pomerne mierne a požiadavky sú viac- menej uspokojené momentálne používanými materiálmi. Cieľmi pre ďalší vývoj je primárne zníženie hustoty, zvýšenie pevnosti a zlepšenie únavových vlastností. Skutočnou výzvou leteckého priemyslu je však nájsť materiály, schopné fungovať za extrémnych podmienok v horúcej časti, preto je väčšina rozsahu tejto práce venovaná danej problematike.

Základný prehľad je vytvorený syntézou niekoľkých zdrojov. Väčšina informácií je čerpaná z amerických kníh, podávajúcich celistvý obraz o materiáloch a postupoch výroby pre toto využitie. Najvhodnejšími materiálmi sa po desaťročiach výskumu ukázali niklové superzliatiny v kombinácii s termálnymi povlakmi a chladiacimi prieduchmi. Ich vlastnosti, štruktúra a proces výroby tvoria základ poznatkov k tejto téme. Hlavným cieľom pre vývoj je zvýšenie teploty, pri ktorej sú tieto materiály schopné fungovať, nakoľko vyššia teplota spalín vstupujúcich do turbíny znamená vyššiu účinnosť a s ňou spojené finančné a ekologické úspory. Napriek dlhoročnému výskumu a vlastnostiam, ktorým nekonkurujú žiadne iné materiály, verím, že je tu stále miesto pre zlepšenia. Tie môžu nastať s príchodom nových technológií a možné je dokonca objavenie novej skupiny materiálov na inej báze ako niklové superzliatiny.

Stručný opis niekoľkých sľubných novo testovaných skupín materiálov, ako aj môj pohľad na budúcnosť tohto odvetvia, tvoria záverečnú časť tejto práce.

Kľúčové slová

Lopatky turbín leteckých motorov, superzliatiny, termálne povlakovanie, materiály v leteckých motoroch, vysokoteplotné materiály

Abstract

This bachelor's thesis provides a basic overview of the materials used in the production of turbine blades of jet aircraft engines. An aircraft engine can be divided into two parts - cold and hot part, each with very different requirements for the materials used in them. The conditions in the cold part are relatively mild and the requirements are more or less satisfied by the currently used materials. The goals for further development are primarily a reduction in density and an increase in strength and fatigue properties. The real challenge of the aerospace industry is to find materials capable of working under extreme conditions in the hot part, therefore this work devotes most of the scope to the given issue.

The basic overview is created by synthesizing several sources. Most of the information is drawn from American books giving a comprehensive picture of materials and manufacturing processes for this use. After decades of research, nickel superalloys in combination with thermal coatings and cooling vents proved to be the most suitable materials. Their properties, structure and production process form the basis of knowledge on this topic. The main goal for the

development is to increase the temperature at which these materials are able to function, as a higher temperature of the flue gas entering the turbine means higher efficiency and associated financial and ecological savings. Despite years of research and properties unmatched by any other material, I believe there is still room for improvement. With the advent of new technologies, the emergence of a new group of materials on a different basis than nickel superalloys is possible.

A brief description of several promising newly tested groups of materials, as well as my view on the future of the industry, form the final part of this work.

Key words

Aircraft engine turbine blades, superalloys, thermal coating, materials in aircraft engines, high temperature materials

Bibliografická citácia

ČERNÝ, Michal. Volba materiálu pro výrobu lopatkových kol proudových leteckých motorů. Brno 2024. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedúci Bakalárskej práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Karla Němce, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2024

.....

Michal Černý

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu, Ing. Karlovi Němcovi, Ph.D., za vedenie tejto práce a za užitočné rady a pripomienky.

Obsah

Úvod	13
1 Letecký motor a základný opis materiálov v ňom používaných	14
1.1 Schéma leteckého motora.....	14
1.2 Základné princípy výberu materiálov.....	15
1.3 Prehľad bežne používaných materiálov.....	16
2 Studená časť	19
2.1 Podmienky a základný prehľad materiálov v studenej časti.....	19
2.2 Plast spevnený uhlíkovými vláknami – CFRP.....	20
2.3 Zliatiny na báze hliníka.....	20
2.4 Zliatiny na báze titánu.....	21
3 Horúca časť	22
3.1 Podmienky v horúcej časti.....	22
3.2 Vysokoteplotné materiály.....	22
3.2.1 Superzliatiny ako vysokoteplotné materiály.....	22
3.2.2 Odôvodnenie niklu ako vysokoteplotného materiálu.....	23
4 Niklové superzliatiny	25
4.1 Kompozícia mikroštruktúry niklových superzliatín.....	25
4.2 Spevňovanie niklových superzliatín.....	27
4.3 Fyzikálna metalurgia niklových superzliatín.....	27
4.3.1 Investment casting a Smerové tuhnutie (directional solidification).....	28
4.4 Formy zaťaženia monokryštalických lopatiek.....	30
4.4.1 Creep.....	30
4.4.2 Únava.....	30
4.4.3 Vlastnosti superzliatín z hľadiska únavy.....	30
4.5 Ďalšie základné typy superzliatín.....	31
4.5.1 Železo-niklové superzliatiny.....	31
4.5.2 Kobaltové superzliatiny.....	31
4.6 Historický vývoj superzliatín.....	32
4.7 Obchodne dostupné žiaruvzdorné niklové zliatiny a superzliatiny.....	33
5 Environmentálna degradácia – úloha povlakovania	34

5.1 Historický vývoj náterov TBC.....	35
5.2 Voľba materiálov pre TBC.....	35
6 Budúcnosť odvetvia.....	37
7 Diskusia.....	39
Záver.....	42
Použité zdroje.....	43

Úvod

Letecká doprava je jedným z najrozšírenejších spôsobov cestovania. Predstavuje najvýhodnejší spôsob pre transport či už ľudí, alebo produktov na dlhé vzdialenosti za veľmi krátky čas. Je taktiež považovaná za jednu z najbezpečnejších a najpohodlnejších spôsobov prepravy. Význam leteckej dopravy je obrovský takisto vo vojenskom priemysle a to už od prvej svetovej vojny. Avšak požiadavky na výrobu lietadiel za nízku cenu, s vysokou bezpečnosťou a minimálnymi emisiami pre civilné letectvo, ako aj požiadavky na extrémne výkony a špecifické vlastnosti vo vojenskom prostredí sú spojené s veľmi vysokými nárokmi na konštrukciu lietadiel a na materiály, ktoré sa v nich vyskytujú. Najdôležitejšou a z pohľadu použitých materiálov najnáročnejšou časťou lietadla je letecký motor, špecificky jeho horúca časť. Cieľom tejto práce je popísať a zmapovať materiály, ako aj základné procesy spojené s ich výrobou, ktoré sa používajú pre lopatkové kolesá prúdových leteckých motorov.

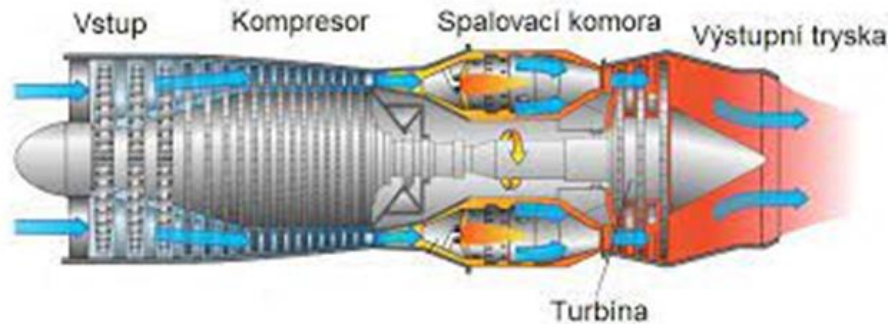
Letecký motor je možné rozdeliť na dve základné časti – studenú a horúcu. Ako už názov napovedá, teploty v studenej časti budú pomerne nízke. Nároky na materiály, ktoré sa tu používajú, sú preto taktiež nižšie s primárnym zameraním na zníženie hmotnosti a zlepšenie únavových vlastností. V minulosti sa pomerne rozšírene používali oceľ, neskôr hliníkové zliatiny a dnes sa do popredia dostávajú zliatiny na báze titánu či dokonca kompozitné materiály, akými je CFRP. Jedným z cieľov tejto práce je podať stručný výklad o týchto skupinách materiálov, opísať ich základné vlastnosti a prednosti, ako aj oblasti ich použitia.

Horúca časť predstavuje z hľadiska materiálov väčšiu výzvu. Teploty sú tu extrémne vysoké, pričom je neustály tlak ich ešte zvyšovať, aby sa dosiahla vyššia účinnosť a s ňou spojené nižšie náklady. Ako najvhodnejšie sa tu ukázali byť superzliatiny na báze niklu, o čosi menej, no stále používané sú aj kobaltové superzliatiny. Vzhľadom na výzvu ktorú predstavujú, a na ich dôležitosť je hlavným cieľom tejto práce opísať práve tieto materiály, špecificky superzliatiny na báze niklu. Opis by nebol kompletný bez základných technologických postupov pri výrobe, opisu vlastností, ako aj bez načrtnutia miesta, ktoré tieto materiály zastávajú v širšej skupine vysokoteplotných materiálov. Dôležitou otázkou je, prečo sa práve nikel ukázal ako najvhodnejší materiál, na ktorého báze sú postavené superzliatiny, keď sú bežne dostupné materiály s vyššou teplotou tavenia, vyššou pevnosťou a nižšou cenou, ako napríklad chróm. Pre získanie odpovede je nutné bližšie pochopiť mikroštruktúru niklových superzliatín, čo je ďalší z cieľov tejto práce.

Na záver si táto práca kladie za cieľ stručne nahliadnúť do výskumu nových materiálov, ktoré sa javia sľubne pre tieto aplikácie a poskytnúť stručnú diskusiu, ako aj môj pohľad na budúcnosť odvetvia.

1 Letecký motor a základný opis materiálov v ňom používaných

1.1 Schéma leteckého motora



Obr. 1 – schéma leteckého motora a jeho rozdelenie na časti [4].

Letecký motor sa dá rozdeliť na päť základných častí – vstup, kompresorová časť, spaľovacia časť, turbína a výstup. Toto rozdelenie je znázornené na obr. 1. Do vstupu prúdi okolitý vzduch, za ktorého nasávanie je zodpovedný ventilátor. Lopatky ventilátora by mali byť vyrobené z ľahkého a pevného materiálu, nakoľko na ne pôsobí odstredivá sila. Taktiež musia mať dostatočnú tuhosť, ktorá zabráni ich deformácii skrútením, a dobrú odolnosť voči únave. V posledných rokoch sa ventilátory zväčšovali, aby sa získala ich vyššia účinnosť (spôsobená vysokým obtekovým pomerom), čo však malo za následok zvýšenie ich hmotnosti (tlak na ich výrobu z ľahších materiálov) [4]. Vzduch nasávaný do leteckého motora je ďalej stlačený kompresorom, čím sa výrazne zvyšuje jeho tlak, ako aj jeho teplota [1]. Niektoré motory -napr. GENx motory- dosahujú vysoké kompresné pomery vďaka využitiu dvoch kompresorových sekcií, sedemstupňovému nízkotlakovému a desaťstupňovému vysokotlakovému kompresoru (nízkotlakový sa otáča proti smeru hodinových ručičiek, vysokotlakový v smere hodinových ručičiek, čím sa dosahuje zlepšenie palivovej účinnosti). V dôsledku zvýšenej teploty je nutné v kompresorovej časti motora používať materiály s vysokou pevnosťou pri zvýšenej teplote [4]. Stlačený vzduch ďalej putuje do spaľovacej komory, kde dochádza k vstreku paliva, ktoré sa zmieša so stlačeným vzduchom a následne sa celá zmes zapáli. Horúcim spalinám je dovolená expanzia cez turbínu. V prípade prúdového motora potom vzniká zo zmeny hybnosti spojenej so zrýchľovaním týchto spalín ťah motora. Turbína taktiež odoberá mechanickú prácu, potrebnú pre pohon kompresora [1]. Teplota v spaľovacej komore môže presahovať 1000°C a teploty pôsobiace na lopatky turbín sa môžu v najnovších motoroch vyšplhať až na 1500°C, takže táto časť musí byť vyrobená zo zliatín odolných voči takto extrémne vysokým teplotám [4]. Pevnosť pri vysokých teplotách je tu najdôležitejším aspektom, ktorému ostatné požiadavky, ako nízka cena a hustota, ustupujú. Pre účinnosť motora je veľmi dôležitá hodnota vstupnej teploty turbíny (ang. *Turbine entry temperature*, skrátene TET). Je to teplota horúcich plynov vstupujúcich do turbíny a čím je TET vyššia, tým je vyšší aj výkon/účinnosť motora. Z tohto

dôvodu prevláda v posledných desaťročiach tendencia TET neustále zvyšovať, čo má za nevyhnutný následok zvyšovanie požiadaviek kladených na materiály lopatiek turbín. (Výsledkom tejto snahy je zvýšenie TET o približne 700°C od roku 1940). TET nie je počas celého letu konštantná, najvyššia je pri vzlietnutí a stúpaní na letovú výšku [1].

1.2 Základné princípy výberu materiálov

Letecký priemysel sa vyznačuje značným výberom lietadiel, ktoré sa líšia najmä dizajnom, veľkosťou a účelom. Tie sú spojené s potrebami spotrebiteľov a s ich ekonomickou situáciou. Z tohto hľadiska možno tento segment rozdeliť do štyroch špecifických skupín: ľahké lietadlá, bizjety (alebo biznis lietadlá), civilné lietadlá a vojenské lietadlá. Požiadavky spojené s materiálmi používanými na konštrukciu ľahkých lietadiel (napr. Cessna) nie sú také vysoké, pričom asi najdôležitejším faktorom je ich nízka cena. V prípade obchodných lietadiel (napr. HAWKER Beechcraft Premiér e. g.) materiálové náklady nie sú také významné, a preto sa tu možno stretnúť s kvalitnejšími, aj keď drahšími materiálmi. Pre civilné lietadlá (napr. Boeing 747) by cena mala byť minimálna, ako aj ich hmotnosť. Avšak otázka bezpečnosti je nesmierne dôležitá a nemožno ju prehliadať. A napokon, posledná kategória zahŕňa vojenské lietadlá (napr. Boeing F/A 18). Pracovné podmienky pre tieto lietadlá sú špecifické, a preto materiály použité na ich výrobu musia byť najvyššej kvality. Na telo lietadla sa tu napríklad používajú kompozitné materiály [7].

