



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

## ŽÁRUPEVNÉ SLITINY NIKLU POUŽÍVANÉ V LETECKÉM PRŮMYSLU

HIGH TEMPERATURE NICKEL BASE ALLOYS FOR THE AEROSPACE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PAVEL MAREŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Pavel Mareš

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:

### **Žárupevné slitiny niklu používané v leteckém průmyslu**

v anglickém jazyce:

#### **High Temperature Nickel Base Alloys for the Aerospace Industry**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Shrnutí poznatků o žárupevných slitinách na bázi niklu, charakteristika těchto slitin, důvody aplikace těchto materiálů v leteckém průmyslu, možnosti zlepšení vlastností niklových superslitin.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Definice žárupevných materiálů
- 2) Charakteristika niklových superslitin
- 3) Aplikace těchto materiálů v leteckém průmyslu
- 4) Formulace závěru, možnosti zlepšení vlastností niklových superslitin

## Abstract

This work describes high temperature materials, mainly the group of nickel base superalloys. It focuses on their structure and properties and deals with their development and application in the aerospace industry, where this group of alloys plays a crucial role in the production of jet-engines.

## Abstrakt

Tato práce popisuje žárupevné materiály, zejména pak skupinu superslitin na bázi niklu. Zaměřuje se na jejich složení a vlastnosti a zabývá se jejich vývojem a využitím v leteckém průmyslu, kde hraje tato skupina slitin velmi důležitou úlohu při výrobě proudových motorů.

## Key words

nickel-base superalloys, high temperature material, creep, jet-engine

## Klíčová slova

superslitiny na bázi niklu, žárupevný materiál, creep, proudový motor

### Bibliografická citace

MAREŠ, P. Žárupevné slitiny niklu používané v leteckém průmyslu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze uvedené zdroje a literaturu.

V Brně dne 2. května 2010

.....

## Poděkování

Za cenné rady, připomínky a informace poskytnuté při vypracování této bakalářské práce děkuji Ing. Karlu Němcovi Ph.D.

## Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Definice žárupevných materiálů</b> .....	<b>10</b>
2.1 Charakteristika žárupevných materiálů .....	10
2.2 Požadavky kladené na žárupevné materiály .....	10
2.3 Rozdělení žárupevných slitin .....	11
2.4 Využití superslitin .....	11
2.5 Creep .....	12
2.5.1 Definice creepu .....	12
2.5.2 Creepová křivka .....	13
2.6 Mechanismy plastické deformace .....	14
2.7 Precipitačně a disperzně zpevněné soustavy .....	14
<b>3 Charakteristika niklových superslitin</b> .....	<b>16</b>
3.1 Vybrané žárupevné slitiny Ni .....	16
3.2 Chemické složení .....	16
3.3 Vlastnosti prvků v žárupevných slitinách Ni .....	17
3.3.1 Nikl, kobalt, železo .....	17
3.3.2 Chrom .....	18
3.3.3 Molybden a wolfram .....	18
3.3.4 Tantal, niob, titan a vanad .....	18
3.3.5 Bor, zirkonium a hafnium .....	18
3.3.6 Cer a jiné prvky vzácných zemin .....	18
3.4 Fázové složení .....	18
3.4.1 Tuhý roztok $\gamma$ .....	19
3.4.2 Fáze $\gamma'$ .....	19
3.4.3 Karbidické a boridické fáze .....	20
3.4.4 Nežádoucí TCP fáze .....	21
3.5 Odlévání superslitin .....	21
3.5.1 Proces skořepinového odlévání .....	21

3.5.2 Aplikace odlévání u superslitin .....	22
3.6 Tepelné zpracování slitin na bázi Ni (vytvrzování) .....	22
<b>4 Vývoj niklových superslitin .....</b>	<b>24</b>
4.1 Slitiny s usměrněnou krystalizací .....	25
4.1.1 Slitiny se směrovou krystalizací .....	25
4.1.2 Monokrystalické slitiny Ni .....	26
4.1.2.1 Monokrystalické slitiny I. generace .....	26
4.1.2.2 Monokrystalické slitiny II. generace .....	27
4.1.2.3 Monokrystalické slitiny III. generace .....	27
4.2 Slitiny vyráběné metodami práškové metalurgie .....	27
4.3 Žáruvzdorné vrstvy .....	28
<b>5 Aplikace slitin Ni v leteckém průmyslu .....</b>	<b>29</b>
5.1 Princip činnosti proudového motoru .....	29
5.2 Materiály používané v proudovém motoru .....	29
5.3 Aplikace superslitin na bázi niklu v proudovém motoru .....	30
<b>6 Závěr .....</b>	<b>31</b>
<b>7 Literatura .....</b>	<b>32</b>



# 1 Úvod

Žárupevné slitiny, nazývané také jako superslitiny, hrají nenahraditelnou roli ve strojním průmyslu, a to díky své vlastnosti zachovat si pevnost po dlouhou dobu i při velmi vysokých teplotách. Z tohoto důvodu jsou téměř nezastupitelné od výroby kotlů a rozvodů páry přes výrobu parních a plynových turbín až po letectví a kosmonautiku. Superslitiny procházejí neustálým vývojem a staly se bezesporu jedním z nejvýznamnějších materiálů posledních desetiletí. Výrazný posun v rozvoji superslitin nastal v padesátých letech, kdy v letectví do té doby běžné pístové spalovací motory začaly být nahrazovány výkonnějšími proudovými motory.

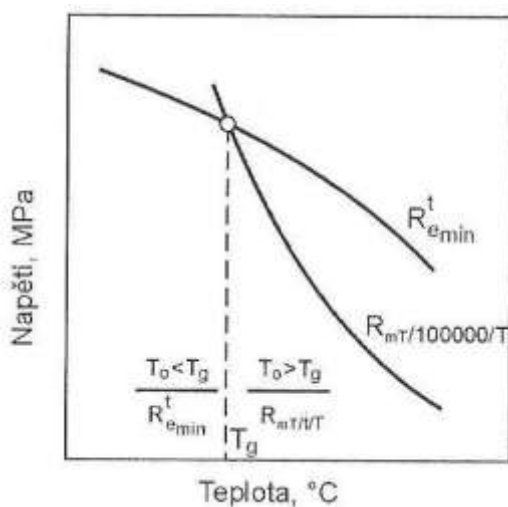
Cílem této práce je charakteristika superslitin, zejména na bázi niklu. Dále zdůvodňuje použití superslitin v leteckém průmyslu, kde se stala právě tato skupina žárupevných slitin jedním z nejdůležitějších materiálů. V neposlední řadě práce poukazuje na vývoj žárupevných slitin v posledních letech.

## 2 Definice žárupevných materiálů

### 2.1 Charakteristika žárupevných materiálů

Obecně řečeno patří mezi žárupevné materiály slitiny kovů, především oceli pro práci za zvýšených teplot, a slitiny niklu a kobaltu pro práci za vysokých teplot. Mezi žárupevnými materiály najdeme ale také keramiku a kompozitní materiály.

Přesná definice žárupevných materiálů není jednoznačná. Jedna z definic říká, že žárupevné materiály jsou ty, které pracují za teplot vyšších než je mezní teplota  $T_g$ , která pro daný materiál vyznačuje průsečík dvou charakteristik. Za první pevnostní vlastnosti za zvýšené teploty, to je mez kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ), za druhé časové pevnosti při tečení  $R_{mT}/T/t$  [1].



Obr.1: Stanovení mezní teploty  $T_g$  [1]

### 2.2 Požadavky kladené na žárupevné materiály

Nejdůležitějším požadavkem, který klademe na veškeré žárupevné materiály, je zachování jisté úrovně mechanických vlastností při vysoké teplotě. Teplota je totiž základním, ačkoli ne jediným, činitelem rozhodujícím o procesech deformace.

