

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



PLAZMOVÉ NAVAŘOVÁNÍ NI-SLITIN

PRO PLYNOVÉ TURBÍNY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Autor:** Bc. David Rebhán

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Rohan Ph.D., IWE

Praha 2020



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rebhán** Jméno: **David** Osobní číslo: **419986**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Plazmové navařování Ni-slitin pro plynové turbíny**

Název diplomové práce anglicky:

**Plasma hardfacing of Ni-alloys for gas turbine**

Pokyny pro vypracování:

provést literární rešerši se zaměřením na navařování plazmatem, niklové slitiny pro energetiku, plynové turbíny, těsnění rotoru  
ověřit parametry navaření opotřebovaného rotoru na lineárním modelu  
vyhodnotit návrhy z hlediska metalografie, mikrotvrdosti

Seznam doporučené literatury:

PRASAD, K. Siva, Ch. Srinivasa RAO a D. Nageswara RAO. Application of design of experiments to plasma Arc Welding Process: a review: a review. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. sciELO, 2012  
ROHAN, Pavel, Monika BOXANOVÁ, Lecheng ZHANG a František LUKÁČ. High speed steel deposited by pulsed PTA – frequency influence. In: Proceedings of the Conference in Düsseldorf - ITSC 2017  
MELLOR, B. G. 9 - Welding surface treatment methods for protection against wear. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. Woodhead Publishing, 2006

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


**Ing. Karel Kovanda, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
Ing. Pavel Rohan, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.6.2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

# Anotační list

Jméno autora, titul:	David Rebhán, Bc.
Název DP:	Plazmové navařování Ni-slitin pro plynové turbíny
Anglický název:	Plasma hardfacing of Ni-alloys for gas turbine
Rok:	2020
Obor studia:	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí:	Ing.Pavel Rohan, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
Bibliografický údaje:	Počet stran: 97 Počet obrázků: 53 Počet tabulek: 16 Počet příloh: 1
Klíčová slova:	PTA, plazmové navařování, niklové slitiny pro energetiku, rotor plynové turbíny, labyrintové těsnění
Keywords:	PTA, Plasma Transferred Arc, plasma surfacing, hardfacing, nickel alloys for energy engineering, gas turbine rotor, labyrinth seal
Anotace:	Diplomová práce se věnuje problematice navařování niklových slitin pro plynové turbíny pulzní metodou PTA. Rešeršní část je zaměřena na plynové turbíny, labyrintové těsnění, dále na problematiku navařování plazmatem a rozbor niklových slitin pro energetiku. Experimentální část se zabývá optimalizací parametrů navaření opotřebeného rotoru a vyhodnocením návarů z hlediska metalografie a mikrotvrdosti.
Abstract:	The diploma thesis deals with the issue of hardfacing by Plasma Transferred Arc for gas turbines. The research part is focused on an introduction to gas turbines, labyrinth seals and further on the issue of plasma hardfacing and analysis of nickel alloys for energy engineering. The experimental part deals with the optimization of the PTA parameters of the worn rotor and the evaluation of the welds in terms of metallography and microhardness.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím pramenů a literatury uvedením v seznamu citovaných zdrojů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za vedení diplomové práce, za jeho odborné vedení, cenné rady a obětavou podporu při řešení této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D., IWE za cenné připomínky a pomoc při experimentální části práce. Rád bych poděkoval firmě Solar Turbines EAME s.r.o. za spolupráci a poskytnuté materiály pro řešení experimentální části. V poslední řadě bych rád poděkoval své rodině, zejména svým rodičům, kteří mi byli po celou dobu studia vždy morální podporou.