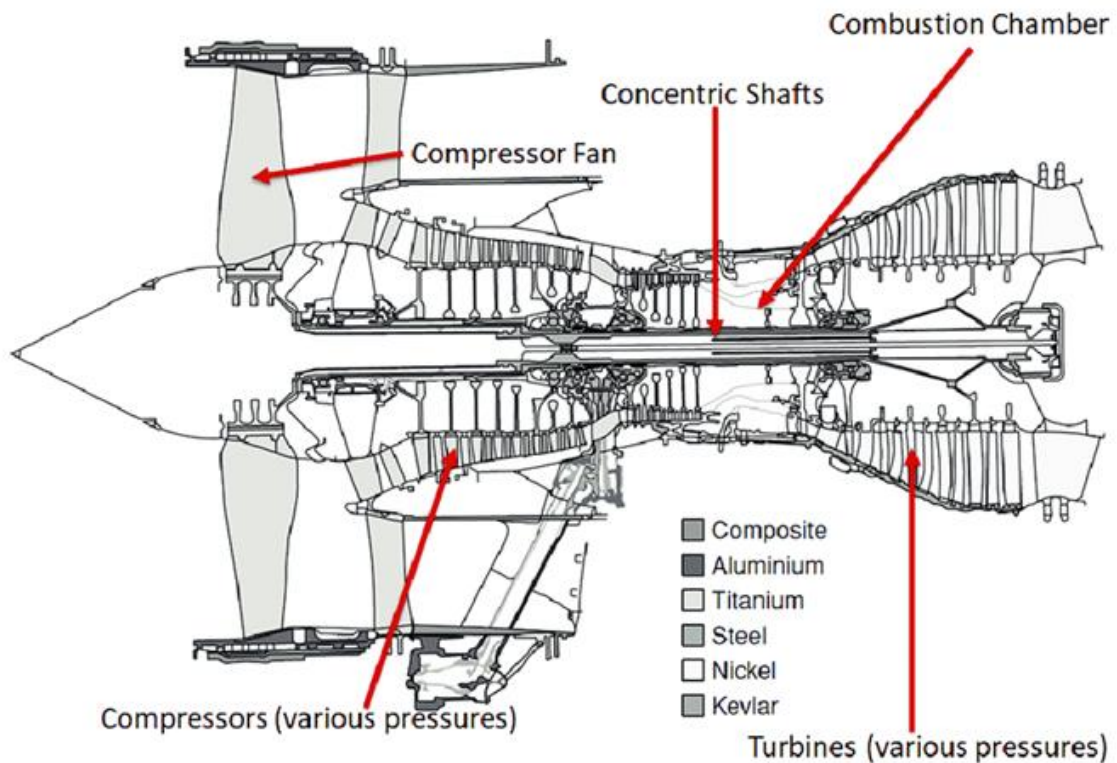
Výber materiálu je pomerne zložitý proces, ktorý sa do značnej miery riadi odpoveďou na otázku „čo je štandardné“ pre konkrétnu časť, čo sa ale samozrejme s časom a novými poznatkami mení a vyvíja [14]. Napríklad veľké konštrukčné časti motora sa pred päťdesiatimi rokmi vyrábali takmer výlučne spôsobom spájania veľkého množstva malých kusov z tvarovaného materiálu (plechový materiál, výkovky). Tie sa spájali najskôr nitovaním, ale neskôr oblúkovým zvaraním v inertnom plyne. Neskôr, v osemdesiatych rokoch minulého storočia, s príchodom technológie vákuového odlievania (aj pre veľké súčasti) bolo možné produkovať tieto konštrukčné prvky s veľmi zložitou geometriou a s dobrou kvalitou ako jediný odlievaný kus. Táto technológia sa dnes používa takmer výlučne na titánové štruktúry na prednej strane, tj. v studenej časti, ako aj pre superzliatinové štruktúry na zadnej strane, tj. v horúcej časti [5]. Každá nová technológia má určité nevýhody a v tomto prípade je nevýhodou zvýšená hmotnosť takto vyrábaných súčastí. Odlievaný materiál má totiž v porovnaní s rovnakým kovaným materiálom horšie mechanické vlastnosti (možno s výnimkou tečenia pri vysokej teplote a rastu trhlín), preto sa na kompenzáciu tieto súčastky vyrábajú s väčšími rozmermi – s mohutnejšími stenami, čo má za nevyhnutný následok zvýšenie ich hmotnosti. Dôležitejšia je však aj nutnosť veľkej investície potrebnej pre príslušnú technológiu, nakoľko náklady na odlievanie vo vákuu sa veľmi rýchlo zvyšujú s rastúcimi rozmermi súčastí (Göran Sjöberg v danom článku [5] odhaduje, že by mohlo ísť o približne kvadratickú závislosť). S obmedzeným počtom veľkých leteckých motorov používajúcich takéto diely existuje len málo dielov na amortizáciu investície, preto nie je v tomto odvetví priestor pre mnohých dodávateľov. Preto v súčasnosti vidíme opačný trend, ktorým je návrat k výrobe zvaraním menších kusov dohromady. Týmto (s výnimkou oslobodenia od situácie s nedostatkom dodávateľov) sa zavádza flexibilita, ktorá umožňuje zmiešať vysoko pevný kovaný materiál s malými odlievanými dielmi, ktoré sa majú použiť v miestach so zložitou geometriou. V podstate to umožňuje výrobu súčastok s optimalizovaným pomerom hmotnosti a nákladov. Tento proces je taktiež výhodný z hľadiska doby prípravy [5].

1.3 Prehľad bežne používaných materiálov

Na lopatky ventilátora sa používa prevažne hliník, titán a nehrdzavejúca oceľ. Taktiež je ale možné stretnúť sa s kompozitnými materiálmi, napr. v motore GENx sú lopatky ventilátora zložené z kompozitného plastu, vystuženého uhlíkovými vláknami (Composite fiber reinforced plastic alebo v skratke CFRP), čepele a titánová nábežná hrana je zo zliatiny Ti-6Al-4V. Tá sa tu vyskytuje z dôvodu zlepšenia odolnosti voči poškodeniam vplyvom nárazov (pri zrážkach s vtákmi) [4]. Výskum sa pri týchto materiáloch (hlavne zliatiny hliníka) zamerlal na neustále znižovanie ich hustoty a zlepšenie mechanických vlastností, ako aj odolnosti voči korózii [7]. Vzduch, ktorý letecký motor nasáva, často obsahuje soli (pri lete nad morom), letecké palivo má taktiež nežiadúce účinky z hľadiska korózie materiálov, ktoré s ním prichádzajú do styku (to platí pre horúcu časť motora).

V kompresorovej časti je vplyvom stlačovania vzduchu zvýšená teplota, jej hodnoty však nie sú príliš vysoké – maximálne dosahujú 550°C, avšak vo väčšine prípadov sa teplota v studenej časti leteckého motora pohybuje okolo 200°C. Tam, kde hliníkové zliatiny už nedosahujú potrebnú pevnosť, odolnosť voči korózii alebo vysokej pracovnej teplote, nahradzujú ich zliatiny titánu. Hlavnou snahou pri ich vývoji je zvýšiť ich pracovnú teplotu [7], napr. v motore GENx sú lopatky nízkotlakového kompresora a niekoľko lopatiek vysokotlakového kompresora vyrobené zo zliatiny Ti-6Al-4V, ktorá sa používa aj na lopatky ventilátora, zvyšné lopatky vysokotlakového kompresora sú vyrobené zo superzliatín na báze Ni, ako je napríklad Hastelloy X. V posledných rokoch sa Ti-zliatiny začali používať pre sekciu vysokotlakového kompresora s cieľom znížiť hmotnosť [4].

V spaľovacej a turbínovej časti dosahujú teploty extrémne hodnoty (1000 – 1500°C), čomu nie sú bežné materiály schopné odolávať. Sú tu potrebné vysokoteplotné materiály, t.j. zliatiny odolné voči veľmi vysokým teplotám, pričom najčastejšie sa používajú superzliatiny na báze niklu a kobaltu. Tie totiž majú excelentnú pevnosť pri tečení a odolnosť voči extrémnym teplotám. Teploty, pôsobiace na lopatky turbín, však môžu byť až také vysoké, že ani tieto materiály nestačia. Tu prichádzajú na rad keramické povlaky izolujúce superzliatinu od okolia (na zaručenie tepelnej izolácie, ale aj ochrany voči oxidácii), ako aj chladiace kanály v lopatkách či úprava metalurgickým technik a výroba jednozrnných lopatiek [4]. V tejto oblasti boli predstavené zliatiny titánu blízke typu α so zlepšenými schopnosťami fungovania za zvýšených teplôt. Sľubne sa taktiež javia aluminidy titánu. Pri teplotách okolo 800°C majú tieto intermetaliky potenciál čiastočne nahradiť superzliatiny na báze Ni [7].



Obr. 2 – Materiály použité v rôznych častiach leteckého motoru [13].

Na obr. 2 sú znázornené rôzne materiály použité v rôznych častiach leteckého motoru Trent 800. Typy materiálov sú v súlade s vyššie spomenutými princípmi a všeobecnými normami. Na ventilátor a kompresorovú časť sú použité titánové zliatiny, ktoré sú volené pre ich dobrú odolnosť voči únave, pevnosti a nízkej hustote. V spaľovacej komore a v turbínovej časti sú zase použité takmer výhradne superzliatiny na báze niklu, taktiež sú použité v koncovej (vysokotlakovej) časti kompresora [1].

Táto práca je zameraná na materiály slúžiace na výrobu lopatiek turbín v leteckých motoroch, preto pokladám za dôležité spresniť podmienky, ktorým čelia špecificky lopatky. Pracovné podmienky, v ktorých fungujú vysokotlakové turbínové lopatky vo veľkých civilných turboventilátorových motoroch, ako napríklad Rolls-Royce Trent 800 alebo General Electric GE90, sú veľmi náročné. Teploty prúdu plynov sa tu pohybujú okolo 1480°C, čo je nad hodnotou teploty tavenia superzliatín, z ktorých sú lopatky vyrobené. Od každej rady lopatiek je očakávaná životnosť aspoň tri roky za predpokladu, že pracujú v priemere po dobu deviatich hodín denne. To je ekvivalent asi ôsmich miliónov kilometrov letu. Lopatky sa otáčajú s uhlovou rýchlosťou väčšou ako 10 000 otáčok za minútu (takže rýchlosť koncov lopatiek prevyšuje 330m/s). Napätie pôsobiace v lopatkách, spôsobené prevažne odstredivými silami, je preto značné.

Prikladám jednoduchý výpočet, ktorým je možné získať približnú hodnotu napätia.

Použitím vzorca: $\int_{r_{root}}^{r_{tip}} \rho \omega^2 r dr$, kde ρ je hustota turbínovej lopatky, radiálne polohy sú označené pomocou: r_{tip} označuje vrchol lopatky a r_{root} jej päť, pričom integrujeme po celej jej dĺžke a ω zase predstavuje uhlovú rýchlosť otáčania lopatiek, ak počítame s hustotou lopatky cca 9000 kg/m³, s dĺžkou lopatky 10 cm a priemerným lopatkovým rádiusom 50 cm, vyjde, že

napätie pôsobiace v päte lopatky je približne 180 MPa. Skutočná hodnota však bude ešte vyššia, pretože na lopatkách je aplikovaný ochranný povrch a náter, ktoré zvyšujú ich hmotnosť. [1]. Z týchto hodnôt, aj keď len názorných a približných, je jasné, že nároky kladené na materiály, z ktorých sú tieto lopatky vyrobené, sú extrémne. Aby bolo vôbec možné ich vyrobiť, bolo nutné vyvinúť novú skupinu vysokoteplotných materiálov – superzliatiny.

2 Studená časť

2.1 Podmienky a základný prehľad materiálov v studenej časti

Ako už bolo spomenuté, teploty v studenej časti sa pohybujú väčšinou okolo 200°C. Takéto mierne teploty znamenajú, že tu môžu byť použité bežné materiály (tj. nie nutne vysokoteplotné materiály), ako sú zliatiny na báze hliníka, titánu, ocele alebo plast vystužený uhlíkovými vláknami. Dôležitými vlastnosťami sú špecifická pevnosť, tj. pevnosť, ktorá sa vzťahuje na hustotu materiálu, resp. na hmotnosť danej súčasti, ako aj špecifická tuhosť alebo modul pružnosti [13].

Nasleduje rozbor týchto špecifických materiálov, počnúc kompozitnými materiálmi vystuženými pomocou uhlíkových vlákien s polymérou matricou (napr. sa používa epoxid), často označované ako materiál PMC (polymer matrix composite) alebo CFRP (carbon fibre reinforced polymer). V porovnaní so všetkými ostatnými materiálmi má tento materiál veľmi vysokú špecifickú pevnosť, najmä vďaka sile uhlíkových vlákien a celkovej nízkej hustote. Vďaka tomu je jeho použitie lákavé aj napriek náročným výzvam pri navrhovaní a pri výrobe lopatiek. Ďalší dôležitý parameter predstavuje tuhosť, ktorú majú tieto materiály taktiež veľmi vysokú vďaka vysokému Youngovmu modulu uhlíkových vlákien [5].

Druhou najlepšou voľbou pre nízkoteplotné aplikácie, akými sú lopatky ventilátora, sú zliatiny na báze titánu. Majú dobrú špecifickú pevnosť, ako aj odolnosť za zvýšených teplôt, ktorá je výhodná v prípade, že sa teploty vplyvom kompresie vyšplhajú z bežných 200°C až na 500°C. Čo sa hliníkových zliatin týka, zriedka sa používajú v prípadoch, kde je hlavným problémom pevnosť. Dôvodom pre ich použitie je prevažne ich nízka hustota a dobrá odolnosť voči oxidácii. Ich ďalším obmedzením je ich neschopnosť fungovať za vysokých teplôt. Oceľ má síce dobrú pevnosť, no má vysokú hustotu a postupom času sa dostáva stále viac a viac do úzadia [5].

Špecifické pevnosti a tuhosti, ako aj ich hodnoty pri zvýšených teplotách sú dôležitými faktormi, avšak nesmie sa zabúdať aj na cenu týchto materiálov, ktorá je často rozhodujúca. Lopatky z ocele a hliníkových zliatin budú pomerne lacné, lopatky z titánových zliatin budú vo väčšine prípadov o čosi drahšie, avšak zvýšenie ceny nie je príliš dramatické [13]. Lopatky z CFRP sú však v porovnaní s ostatnými možnosťami výrazne drahšie, preto sa s nimi najčastejšie stretáme v aplikáciách, kde financie nepredstavujú problém (z mnou skôr uvedených skupín sú to najmä vojenské lietadlá).