Požadavky kladené na žárupevné materiály můžeme rozdělit do těchto skupin [1]:

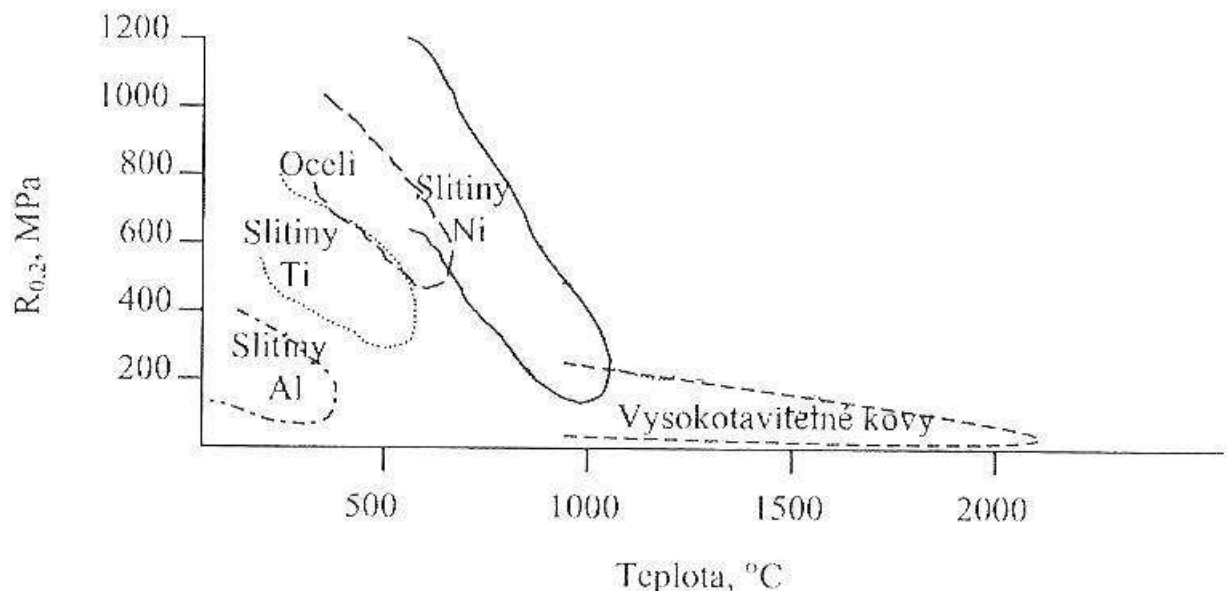
- vysoká dlouhodobá pevnost při tečení
- vysoká mez kluzu a pevnost v tahu
- dobrá tvárnost, tažnost a odolnost proti křehkému porušení
- vysoká odolnost proti tepelné a tepelně mechanické únavě
- stabilita struktury a vlastnosti, nízká náchylnost jak k poklesu zpevnění, tak i nárůstu zpevnění a provozní křehkosti
- výhodné fyzikální vlastnosti – pokud možno vysoký součinitel tepelné vodivosti a nízký součinitel teplotní roztažnosti
- dobrá žáruvzdornost a korozní odolnost v prostředí spalin a vodní páry
- dobré technologické vlastnosti – vhodnost k tváření, svařitelnost
- poměrně nízká cena

## 2.3 Rozdělení žárupevných slitin

Základním kritériem pro rozdělení žárupevných slitin je jejich chemické složení. Podle tohoto kritéria lze vyčlenit například následující skupiny:

- slitiny Ti
- žárupevné oceli
- slitiny na bázi Ni
- slitiny na bázi Co
- slitiny obtížně tavitelných kovů, hlavně wolframu, tanta lu, molybdenu, a niobu

Tyto skupiny mají vzhledem ke svému odlišnému chemickému složení a struktuře rozdílné vlastnosti. Například slitiny titanu jsou používány pro svou nízkou hmotnost, ale při vysokých teplotách ztrácejí pevnost, proto je nutné v tomto případě použít žárupevné oceli. Nejlepší pevnostní vlastnosti při vysokých teplotách mají slitiny na bázi niklu a slitiny na bázi kobaltu, jejich nevýhodou je však jejich vysoká cena. Nejvyšší teplotě odolávají vysokotavitelné kovy, přičemž jejich nevýhodou je nízká pevnost [1].



Obr. 2: Teplotní oblasti použití hlavních skupin žárupevných slitin [1]

## 2.4 Využití superslitin

Využití žárupevných slitin je značně široké. Nejčastěji jsou využívány v letectví, energetice, chemickém a petrochemickém průmyslu, pro svoji vlastnost zachovat si pevnost po dlouhou dobu i při velmi vysokých teplotách. Superslitiny jsou však používány i pro jiné své vlastnosti, například korozivzdornost a vysokou pevnost. Ty jsou využity v kryogenice a lékařství při výrobě biokompatibilních náhražek lidského těla.

Nejčastější aplikace superslitin jsou [2]:

- letectví / komponenty proudových motorů:
  - šrouby
  - hřídele
  - pláště
  - lopatky turbíny
  - spalovací komory
  - forsáže
  - obraceče tahu
- komponenty kondenzačních elektráren:
  - rozvody páry
  - komponenty parních turbín
  - kotle
- automobilové komponenty:
  - turbodmychadla
  - výfukové ventily
- zpracování kovů:
  - nástroje používané při práci v nadměrných teplotách
  - lisovací formy
  - formy na odlévání
- komponenty používané v lékařství:
  - stomatologie
  - protézy
- komponenty využívané v kosmonautice:
  - tepelně namáhané pláště
  - části raketového motoru
- zařízení využívané v jaderné energetice
  - hnací mechanismy regulačních tyčí
  - armatury reaktorů
- chemický a petrochemický průmysl:
  - potrubí
  - reaktory
  - čerpadla

## 2.5 Creep

### 2.5.1 Definice creepu

Působí-li na krystalickou látku vnější namáhání, mřížka se začne přizpůsobovat tak, aby rovnováha mezi působícími vnějšími silami byla zachována. Přizpůsobení atomové mřížky se makroskopicky projevuje jako deformace. Deformace je tedy odezvou tělesa na působící napětí a je závislá na velikosti napětí, teplotě a případně na rychlosti deformace.

Deformaci lze rozdělit na tři základní druhy a to na elastickou, anelastickou a plastickou [3].

Elastická deformace, nazývaná také jako pružná, nastává v okamžiku působení napětí a ztrácí se, pokud je toto napětí odstraněno. Je tedy vratná a časově nezávislá.

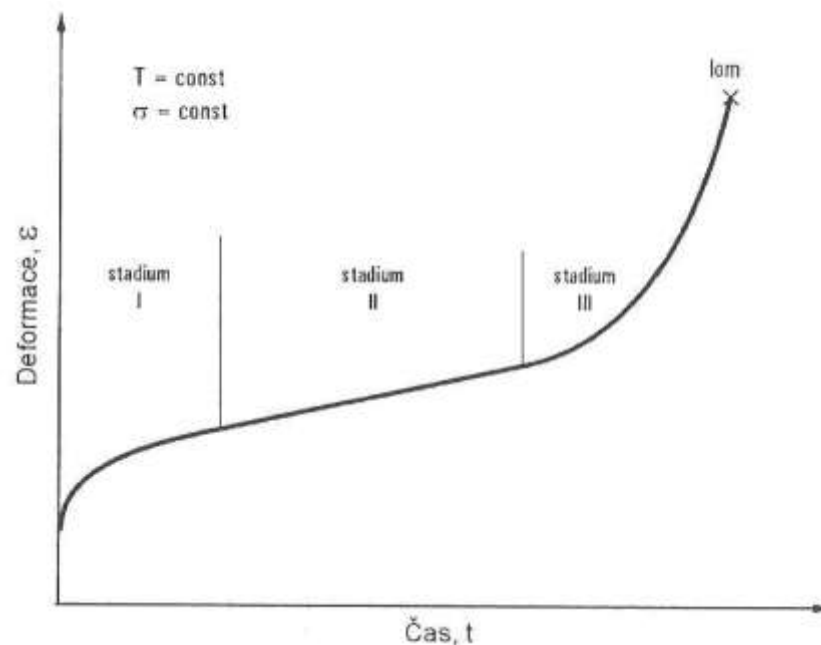
Anelastická deformace je vratná. Od elastické se liší pouze tím, že je časově závislá a to na rychlosti deformace a struktuře.

Plastická deformace, která se vyznačuje trvalou změnou tvaru tělesa, je nevratná a je tvořena časově závislou a časově nezávislou složkou. Časově závislá složka plastické deformace se nazývá creep.

Anglický termín „creep“ se obvykle v české literatuře nazývá jako „tečení“. Creep je jednou z nejdůležitějších charakteristik superslitin.

## 2.5.2 Creepová křivka

Závislost creepové deformace na čase vyjadřuje creepová křivka. Tato křivka je grafickým znázorněním poměrného prodloužení na čase při konstantní teplotě a napětí. Creepová křivka neboli křivka tečení charakterizuje tři stádia creepu [3].



Obr. 3: Křivka tečení [3]

První stádium označujeme jako primární nebo tranzitní creep. Vyjadřuje prodloužení v prvním stádiu zatížení, při němž rychlost creepu s časem klesá. Při nízké teplotě se uskutečňuje pouze toto stádium.

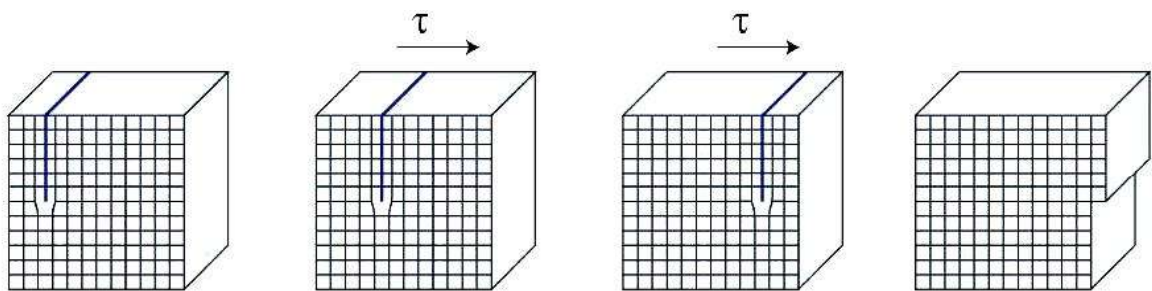
Druhé stádium označujeme jako sekundární nebo stacionární creep. Při tomto stádiu se rychlost creepu s časem nemění. Druhé stádium se uskutečňuje při vysoké teplotě, kdy zotavení vyvažuje účinky deformačního zpevnění.