## OBSAH

Seznam zkratk a symbolů.....	8
Seznam obrázků .....	9
Seznam grafů.....	11
Seznam tabulek.....	12
Úvod.....	13
<b>1 Plazma .....</b>	<b>14</b>
1.1 Výskyt plazmatu .....	15
<b>2 Technologie navařování plazmatem.....</b>	<b>18</b>
2.1 Princip PTA.....	19
2.2 Plyny při navařování prášku plazmatem (PTA) .....	20
2.3 Přídavný materiál.....	21
2.4 Plazmové hořáky.....	22
2.1 Materiály určené pro navařování (PTA).....	24
2.2 Výhody a nevýhody PTA.....	26
<b>3 Nikl.....</b>	<b>27</b>
3.1 Použití niklu .....	28
<b>4 Niklové slitiny .....</b>	<b>29</b>
4.1 Slitiny konstrukční.....	29
4.2 Slitiny žáruvzdorné a žárovevné.....	32
4.3 Niklové slitiny pro energetiku .....	34
<b>5 Plynové turbíny.....</b>	<b>38</b>
5.1 Princip plynové turbíny .....	39
5.2 Labyrintové těsnění rotoru plynové turbíny.....	43
5.3 Konfigurace labyrintového těsnění v plynové turbíně .....	49
5.4 Opatřování labyrintového těsnění .....	50
<b>6 Experimentální část .....</b>	<b>51</b>
6.1 Cíle a úvod experimentu.....	51
6.2 Použitá zařízení.....	52
6.3 Navařování zkušební vzorku.....	57

---

6.4	Měření mikrotvrdomosti.....	60
<b>7</b>	<b>Výsledky a diskuze.....</b>	<b>61</b>
7.1	Část 1 – Navařování na slitinu Nimonic 901 .....	61
7.2	Část 2 - Navařování na slitinu Waspaloy.....	68
7.3	Průběhy teplot při navařování .....	70
7.4	Vyhodnocení metalografie.....	73
7.5	Vyhodnocení mikrotvrdomosti .....	80
	<b>Závěr .....</b>	<b>81</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>84</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>97</b>

## Seznam zkratk a symbolů

Zkratka, symbol	Anglický název	Český překlad
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition	Chemická depozice vrstev za asistence plazmatu
PTA	Plasma Transferred Arc	Navařování plazmatem (přídavný materiál = prášek)
PAW	Plasma Arc Welding	Navařování plazmatem (přídavný materiál = drát)
TZ	Heat treatment	Tepelné zpracování
HRSG	Heat recovery steam generator	Parní generátor s rekuperací tepla
TV	Television	Televize
LED	Light-Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
LCD	Liquid Crystal Display	Displej z tekutých krystalů
FCC	Face centered cubic	Kubická plošně centrovaná
PTFE	Polytetrafluorethylene	Polytetrafluorethylen
PEEK	polyetheretherketon	Polyéteréterketon
PI	Polyimide	Polyimid
PPS	polyphenylensulfide	Polyfenylensulfid
IH	-	Horní hodnota proudu [A]
IL	-	Dolní hodnota proudu [A]
ZM	-	Základní materiál



## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Vlákna plazmatu na Slunci [3]</i> .....	15
<i>Obrázek 2 Generátory plazmatu blesky a neony [4][5]</i> .....	16
<i>Obrázek 3 Plazmatická koule [2]</i> .....	16
<i>Obrázek 4 Produkty vyrobené pomocí plazmy [6]:</i> .....	17
<i>Obrázek 5 Porovnání PTA a PAW [8]</i> .....	18
<i>Obrázek 6 Schéma plazmatronu (PTA) [15]</i> .....	20
<i>Obrázek 7 Typy přídavných materiálů pro plazmatické navařování [19]</i> .....	22
<i>Obrázek 8 Schéma plazmatronu [20]</i> .....	23
<i>Obrázek 9 Příklady plazmatronů [21]</i> .....	24
<i>Obrázek 10 Příklady návarů metodou PTA [18] [21] [26]</i> .....	25
<i>Obrázek 11 Nikl [31]</i> .....	27
<i>Obrázek 12 Mřížka čistého niklu [32]</i> .....	27
<i>Obrázek 13 Vlastnosti niklu [33]</i> .....	27
<i>Obrázek 14 Aplikace slitin u proudového motoru [43]</i> .....	33
<i>Obrázek 15 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718 a Waspaloy [56]</i> .....	37
<i>Obrázek 16 Největší plynová turbína na světě (Harriet) [58]</i> .....	38
<i>Obrázek 17 Plynová turbína Taurus 60 (Solar Turbines) [61]</i> .....	40
<i>Obrázek 18 a) otevřený a b) uzavřený typ plynové turbíny [60]</i> .....	41
<i>Obrázek 19 Schéma a) regeneračního a b) kombinovaného cyklu plynové turbíny [61]</i> .....	42
<i>Obrázek 20 Turbulentní proudění uvnitř labyrintu [62]</i> .....	43
<i>Obrázek 21 Základní rozdělení labyrintových těsnění [66]: a) přímé labyrinty, b) přímé labyrinty se šikmými zuby, c) odstupňované labyrinty, d) stupňovité labyrinty, e) drážkové labyrinty, f) opotřebitelné labyrinty</i> .....	44
<i>Obrázek 22 Porovnání standardního (britového) a labyrintového těsnění [63]</i> .....	46
<i>Obrázek 23 Příklad Labyrintového těsnění pro ochranu ložiska [73]</i> .....	48
<i>Obrázek 24 Konfigurace labyrintového těsnění u plynové turbíny [70]</i> .....	49
<i>Obrázek 25 Druhy opotřebení zubů: a) ohýbání, b) zkroucení c) odlomení [74]</i> .....	50
<i>Obrázek 26 Lamely labyrintového těsnění na rotoru plynové turbíny [76]</i> .....	51
<i>Obrázek 27 Navařovací automat PPC 250 R6 [78]</i> .....	53
<i>Obrázek 28 Měřicí ústředna ALMEMO 5690 - 2M</i> .....	54
<i>Obrázek 29 Zařízení pro navařování termočlánků BT-2 [80]</i> .....	55
<i>Obrázek 30 Laboratorní pec LE 05/11, regulátor HT40P [81]</i> .....	55

Obrázek 31 Mikroskop Zeiss Axio Observer [82] DIM [81].....	56
Obrázek 32 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104.....	56
Obrázek 33 Rozmístění termočlánků na testovacím vzorku .....	58
Obrázek 34 První zkušební návar – vznik póru .....	58
Obrázek 35 Druhý a třetí zkušební návar.....	59
Obrázek 36 Průběh zkoušky mikrotvrdosti dle Vickerse.....	60
Obrázek 37 Příprava navařované součásti ze slitiny Nimonic 901 s umístěnými termočlánky.....	61
Obrázek 38 První vrstva po navařování rozkvyem hořáku .....	63
Obrázek 39 Výsledný návar složený z pěti vrstev (prášek Nibasit 625-P).....	63
Obrázek 40 Výsledná stěna po navařování (prášek Nibasit 625-P).....	65
Obrázek 41 Trhlina při navařování 8. vrstvy (prášek = Celsit V-P).....	67
Obrázek 42 Výsledná stěna po navařování (prášek = Celsit V-P).....	67
Obrázek 43 Výsledek navařování stěny na slitinu Waspaloy.....	68
Obrázek 44 Trhlina vytvořená při navařování 8. vrstvy .....	69
Obrázek 45 Metalografické výbrusy.....	73
Obrázek 46 První návar provedený rozkvyem hořáku (zvětšení 1×).....	74
Obrázek 47 Makroskopické snímky druhého a třetího návaru, zvětšení 1×.....	75
Obrázek 48 Struktura prvního návaru rozkvyem hořáku .....	76
Obrázek 49 První návar rozkvyem hořáku.....	77
Obrázek 50 Vlevo: Makrostruktura druhého návaru (zvětšení 1×) .....	78
Obrázek 51 Vlevo: Mikrostruktura slitiny Inconel 625 (zvětšení 200×) [88].....	78
Obrázek 52 Vlevo: Makrostruktura třetího návaru (zvětšení 1×).....	79
Obrázek 53 Vlevo: Mikrostruktura slitiny Stellite 6 (elektronový mikroskop, zvětšení 1000×) [88] .....	79