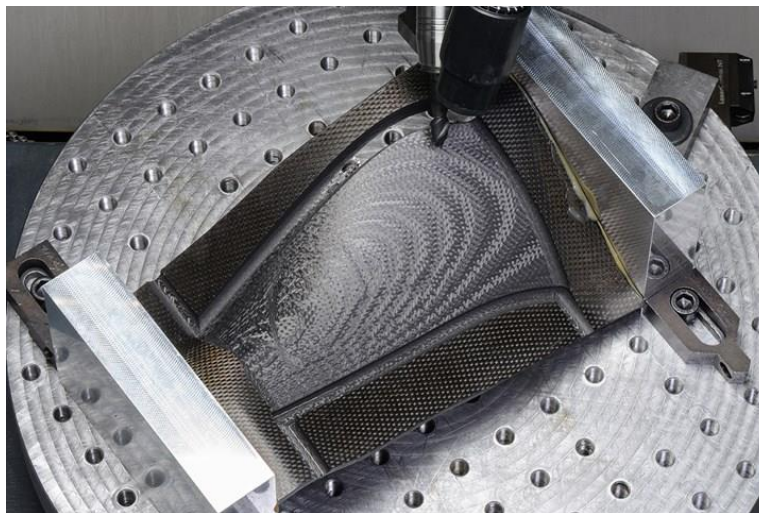
Pre úplnosť treba spomenúť aj zliatiny horčíka. Tie majú atraktívne nízku hustotu, avšak pevnosť a modul pružnosti sú príliš nízke a teplotné obmedzenia sú ešte prísnejšie ako u hliníkových zliatin. Predovšetkým je tu však problém galvanickej korózie, ktorý je veľmi ťažké (aj keď to nie je nemožné) zohľadniť pri návrhu. Existuje aj nebezpečenstvo požiaru a na základe týchto negatív sa horčíkové zliatiny používajú na konštrukcie leteckých motorov len veľmi zriedkavo. Pri vyšších teplotách pevnosť epoxidovej polymérnej matrice v CFRP rýchlo klesá a zliatiny na báze hliníka si tu nedokážu udržať potrebné pevnostné vlastnosti, takže zliatiny titánu tu nemajú konkurenciu [5].

V nasledujúcej časti sa pokúsím podať detailnejší opis najpoužívanejších typov týchto materiálov, avšak popis bude stále stručný, nakoľko studená časť leteckých motorov nepredstavuje v porovnaní s horúcou časťou z materiálového hľadiska výrazný problém.

2.2 Plast spevnený uhlíkovými vláknami - CFRP

Ako už bolo spomenuté v úvode, plast vystužený uhlíkovými vláknami má výhodu oproti iným materiálom pri teplote nižšej ako 200 °C (teplotné obmedzenie kvôli epoxidovému typu matrice). Existujú ďalšie tepelne odolnejšie polyimidové systémy, najmä bismaleimidy, ktoré boli úspešne vyskúšané, ale niekoľko problémov súvisiacich s výrobou, v neposlednom rade vrátane toxicity týchto systémov, v súčasnosti znemožňuje ich komerčné použitie vo veľkom meradle. Pevnosť CFRP pochádza iba z vlákien, ktoré sú „zlepené“ polymérovou matricou a čím vyšší je obsah vlákna (ten je charakterizovaný pomocou faktoru plnenia), tým vyšší je potenciál pevnosti kompozitu. V leteckých aplikáciách sú jedinými vláknami, ktoré sú predmetom záujmu, uhlíkové vlákna. Tých však existuje mnoho rôznych typov, ktoré sa vyznačujú rôznou pevnosťou a modulom pružnosti, ktoré sú však všetky v porovnaní s kovovými materiálmi veľmi vysoké. Zarovnaním vlákien, ktoré sa zvyčajne dodávajú vo zväzkoch, je možné dosiahnuť oveľa väčšie faktory plnenia, ako keby boli vlákna orientované náhodne. Pretože sila sa prenáša len pozdĺž vlákien, a keďže sú zarovnané, je tento kompozit pevný len v jednom smere a aj to hlavne v smere zaťaženia ťahom. To vytvára určité obmedzenia návrhu konštrukcie [4].

V zásade existujú dva spôsoby výroby. Jedným z nich je použitie „predimpregnovaných laminátov“, tj. plátov s uhlíkovými vláknami už impregnovanými polymérovou matricou a pripravených na zostavenie akéhokoľvek dielu skladaním vyrezaných tvarov, po ktorom nasleduje cyklus vytvrdzovania teplom v autokláve. Ďalším spôsobom výroby je použitie prefabrikátov plátenného typu bez živice vo forme, ktorá sa po uzavretí vakuuje a impregnuje polymérom a neskôr vytvrdzuje pri zvýšenej teplote. Z hľadiska konštrukcie platí, že jednoduché tvary – či už kruhové či pozdĺžne, môžu byť ľahko navrhnuté a využívajú plný potenciál materiálu CFRP, ale v akejkoľvek zložitej geometrii je tento potenciál značne znížený [5]. Na obr. 3 je možné vidieť lopatku kompresoru vyrobenú z CFRP.



Obr. 3 – Lopatka kompresoru z CFRP [13].

2.3 Zliatiny na báze hliníka

Historicky boli hliníkové zliatiny uprednostňované pred inými materiálmi pre konštrukciu studených častí leteckých motorov. Dôvodom je fakt, že hliník sa v porovnaní s oceľou veľmi

ľahko odlieva a následne sa dobre hodí na diely so zložitou geometriou, ako aj skutočnosť, že cena materiálu je oveľa nižšia ako pri lepšej alternatíve titánových zliatín [4]. Dobrá opracovateľnosť je tiež výrazným faktorom. Napriek tomu dnes hliníkové zliatiny nemajú žiadnu skutočnú výhodu, ani z hľadiska pevnosti, ani z hľadiska tuhosti, oproti alternatívnym materiálom. Hliníkové zliatiny sú v tomto ohľade v podobnej situácii ako oceľ a dostávajú sa do úzadia oproti titánu a CFRP. Zvýšenie tuhosti hliníkových zliatín je jednou z možností ako ich urobiť atraktívnejšími. To je možné dosiahnuť zavedením vláknitej výstuže (vlákna SiC) do hliníkovej matrice a tento typ materiálu je preto označený ako MMC (Metal Matrix Composites), čím sa replikuje myšlienka materiálu CFRP. Napriek týmto zlepšeniam sa však stále viac a viac dostávajú do popredia titánové zliatiny a CFRP [5].

2.4 Zliatiny na báze titánu

Vysoká špecifická pevnosť titánových zliatín v širokom rozsahu teplôt ich robí veľmi atraktívnymi pre všeobecné letecké aplikácie. Dôležitou charakteristikou materiálov na báze titánu je reverzibilná transformácia kryštálovej štruktúry z alfa (α , HCP) štruktúry na beta (β , BCC) štruktúru, keď teploty prekročia určitú úroveň. Toto alotropné správanie, ktoré závisí od typu a množstva obsahu zliatiny, umožňuje komplexné variácie v mikroštruktúre a rozmanitejšie možnosti spevnenia ako pri iných neželezných zliatinách, ako je meď alebo hliník [11]. Legovaním je možné upraviť charakter, pokiaľ ide o pomer α/β -, aby sa umožnili špeciálne vlastnosti pri spracovaní. Zliatinami zaujímavými pre letectvo a kozmonautiku sú napríklad Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (bežne nazývané Ti-17) a Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo pre vysokú pevnosť v ťažkých profiloch pri zvýšených teplotách a Ti6242 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) pre odolnosť proti tečeniu [5]. Na obr. 4 sú znázornené rôzne koncepcie lopatkových kolies zo zliatín titánu a hliníka.



Obr. 4 – Koncepcie lopatkových kolies leteckého motoru zo zliatín titánu a hliníka [16].

3 Horúca časť

3.1 Podmienky v horúcej časti

Ako už bolo spomenuté, materiály v horúcej časti musia čeliť extrémnym podmienkam. Nielen, že musia dosahovať dobrú pevnosť a čo najlepší pomer pevnosti k hustote, aby odolávali odstredivým silám, dobrú odolnosť voči únave a oxidácii, ale taktiež - a to hlavne - musia odolávať extrémnym teplotám a udržať si v týchto podmienkach všetky ostatné spomínané vlastnosti [1]. Teploty pôsobiace na lopatky turbín presahujú 1000°C, a môžu sa dokonca vyšplhať až na 1500°C, čo je (hlavne v kombinácii s vysokým napätím a oxidáciou) nezvládnuteľné pre všetky bežne používané skupiny materiálov. Až koncom 30. a začiatkom 40. rokov 20. storočia, so zavedením prúdového motora, sa začalo spoločné výskumné úsilie s cieľom vyvinúť zliatiny špeciálne na tento účel [6]. Materiálmi voľby na výrobu lopatiek turbín sú superzliatiny, ktoré patria pod tzv. vysokoteplotné materiály.

3.2 Vysokoteplotné materiály

Sú to materiály, schopné zachovať si svoje vlastnosti (predovšetkým nás zaujímajú mechanické vlastnosti) pri zvýšených teplotách. Žiadúcou vlastnosťou týchto materiálov je ich schopnosť zniesť zaťaženie aj pri teplotách blízkyh teploty tavenia. Pomer pracovnej teploty a teploty tavenia τ by mal byť aspoň približne 0,6. Napríklad superzliatina na báze niklu, pracujúca pri teplote 1000°C, v blízkosti teploty tavenia niklu, ktorá je približne 1455°C má τ 0,69 a je preto klasifikovaná ako vysokoteplotný materiál. Ďalšou vlastnosťou je značná odolnosť voči mechanickému poškodeniu počas dlhších časových období. Pre vysokoteplotné materiály je rozhodujúcim zastupiteľom tejto kategórie creep [15]. Finálnym požiadavkom je odolnosť voči náročným prevádzkovým prostrediam. Napríklad kerozín (letecký petrolej) používaný v leteckých motoroch je korozívny následkom nečistôt, ako sú draselné soli. V takýchto prípadoch vysoké teploty ešte zvýšia možnosť oxidácie [1].

3.2.1 Superzliatiny ako vysokoteplotné materiály

Pri požiadavkách na veľkú odolnosť voči statickému zaťaženiu za únavových a creepových podmienok pri vysokoteplotných aplikáciách sa ukazujú superzliatiny ako ideálna voľba. Obzvlášť to platí pri podmienkach, kde teploty presiahnu 800°C. Viz použitia, konkrétne lopatky leteckých motorov. [1]. Superzliatiny sú zliatiny na báze niklu, železa a niklu, ako aj kobaltu (poprípade aj titánu), ktoré sa používajú na aplikácie, kde pracovné teploty presiahnu cca 540°C. Superzliatiny na báze železa s niklom (ktoré sú pokračovaním technológií nehrdzavejúcich ocelí resp. žiaruvzdorných ocelí) sú kované/tvarované. Superzliatiny na báze niklu a kobaltu, ktoré sú najpoužívanejšie v aplikáciách leteckých motorov, sú prevažne odlievane (aj keď môžu byť taktiež tvarované) [3]. V prípade, že je dôležitým faktorom hmotnosť, používajú sa titánové superzliatiny, ale ich nízka odolnosť voči oxidácii obmedzuje ich aplikácie na teploty pod 700°C. Keramické materiály (ako silicon carbide a nitride) sa nepoužívajú na tieto aplikácie (turbíny a letecké motory) napriek svojej vynikajúcej odolnosti

voči oxidácii a creepu pre ich krehkosť. Avšak napríklad keramiky na báze zirkonia nachádzajú svoje využitie ako tepelne bariorový náter (thermal barrier coating), ktorý sa používa pri vysokoteplotných aplikáciách.] [1].

3.2.2 Odôvodnenie niklu ako vysokoteplotného materiálu

Ako som už spomenul v predošlom odstavci, najrozšírenejšími superzliatinami, a tým aj vysokoteplotnými materiálmi používanými v leteckých motoroch (hlavne v častiach motora vystavených extrémnym podmienkam, ako sú lopatky turbín), sú superzliatiny na báze niklu (rozšírené sú aj superzliatiny na báze kobaltu, avšak niklové prevládajú). V tomto odstavci sa preto pokúsím opísať, prečo je nikel takým vhodným materiálom na vysokoteplotné aplikácie.

Nikel je chemický prvok so značkou Ni a atómovým číslom 28. Patrí do skupiny tranzitných kovov a je tvrdý a kujný. Je to strieborno-biely kov s vysokým leskom. Je stály na vzduchu a inertný voči oxidácii. Taktiež je magnetický – je to jeden z piatich feromagnetických elementov. Má hustotu (pri 20 °C) 8908 kg/m³ a teplotu topenia 1454,85 °C, čo zároveň predstavuje absolútny limit teplotných schopností niklových superzliatin. (Youngov modul 200 GPa, Poissonovo číslo 0,31).

Má FCC (face centered cubic, tj. kubickú plošne stredenu) mriežku, a túto alotropickú modifikáciu si udržiava v celom rozsahu teplôt. To je výhodné, nakoľko alotropické premeny spôsobujú skokové zmeny objemu materiálu, čo je nepriaznivé pre vysokoteplotné materiály [1]. Vďaka svojej FCC štruktúre je nikel pevný a zároveň tvárny (húževnatý), čo je spôsobené značnou kohéznou energiou vznikajúcou väzbou, ktorú zabezpečujú vonkajšie d-elektróny. Ďalšou pozitívnou vlastnosťou FCC kovov je ich nízka miera difuzivity (spôsobená tesným usporiadaním atómov v FCC mriežke, čím nemajú difundujúce prvky dostatok miesta pre pohyb), čo zaručuje vysokú mikroštruktúrnú stabilitu za vyšších teplôt. (U čistých kovov môžeme pozorovať koreláciu medzi aktivačnou energiou samodifúzie a creepu. Z toho dôvodu si nízka miera teplotne aktivovaného creepu vyžaduje nízku mieru difuzivity). Z hľadiska kryštalickej mriežky majú podobné vlastnosti aj iné materiály zo skupiny prechodných kovov, tie však patria medzi kovy platinovej skupiny (platinum group metals alebo PGMs) a sú preto veľmi drahé a majú veľmi vysokú hustotu. Ostatné materiály, ktoré majú požadované vlastnosti – z HCP (hexagonal closely packed, tj. hexagonálne tesne usporiadaná mriežka) materiálov je jediným prijateľným kandidátom (na báze hustoty a ceny) kobalt (Re a Ru patria medzi PGMs a sú preto príliš drahé, Os má jedovaté oxidy a Tc je rádioaktívny). Superzliatiny na báze kobaltu sú používané na vysokoteplotné aplikácie, avšak ich cena je vyššia ako cena niklových superzliatin, preto zostávajú v úzadí [1]. (Pokiaľ ide o Clarkovo číslo, ktoré zobrazuje obsah chemických prvkov (hmotnostné percentá, hm. %) v povrchu zeme, obsah niklu je podstatne vyšší ako obsah kobaltu, menovite vzácnosť niklu je v tomto ohľade nízka.) [6]. Pre materiály s BCC (body centered cubic, tj. kubická telovo stredená) mriežkou, ako napríklad Cr, platí, že majú tendenciu byť krehké a nastáva u nich tranzit - tvárnosť/krehkosť, čo spôsobuje, že ich pevnosť sa so zvyšujúcimi teplotami výrazne znižuje.