Třetí stádium označujeme jako terciální creep. Při tomto stádiu rychlost creepu s časem vzrůstá. Vzrůst rychlosti je ovlivněn vzrůstajícím napětím nebo metalurgickou změnou struktury. Třetí stádium končí lomem materiálu.

## 2.6 Mechanismy plastické deformace

Nejvýznamnějším mechanismem plastické deformace je skluz dislokací, který je základním mechanismem dislokačního creepu. Uskutečňuje se při poměrně nízkých teplotách a při vyšších rychlostech deformace. Je-li teplota dostatečně vysoká, vstupuje do popředí jev, který je při nízkých teplotách jen málo významný. Tento jev se nazývá dynamické zotavení.

Dynamické zotavení do jisté míry likviduje deformační zpevnění, a to v závislosti na teplotě a rychlosti deformace. Uskutečňuje se různými mechanismy, z nichž nejvýznamnějším je šplhání hranové dislokace. To závisí na difuzi, která může probíhat dvěma způsoby: mřížkou – při vyšších teplotách a jádru dislokací – při nižších teplotách [3].

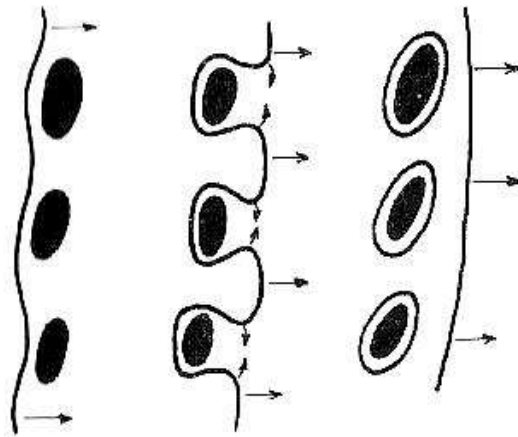


Obr. 4: Dislokační skluz [7]

## 2.7 Precipitačně a disperzně zpevněné soustavy

Žárupevné slitiny mohou být precipitačně nebo disperzně zpevněny částicemi fází. Ty se stávají překážkou pohybu dislokací, a tím zlepšují vlastnosti těchto slitin. Při velmi vysokých teplotách musejí částice splňovat následující předpoklady [3]:

- v průběhu creepu se od sebe nesmí vzdalovat příliš rychle, v ideálním případě by se částice v matici neměly pohybovat vůbec
- za velmi vysokých teplot musejí být v podstatě plasticky nedeformovatelné
- je nutné, aby byly v matici vhodně uspořádány, vzhledem k podmínkám, za nichž creep probíhá: při difuzním creepu je třeba, aby částice byly v místech hranice zrn; při dislokačním creepu musí být v znu



Obr. 5: Pohyb dislokace přes disperzně zpevněnou soustavu [3]

## 3 Charakteristika niklových superslitin

### 3.1 Vybrané žárupevné slitiny Ni

Různé druhy žárupevných slitin niklu mají rozdílné chemické složení. V současnosti používané žárupevné slitiny niklu jsou z hlediska chemického složení od svých prvotních typů významně odkloněny. Vývoj žárupevných slitin je uskutečnitelný zejména díky technicko-technologickému pokroku a stimulovaný zvětšujícími se požadavky v jaderné a vojenské technice, letectví a kosmonautice.

Tab. 1: Chemické složení vybraných žárupevných slitin na bázi niklu [1]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	C	B	Zr	Jiné
Hasteloy X	22	1,5	9	0,6	-	-	-	-	0,1	-	-	Fe18,5
IN 625	21,5	-	9	-	-	3,6	0,2	0,2	0,05	-	-	Fe2,5
Haynes 230	22	-	2	14	-	-	0,3	-	0,1	-	-	La0,02
Waspaloy	19,5	13,5	4,3	-	-	-	1,3	3	0,08	0,006	-	-
Udimet 500	18	18,5	4	-	-	-	2,9	2,9	0,08	0,006	-	Zr0,05
N 115	14,3	13,2	-	-	-	-	4,9	3,7	0,15	0,16	0,04	
IN 713C	12,5		4,2			2	6,1	0,8	0,12	0,012	0,1	
IN 738LC	16	8,5	1,7	2,6	1,7	0,9	3,4	3,4	0,11	0,01	0,05	
Rene 77	0,015	15	4,3				4,3	14,6	0,07	0,016	0,05	
Rene 80	14	9,5	4	4			3	5	0,17	0,015	0,05	
Rene 95	14	8	3,5	3,5		3,5	3,5	2,5	0,15	0,01	0,05	
IN-792	12,4	9	1,9	3,8	3,9		3,1	4,5	0,12	0,02	0,1	
IN-100	10	15	3				5,5	4,7	0,18	0,014	0,06	V1
M-M 200	9	10	12,5			1	5	2	0,15	0,015	0,06	
M-M 200+Hf	9	10	12,5		1	5	2		0,14	0,015	0,05	Hf1,8
M-M 247	8,3	10	0,7	10	3		5,5	1	0,14	0,015	0,05	Hf1,5
phaB-1900	8	10	6		4		6	1	0,1	0,015	0,1	
GTD 111	14	9,5	1,5	3,8	2,8		3	4,9	0,1	0,01		
IN 939	22,5	19		2	1,4	1	1,9	3,7	0,15	0,009	0,09	

### 3.2 Chemické složení

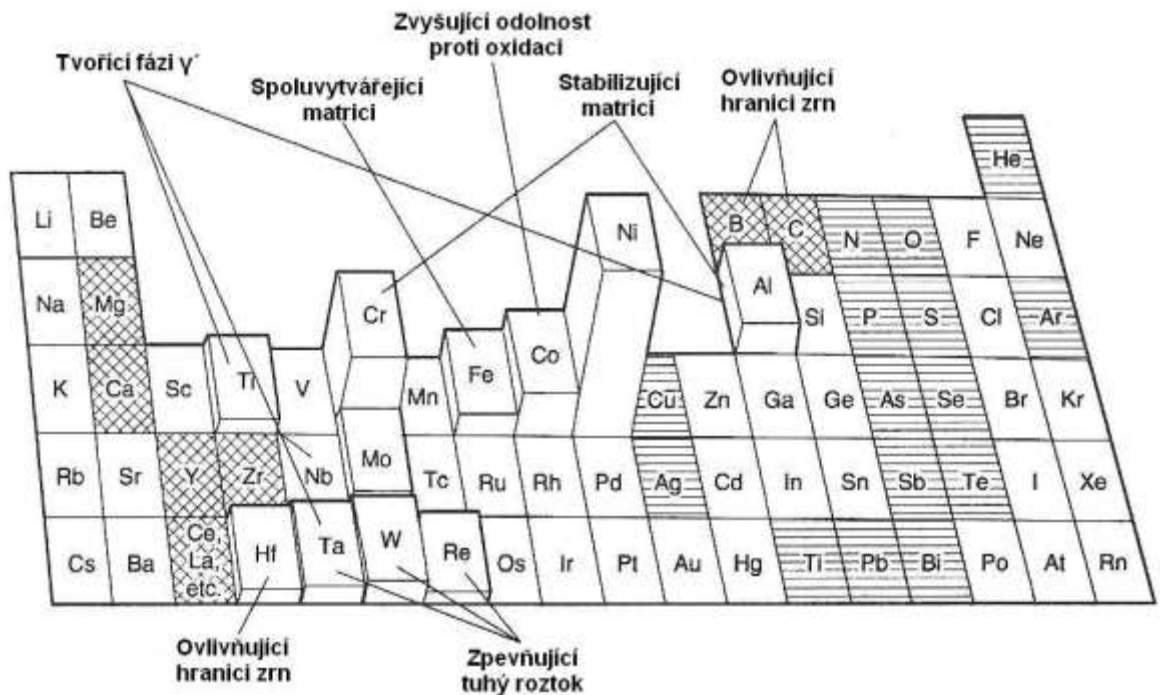
Žárupevné slitiny niklu mají bohaté chemické složení, aktuálně používané superslitiny jsou tvořeny z deseti až osmnácti legujících prvků. V závislosti na prvcích tvořících matici je tedy možné je rozdělit následujícím způsobem:

- Ni-Cr
- Ni-Co-Cr
- Ni-Fe-Cr

Legující prvky, které se vyskytují v superslitinách, je možné zařadit do pěti hlavních skupin [1]:

- prvky tvořící a zpevňující matici, přičemž matrice je tvořena tuhým roztokem s mřížkou kubickou plošně centrovanou
- prvky tvořící intermetalickou fázi  $\gamma'$  s mřížkou kubickou plošně centrovanou
- prvky ovlivňující fázové složení a strukturu hranic zrn
- prvky vytvářející karbidické fáze a prvky vytvářející boridické fáze
- nežádoucí přísady





Obr. 6: Legující prvky používané v žárupevných slitinách na bázi niklu [2]

### 3.3 Vlastnosti prvků v žárupevných slitinách Ni

Nikl, Kobalt a železo tvoří matici struktury a jejich koncentrace má velký vliv na rozpustnost legujících prvků. Ostatní legující prvky zlepšují pevnostní vlastnosti za vysokých teplot a to zpevněním tuhého roztoku, tvorbou precipitátů a také tvorbou stabilních karbidů [1].