---

## Seznam grafů

<i>Graf 1 Teplotní průběh prvního testovacího vzorku.....</i>	<i>70</i>
<i>Graf 2 Teplotní průběh pro navařování rozkvyem hořáku na slitinu Nimonic 901 (přídavný materiál Nibasit 625-P).....</i>	<i>71</i>
<i>Graf 3 Teplotní průběh navařování stěny na slitinu Waspaloy (přídavný materiál Celsit V-P).....</i>	<i>72</i>
<i>Graf 4 Průběhy mikrotvrdostí pro 3 měřené vzorky (základní materiál Nimonic 901).....</i>	<i>80</i>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Ionizační energie, teploty varu a hustota plazmových plynů. [12]</i> .....	21
<i>Tabulka 2 Porovnání metod svařování v rámci rychlosti [27]</i> .....	26
<i>Tabulka 3 Chemické složení vybraných Monelů v hm. %. [36]</i> .....	30
<i>Tabulka 4 Chemické složení slitiny INCONEL 718 [49]</i> .....	35
<i>Tabulka 5 Chemické složení slitiny Waspaloy [54]</i> .....	36
<i>Tabulka 6 Rozdělení plynových turbín [61]</i> .....	41
<i>Tabulka 7 Srovnání různých materiálů těsnění [63]</i> .....	45
<i>Tabulka 8 Porovnání chemického složení slitiny Inconel 718 a Nimonic 901 [49] [77]</i> .....	52
<i>Tabulka 9 Chemické složení prášku Nibasit 625-P [85]</i> .....	57
<i>Tabulka 10 Parametry pro jednotlivé části návaru prvního zkušebního navařování</i> .....	58
<i>Tabulka 11 Parametry navařování pro 2 a 3 zkušební návar</i> .....	59
<i>Tabulka 12 Parametry navařování rozkyvem hořáku pro jednotlivé vrstvy</i> .....	62
<i>Tabulka 13 Chemické složení prášku Celsit V-P % [87]</i> .....	64
<i>Tabulka 14 Parametry pro navařování první stěny (prášek Nibasit 625-P)</i> .....	65
<i>Tabulka 15 Parametry pro navařování druhé stěny (prášek = Celsit V-P)</i> .....	66
<i>Tabulka 16 Parametry pro navařování stěny na slitinu Waspaloy (prášek = Celsit V-P)</i> .....	69

## Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na plazmové navařování (PTA) niklových slitin (Inconel 718 a Waspaloy) pro plynovou turbínu ve spolupráci se společností **Solar Turbines EAME s.r.o.** Na základě požadavků partnera bylo provedeno navaření rotoru plynové turbíny za účelem náhrady lamel labyrintového těsnění.

Byla provedena rešerše na téma technologie navařování plazmatem, která se v současné době využívá pro svou snadnou automatizaci a vysoký stupeň reprodukovatelnosti navařovaných vrstev. Výhody tohoto procesu jsou vysoce koncentrovaný zdroj tepla a využití přídavného materiálu ve formě prášku, a proto lze dosáhnout velmi nízké úrovně zředění návarového kovu se základním materiálem. Jelikož lze použít přídavné materiály v práškové formě, je možné vyrábět povlaky z mnoha různých materiálů a jejich kombinací se širokou škálou tvrdosti a dalších vlastností. Návary vzniklé aplikací PTA jsou primárně určeny k ochraně součástí, které pracují v extrémních podmínkách. Zvyšují odolnost vůči teple, otěru, korozi, erozi, adhezivnímu a abrazivnímu opotřebení.

Niklové slitiny jsou využívány převážně v energetice pro svou odolnost proti korozi a pevnost při vysokých teplotách. Další aplikace těchto slitin lze nalézt v leteckém průmyslu u civilních a vojenských proudových motorů, kde se využívají v hořácích, turbínách i výfukových systémech. Nacházejí uplatnění v řadě dalších oblastí, jako je automobilový, chemický průmysl nebo kosmonautika.

Labyrintové těsnění je důležitým prvkem plynových turbín a má velký vliv na jejich účinnost. Lamely tohoto těsnění jsou vystaveny velkému opotřebení a v konečné fázi dochází k jejich odstranění.

Cílem a motivací této práce bylo se seznámit s problematikou plazmatického navařování (PTA). Vypracovat rešerši na téma niklové slitiny, plynové turbíny, labyrintové těsnění a s využitím teoretických znalostí provést experimentální navaření rotoru plynové turbíny s následným vyhodnocením z hlediska metalografie a mikrotvrdosti.