V zhrnutí, superzliatiny na báze niklu (avšak so značným množstvom legujúcich prvkov, často viac ako desať) sa ukázali ako preferovaná voľba pre vysokoteplotné aplikácie, ako sú lopatky turbín v horúcej časti leteckých motorov. Majú výraznú odolnosť voči creepu, únave a odolávajú náročným prevádzkovým prostrediam (sú odolné voči korózii/oxidácii). Prieskum tečenia dostupných technických materiálov potvrdzuje nadradenosť superzliatin pre vysokoteplotné aplikácie. Použitie niklu ako rozpúšťadla pre tieto materiály môže byť

odôvodnené jeho FCC kryštálovou štruktúrou, jeho miernymi nákladmi a nízkymi rýchlosťami tepelne aktivovaných procesov, ako aj prijateľnou hustotou. Ich metalurgický vývoj je úzko spätý s vývojom leteckých motorov, pre ktoré boli prvé superzliatiny vyvinuté (aj keď v dnešnej dobe nachádzajú uplatnenie aj v iných oblastiach – prevažne v turbínach slúžiacich na generáciu energie v elektrárňach). Motív pre ich ďalšie zlepšovanie (primárne prostredníctvom schopností zlievania a vývoja spracovania) nachádzame v zlepšení palivovej účinnosti (lepší výkon dosiahnutý pri vyšších rozdieloch teplôt v tepelných strojoch) a následným šetrením-finančným i environmentálnym. Riziko zlyhania vplyvom rozlomenia alebo únavy a možné katastrofické následky takýchto zlyhaní si vyžadujú výrobu súčastí najvyššej možnej kvality a kontroly pri prebiehajúcej operácii [1].

4 Niklové superzliatiny

Sú modifikáciou niklových zliatin, upravených pre možnosť používania pri extrémne vysokých teplotách (prevyšujúcich 1000°C, na istých miestach presahujúcich 1200°C) [16]. Sú to austenitické zliatiny spevnené disperzným vylučovaním fáze γ' . Základnou bázou sú prvky Ni a Cr za spolupôsobenia ochranného povlaku oxidu chrómu. Ďalšie zliatinové prvky ktoré sa používajú pre zlepšenie požadovaných vlastností niklových superzliatín sú Al, Ti, Co, W, V, Nb, Ta, B, Zr, Mg, Mo [2]. Požiadavky na niklové superzliatiny sú predovšetkým: žiaruvzdornosť, požadovaná hodnota medze pevnosti a klzu pri tečení, odolnosť voči oxidácii a creepu. (Prvá superzliatina na báze niklu je zliatina TD niklu, tj. nikel spolu s prísadou Tória (precipitát fáze ThO₂ intenzívne spevňuje tuhý roztok niklu)). [2].

4.1 Kompozícia mikroštruktúry niklových superzliatín

Základom je nikel, môžeme však vidieť, že obsahujú veľké množstvo prímesových prvkov (často viac ako 10), čo z nich robí jedny z najkomplexnejších používaných materiálov [1]. Medzi legujúce prvky patria napríklad: Cr, Al, Ti, Co, W, V, Nb, Ta, B, Zr, Mg, Mo... [2]. Napriek veľkej rozmanitosti používaných prímesových materiálov platia isté základné zásady [1]. V závislosti na chemickom zložení, spôsobe výroby a tepelného spracovania sa štruktúra niklových superzliatín skladá z matrice a sekundárnych fáz:

Fáza γ – tvorí austenitickú maticu - má FCC mriežku. Z prímesových prvkov obsahuje prevažne Co, Cr, Mo, Re a Rt. V matici sú rozpustené sekundárne fázy prevažne vo forme precipitátov. Sú to:

Karbidické fázy - (MC, M₂₃C₆, M₇C₃, M₆C), vyskytujúce sa prevažne po hraniciach zŕn matrice (γ). Karbidotvornými prvkami sú Cr, Mo a V. Bór je taktiež schopný tvoriť zlúčeniny – boridy, ktoré sa taktiež vyskytujú po hraniciach zŕn matrice (γ)

Fáza γ' – táto fáza tvorí primárne precipitáty, ktoré sú koherentné s maticou (γ) a sú bohaté na prvky ako Al, Ta, Ti. Má FCC mriežku a patrí sem Ni₃(Al,Ti)

Fáza γ'' – štruktúra BCT (tetragonálna priestorovo centrovaná), patrí sem Ni₃Nb

Fáza η – má hexagonálnu štruktúru (HCP), patrí sem Ni₃Ti

Fáza δ - má ortorombickú štruktúru, patrí sem NiNb

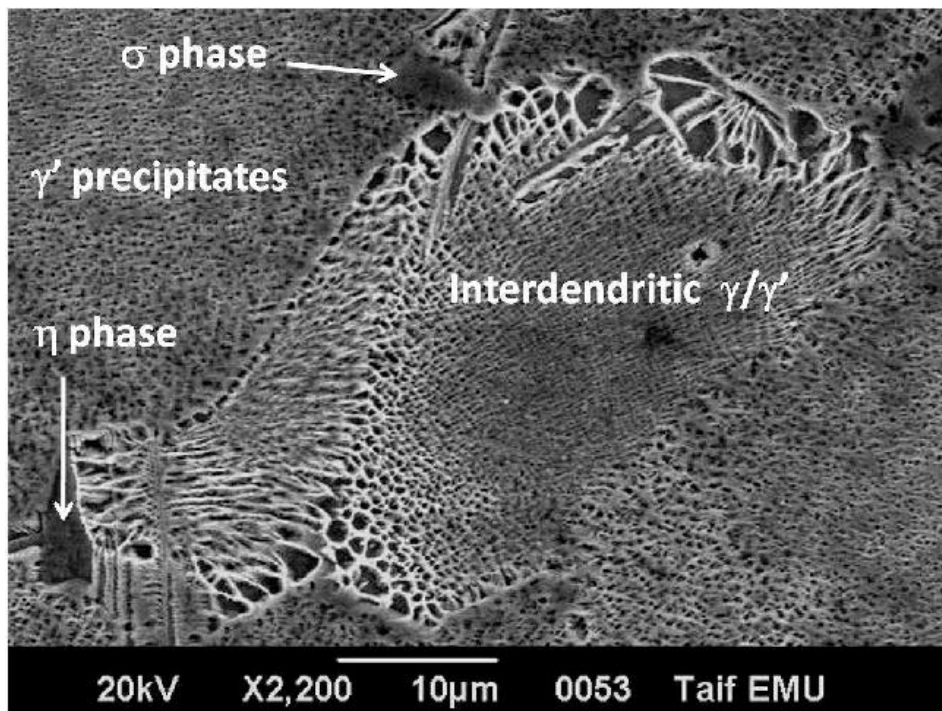
Lavesove fázy a fázy σ . [2]

Fázy γ' a γ'' sú taktiež známe ako geometricky tesne usporiadané, tj. GCP (geometrically close-packed). Je to práve úprava a vytváranie týchto fáz, ktoré dávajú superzliatinám ich špecifické vlastnosti. Fázy σ a Lavesove fázy (ako aj fázy μ) sú topologicky tesne usporiadané, tj. TCP (topologically closely-packed) [3].

Precipitáty fáz γ' a γ'' spevňujú tuhý roztok. Fázy η a δ sa prejavujú disperzným spevnením a stabilizáciou zŕn (u tvárených superzliatín v dôsledku tvorby dislokácií). Prvky B, Zr, Hf blokujú pohyb hraníc zŕn. Zloženie sa zvyčajne pohybuje v rozsahu Ni – 50-70 hm%, Cr – 15-20 hm.%, zvyšok tvoria Ti, Al, Mo, Nb, Zr, V., ktorých zastúpenie je výrazne menšie [1,2]. Na obr. 5 je zobrazená mikroštruktúra niklovej superzliatiny s označenými danými fázami.

Niektoré superzliatiny, ako napr. IN718 a IN706, obsahujú taktiež výrazné množstvo Fe a radia sa medzi niklovo-železné superzliatiny. Prvky ako Co, Fe, Cr, Mo, Re, Rt a W stabilizujú austenitickú γ fázu matrice. Prvky ako Al, Ti, a Ta majú väčší atómový priemer a napomáhajú tvoreniu usporiadaných fáz, ako napr. zlúčenine $Ni_3(Al, Ta, Ti)$, tj. fáze γ' . Prvky ako B, C a Zr majú tendenciu oddeľovať hranice zŕn fázy γ , dôsledkom svojej výrazne menšej atómovej veľkosti. Taktiež spôsobujú tvorbu karbidov a boridov [1]. Bór (teplota tavenia cca 2300 K) a zirkónium (teplota tavenia 2125 k) taktiež zvyšujú (stabilizujú) hodnotu medze pevnosti pri tečení za najvyšších pracovných teplôt. Bór taktiež podstatne znižuje súčiniteľ difúzie niklu v zliatine a brzdí pohyb dislokácií pri deformácii zliatiny. Ďalší priaznivý účinok je obsadenie vakácií na hraniciach zŕn s následným blokovaním pohybu dislokácií [2]. So znižujúcim sa obsahom Cr sa morfológia fázy γ' mení, fáza hrubne – mení sa z guľovitého tvaru na tvar kvádrový za súčasného hrubnutia. Chemické zloženie superzliatín sa riadi podľa množstva precipitátov fázy γ' – tj. výrobcovia v závislosti na použití superzliatín dosahujú až 80% štruktúry tvorené intermetalickými γ' fázami, v niektorých prípadoch je percento ešte vyššie a blíži sa až ku 100%. V závislosti na chemickom zložení a procese tepelného spracovania je možné doceliť sekundárnu precipitáciu jemnej γ' fáze. Zmeny štruktúry počas zotrvávania Ni superzliatiny na vysokej teplote 900°C – kvádrovitý tvar štruktúry sa mení na chevronový (prýmkový). Konečná fáza potvrdzuje proces sferoidizácie precipitátov, tj. prýmkový sa zabaľujú za súčasného znižovania hodnoty medze pevnosti pri tečení [2].

S dobou zotrvania zliatín na vysokej teplote, v dôsledku zaradovania zŕn do smeru namáhania, procesov prebiehajúcich po klzných plochách, po hraniciach aj v interiéri zŕn a procesov sferoidizácie za súčasného porušovania vznikom porúch typu w a r (tvorba kavít spôsobujúca znižovanie nosného prierezu) dochádza k podstatnému znižovaniu hodnôt medze napätia (klzu aj pevnosti). (Príklad z [2]: u skúšobných superzliatín došlo v priemere po 10 000 hodinách k 50% poklesu počiatkovej hodnoty napätia). [2].



Obr. 5 – Mikroštruktúra niklovej superzliatiny [3]

4.2 Spevňovanie niklových superzliatín

Základným procesom spevňovania (u niklových superzliatín) je premena γ na γ' , tj. spevňujúci proces disperzného vylúčenia fáze γ' – $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$ [2]. Tento proces pozorujeme pri zliatinách obsahujúcich titán a hliník a sú typicky kované/tvarované. Patria sem napr. Waspaloy, Astroloy, U-700 a U-720 [3]. Aby tento proces prebehol správne, je nutné dodržať presné zloženie niklovej superzliatiny. V prípade nedodržania správneho zloženia dochádza k procesom, ktoré porušujú stabilitu karbidických fáz a fáze γ' tým, že procesy pokračujú za tvorby ďalších fáz. Tieto fázy sa vylučujú v rovinách plošne centrovanej mriežky matricovej fázy γ vo forme tvrdých a krehkých fáz typu σ , η a Lavesových fáz. Tie majú za následok krehnutie superzliatín za vysokých teplôt [2]. Taktiež hodnota mriežkovej nezhody medzi fázou γ a γ' ovplyvňuje ich mechanické vlastnosti. Mriežkové parametre Ni (γ) a Ni_3Al (γ') sú veľmi podobné (rozdiel len približne 0~1%), čo pôsobí veľmi pozitívne na mechanické vlastnosti týchto superzliatín [9]. Ďalšími faktormi, prispievajúcimi k dobrým mechanickým vlastnostiam, sú aj objemový zlomok a veľkosť fázy Ni_3Al (γ'). Napríklad v porovnaní s Boeingom 777 a 747, Boeing 777 mení objemový podiel fázy Ni_3Al (γ') zo 65 % v Boeingu 747 až na 70% s cieľom dosiahnuť menšiu deformáciu pri vysokej teplote [4].

Pri niklových superzliatinách spevnených niómom je precipitátom fáza γ'' . Sú typizované ako IN-718. Zliatiny, ktoré obsahujú aj nióbob, aj titán alebo hliník, využívajú k spevňovaniu ako fázu γ' , tak aj γ'' . Zliatiny tohto typu sú napr. IN-706 a IN-909. Trieda niklových superzliatín, ktorá má spevnený tuhý roztok, je typizovaná ako Hastelloy X a IN-625. Tieto zliatiny môžu získať určité prídavné spevnenie pomocou karbidov alebo precipitáciou intermetalickými zlúčeninami.