#### 3.3.1 Nikl, kobalt, železo

Nikl tvoří základní složku slitin a určuje jejich strukturu, stabilitu fází a chování v technologických procesech. Je to kov s měrnou hmotností  $8,9 \text{ g/cm}^3$  a teplotou tání  $1455^\circ\text{C}$  [4]. Krystalová struktura je kubická plošně centrovaná, proto má nikl dobré plastické vlastnosti a tvářením za studena výrazně zpevňuje. Spolu s železem a kobaltem patří do skupiny feromagnetických kovů. Nikl poměrně dobře odolává korozi v atmosféře, vodě a v alkalických roztocích.

Železo může částečně zastoupit nikl, čímž se snižuje cena slitiny. Má však nežádoucí vliv na žáruvzdornost, protože jeho oxidy mají sníženou přilnavost k základu. Další nevýhodou je náchylnost slitin k vylučování nežádoucích intermetalických fází.

Kobalt stabilizuje matici, přičemž zvyšování jeho obsahu snižuje rozpustnost v ní obsažených legujících prvků, a to zejména hliníku a titanu. Jeho hlavní účel ve slitině je zvýšit žárupevnost a zajistit dobré technologické vlastnosti.

### 3.3.2 Chrom

Chrom zaručuje dobrou odolnost slitiny proti oxidaci za vysokých teplot. Tvoří 5 až 30 % hmotnostního složení slitiny. Vytvářením velmi stabilního karbidu typu  $M_{23}C_6$  zvyšuje odolnost slitiny proti creepu a zlepšuje její plastické vlastnosti. Karbid  $M_{23}C_6$  se vylučuje hlavně na hranicích zrn a defektech krystalické struktury.

### 3.3.3 Molybden a wolfram

Hlavním cílem molybdenu a wolframu ve slitinách niklu je zpevnění matrice. Pokud jejich obsah přesahuje 6% tvoří tyto prvky karbidy typu  $M_6C$ . Ve slitinách Ni-Co-Cr je velké množství molybdenu a wolframu vázáno ve fázi  $\gamma'$ .

### 3.3.4 Tantal, niob, titan a vanad

Tantal, niob, titan a vanad mohou nahradit hliník ve fázi  $\gamma'$ . V procesu křehnutí tvoří precipitáty jednoduchých karbidů. Tyto karbidy však nejsou stabilní a za vyšších teplot se během delší doby rozpouštějí.

Poměr koncentrace Ti:Al má velký vliv na strukturu a vlastnosti žárupevné slitiny, dále vymezuje podmínky, rozmezí výskytu a tvar fáze  $\gamma$ .

### 3.3.5 Bor, zirkonium a hafnium

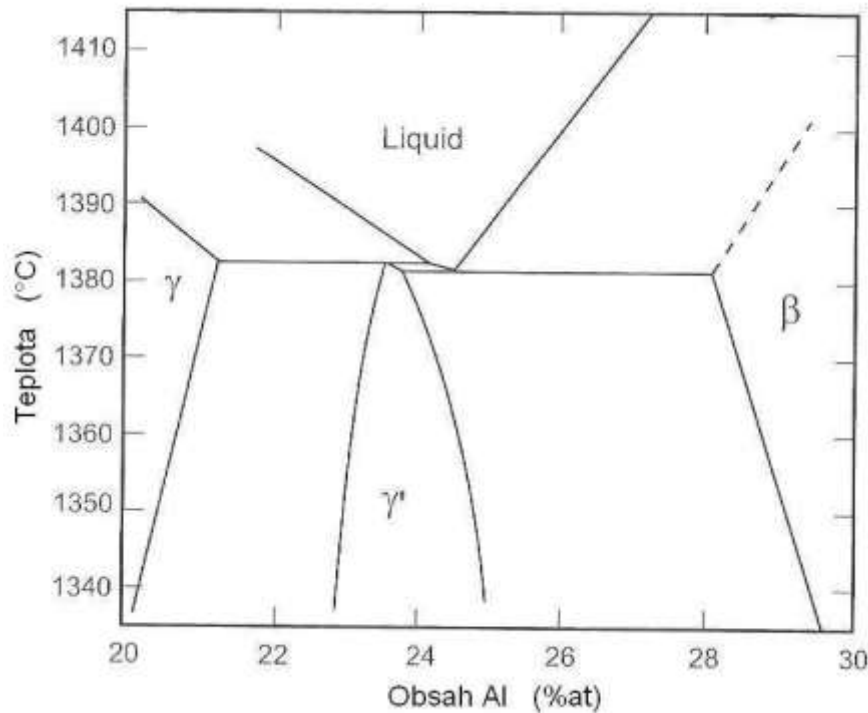
Bor je přidáván do superslitin v množství do 0,02% hmotnostního složení. Tento prvek zvyšuje pevnost při tečení, což je způsobeno jeho vlivem na morfologii hranic zrn. Přítomnost boru také zvyšuje odolnost proti křehkému porušení za vysoké teploty. V podmínkách dlouhodobé práce zpožďuje vylučování karbidu chromu po hranicích zrn. Stejně vlastnosti v superslitinách má také zirkonium přidávané v množství do 0,05% a hafnium do 2% hmotnostního složení.

### 3.3.6 Cer a jiné prvky vzácných zemin

Cer a jiné prvky vzácných zemin jsou přidávány do superslitin v malém množství. Jejich úkolem je zvýšit odolnost proti vysokoteplotní oxidaci.

## 3.4 Fázové složení

Žárupevné slitiny niklu jsou vypracovány na základě binárního rovnovážného systému Ni-Al. Ze strany niklu je struktura slitiny složená z tuhého roztoku  $\gamma$ , po dosažení přibližně 10% hliníku ve slitině se objevuje fáze  $\gamma'$ . Ta je intermetalickou fází  $Ni_3Al$  a má mřížku kubickou plošně centrovanou. Rozpustnost hliníku v tuhém roztoku  $\gamma$  je závislá na teplotě, z čehož vyplývá možnost precipitačního vytvrzování slitiny pomocí tepelného zpracování. Při přidání dalších prvků, například chromu, titanu, niobu, se rozpustnost hliníku ve fázi  $\gamma$  mění a dvofázová oblast  $\gamma+\gamma'$  se zužuje [1].



Obr. 7: Fázový diagram Ni-Al [5]

### 3.4.1 Tuhý roztok $\gamma$

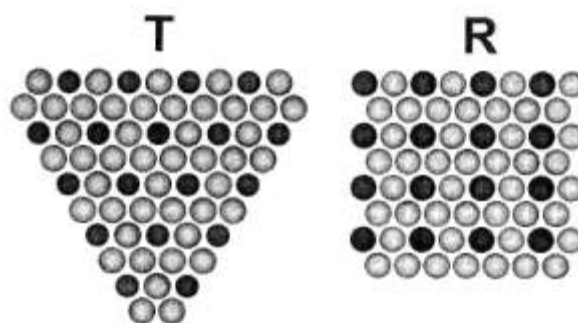
Čistý nikl nemá za vysokých teplot příliš vysokou hodnotu modulu pružnosti. Současně vykazuje poměrně velkou hodnotu součinitele samodifuze. Tuhý roztok na bázi niklu se na rozdíl od čistého niklu vyznačuje vyšší žárupevností, což je spjato s následujícími vlastnostmi [1]:

- vynikající schopnosti niklu pro tvorbu tuhých roztoků o velké stabilitě, a také vyšším stupněm naplnění elektronové podslupky 3d.
- vytvářením ochranných oxidických vrstev, bohatých na  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  s nízkou koncentrací vakancí; oxidické vrstvy jsou efektivní bariérou pro proniknutí jiných kovů a zabraňují difuzi škodlivých příměsí kyslíku, dusíku a síry do slitiny

Tyto vlastnosti umožňují použití superslitin na bázi niklu při vysokých teplotách. Žárupevné slitiny si tedy drží svoji pevnost řádově do 90% jejich teploty tání.

### 3.4.2 Fáze $\gamma'$

Fáze  $\gamma'$  je základní fází žárupevných slitin na bázi niklu. Chemické složení, morfologie a rozmístění jejího precipitátu ve struktuře má rozhodující vliv na žárupevnost. Fáze  $\gamma'$  je vylučována z neuspořádaného tuhého roztoku  $\gamma$ , což vede ke vzniku nadmřížky. Tato fáze je tedy nadstrukturou intermetalické sloučeniny typu  $\text{A}_3\text{B}$  s mřížkou kubickou plošně centrovanou, geometricky těsně uspořádanou.