# 1 Plazma

Plazma je ionizovaný plyn obsahující ionty, elektrony a neutrální částice. V roce 1920 bylo poprvé pojmenováno chemikem Irvingem Langmuirem. Z fyzikálního hlediska se označuje jako čtvrté skupenství hmoty (disociace atomů plynu pomocí vysoké teploty nebo ionizujícího záření na kladné ionty a záporné elektrony). Plazma je kvazineutrální, to znamená, že obsahuje stejné množství kladných a záporných částic. Definiuje se kolektivním chováním, což je schopnost generovat a zároveň reagovat na globální elektrická a magnetická pole. Frekvence kmitů elektronů plazmatu je vyšší než srážková frekvence. [1] Plazma lze rozdělit na základě teploty, tlaku a hustoty [2]:

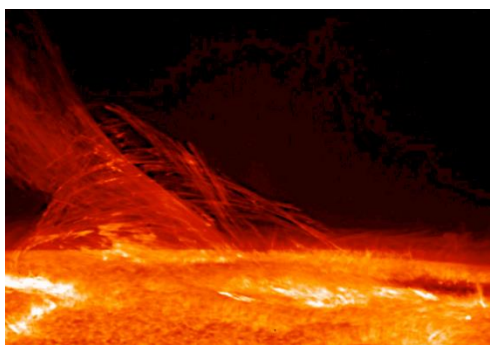
1. Relativně nízká teplota ( $10^4$ – $5 \cdot 10^4$  K), vysoký tlak
  - a. Plameny
  - b. Plynná dynamická plazma
  - c. Plazmové trubice
  - d. Laserové plazma
  - e. Plazma v elektrickém oblouku
2. Vysoká teplota (energie nabitých částic je větší než 100 eV), nízký tlak
  - a. Výbojky (zářivky, plazmové obrazovky)
  - b. Raketové pohony
3. Vysoká hustota, vysoká teplota
  - a. Experimenty s jadernou fúzí
  - b. Experimenty s laserovou implozí

Chování plazmatu ovlivňuje stupeň jeho ionizace. Proto také lze plazma rozdělit na základě stupně ionizace na 1) slabě ionizované, kde je nízká koncentrace nabitých částic vztažená ke koncentraci neutrálních molekul a nabitě částice se tedy převážně srážejí s molekulami plynu a 2) silně ionizované, kde je vysoká koncentrace nabitých částic a dominance vzájemných srážek nabitých částic. Na rozdíl od silně ionizovaného plazmatu

může slabě ionizované plazma existovat i za pokojové teploty. Na základě separace jednotlivých složek atomu od sebe lze plazma také dělit na běžné (poškození elektronové části obalů), termonukleární (destrukce atomárních obalů), nukleonové (destrukce jader atomů) a kvark-gluonové (destrukce protonů a neutronů). [3] [4]

## 1.1 Výskyt plazmatu

Nejčastější výskyt plazmatu je ve vesmíru. Lze ho nalézt na Slunci (*Obrázek 1*), ve hvězdách, mlhovinách, ionosféře nebo slunečním větru. Další jeho formy jsou v podobě blesku, polární záře, uvnitř zářivek a „neonů“ (*Obrázek 2*) nebo v elektrickém oblouku – plazmová koule (*Obrázek 3*). [1]

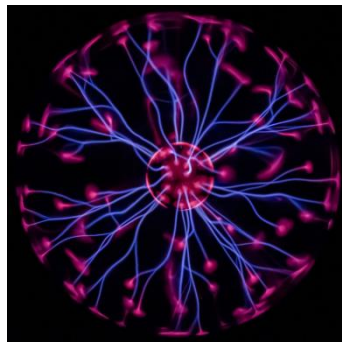


*Obrázek 1 Vlákna plazmatu na Slunci [3]*

Plazma může tvořit lineární útvary (pinč, helikální pinč nebo dvojspirála) a plošné útvary (proudové vrstvy a proudové stěny). Lze ho využít i pro řízenou termonukleární reakci, konstrukci raketového motoru na bázi plazmového injektoru nebo magnetohydrodynamický generátor. Velký význam a přínos má výzkum plazmatu v oblasti s teplotami stovek milionů stupňů (termojaderné reakce). [4] [5]