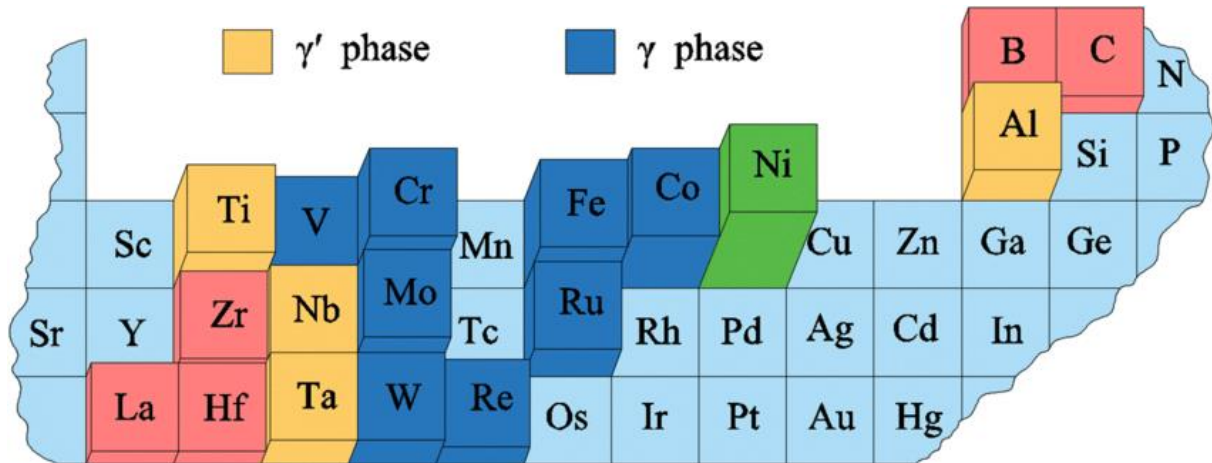
Tretou triedou niklových superzliatín je trieda spevnená disperziou oxidov (oxide-disperzia-strengthened alebo ODS). Patria sem zlúčeniny ako IN-MA-754 a IN-MA-6000E [11], ktoré sú spevnené disperziou inertných častíc, ako je ytrium, v niektorých prípadoch v kombinácii s γ' precipitáciou [3].

Niklové superzliatiny sa používajú ako v kovanej/tvarovanej, tak v odlievanej forme. Na produkciu vysoko legovaných kompozícií (ako je Rene 95, Astroloy a IN-100) v kovanej forme sa často používajú špeciálne postupy, ako je prášková metalurgia alebo izotermálne kutie. Zliatiny tvorené práškovou metalurgiou a kované, patriace do triedy ODS, a odlievané zliatiny ako MAR-M-247 majú zlepšené vlastnosti vďaka kontrole morfológie zŕn a smerovej rekryštalizácii a smerovému tuhnutiu (directional recrystallization and directional solidification) [3].

4.3 Fyzikálna metalurgia niklových superzliatín

Prvoradou požiadavkou pri superzliatinách je homogenita tuhého roztoku s potlačenou segregáciou – a to hlavne po hraniciach zŕn, nakoľko hranice zŕn sú počiatkami creepových porúch. Náchylnosť k segregácii v priebehu výroby odliatkov je možné znížiť minimalizáciou obsahu povrchovo aktívnych prvkov (Pb, Sb, Bi, S, P, Sn a ďalšie). Superzliatiny sú vyrábané v indukčných peciach pretavením vo vákuu, ktoré pôsobí priaznivo z hľadiska zvýšenej metalurgickej čistoty a odplynenia. Segregačné procesy počas tuhnutia je možné potlačiť lokálnym natavením malého objemu materiálu. Problémy hraníc zŕn sú riešené tzv. riadenou solidifikáciou (directional solidification) tj. riadenou kryštalizáciou vo vhodnej forme [2].

Lopatky prvých leteckých motorov boli vyrábané pomocou operácií vytlačania a kovania, pričom najvhodnejším spôsobom, z hľadiska mechanických vlastností, je izotermické kovanie [10]. V roku 1970 však začínalo byť jasné, že tento postup má výrazné limitácie a problémy. Lopatky boli ťažké, pretože nebolo možné ich urobiť duté, mali tendenciu praskať a dochádzalo k incipient meltingu. Z týchto dôvodov sa v dnešnej dobe lopatky vyrábajú pomocou odlievania. Táto technológia umožňuje vyrábať duté profily s komplikovanými tvarmi, často zahŕňajúcimi vnútorné chladiace prieduchy. Ďalšou výhodou je, že táto technológia umožňuje odstránenia hraníc zŕn, čo výrazne zlepšuje creepové vlastnosti. Približné zloženie niklových superzliatin je znázornené na obr. č. 6. Jednotlivé prvky sú farebne rozlíšené na základe ich účinkov na mikroštruktúru.



Obr. 6 – Zastúpenie prvkov v superzliatinách na báze niklu. Prvky sú farebne rozlíšené na základe ich účinkov na mikroštruktúru [1].

4.3.1 Investment casting a Smerové tuhnutie (directional solidification)

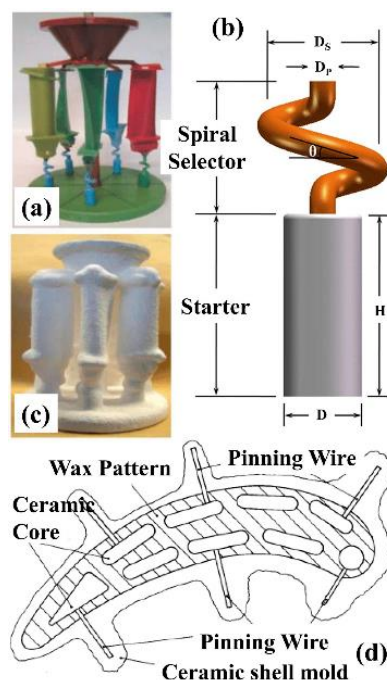
The investment casting alebo “lost wax“ je proces odlievania, ktorý možno zhrnúť v niekoľkých krokoch:

- 1.) Je pripravený voskový model odlievaného komponentu – ten sa získa vstreknutím vosku do kovovej tzv. hlavnej (master) formy. V prípade odlievania dutých komponentov, ako sú duté lopatky turbín, sa do vosku ukladá keramické jadro (ktoré je replikou chladiacich prieduchov).
- 2.) Na modeloch sa vytvorí keramická škrupina, tzv. investment shell. Tá sa získava namáčaním voskových modelov do keramických kaší, zložených z pojív a mixtúry zirkónia ($ZrSiO_4$), hliníka (Al_2O_3) a kremíka (SiO_2). Pre zvýšenú efektívnosť sa spája viacero voskových modelov a namáčanie do keramickej kaše, ako aj ďalšie procesy, sa tak aplikujú na viacero komponentov súčasne. Následne sa na komponenty pokryté tenkou vrstvou keramickej kaše nanášajú väčšie častice rovnakých keramických materiálov. Táto operácia sa opakuje niekoľkokrát – zvyčajne 3 alebo 4, až kým sa nedosiahne požadovaná hrúbka keramickej vrstvy.
- 3.) Forma sa dá do pece, dochádza k zliňovaniu keramickej vrstvy a forma nadobúda pevnosť. Na začiatku procesu je teplota nízka, len taká vysoká, ako je nutné pre roztavenie vosku vo vnútri formy, následne sa zvyšuje na hodnoty schopné zlinúť keramiku.

- 4.) Po následnom predhriatí a odplynení je do formy vo vákuu vliata superzliatina, ktorá má teplotu asi 1550°C.
- 5.) Po stuhnutí superzliatiny je forma odstránená, keramické jadro sa odstraňuje (rozleptáva) pomocou chemickej reakcie [1].

Pri prvých použitíach investment casting-u na výrobu lopatiek turbín boli rovnoosé odliatky vyrobené metódou “power down“, ktorá si však vyžadovala vypnutie pece po naliatí roztaveného kovu. Postupne sa však zistilo, že creepové vlastnosti sú výrazne lepšie, ak sú komponenty odlievajú pomocou “directional solidification“ metódy. Priekopníkmi tejto metódy boli Versnyder a jeho spolupracovníci z firmy Pratt and Whitney v rokoch 1970.

Po naliatí sa odliatok kontrolovanou rýchlosťou vyťahuje z pece (ako pri konvenčnej metóde pestovania kryštálov Bridgman). Typická rýchlosť sa pohybuje okolo niekoľkých centimetrov až desiatok centimetrov za hodinu - takže rozhranie tuhá látka-kvapalina postupuje postupne pozdĺž odliatku, začínajúc od jeho základne. To má za následok vytváranie veľkých stĺpcových zŕn, ktoré sú predĺžené v smere sťahovania, takže chýbajú priečne hranice zŕn [1]. V určitých variantách tohto procesu sú dokonca hranice zŕn odstránené úplne. To je typicky dosiahnuté pomocou tzv. selektoru zŕn (grain selector), ktorý sa nachádza na samom dne (základni) voskovej formy. Má typicky špirálovitý tvar a jeho prierez nie je omnoho väčší ako prierezová plocha jedného zrna. Následkom toho sa do dutiny odliatku dostane len jediné zrnó, ktoré následne rastie a odliatok je následkom toho monokryštalický. Týmto spôsobom je možné odlievať lopatky turbín s komplikovanými chladiacimi kanálmi. Samotné tvary/vzory chladiacich kanálov sa (aj za pomoci výpočtovej a modelovacej techniky) výrazne zlepšili. Vďaka týmto zlepšeniam sa podarilo zvýšiť TET typických veľkých turboventilátorových motorov o asi 250°C. Dôvodom snahy o tvorbu stĺpcových zŕn, poprípade monokryštalických štruktúr je fakt, že pri creepe predstavujú hranice zŕn slabiny [3]. Na obr. č. 7 je znázornená forma a modely lopatiek pri odlievaní metódou investment castingu. Na časti (a) možno vidieť lopatky s tzv. grain selektormi, na časti (b) je znázornený tvar selektoru zŕn a na časti (c) je viditeľná keramická forma investment castingu (lost wax).



Obr. 7 – Forma a modely lopatiek pri odlievaní metódou investment castingu [1].

4.4 Formy zaťaženia monokryštalických lopatiek

Najdôležitejšie formy zaťaženia sú creep a únavové zaťaženie. Lopatky sú prevažne vystavované axiálnemu zaťaženiu, preto bude hodnotenie ich mechanických vlastností v tejto časti vzťahnuté práve na axiálne zaťaženie. Os napätia/zaťaženia má kryštalografický smer $\langle 001 \rangle$ [1].

4.4.1 Creep

Za normálnych teplôt sa pevnosť materiálov meria prevažne z krátkodobého hľadiska hodnotami, ako je medza klzu či pevnosti. Za zvýšených teplôt – prevažne, keď teploty presiahnu 50% hodnoty teploty tavenia tj. $\tau = 0,5$ – sa musí pri meraniach pevnosti zohľadňovať čas, počas ktorého na materiál pôsobilo zaťaženie. V prípade, že je kov podrobený zaťaženiu, ktoré je výrazne nižšie, ako je jeho medza klzu, avšak ku zaťaženiu dochádza pri vysokých teplotách, začne sa postupne materiál deformovať a môže prísť až k jeho porušeniu [8]. Časovo závislá plastická deformácia, ku ktorej dochádza pri zvýšených teplotách, je nazývaná creep (tj. tečenie) [3]. Ak sa chceme vyhnúť výraznému creepu, je nutné rozumne ohraničiť napätia a teploty, ktorým bude komponenta čeliť [1]. Pre lopatky turbín leteckých motorov je to obzvlášť dôležité, nakoľko sú vyrábané s pomerne malými toleranciami a lopatky sa nemôžu predĺžiť o výraznú mieru bez ich kolízie s telom turbíny.

4.4.2 Únava

Je to degradácia materiálu cyklickým namáhaním súčiastky mechanickým zaťažením, ktoré, ak je rozkmit amplitúdy napätia väčší ako medza únavy, vedie k iniciácii trhliny, jej šíreniu a nakoniec k lomu, ktorý má zväčša krehký charakter. Medza únavy je (taktiež ako pri creepe) nižšia ako medza klzu, a preto je nutné pri testovaní materiálov zohľadňovať čas, počas ktorého bola súčasť vystavená cyklickému zaťažovaniu. Únavu je možné rozdeliť na dve základné časti – nízkocyklovú, ku ktorej dochádza pri menej ako 10^5 cykloch, a vysokocyklovú, kedy je množstvo cyklov vyššie, typicky vyššie ako 10^6 .

4.4.3 Vlastnosti superzliatin z hľadiska únavy

Ako už bolo spomenuté, monokryštalické superzliatiny používané na lopatky sú podrobované cyklickému zaťažovaniu, čo vedie k únavovým porušeniam aj pri napätiach nižších, ako je medza klzu, t.j. pri napätiach, ktoré sa pri statickom zaťažovaní prejavujú elasticky. Dôvodom je, že plastická deformácia sa tu vyskytuje vo veľmi lokalizovanej forme, typicky na miestach, kde dochádza ku koncentrácii napätia. Toto únavové porušenie je najčastejšie vo forme intenzívnych, lokalizovaných sklzov s dislokačnou aktivitou obmedzenou na malé množstvo mriežkových rovín. Tento fenomén sa často nazýva cyklická sklzová lokalizácia (cyclic slip localisation). Obzvlášť pri teplotách okolo 700°C a pri vysokých napätiach je podporovaná formácia “vytrvalých sklzových pásov“ (persistent slip bands alebo PSB), ktoré prestrihávajú/režú γ' častice. Vznik/iniciácia únavy je na miestach koncentrácie napätia, ako sú póry po odlievaní či ryhy po obrábaní (machining marks). Pri vyšších teplotách a nižších

napätíach je dislokačná aktivita obmedzená na γ a cyklická sklzová lokalizácia je menej intenzívna – deformácia je viac homogénna, avšak stále je limitovaná na najviac zaťažené roviny $\langle 111 \rangle$. V týchto podmienkach dochádza k iniciácii únavy na povrchových trhlinkách a dierach (pits and cracks). Životnosť sa preto výrazne zvýši, ak sú použité ochranné povlaky, ako napr. aluminidy [1].

Nízkocyklová únava – je tu veľmi dôležitý smer zaťaženia vzhľadom ku kryštalografickej orientácii. Zo štandardného kryštalografického “trojuholníka“ $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ a $\langle 111 \rangle$, sa prejavuje ako najpriaznivejšia orientácia $\langle 001 \rangle$, zatiaľ čo orientácia $\langle 111 \rangle$ sa javí ako najhoršia.

Vysokocyklová únava – prirodzené rezonančné vibračné frekvencie monokryštalických lopatiek turbín sú v rozmedzí od niekoľkých po niekoľko mnoho tisíc hertzov. V dôsledku turbulentného prúdenia a excitácie týchto frekvencií dochádza k vysokocyklovej únave (high cycle fatigue HCF). HCP zaťaženie je pridané ku “statickému zaťaženiu“ od odstredivých síl. Z dát získaných od *Wright and co-workers* vyplýva, že pri vysokých R-pomeroch je kolaps pozdĺž jedinej línie definovaný creepovými schopnosťami. Z toho vyplýva, že v tomto prípade je životnosť nezávislá od striedavého zaťaženia a dominantným módom zaťaženia je creep. Naproti tomu, pri nízkych R-pomeroch je únava dôležitým módom zaťažovania a cyklické zaťažovanie výrazne vplýva na životnosť. [1].