Obr. 8: Uložení atomů na plochách těsného uspořádání [5]

### 3.4.3 Karbidické a boridické fáze

Superslitiny na bázi niklu, zejména vícesložkové slitiny s vyšším obsahem uhlíku, obsahují ve struktuře karbidy typu MC,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  a  $M_6C$  a boridy  $M_3B_2$ ,  $M_{23}B_6$ ,  $M_2B$  a  $MB_{12}$  [1].

Primární karbidy typu MC jsou tvořeny hlavně titanem, tantalem, niobem a vanadem. V přítomnosti fáze  $\gamma'$  ve struktuře, což je běžné, se stabilita karbidu TiC zmenšuje, protože do ní přechází titan. Karbidy jsou rozmístěny rovnoměrně v matici  $\gamma$ , nebo jsou seskupeny na hranici zrn. Jejich přítomnost umožňuje vazbu určitého množství uhlíku a zpomaluje růst zrn při vysokoteplotním zpracování.

Molybden, wolfram a chrom se rozpouštějí v karbidu MC, tím oslabují síly jeho meziatomových vazeb. Tento proces vede k rozpadu karbidu MC na karbidy  $M_{23}C_6$  a  $M_6C$ . Jev se uskutečňuje hlavně v karbidu TiC při teplotě 815°C.

Karbid  $M_7C_3$  se obecně nevyskytuje ve vícesložkových slitinách. Objevuje se ve slitinách s nízkou koncentrací chromu, které neobsahují molybden, wolfram, a další silně karbidotvorné prvky. Při teplotě nad 1100°C se mění na karbid  $M_{23}C_6$ .

Karbid  $M_{23}C_6$  se často tvoří ve slitinách s velkým množstvím chromu. Při obsahu molybdenu a wolframu vzniká karbid  $Cr_{21}(Mo,W)_2C_6$ . Přítomnost karbidu  $M_{23}C_6$  ve struktuře může být výsledkem přeměny karbidu MC nebo precipitace z matrice  $\gamma$  při tepelném zpracování.

Karbid  $M_6C$  se tvoří ve slitinách s vysokým obsahem molybdenu a wolframu při teplotě vyšší než 800°C. Tyto se soustředí hlavně na hranicích zrn. Jejich chemické složení je nejčastěji  $(Ni,Co)_3Mo_3C$  nebo  $(Ni,Co)_2W_4C$ .

V současnosti je do žárovečných slévarenských slitin přidáván bor v množství 0,005 až 0,2% hmotnostního složení. Při použití boru snižujeme množství uhlíku ve slitině, což vede k nahrazení karbidů boridy.

Boridy  $M_3B_2$  se vylučují během krystalizace místo karbidu MC. Borid  $M_3B_2$  vykazuje lepší rozptýlení ve slitině a má příznivý vliv na změnu morfologických znaků při tepelném zpracování. Při vyšším obsahu boru ve slitině se během krystalizace vylučují velké částice boridu  $M_3B_2$ . Ty často vyrůstají z hranic zrn jako precipitáty ve tvaru bloků a pŕlměsícu.

### 3.4.4 Nežádoucí TCP fáze

Souhrnně se tyto fáze označují jako TCP (Topologically Close – Packed). Vznikají buď v průběhu tepelného zpracování nebo za provozních podmínek vlivem vysoké teploty a působícího napětí. Struktura těchto fází je buňková, přičemž atomy jsou těsně uspořádány jen ve vrstvách, ale vzdálenost mezi vrstvami je výrazně vyšší. Vrstvy těsně uspořádaných atomů jsou posunuté o vloženou vrstvu větších atomů, vytvářejících charakteristickou topologii. [6]

V superslitinách jsou TCP fáze nežádoucí hlavně pro svou nevhodnou morfologii a křehkost způsobenou anisotropií krystalické struktury. Zpravidla dlouhé, tenké a křehké částice, často vyloučené po hranicích zrn, zhoršují mechanické a creepové vlastnosti superslitin a bývají místem iniciace trhlin. Nežádoucí fáze mají rovněž nepříznivý vliv na žáruvzdornost. Obsahují totiž velké množství prvků zajišťujících žáruvzdornost, o které je ochuzena matrice. Mezi nežádoucí fáze patří  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\delta$ ,  $\eta$  a Lavesovy fáze. [6]

## 3.5 Odlévání superslitin

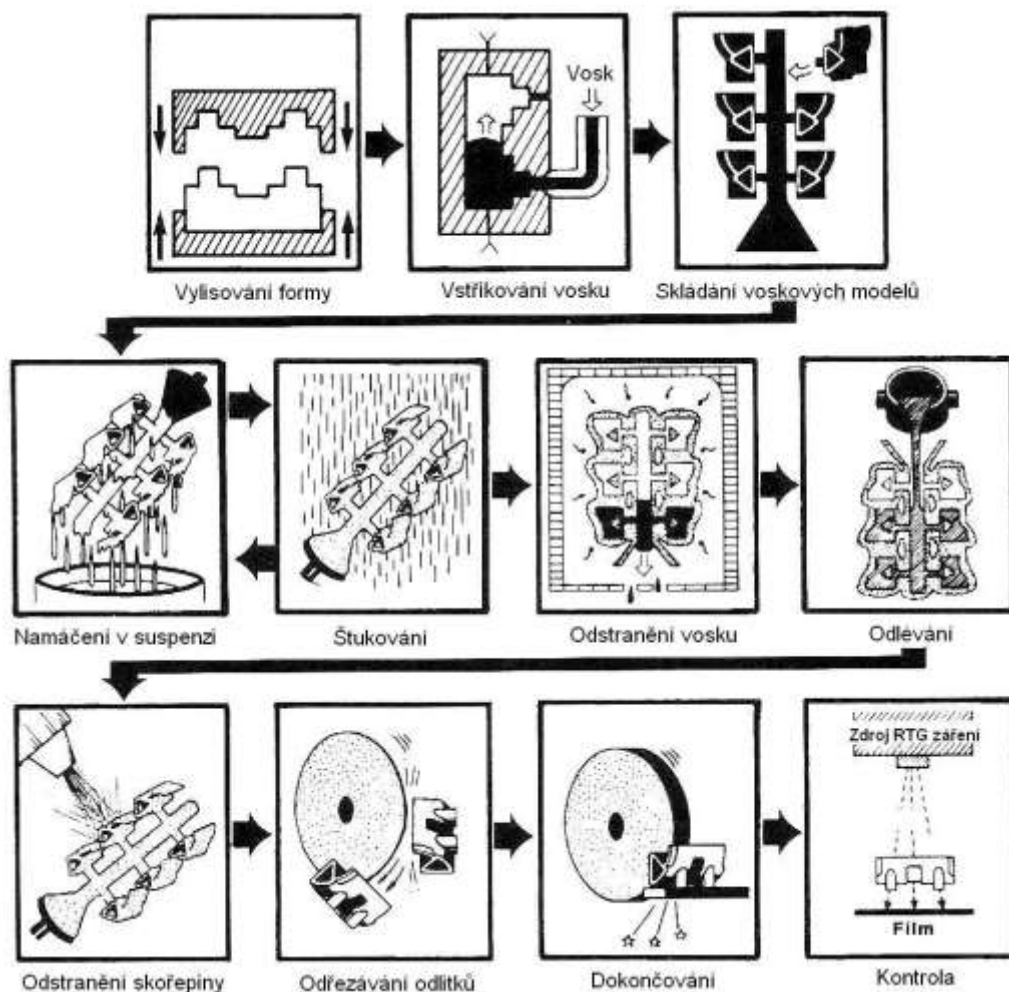
Niklové superslitiny jsou nejčastěji používány v litém stavu. Aby byla zajištěna optimální mikrostruktura a tím i mechanické vlastnosti, je třeba přesně definovat následující parametry lití:

- licí teplota
- teplota formy
- rychlost ochlazování tekutého kovu
- tepelný tok

Všechny tyto parametry mají významný vliv na strukturní charakteristiky, jako je velikost a orientace zrna, velikost mezidendritických prostor, tvar a rozložení precipitátů  $\gamma'$  atd.

### 3.5.1 Proces skořepinového odlévání

Při skořepinovém odlévání se používá keramická suspenze, která se nanáší na voskový model, ztvrdnutím této suspenze se vytvoří licí forma (skořepina). Vosk se z licí formy odstraní pomocí ohřevu, čímž vznikne dutá keramická skořepina, do níž se lije roztavený kov z vakuových pecí nebo pecí s ochranou atmosférou. Roztavený kov poté ve skořepině ztuhne. Pokud se nechává tuhnout přirozeně, bez vnějších zásahů do změny teploty během krystalizace, vzniká polykrystalická struktura. Pokud je teplota při tuhnutí řízená, vzniká struktura se sloupcovou texturou nebo monokrystal, který má z těchto struktur nejlepší vlastnosti. Pro vyjmutí odlitku je nutno skořepinu rozbít, skořepinovou formu lze tedy použít pouze jednou [2].



Obr. 9: Schéma postupu při skořepinovém odlévání [2]

### 3.5.2 Aplikace odlévání u superslitin

Skořepinové odlévání se často používá u superslitin na bázi niklu. V technologii monokrystalického odlévání superslitin došlo v posledních desetiletích k velkému rozvoji, a to díky zvyšujícím se nárokům superslitin při jejich aplikaci v proudových motorech. Řízené odlévání monokrystalů otvírá další možnosti rozvoje vysokopevnostních superslitin na bázi niklu.