Obrázek 2 Generátory plazmatu blesky a neony [4][5]



Obrázek 3 Plazmatická koule [2]

Zpracování plazmatu má zásadní význam pro největší výrobní odvětví na světě, kam patří především elektronický průmysl. Zde jsou procesy na bázi plazmatu nezbytné pro produkci integrovaných mikroelektronických obvodů. Dále se zpracování materiálu pomocí plazmatu využívá například v leteckém a automobilovém průmyslu nebo ve zdravotnictví. Produkty vyrobené nebo upravené pomocí plazmatu lze nalézt v každé domácnosti (Obrázek 4). [6]

V poslední době se zvýšil zájem o využití plazmatu ve zpracování odpadu. Výhodou je menší zatížení životního prostředí ve srovnání s klasickým spalováním, jelikož neprodukuje popel. Je zde i možnost zpracování nebezpečného odpadu. [7]





Obrázek 4 Produkty vyrobené pomocí plazmy [6]:

1 – plazma TV, 2 - lopatky turbíny, 3 - LED diody, 4 – PECVD povlakování, 5 – umělá kyčel – iontová implementace, 6 – plazmové řezání textilu, 7 – xenonové světlomety, 8 – výroba vodíku pomocí plazmové elektrolýzy vody, 9 – plazmové zplyňování odpadů, 10 – tlumiče auta, 11 – čištění vody, 12 – depozice LCD obrazovky, 13 – výroba solárních článků, 14 – zpracování mikroelektroniky, 15 – výroba léků, 16 – plazmová polymerace, 17 – úprava textilu, 18 – plazmatické ošetření stentů, 19 – úprava obalů, 20 – předúprava keramických nátěrů, 21 – výroba zářivek

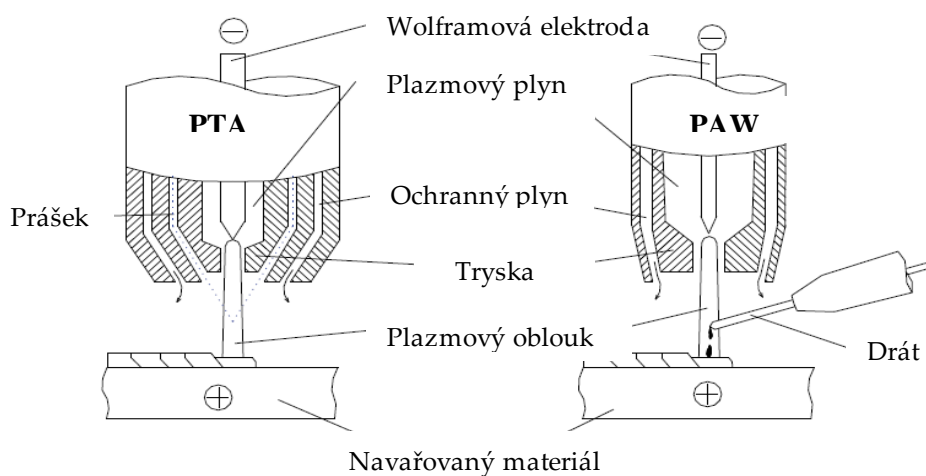
## 2 Technologie navařování plazmatem

Technologie navařování plazmatem lze rozlišit podle přídavného materiálu, který je přiváděn do svarové lázně a tvoří se základním materiálem (navářovanou součástí) metalurgicky výhodné spojení. [8]

Technologie PAW (Plasma Arc Welding) byla představena Robertem M. Gagem v roce 1954 v laboratoři Linde Union v Buffalu a její objevení bylo patentováno v roce 1957. První svařovací zařízení, jehož vývoj trval kolem deseti let, bylo uvedeno na trh v roce 1964. U technologie PAW se aplikuje přídavný materiál ve formě drátu. [9] [10]