4.5 Ďalšie základné typy superzliatín

Keďže niklové superzliatiny sú najrozšírenejšie a najviac používané, venoval som ich rozboru najväčšiu pozornosť. V tejto časti by som sa chcel stručne vyjadriť aj ku zvyšným kategóriám superzliatín – na báze železo-niklu a kobaltu [3].

4.5.1 Železo-niklové superzliatiny

Tieto superzliatiny majú maticu tvorenú ako niklom, tak aj železom. Obsah týchto prvkov určuje ich kategorizáciu. V prípade, že je obsah niklu prevládajúci, môžu byť označené ako niklovo-železné superzliatiny (resp. len niklové superzliatiny). Najdôležitejšou triedou týchto superzliatín predstavujú zliatiny, ktoré sú spevnené intermetalickou precipitáciou zlúčenín v FCC matici. Najbežnejším precipitátom je γ' , typizovaný ako A-286, V-57 alebo Incoly 901. Iné železo-niklové superzliatiny pozostávajú z modifikovanej nehrdzavejúcej ocele, primárne spevnenej vytvrdzovaním tuhého roztoku. Zliatiny v tejto kategórii sa líšia od 19-9DL, čo je nehrdzavejúca oceľ 18-8 s jemnými úpravami množstva chrómu a niklu a s pridanými vytvrdzovadlami roztoku, ako aj s vyšším obsahom uhlíka, až po zliatiny ako Incoloy 800H, ktorá obsahuje veľké množstvo niklu, asi 20% chrómu a prímеси titánu a hliníka, ktoré produkujú γ' fázu. V súčasnosti sa železo-niklové superzliatiny vždy používajú ako kované [3].

4.5.2 Kobaltové superzliatiny

Tieto superzliatiny sú vždy vytvrdzované kombináciou karbidov a vytvrdzovadlami tuhého roztoku – nakoľko sa u nich nestretávame s γ' ani γ'' fázami. Neboli u nich nájdené žiadne intermetalické zlúčeniny, ktoré by sa užitočnosťou vyrovnali γ' precipitátom, s ktorými sa

stretávame pri niklových a železo-niklových superzliatinách. Zásadný rozdiel pri týchto zliatinách pozorujeme medzi kovanou/tvarovanou a odlievanou štruktúrou. Odlievané zliatiny sú typizované ako X-40 a kované/tvarované ako L-605 (HA-25) [3].

4.6 Historický vývoj superzliatín

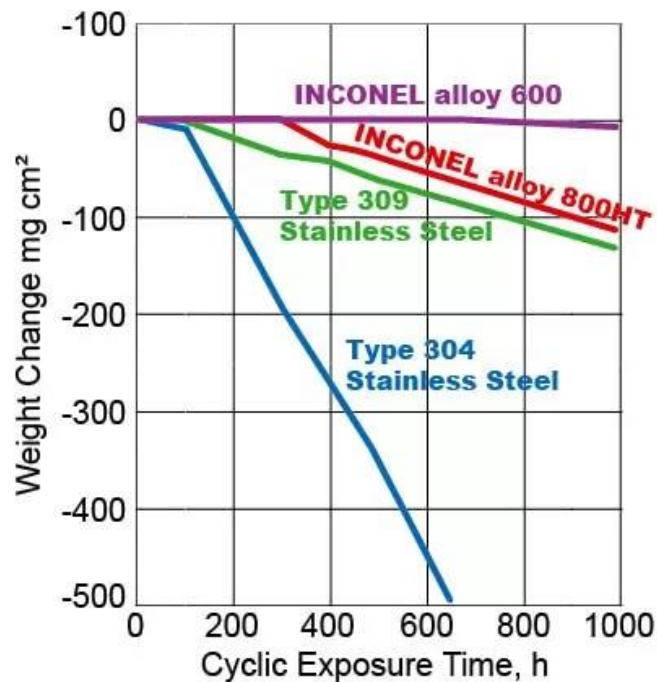
Prvé superzliatiny sa začali objavovať v rokoch 1940. Údaje tu súvisia prevažne s materiálmi a procesmi pre lopatky turbín, so zameraním na odolnosť voči creepu (najvyššia teplota, pri ktorej nedôjde k porušeniu počas 1000 hodín pri záťaži 137Mpa) [1].

Korozivzdorné (žiaruvzdorné) ocele, ktoré boli vyvinuté a používané v prvých troch desaťročiach dvadsiateho storočia, slúžili ako odrazový bod pre uspokojenie vysokoteplotných požiadaviek materiálov. Ich schopnosti sa však pomerne rýchlo ukázali ako limitované. Odpoveďou boli prvé tzv. super-zliatiny, ktoré vznikli ako pokračovanie týchto korozivzdorných ocelí. Netrvalo dlho a zo super-zliatín sa stali superzliatiny, tieto vylepšené materiály so zvýšenou odolnosťou voči vysokým teplotám sa stali novou kategóriou materiálov. Súčasne s II. svetovou vojnou sa plynové turbíny stali dôvodom (tlakom – driver) skúmania a adaptácií zliatín. Superzliatinový priemysel sa vynoril následkom prijatia kobaltovej zliatiny (Vitallium, inak známej ako Haynes Stelite 31), používanej pôvodne v zubárskom priemysle ako zliatiny pre uspokojenie vysokoteplotných požiadaviek v oblasti leteckých motorov (jet engines). Taktiež niektoré niklovo-chrómové zliatiny (Inconely a Nimonicy) boli viac- menej prevzaté z drôtov hriankovačov [3]. Tieto zliatiny boli základom celej superzliatinovej kategórie materiálov. Z dôvodov vojenských i priemyselných bol na vyspelé krajiny kladený veľký tlak, aby boli vyvíjané stále lepšie a lepšie vysokoteplotné zliatiny a superzliatiny. V neskorších rokoch dvadsiateho storočia umožnil zosúladené obdobie vývoja zliatín a metalurgických procesov dramatické zlepšenie výkonu superzliatín. Počas tejto doby boli získané základné poznatky a skúsenosti:

Pre aplikácie lopatiek turbín sa materiály získané zlievaním preferujú pred materiálmi spracovanými tvarovaním. Dôvodom je lepšia odolnosť voči creepu, ktorú pozorujeme pri zlievaných materiáloch. Napriek tomu boli prvé aerofoily produkované pomocou tvarovania. Z tohto dôvodu boli vplyvom vývojových prác na zlievaní v počiatkových rokoch výrazne zlepšené vlastnosti lopatiek turbín. V rokoch 1950 boli predstavené technológie vákuového indukčného liatia, ktoré výrazne zlepšili čistotu, a tým aj kvalitu zliatín a superzliatín. Zavedenie zdokonalených metód odlievania a neskôr zavedenie spracovania smerovým tuhnutím umožnilo výrazné zlepšenie. To bolo spôsobené vytvorenými stĺpcovými mikroštruktúrami, v ktorých chýbali priečne hranice zrn. Keď nastal tento vývoj, bolo prirodzené, že sa hranice zrn neskôr odstránili úplne a vznikli monokryštalické superzliatiny. To zase umožnilo odstránenie prvkov spevňujúcich hranice zrn, ako je bór a uhlík, ktoré sa tradične pridávali, čo umožnilo lepšie tepelné spracovanie na zníženie mikrosegregácií a eutektického obsahu vyvolaného odlievaním, pričom sa zabráni počiatkovému roztaveniu počas tepelného spracovania. Dôsledkom toho bolo zvýšenie únavovej životnosti. V dnešnej dobe sa monokryštalické superzliatiny používajú stále viac, hlavne v lopatkách plynových turbín – v podmienkach, kde sa vyžadujú najvyššie odolnosti voči creepu [1].

4.7 Obchodne dostupné žiaruvzdorné niklové zliatiny a superzliatiny

Je niekoľko základných typov superzliatín: INCONEL, NIMONIC alloys, WASPALOY, UDIMET atď. Tieto kategórie pokrývajú širokú škálu použitia a pracovných podmienok, ktoré tieto superzliatiny zvládajú. V leteckom priemysle sa na lopatky turbín používajú napr.: INCONEL alloy 625, INCONEL alloy HX a rôzne ďalšie superzliatiny zo skupiny INCONEL, ako aj zo skupiny HASTELLOS [2]. Porovnanie niektorých superzliatín a nehrdzavejúcich ocelí z hľadiska hmotnostného úbytku pri fungovaní za vysokých teplôt je znázornené na obr. 8. INCONEL alloy 625 – obsahuje približne 61% Ni, 21,5% Cr, 9% Mo, 3,6% Nb a 2,5% Fe. Táto superzliatina sa žiha pre zníženie zostatkového napätia. Je žiarupevná a žiaruvzdorná s odolnosťou proti oxidácii, proti koróznym trhlinám pod napätím a proti pittingovej korózii. Je vhodná pre prácu na vzduchu v celom rozsahu teplôt do 1150°C. Využíva sa v leteckom (horúca časť leteckého motora, lopatky turbín), ale aj energetickom priemysle (spaľovacie turbíny) pre súčiastky pracujúce v oxidačnom a redukčnom prostredí [2].



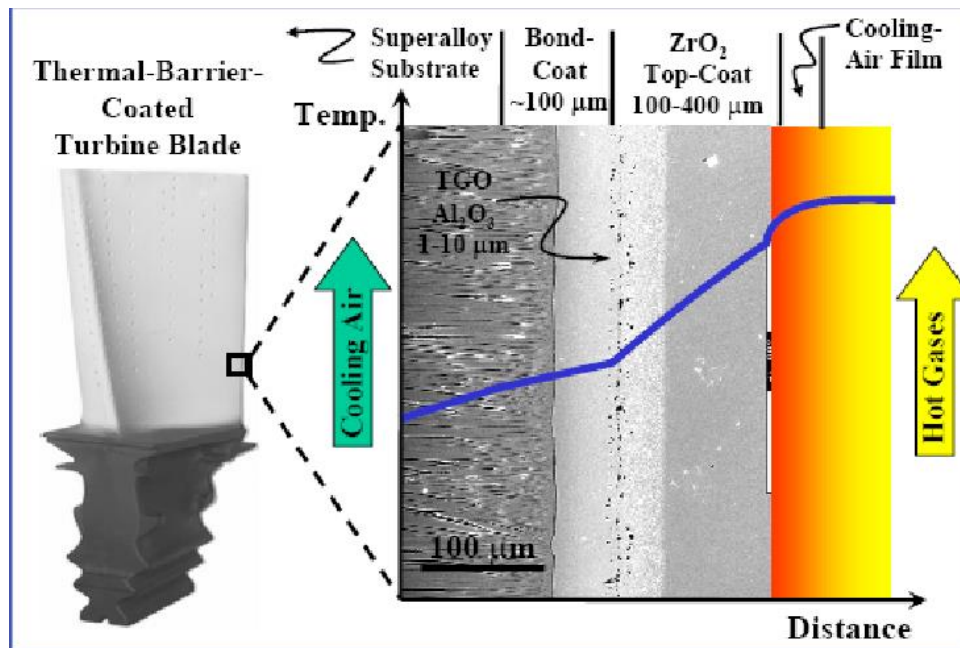
Obr. 8 – Porovnanie hmotnostného úbytku pri vysokoteplotnom fungovaní [3].

5 Environmentálna degradácia – úloha povlakovania

Pri príliš vysokých teplotách podliehajú superzliatiny, tak ako všetky iné materiály, chemickej a mechanickej degradácii. Je zjavné, že maximálna teplota, ktorú je superzliatina schopná vystáť, je teplota tavenia (počiatočná teplota tavenie), ktorá je približne 1350°C. Napriek tomu TET moderných plynových turbín stále vzrastá, pričom v dnešnej dobe je približne na hodnote 1480°C. Takéto extrémne podmienky sú možné len vďaka úpravám povrchov materiálov, ktoré pri týchto teplotách pracujú. V skutočnosti sa poskytovanie týchto povlakov a opatrení na zabezpečenie toho, aby zostali na mieste počas prevádzky, stalo najkritickejším problémom v oblastiach plynových turbín. V najmodernejších motoroch by komponenty v spaľovacej a turbínovej časti veľmi rýchlo zdegradovali vplyvom extrémnych teplôt, nebyť práve týchto povlakov. Úlohou superzliatín je schopnosť znášať mechanické zaťaženie, ktoré na ne pôsobí pri vysokých teplotách, avšak vyžaduje sa aj povlakovanie pre zabezpečenie dostatočnej tepelnej a chemickej ochrany [1]. Vplyvom cyklických zmien teplôt, pôsobiacich na lopatky turbín, môže nastať praskanie a odlupovanie materiálu z povrchov lopatiek. Prvky ako chróm či hliník síce vytvárajú na povrchu lopatiek ochrannú vrstvu, avšak ich zastúpenie v superzliatine je obmedzené množstvom, ktoré vykazuje ideálne mechanické vlastnosti, a pri teplotách nad 800°C sú nedostatočné a nedokážu zaručiť ochranu povrchu proti oxidácii a horúcej/ vysokoteplotnej korózii (hot corrosion).

Spočiatku sa tento problém riešil zvýšením obsahu ochranných prvkov lokálne v blízkosti povrchu len do hĺbky niekoľkých mikrometrov, aj táto technológia má však svoje limity a postupom času sa ukázala potreba aplikácie ochranných náterov [3]. Najbežnejším spôsobom ochrany povrchov sú takzvané difúzne nátery. Napríklad hliník je často nanášaný na povrch superzliatín pomocou metódy chemical vapour deposition resp. CHVD, čo je známe aj pod pojmom obalová aluminizácia. Následne dochádza k tepelnej úprave na podporu priľnavosti, ktorá podporuje interdifúziu so substrátom zo superzliatiny tak, že sa na povrchu komponentu vytvorí vrstvu bohatá na hliník. Tá je typicky bohatá na Beta-NiAl fázu. Vďaka vysokej povrchovej koncentrácii hliníka, povlakované superzliatiny vyrábané týmto spôsobom sú veľmi účinnými formovačmi vonkajšej ochrannej vrstvy oxidu hlinitého, čím sa zlepšuje odolnosť voči oxidácii. Bolo taktiež zistené, že elektrodepozícia 5 až 10 mikrometrov hrubej vrstvy platiny pred aluminizáciou zlepšuje ako odolnosť voči vysoko teplotnej oxidácii, tak aj odolnosť proti horúcej korózii. Tieto platinovo-hliníkové povlaky sa stali industriálnym štandardom, voči ktorému sú ostatné povlaky porovnávané. Pre ešte vyššiu odolnosť voči oxidácii je možné použiť tzv. prekryvacie povlaky (overlay coatings). Tie sú však drahšie, pretože nanášanie sa musí vykonávať vzduchovým či vákuovým plazmovým striekaním, alebo fyzikálnym nanášaním pár elektrónovým lúčom [1].