### 3.6 Tepelné zpracování slitin na bázi Ni (vytvrzování)

Vytvrzování žárupevných slitin je jejich nejnáročnějším tepelným zpracováním. Optimální kombinace množství, tvaru, velikosti a způsobu vyloučení zpevňující fáze ve slitině je dosahována rozpouštěcím ohřevem, ochlazením a umělým stárnutím [7].

Teplota rozpouštěcího ohřevu je vysoká z důvodu rozpuštění co největšího množství fáze  $\gamma'$ . V závislosti na chemickém složení slitiny je teplota rozpouštění v rozmezí od 1080°C do 1220°C při době ohřevu 2 až 12 hodin. Z důvodu zamezení ochuzování povrchu legujícími prvky je rozpouštění prováděno ve vakuových pecích s ochrannou atmosférou.

Ochlazování z teploty rozpouštěcího ohřevu nesmí být prudké, proto se nejčastěji provádí na vzduchu. Při prudkém ochlazení, například ve vodě, by mohlo u vysokolegovaných žárupevných slitin dojít ke vzniku trhlin.

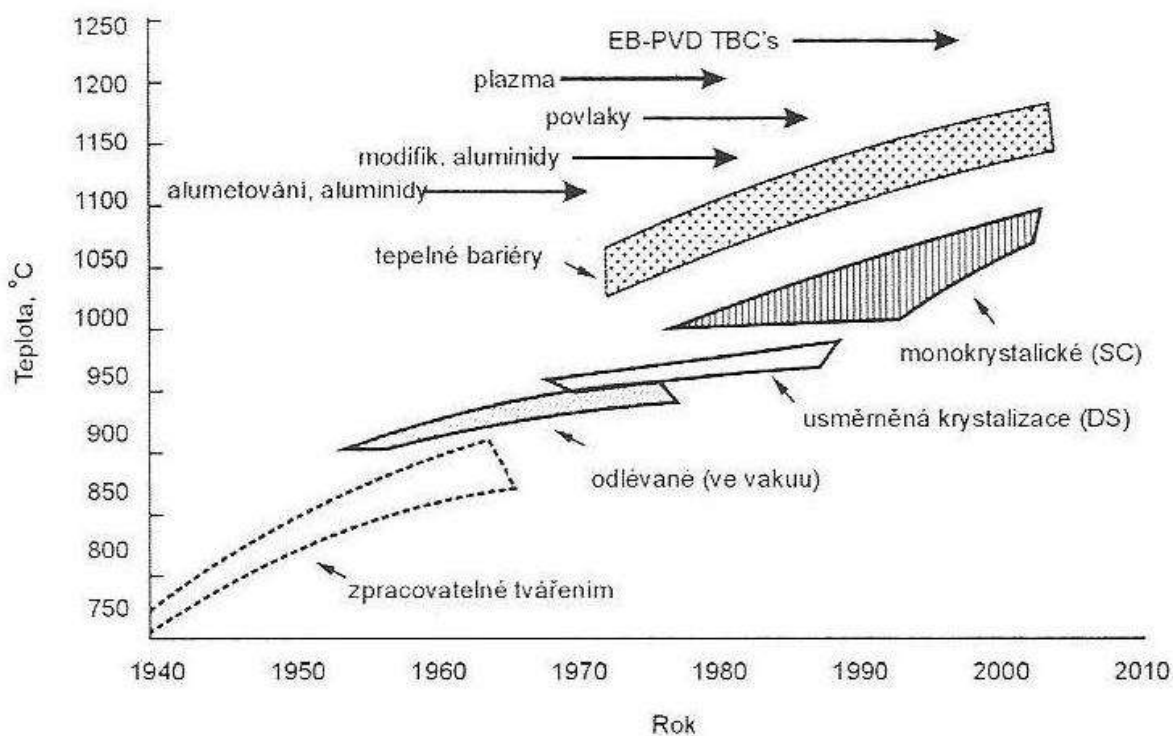
Stárnutí slitiny probíhá při ohřevu. Jeho teplota je vyšší, v krajním případě stejná, jako teplota, při které daná součást plní svoji funkci. Pohybuje se obvykle v rozmezí 700 až 950°C. Při stárnutí se z přesyceného tuhého roztoku vylučují precipitáty fáze  $\gamma'$  a karbidy. Některé slitiny jsou podrobovány stupňovitému stárnutí z důvodu vyloučení co největšího množství  $\gamma'$ .

## 4 Vývoj niklových superslitin

Žárupevné slitiny na bázi niklu procházejí od čtyřicátých let do současnosti neustálým vývojem. Vzhledem ke svému strategickému významu, zejména v letectví, se staly jednou z nejvíce zkoumaných skupin kovových materiálů. Snahou bylo vyrábět slitiny se stále vyššími užitnými vlastnostmi, umožňující vyrábět výkonnější, účinnější, a proto ekonomičtější agregáty. Vyvíjela se i technologie jejich zpracování, od prvních typů zpracovaných tvářením, přes vakuové odlévání, které bylo nejprve s polykrystalickou, poté se směrovou i monokrystalickou strukturou, až po využití žárovevých vrstev. Díky tomuto vývoji je dnes k dispozici velký počet superslitin.

Tab. 2: Ukázka slitin na bázi niklu, používaný předními výrobci leteckých motorů [1]

Pratt & Whitney Aircraft	General Electric	Rolls-Royce
Waspaloy		
Udimet 700	Rene 41	IN100
B-1900,1900+Hf	Rene 77	MAR-M-002
SCPWA1480	Rene 80	DS.MAR-M-002
SCPWA1484	Rene N4,N5,N6	SRR 99,SRR 47

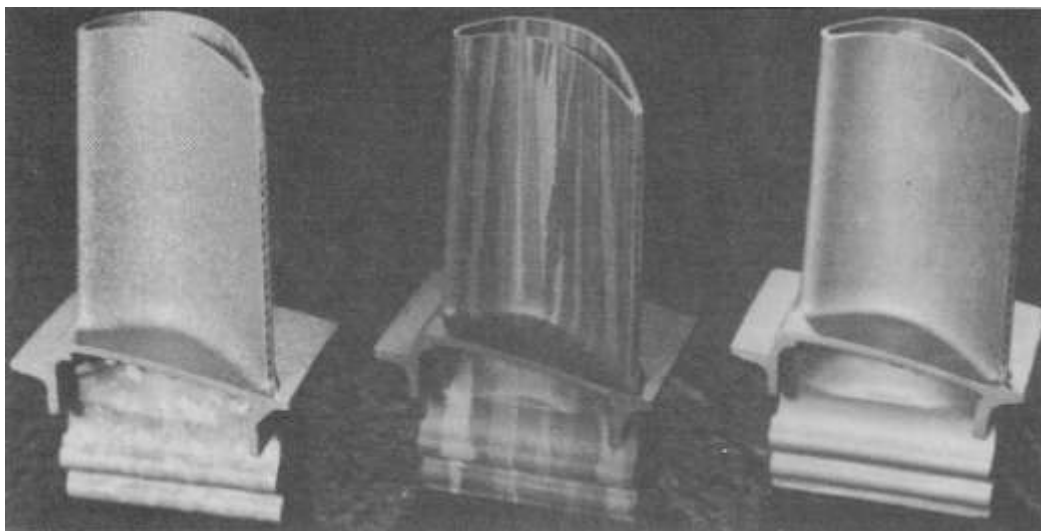


Obr. 10: Rozvoj žárovevých slitin na bázi niklu [1]



## 4.1 Slitiny s usměrněnou krystalizací

Lopatky rotorů leteckých motorů se vyrábějí pomocí technologie řízené krystalizace (DS – directional solidification), jejímž výsledkem je buď kolumnární polykrystalická mikrostruktura nebo monokrystal [8].



Obr. 11: Lopatka turbíny s polykrystalickou, směrovou a monokrystalickou strukturou [2]

### 4.1.1 Slitiny se směrovou krystalizací

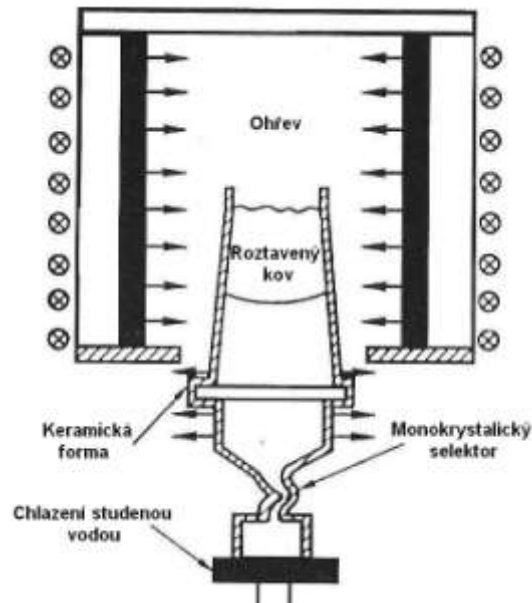
Pokud teplo při krystalizaci odvádíme jednosměrně při vysokém teplotním gradientu, je možné získat usměrněnou rozloženou fázi. Směrovou krystalizací lze získat materiál se sloupcovou strukturou s řízenou velikostí zrna. Sloupcová zrna jsou uložena rovnoběžně se směrem hlavního napětí, které působí na lopatku. Tímto způsobem je dosaženo značného nárůstu pevnosti při tečení a odolnosti proti tepelné únavě. Toto zlepšení vlastností je způsobeno eliminací příčných hranic zrn. První žárupevná slitina získaná metodou směrové krystalizace byla vyrobena pro lopatky turbín v americké firmě Pratt & Whitney Aircraft. Zásadním činitelem ovlivňujícím možnosti směrové krystalizace je chemické složení slitin, kterého lze dosáhnout modifikací slitin základních [1].

Tab. 3: Chemické složení slitin se směrovou krystalizací na lopatky plynových leteckých turbín [1]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	B	Zr	C	Hf	Jiné
CM186LC	6	9	0,5	8	5,7	0,7	3	0,015	0,05	0,07	1,4	Re3
CM247LC	8,1	9,2	0,5	9,5	5,6	0,7	3,2	0,015	0,015	0,07	1,4	-
MARM200Hf	9	10	12,5	12,5	5	2	1	0,015	0,5	0,15	1,8	-
MM247	8	10	0,6	10	5,5	1	3	0,015	0,03	0,15	1,5	-
GTD111	14	9,4	1,5	3,7	3	5	3	0,1	0,01	0,1	0,1	-
IN738LC	16	8,5	1,7	2,6	3,4	3,4	1,7	0,01	0,05	0,11	-	Nb0,9
IN792LC	12,5	9	1,85	4,1	3,4	3,4	4,1	0,015	0,02	0,08	1	-
DS16	16	5	3	-	3,5	3,5	3,5	0,015	0,015	0,06	1	-

## 4.1.2 Monokrystalické slitiny Ni

V minulosti monokrystalické slitiny niklu nedosahovaly očekávaných výsledků v porovnání se slitinami se směrovou krystalizací, přičemž i jejich výrobní náklady byly velmi vysoké. Kolem roku 1975 však byl zaznamenán výrazný pokrok při vytváření monokrystalů s vysokou pevností při tečení a vysokou odolností vůči tepelné a nízkocyklové únavě. Rozvoj monokrystalických slitin niklu udávali hlavně přední výrobci leteckých motorů: Pratt & Whitney Aircraft, Rolls-Royce a General Electric. Vývoj monokrystalických slitin lze vyčlenit do tří generací [1].



Obr. 12: Výroba monokrystalické slitiny [5]

### 4.1.2.1 Monokrystalické slitiny I. generace

Monokrystalické slitiny byly zpočátku vyvíjeny pro letecké motory, avšak nyní je lze použít i pro průmyslové turbíny. Odstranění přísad zpevňující hranici zrn jako jsou uhlík, bor, hafnium a zirkon umožnilo zvýšení teploty tání na 1335 až 1350 °C, aniž by se snížily pevnostní vlastnosti při nárůstu plasticity. Tyto slitiny mají navíc vysokou odolnost proti oxidaci a vysokoteplotní korozi.

Tab. 4: Chemické složení monokrystalických slitin I. generace [1]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Jiné
NASAIR100	9	-	1	10,5	5,7	1,2	3,3	-	-
CMSX-2	8	5	0,6	8	5,6	1	6	-	-
CMSX-3	8	5	0,6	8	5,6	1	6	0,1	-
CMSX-6	9,8	5	3	-	4,8	4,7	2	0,1	-
PWA1480	10	5	-	4	5	1,5	12	-	-
TMS-1	5,5	7,5	-	16,6	5,2	-	5,1	-	-
TMS63	6,9	-	7,5	-	5,8	-	8,4	-	-
AM3	8	5,5	2,25	5	6	2	3,5	-	-
SRR99	9	5	-	9,5	5,5	1,8	1,8	-	Nb0,7
ReneN4	9	8	2	6	3,7	4,2	4	-	Nb0,5
RR2000	10	15	3	-	5,5	4	-	-	V1
S.C.16	16	-	3	-	3,5	3,5	3,5	-	-

## 4.1.2.2 Monokrystalické slitiny II. generace

Monokrystalické slitiny II. generace vznikly zdokonalováním chemického složení svých předchůdců. Tyto slitiny obsahují 3% rhenia. Při této modifikaci byla snížena pravděpodobnost výskytu nežádoucích karbidických fází bohatých na chrom a wolfram. Obsah obtížně tavitelných prvků jako jsou wolfram, rhenium, molybden a tantal naopak výrazně stoupl, stejně jako množství kobaltu, které bylo zvýšeno na 9%.

Tab. 5: Chemické složení monokrystalických slitin II. generace [1]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Jiné
CMSX-4	6,5	9	0,6	6	5,6	1	6,5	0,1	3	-
PWA1484	5	10	2	6	5,6	-	9	0,1	3	-
ReneN5	7	8	2	5	6,2	-	7	0,2	3	-
S.C.180	5	10	2	5	5,2	1	8,5	0,1	3	-
SMP14	4,8	8,1	1	7,6	5,4	-	7,2	-	3,9	Nb1,4

## 4.1.2.3 Monokrystalické slitiny III. generace

Monokrystalické slitiny III. generace mají vykazovat vyšší pevnost při tečení než slitiny II. generace. Této pevnosti se dosáhlo dalším zdokonalením chemického složení, hlavně zvýšením obsahu rhenia z 3% na 6%. V této generaci slitin jsou prováděny i pokusy s použitím iridia, což stabilizuje matici a omezuje vylučování nežádoucích intermetalických fází topologicky těsně uspořádaných. Nevýhodou jeho použití je však značná ekonomická náročnost.

Slitiny III. generace vykazují ve srovnání se slitinami II. generace:

- výrazné zvýšení stability
- až o 30°C vyšší pevnost tečení
- 2x až 3x vyšší odolnost proti nízkocyklové únavě
- 2x až 3x vyšší pevnost při vysokocyklové únavě
- dobré slévárenské vlastnosti a odolnost proti oxidaci

Tab. 6: Chemické složení monokrystalických slitin III. generace [1]

Slitina	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Jiné
CMSX-10	2	3	0,4	5	5,7	0,2	8	0,03	6	Nb0,1
CMSX-10M	2	1,7	0,4	5,4	5,78	0,24	8,2	0,03	6,5	Nb0,08
ReneN6	4,2	12,5	1,4	6	5,75	-	7,2	0,15	5,4	Co,05 B0,004 Y0,01
Alloy5A	4,5	12,5	-	5,75	6,25	-	7	0,15	6,25	Co,05 B0,004 Y0,01
TMS-75	3	12	2	6	6	-	6	0,1	5	-
TMS-80	2,9	11	1,9	5,8	5,8	-	5,8	0,1	4,9	Ir3

## 4.2 Slitiny vyráběné metodami práškové metalurgie

Technologie práškové metalurgie je používána u běžných superslitin, slitin se superplastickými vlastnostmi a disperzně zpevněných slitin.

Malá velikost zrn práškových žárupevných slitin zajišťuje zvýšenou plastickou houževnatost součástem o velkých rozměrech. Pokud přitom není slitina zpevněná oxidy, je na ní dosaženo superplastických vlastností.

Slitiny disperzně zpevněné oxidy musejí splňovat následující kritéria [1]:

- oxid musí být stabilní
- rozměry částic oxidu do 10 až 50 nm
- objemové množství oxidu do 0,4 až 4%
- střední vzdálenost mezi částicemi 50 až 300 nm
- teplota tavení vyšší než 1300°C

Tato kritéria splňují oxidy  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  a  $\text{Y}_2\text{O}_3$  přičemž nejlépe pak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{ThO}_2$ . Tyto slitiny vykazují nejlepší mechanické vlastnosti a korozní odolnost pokud jsou společně s oxidy zpevněny i fází  $\gamma'$ .

## 4.3 Žáruvzdorné vrstvy

Pro součásti z žárupevných slitin, které pracují v extrémních teplotních podmínkách, jsou používány žáruvzdorné vrstvy. Tyto vrstvy mají velmi dobrou odolnost proti vysokoteplotní korozi, nízkou tepelnou vodivost a vysokou stabilitu struktury. Takto upravené lopatky mohou v závislosti na typu proudového motoru vydržet 5000 až 20000 hodin. Z mnoha druhů ochranných vrstev mají největší uplatnění vrstvy difuzní na bázi hliníku.

Nejdéle používané jsou povlaky hliníkové a povlaky modifikované na bázi hliníku: Al-Si, Al-Cr, Al-Pt, Pt-AlCr. Vrstva hliníku je nanášena metodou PVD, zatímco vrstva platiny o tloušťce 7  $\mu\text{m}$  je vytvářena galvanickou metodou. Dalšího rozvoje bylo dosaženo nezávislostí chemického složení povlaku na žárupevné slitině, což vedlo k vytvoření povlaků typu MeCrAlY.