Alternatívny spôsob predstavuje Tepelne bariérový povlak (Thermal barrier coating alebo TBCs), ktorý je znázornený aj s teplotným gradientom na obr. 9. Ten v dnešnej dobe nachádza široké uplatnenie v turbínach motorov. Na superzliatinu je nanosená keramická vrstva, ktorá vďaka svojej nízkej tepelnej vodivosti poskytuje tepelnú izoláciu, a tým znižuje teplotu pôsobiacu na kovový základ. Tento účinok môže byť veľmi výrazný – pri moderných TBC, ktoré majú hrúbku asi 300 mikrometrov, v kombinácii s dutými súčasťami a vzduchovým chladením dokáže znížiť teplotu pôsobiacu na superzliatinu až o niekoľko stoviek stupňov [12].



Obr. 9 – Známenie TBC a teplotného gradientu vznikajúceho v lopatkách ním povlakovaných [1].

5.1 Historický vývoj náterov TBC

Prvé TBC povlaky sa objavili v rokoch 1960 a boli tvorené pomocou plazmového nástreku vápnikom alebo horčíkom stabilizovaného zirkónia. Tieto povlaky mali dobré vlastnosti pri teplotách pod 1000°C , pri prekročení týchto teplôt boli však nestabilné. Moderné TBC, používané na ochranu lopatiek turbín, vodiace lopatky trysky a sekcie spaľovacieho zariadenia sú na báze zirkónia obsahujúceho asi 7 hm.% yttria – tzv. yttria-stabilised zirconia YSZ. Bohužiaľ, TBC založené na YSZ nie sú schopné zabrániť prenikaniu kyslíka v dôsledku rýchleho transportu oxidových iónov cez ne. V dôsledku toho zostáva počas prevádzky možná oxidácia podkladového substrátu. Táto skutočnosť spolu s nesúlalom koeficientov tepelnej rozťažnosti superzliatinového substrátu ($17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) a keramickeho povlaku ($12 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) vedie k prípadnému zlyhaniu TBC odlupovaním. Na zmiernenie tejto možnosti sa pred nanosením keramickeho vrchného náteru nanáša na superzliatinový substrát takzvaný väzbový náter. Pojem TBC sa striktnie vzťahuje na kombináciu keramickej vrstvy a väzbového náteru, ktoré musia byť vhodne zvolené, aby bola zaistená kompatibilita so superzliatinovým substrátom. Aj s väzbovým náterom nakoniec dôjde k odlupovaniu, avšak po značne dlhšej dobe prevádzky ako bez neho. Predlžovanie životnosti TBC a návrh postupov na jeho odhad patria v súčasnosti medzi najväčšie výzvy, ktorým čelia materiáloví vedci a inžinieri pracujúci v oblasti plynových turbín [1].

5.2 Voľba materiálov pre TBC

Typickým a najpoužívanejším materiálom na TBC je na báze zirkónia (ZrO_2) [12]. Dôvodom je jeho veľmi nízka tepelná vodivosť – len 2 W/mK , a čo viac, neukazuje sa tu ani žiadna výrazná závislosť na teplote (takže materiál prudko nezvyšuje svoju tepelnú vodivosť za nižších teplôt). V súčasnosti sa však nepoužíva čistý ZrO_2 , ale pridáva sa k nemu 6-11%hm. (typicky

7%hm.) ytria (Y_2O_3). Túto kompozíciu objavila NASA v rokoch 1970. Ukazuje sa, že toto je limitné zloženie, pri ktorom sa tvorí metastabilná netransformovateľná tetragonálna fáza t' , keď sa keramika ochladzuje z pol'a kubickej fázy. Tým sa zabráni premene tetragonálnej na monoklinickú fázu, ktorá je spojená so 4 % objemovou zmenou, a teda so zlou odolnosťou voči tepelným cyklom v dôsledku praskania a odlupovania pri nízkych obsahoch Y_2O_3 . Čiastočne stabilizované zirkónium je štandardom pre výrobu TBC, pričom sa aplikováva od rokov 1970. Má excelentnú tepelnú stabilitu až do teploty $1200^\circ C$. Nanešťastie, po prekročení tejto teploty má jeho použitie dve nevýhody. Po prvé, čiastočná reverzia do rovnovážnej t a kubickej fázy nastáva so zmenou tetragonálnej fázy na monoklinickú, pričom nízka rýchlosť tejto reverznej transformácie je spôsobená potrebou difúzie Y cez oxid zirkoničitý. Po druhé, dlhodobé vystavenie vysokým teplotám spôsobuje spekanie YSZ so súvisiacim zvýšením modulu pružnosti. Kombinácia týchto účinkov spôsobuje stratu odolnosti proti tepelnému cyklovaniu [1].

6 Budúcnosť odvetvia

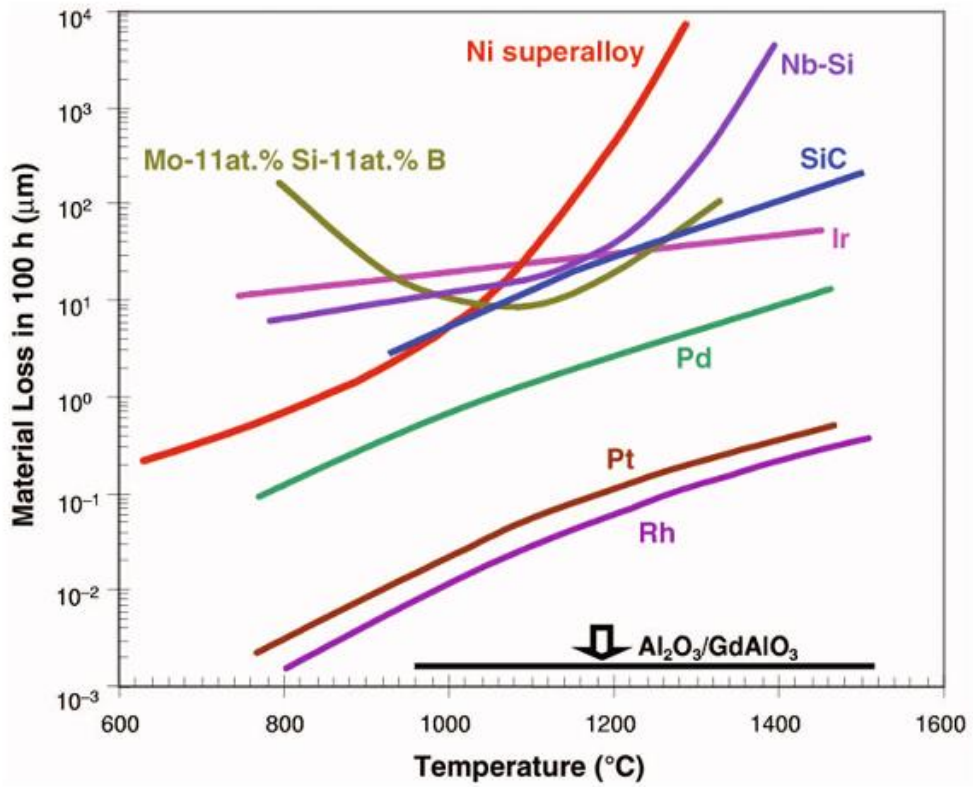
Po desaťročiach výskumu a zdokonaľovania sme sa dostali do situácie, keď zrejme nemôžeme predpokladať výrazné zmeny a zlepšenia vlastností vysokoteplotných materiálov len drobnými úpravami ich mikroštruktúry. Superzliatiny na báze niklu či kobaltu sa blížia k naplneniu svojho potenciálu, avšak nároky na neustále zvyšovanie TET a lepšie pevnostné, únavové či oxidačné vlastnosti neustanú. Je preto nutné začať sa zaoberať výskumom iných tried materiálov. Pre vysokoteplotné materiály prichádzajú do úvahy štyri kategórie materiálov – žiaruvzdorné kovy, monolitická keramika, intermetalické zlúčeniny a kompozity (prírodné alebo syntetické) [6].

Žiaruvzdorné kovy – patria sem napríklad volfrám, molybdén, tantal, niób či rénium. Žiaden zo žiaruvzdorných kovov však nie je dostatočne odolný voči oxidácii a všetky, s výnimkou chrómu, majú podstatne vyššiu hustotu ako nikel. Chróm, aj keď má výhodu nižšej hustoty, čelí inému problému, a to krehnutiu dusíkom pri vystavení vzduchu za vysokých teplôt. Z týchto dôvodov sa táto skupina materiálov nejaví ako perspektívna [6].

Monolitická keramika – má veľmi dobrú odolnosť voči teplote aj oxidácii a aj dobrú pevnosť. Dôvodom, prečo ani táto skupina materiálov s najväčšou pravdepodobnosťou nemá perspektívu, je ich krehkosť, ktorá predstavuje výrazné nebezpečie, hlavne pri náraze cudzieho telesa (ako napríklad zrážka s vtákmi) [6].

Intermetalické zlúčeniny – sú tu tri základné skupiny materiálov, ktorým sa venuje pozornosť. Sú to γ -TiAl, NiAl a zlúčeniny kovov platinovej skupiny (PGM). TiAl sa z technického hľadiska považuje za najvyspelejšiu intermetalickú látku pre aplikácie prúdových motorov. Napriek tomu ho jeho mierny bod topenia znemožňuje použiť vo vysokoteplotných lopatkách a obmedzuje ho na nízkotlakovú turbínu a statické časti motora. NiAl má množstvo atraktívnych vlastností pre aplikácie prúdových motorov, ako je vysoká teplota topenia (1650°C), dobrá tepelná vodivosť, nízka hustota a odolnosť voči oxidácii. Vhodným legovaním - pomocou Ta a Cr- možno dosiahnuť dobré pevnostné vlastnosti pri teplotách vyšších ako 1000°C. Zliatinové diely na báze tejto intermetalickej zliatiny boli úspešne vyrobené rôznymi procesmi (napr. vytavením, práškovou metalurgiou, vytláčaním za tepla či vstrekovaním). Taktiež má táto skupina materiálov úspešne za sebou skúšky pre použitie v statickej časti turbíny. Aby však bolo možné vážne zvažovať túto skupinu materiálov pre lopatky turbín, bude vyžadovaná o čosi lepšia húževnatosť za izbovej teploty a vyššia pevnosť pri tečení za vysokých teplôt. Zlúčeniny platinovej skupiny – PMG, sa vyznačujú vysokou teplotou tavenia a dobrou odolnosťou voči oxidácii, avšak platia za to svojou vysokou hustotou [6].

Kompozity – boli testované napríklad kompozity na báze SiC. Ich problémom je relatívne nízka pevnosť. Výzvou pri tejto skupine materiálov je taktiež odhad ich životnosti a spoľahlivosť [5]. Porovnanie týchto skupín materiálov z hľadiska hmotnostných strát pri fungovaní za vysokých teplôt je znázornené na obr. 10.



Obr. 10 – Porovnanie hmotnostných strát vysokoteplotných materiálov pri fungovaní za vysokých teplôt [6].

7 Diskusia

Ako už bolo spomenuté, letecký motor možno rozdeliť na horúcu a studenú časť, každá má špecifické podmienky a nároky na materiály v nich použité.

Podmienky v studenej časti sú mierne (aspoň v porovnaní s horúcou časťou) – teploty sa tu pohybujú v rozmedzí približne od 200°C do 550°C. Tieto teploty vznikajú kompresiou vzduchu, ktorý letecký motor nasáva. Lopatkové kolesá musia byť schopné pracovať za týchto teplôt a udržať si dostatočnú pevnosť, odolnosť voči únave a tuhosť voči skrúteniu. Dôležitým faktorom je taktiež ich hustota, ako z hľadiska celkovej hmotnosti leteckého motora, tak z dôvodu, že lopatky sú vystavené odstredivým silám, ktoré sa s ich zvyšujúcou hmotnosťou zvyšujú [13].

Používajú sa tu štyri základné skupiny materiálov – oceľ, hliníkové zliatiny, titánové zliatiny a kompozity na báze CFRP. Ocele boli používané najmä v minulosti, neskôr prevládali hliníkové zliatiny, v dnešnej dobe sú preferované najmä zliatiny titánu a CFRP. Vlastnosti titánových zliatin a CFRP sú síce lepšie než u ich alternatív, no dôležitým aspektom je často cena, ktorá je pre tieto materiály vyššia. Oblasť ďalšieho vývoja sú zamerané prevažne na zníženie hmotnosti, zvýšenie pevnosti a únavových vlastností a prípadne mierne zvýšenie teplôt, za ktorých sú tieto materiály schopné udržať si svoje vlastnosti. V každom odvetví materiálov je miesto pre zlepšenie a táto oblasť nie je výnimkou, napriek tomu neočakávam prelomové zmeny v zaužívaných postupoch a skupinách materiálov používaných na lopatkové kolesá v studenej časti. Zdá sa mi, že dané skupiny materiálov uspokojujú potreby a technológie ich výroby a spracovania sú dobre zvládnuté [1,5].

Podmienky v horúcej časti sú výrazne náročnejšie pre materiály v nich použité. Teploty tu presahujú 1000°C a lopatky turbín tu môžu byť vystavené dokonca teplotám bližiacim sa 1500°C. Dôvodom takto extrémne vysokých teplôt a tlaku na ich neustále zvyšovanie je zvýšená účinnosť a s ňou spojené finančné a ekologické úspory, ku ktorým dochádza pri zvyšovaní TET. Vzhľadom na dôležitosť leteckého priemyslu, či už z civilného, či vojenského hľadiska, bolo v posledných desaťročiach investované veľké množstvo financií a úsilia s cieľom nájsť a zdokonaľiť materiály na túto aplikáciu. Vznikla nová skupina vysokoteplotných materiálov – superzliatiny. Používané sú železo-niklové, kobaltové a niklové superzliatiny. Z týchto troch skupín sa superzliatiny na báze niklu ukázali ako najvýhodnejšie, a sú používané najčastejšie [1,8].