Další typy povlaků - tepelné bariéry – splňují úlohu tepelné izolace, která chrání slitinu před působením extrémních teplot. Jsou vyrobeny z  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+5%Ni}$ , jako mezivrstva je používán povlak typu MeCrAlY.

Jinou skupinou jsou kovo-keramické povlaky, které zvyšují pracovní teplotu žárupevné slitiny až o 170°C.

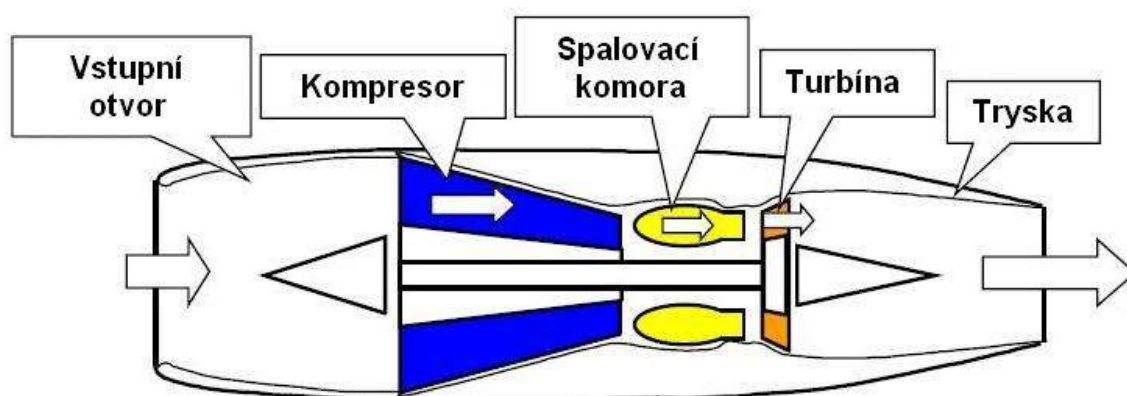
Zvyšování žárupevnosti není jedinou výhodou žárupevných vrstev. Neméně důležité je i působení povlaků na nízkocyklovou a tepelně-mechanickou únavu [1].

## 5 Aplikace slitin Ni v leteckém průmyslu

### 5.1 Princip činnosti proudového motoru

Proudové motory patří mezi reaktivní motory, u nichž je využit třetí Newtonův pohybový zákon (zákon akce a reakce). To znamená, že zde dochází k přeměně vnitřní energie plynu v energii mechanickou. Při spalování paliva (kerosinu) dochází ke vzniku plynů, které pak unikají tryskou umístěnou v zadní části motoru do okolí. Síla vypuzující plyny z motoru je akce, někdy je také nazývána tahem motoru. Síla opačného směru, která působí na samotný motor a uvádí ho tak do pohybu, je reakce. Tah motoru lze definovat druhým Newtonovým pohybovým zákonem (zákon síly) jako součin hmotnosti a zrychlení plynu vytlačeného z motoru.

U proudového motoru je vzduch nasáván vstupním otvorem umístěným v jeho přední části. Dále pak putuje přes kompresor, který jej stlačuje na desetinu původního objemu, do spalovacích komor. Zde se do tlakem zahřátého vzduchu vstříkuje pomocí trysky palivo. Spalováním paliva se uvolňuje tepelná energie. Horké plyny, které vycházejí ze spalovacích komor, roztáčejí turbínu v zadní části motoru. Ta přes hřídel vedoucí podélnou osou motoru pohání kompresor. Ve výstupní trysce za turbínou plyn uniká z motoru ven a tepelná energie se mění na kinetickou, čímž vzniká tah motoru [9].



Obr. 13: Části proudového motoru [9]

### 5.2 Materiály používané v proudovém motoru

Při výrobě proudových motorů je třeba dosáhnout co nejvyšší výkonnosti a mechanické odolnosti při minimální spotřebě pohonných hmot a co nejnižší hmotnosti. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na výběr vhodných materiálů.

Z hlediska dosahované teploty lze rozdělit proudové motory na dvě hlavní sekce a to studenou a horkou [10].

Ve studené sekci jsou používány slitiny titanu, hliníku a kompozitní materiály s organickou maticí. Ty jsou tvořeny velmi odolnými vlákny, například uhlíkovými, která jsou ponořena do matrice. Hlavní výhodou těchto materiálů je jejich nízká hmotnost. Do této sekce patří vstupní otvor a kompresor.

Horká sekce proudového motoru vyžaduje použití žárupevných materiálů, jako jsou slitiny niklu, kobaltu a kompozity s keramickou maticí, které jsou teprve na začátku svého vývoje, ale mají slibnou budoucnost. Do této sekce patří spalovací komora, turbína a výstupní tryska. Lopatky vysokotlakých turbín, zvláště těch, které se nacházejí v blízkosti spalovacích komor, jsou vystaveny tak vysoké teplotě, že by ani žárupevné materiály nebyli schopni odolávat. Teplota zde může dosahovat až 2000°C. Tento problém lze řešit použitím systému chlazení vzduchem a pomocí žáruvzdorných povlaků.

### 5.3 Aplikace superslitin na bázi niklu v proudovém motoru

Části proudového motoru, zvláště pak lopatky vysokotlaké turbíny, jsou vystaveny extrémním podmínkám, a to jak tepelným, tak mechanickým. Při těchto podmínkách jsou lopatky vystaveny řadě degradačních vlivů, zvláště vysokoteplotní korozi, únavovým procesům a creepu. Těmto podmínkám díky svým vlastnostem nejlépe vyhovují žárupevné slitiny na bázi niklu. Z tohoto důvodu jsou právě tyto materiály při výrobě proudových motorů takřka nenahraditelné. Moderní niklové superslitiny jsou použitelné do provozních teplot asi 1150°C [8].

## 6 Závěr

Žárupevné materiály na bázi niklu jsou bezesporu jedním z nejvýznamnějších materiálů současnosti. Od čtyřicátých let do současnosti u nich došlo k velkému rozvoji. Jejich neutuchající vývoj je udáván zejména požadavky předních výrobců leteckých motorů, jakými jsou Pratt & Whitney Aircraft, General Electric a Rolls-Royce.

Na problematiku životnosti a strukturní stability lopatek ze superslitin se klade velký důraz. Důvodem jsou selhání motorů nadzvukových letadel v posledních letech. Součástí spalovacích turbín proudových motorů jsou za provozu namáhány časově, teplotně a napěťově proměnnými zátěžnými cykly. Lopatky turbín jsou vystaveny mnoha degradačním vlivům, zejména korozi za vysokých teplot, únavovým procesům a creepu. V důsledku krátkodobého přetížení během startů, přistávání, případně i dalších nepravidelností chodu proudového motoru nastávají vlivem extrémních teplot a napětí nevratné změny v mikrostruktuře materiálu a jeho vlastnostech. Dochází k lokálnímu rozpouštění a následně ke zpětnému vylučování zpevňujících fází, přičemž se postupně eliminuje dendritické odmíšení prvků, které je pro odlévané lopatky charakteristickým znakem jejich výchozí mikrostruktury a ovlivňuje jejich vlastnosti.

Jak již bylo uvedeno, moderní niklové superslitiny jsou použitelné do teplot asi 1150 °C. Ve snaze pokořit tuto teplotní hranici se sahá po superslitinách na bázi kovů platinové skupiny (Pt, Rh, Ir, Ru), které vytvářejí fáze podobné strukturní skladby jako niklové superslitiny. Dalším z trendů zlepšování vlastností superslitin je používání povrchových vrstev sloužících jako ochrana proti vysokoteplotní korozi nebo technologie jejich výroby pomocí práškové metalurgie.

## 7 Literatura

- [1] Jonšta, Z.: *Žárupevné oceli a slitiny*. 1.vyd. Žilina, ZUSI 2002. 389 s. ISBN 80-968605-6-9
- [2] Donachie, M. J.: *Superalloys. A technical guide*. 2nd ed. Materials Park, ASM International 2002. 437 s. ISBN 0-87170-749-7
- [3] Čadek, J.: *Creep kovových material*. 1. vyd. Praha, Academia 1984. 271 s.
- [4] Vojtěch, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1
- [5] Durand-Charre, M.: *The Microstructure of Superalloys*. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publ 1997. 124 s. ISBN 90-5699-097-7
- [6] NĚMEC, K.: Vliv podmínek zatěžování na strukturu a vlastnosti litých niklových superslitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005.
- [7] Ptáček, L.: *Nauka o materiálu.II*. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [8] Grgač P., Janovec, J., Dománková, M. *Nové materiály a technologie*, 1. vyd. Bratislava: STU. 2007, 217 s. ISBN 978-80-227-2599-6
- [9] Hünecke, K.: *Jet Engines: Fundamentals of Theory, Design and Operation*. 1st ed. Ramsbury, The Crowood Press Ltd 1997. 224 s. ISBN 9781853108341
- [10] Thevenin, J.C.: *Le turboréacteur, moteur des avions à réaction*. 3<sup>ème</sup>. Paris, Association Aéronautique et Astronautique de France 2004. 41 s.