Jednou z otázok, ktorú si možno položiť je, prečo je práve nikel tým najvhodnejším materiálom pre tieto vysokoteplotné materiály. Jeho teplota tavenia (ktorá zároveň predstavuje limit teploty, pri ktorej sú schopné superzliatiny na báze niklu pracovať) je len asi 1455°C. Materiály, ako napríklad chróm, majú podstatne vyššiu teplotu tavenia (vyše 1900°C), vyššiu pevnosť a dokonca nižšiu cenu, no napriek tomu nenachádzajú využitie v danej aplikácii. Dôvodom je mikroštruktúra niklu. Dôležitá nie je len teplota tavenia, ale teplota, pri ktorej sú materiály schopné si zachovať svoje vlastnosti. Problémom pri vysokých teplotách je creep, a nutnosťou je teda odolnosť materiálu voči creepu a stabilita materiálu za vysokých teplôt [2]. Ukazuje sa, že tieto vlastnosti sú spojené s difúziou, na ktorú má výrazný vplyv mriežka materiálu. Nikel má FCC mriežku, ktorá sťažuje difúziu následkom tesného usporiadania atómov a čo viac, nikel si túto mriežku udržiava od izbovej teploty až po teplotu tavenia. To znamená, že tu nedochádza k zmene mriežky, ktorá je spojená so skokovou zmenou objemu, a tým spôsobuje pri vysokoteplotných aplikáciách problémy. Ďalšou dôležitou vlastnosťou, ktorou musia disponovať materiály používané pri takto vysokých teplotách, je odolnosť voči oxidácií. Tá vylučuje žiaruvzdorné kovy, ako napríklad volfrám, tantal či niób. Nikel je zároveň

pomerne bežný, vďaka čomu má prijateľnú cenu a má taktiež prijateľnú hustotu (približne 8900 kg/m³). Tieto vlastnosti zasa vylučujú materiály, akú sú PGMs – napríklad Re a Ru. Sú totiž príliš drahé a majú príliš vysokú hustotu. Skrátka, po desaťročiach výskumu a testovaní najrôznejších skupín materiálov sa ukázali superzliatiny na báze niklu ako najlepšia voľba. Základ tvorí nikel, no obsahujú mnohé legúry – často viac ako 10 a patria medzi ne napríklad Al, Ti, Co, W, V, Nb, Ta, B, Zr, Mg, Mo. Základnými fázami tvoriacimi ich mikroštruktúru sú: Fáza γ , ktorá tvorí austenitickú maticu a má FCC mriežku. V matici sú rozpustené sekundárne fázy prevažne vo forme precipitátov. Medzi tie patria: Karbidické fázy - (M_6C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C), vyskytujúce sa prevažne po hraniciach zŕn matrice (γ). Fáza γ' s FCC mriežkou, tvoriaca primárne precipitáty koherentné s maticou (γ), bohaté na prvky ako Al, Ta, Ti. Ďalej sem patrí fáza γ'' s BCT mriežkou, fáza η s HCP mriežkou, fáza δ , ktorá má ortorombickú štruktúru a v neposlednom rade Lavesove fázy a fázy σ [1,3].

Niklové superzliatiny je možné spevňovať. Existuje niekoľko spôsobov závisiacich od chemického zloženia a mikroštruktúry rôznych typov superzliatín. U superzliatín na báze niklu je základným procesom spevňovania premena fázy γ na γ' , tj. spevňujúci proces disperzného vylúčenia fázy γ' . Odlievanie superzliatín je najčastejšie realizované pomocou investment castingu a smerového tuhnutia (directional solidification). Často sa na dno formy pridáva selektor zŕn, ktorý má za následok vytvorenie monokryštalickej štruktúry – celá lopatka je tvorená len jedným kryštálom. Dôvodom je fakt, že na creepové vlastnosti nepriaznivo pôsobia hranice zŕn. Samotné liatie superzliatiny do formy sa odohráva vo vákuu, nakoľko je nutná vysoká čistota odlievanej superzliatiny a je nutné sa vyhnúť oxidácií [1].

Samotné lopatky, vyrábané z týchto superzliatín, majú síce vynikajúce vysokoteplotné vlastnosti, no stále nie dostatočné, aby boli schopné odolať neustále sa zvyšujúcim teplotám, ktorým sú vystavené. Aby sa zabránilo oxidácií a znížila sa teplota, ktorá na lopatky pôsobí, nanášajú sa na ne ochranné termálne povlaky. Najrozšírenejšími sú TBC. Ide o povlaky na báze zirkónia, obsahujúceho asi 7 hm.% yttria, ktoré sa však nenanášajú priamo na superzliatinu, ale na väzbový náter, aby sa zabránilo ich odlupovaniu a predĺžila sa ich životnosť [1].

Požiadavky na materiály v horúcej časti leteckých motorov, a na lopatky predovšetkým, neustále rastú. Je tu preto tlak na experimenty a vývoj nových skupín materiálov, ktoré prejavujú sľubné vlastnosti a potenciál na nahradenie niklových superzliatín. Momentálne prichádzajú do úvahy štyri skupiny materiálov - žiaruvzdorné kovy, monolitické keramiky, intermetalické zlúčeniny a kompozitné materiály. Prvé dve kategórie možno vylúčiť, nakoľko žiaruvzdorné kovy nie sú schopné dostatočne odolávať oxidácii a monolitické keramiky sú príliš krehké. Bez výrazného posunu v daných smeroch je veľmi nepravdepodobné, že by mohli konkurovať momentálne používaným materiálom. Intermetalické zlúčeniny, ako aj kompozity, majú potenciál, avšak ich vývoj je stále v počiatočných fázach a je nutné zlepšiť ich vlastnosti, ak majú predstavovať náhradu niklových superzliatín. Základnými predstaviteľmi sú tu zliatiny γ -TiAl, NiAl a zlúčeniny kovov platinovej skupiny (PGM). NiAl a PGM sa javia sľubne, avšak PGM drží v úzadí vysoká hustota a cena. Bolo vykonaných viacero testov, avšak zatiaľ prevažne za statických podmienok a napriek tomu neboli ich vlastnosti dostatočne dobré [6].

Z môjho pohľadu sú materiály a postupy ich výroby, ktoré sú v tejto práci, časom odskúšané a ich miesto v leteckom priemysle je stabilné. Jednou možnosťou vývoja je pomalé a postupné zdokonaľovanie postupov výroby a optimalizácia mikroštruktúry či konštrukčných postupov. Tento vývoj prebieha neustále a má za následok postupné zlepšovanie ich vlastností. Ide o multidisciplinárnu snahu, na ktorej sa podieľajú inžinieri zo všetkých odvetví, od materiálového cez technológiu výroby až po konštrukciu, montáž či kontrolu vlastností. Druhým spôsobom vývoja je skokový vývoj, ktorý zatiaľ zostáva v oblasti materiálov. Ide

o snahu nájsť nové skupiny materiálov, ktoré by boli schopné dosiahnuť výrazné zlepšenie vlastností a priniesli by do tohto odvetvia veľký potenciál ďalších zlepšení. Osobne vidím potrebu oboch stupňov vývoja. Druhý typ skokového vývoja sa mi však zdá nepravdepodobný, aspoň v horizonte najbližších rokov. Napriek veľkému množstvu testovaných materiálov má každá skupina isté výrazné problémy, ktoré zabraňujú ich použitiu, a výsledky, ktoré pri testoch dosahujú, nie sú dost' sľubné na to, aby tieto problémy zatienili.

Záver

Cieľom tejto práce bolo podať výklad o základných skupinách materiálov používaných v studenej aj horúcej časti leteckých motorov na výrobu lopatkových kolies. V studenej časti sú pomerne mierne podmienky, ktoré tu umožňujú aplikácie pomerne bežných materiálov, ako sú lopatky na báze ocele, hliníkových či titánových zliatín, či kompozitov ako CFRP. Tieto materiály neboli hlavným zameraním tejto práce, preto bol k nim podaný len stručný výklad. Táto oblasť materiálov je pomerne dobre zvládnutá a našiel som k nej bez problémov dostatok zdrojov.

Väčšina práce bola venovaná materiálom, používaným na lopatky v horúcej časti, nakoľko práve tie čelia najnáročnejším podmienkam. Tu sa ukázali ako najlepšia voľba superzliatiny na báze niklu (taktiež sa používajú superzliatiny na báze kobaltu či železo-niklové superzliatiny, avšak nie tak výrazne). Vzhľadom na to, že ide z hľadiska materiálových inžinierov o najdôležitejšiu oblasť výskumu, čo sa leteckých motorov týka, boli v tejto oblasti absolvované desaťročia výskumu. Nebol preto problém nájsť dostatok dôveryhodných zdrojov, súvisiacich s každou stránkou týchto materiálov – od mikroštruktúry až po technológie odlievania. Napriek svojim vynikajúcim vlastnostiam a schopnosti odolávať veľmi vysokým teplotám by však ani tieto materiály neobstáli v extrémnych podmienkach, ktorým sú vystavené. Je preto nutné použitie termálnych povlakov, ktoré poskytujú ochranu voči oxidácii a sú schopné znížiť teplotu, ktorej čelia samotné lopatky až o niekoľko stoviek stupňov. Taktiež tu prichádzajú do úvahy chladiace kanály, ktoré taktiež napomáhajú lopatkám udržať si čo najnižšiu teplotu. Myslím si, že sa mi podarilo podať celistvý výklad, ako o superzliatinách tvoriacich samotné jadro lopatiek, tak aj o termálnych povlakoch. Opísal som mikroštruktúru niklových superzliatín, ich miesto v skupine vysokoteplotných materiálov, odôvodnenie niklu ako vysokoteplotného materiálu, ako aj technológie ich odlievania. Taktiež bol v tejto práci podaný stručný výklad o zvyšných dvoch skupinách superzliatín – kobaltových aj železo-niklových, ako aj základný opis termálnych povlakov so zameraním na TBC.

Záverečným cieľom tejto práce bolo preskúmať nové sľubné materiály. Podal som stručný opis niekoľkých základných skupín, ktoré by mohli nájsť uplatnenie v tejto aplikácii – žiaruvzdorných kovov, monolitických keramik, intermetalických zlúčenín a kompozitov. Tento opis však bol stručnejší než by som chcel, čo bolo zapríčinené prevažne nedostatkom zdrojov. Jedným problémom je, že je výskum často udržiavaný v tajnosti, hlavne v počiatočnej fáze. Tým druhým je, že informácie, ktoré sa dali dohľadať, sa mi nezdali často dôveryhodné. Bol som schopný nájsť mnohé porovnania a výsledky testov týchto skupín materiálov, avšak testové podmienky boli vždy odlišné a samotní autori článkov apelovali na opatrnosť pri ich interpretácii a ich možnú nedôveryhodnosť.

Použité zdroje

- [1] REED, Roger C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. 9780521859042. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. ISBN 9780521070119. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>. [citováno 2024-05-23].
- [2] PILOUS, Václav a KUDĚLKA, Vladimír. *Nikl a slitiny niklu - superslitiny niklu*. Brno: TESYDO, s.r.o, 2017. ISBN 978-80-87102-16-9. [citováno 2024-05-23].
- [3] DONACHIE, Matthew J. a DONACHIE, Matthew J. *Superalloys - A Technical Guide (2nd Edition)*. Materials Park: ASM International, 2002. ISBN 9780871707499. [citováno 2024-05-23].
- [4] OKURA, Takehiro. Online. *Materials for aircraft engines*. University of Colorado. [citováno 2024-05-23].
- [5] SJÖBERG, Göran. Online. *Aircraft Engine Structure Materials*. Volvo Aero Corporation, 2008. [citováno 2024-05-23].
- [6] ZHAO, J.-C. a WESTBROOK, J. H. Ultrahigh-Temperature Materials for Jet Engines. Online. *MRS bulletin*. 2003, roč. 28, č. 9, s. 622-630. ISSN 0883-7694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1557/mrs2003.189>. [citováno 2024-05-23].
- [7] JURAJ, Belan; ALAN, Vaško a LENKA, Kuchariková. A brief overview and metallography for commonly used materials in aero jet engine construction. Online. *Production Engineering Archives*. 2017, roč. 17, č. 17, s. 8-13. Dostupné z: <https://doi.org/10.30657/pea.2017.17.02>. [citováno 2024-05-23].
- [8] ČADEK, Josef. *Creep kovových materiálů*. Praha: Academia, 1984. [cit. 2024-05-23].
- [9] HEUBNER, Ulrich; BRILL, Ulrich; HOFFMANN, Theo; KIRCHHEINER, Rolf; KLÖWER, Jutta et al. *Nickel alloys*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-0-8247-0440-7. [citováno 2024-05-23].
- [10] SIŃCZAK, Jan; ŁUKASZEK-SOŁEK, Aneta; BEDNAREK, Sylwia a CHYŁA, Paweł. THE FORGING PROCESS OF AIRCRAFT ENGINES TURBINE BLADES. Online. *Metallurgy and foundry engineering: quarterly of University of Mining and Metallurgy = Metalurgia i odlewnictwo : kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica*. 2010, roč.36,č.2, s.83.ISSN1230-2325 Dostupné z:<https://doi.org/10.7494/mafe.2010.36.2.83>. [citováno 2024-05-23].
- [11] BEWLAY, B. P.; NAG, S.; SUZUKI, A. a WEIMER, M. J. TiAl alloys in commercial aircraft engines. Online. *Materials at high temperatures*. 2016, roč. 33, č. 4-5, s. 549-559. ISSN 0960-3409. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068>. [citováno 2024-05-23].
- [12] PARSONS, David; CHATTERTON, Julia. Online. *Carbon brainprint case study Ceramic coatings for jet engine turbine blades*. Cranfield University, 2011. [citováno 2024-05-23].

- [13] MATTINGLY, Jack D.; HEISER, William H. a PRATT, David T. *Aircraft Engine Design (2nd Edition)*. 2. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2002. ISBN 9781563475382. [citováno 2024-05-23].
- [14] ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design (3rd Edition)*. Amsterdam ; Oxford ; Tokyo: Elsevier, 2005. ISBN 0750661682. [citováno 2024-05-23].
- [15] JONŠTA, Zdeněk. *Žárupevné oceli a slitiny*. V Žilině: ZUSI, 2002. ISBN 80-968605-6-9. [citováno 2024-05-23].
- [16] POLLOCK, Tresa M. Alloy design for aircraft engines. Online. *Nature materials*. 2016, roč.15,č. 8, s. 809-815. ISSN 1476-1122. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nmat4709>. [citováno 2024-05-23].