PTA (Plasma Transferred Arc) je analogicky odvozeno od PAW metody, kde hlavní rozdíl je forma přídavného materiálu, který je zde přítomen ve formě prášku. Obě technologie využívají wolframovou elektrodu, trysku, plazmový a ochranný plyn (viz *Obrázek 5*). Technologie PTA je výhodnější především z hlediska dostupnosti a ceny přídavného materiálu v práškové formě. Největší výhodou využití prášku je nižší ředění základního materiálu (PTA = cca 6-10 %, PAW = cca 20-26 %). PTA vykazuje vyšší kvalitu povrchu návaru, menší oblast, která je tepelně ovlivňována a snadnější automatizaci. [8]

Návary vytvořené technologií PAW i PTA poskytují ochranu navařované části před extrémními podmínkami a zvyšují její odolnost vůči teple, otěru, korozi, erozi, adhezivnímu a abrazivnímu opotřebení. [8]



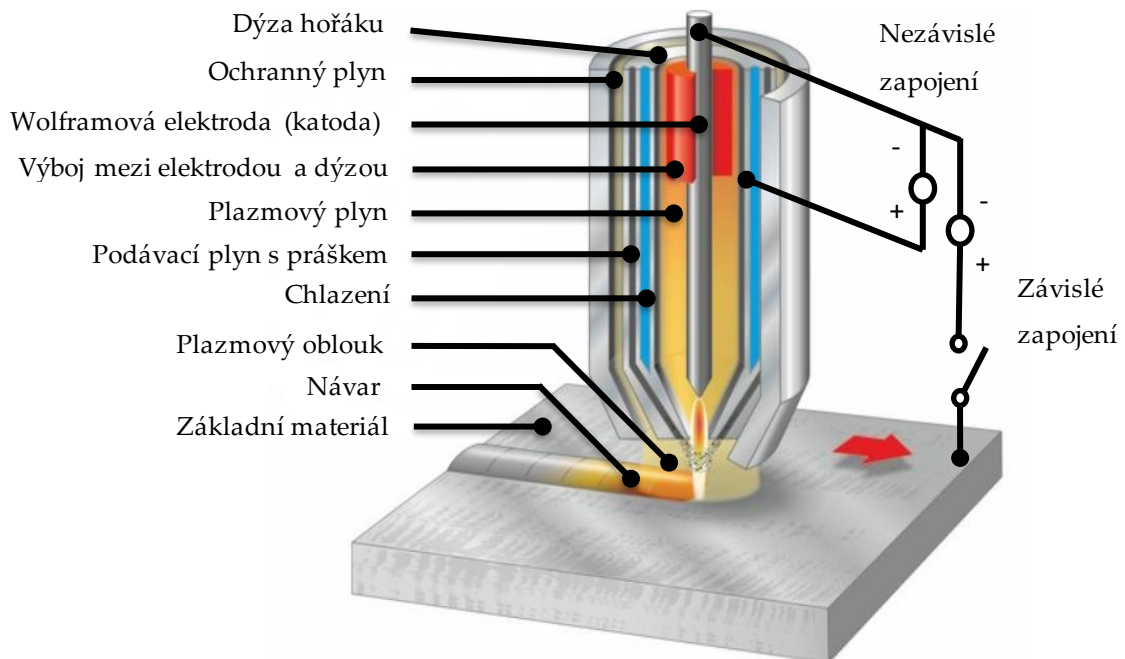
Obrázek 5 Porovnání PTA a PAW [8]

## 2.1 Princip PTA

Při navařování pomocí technologie PTA nejprve vzniká pilotní oblouk, který je vytvořen vysokofrekvenčním výbojem mezi měděnou dýzou a elektrodou. Plazma vznikne ionizací nebo disociací s následnou ionizací plazmového plynu, který prochází plazmovým hořákem. Plazma je složeno z kladně nabitých iontů a elektronů oddělených od atomu. To znamená, že je elektricky vodivé a má schopnost uzavírat elektrický obvod vytvořený zdrojem elektrického proudu. Pomocí pilotního oblouku se zapaluje přenesený oblouk, který vzniká mezi neodtavující se wolframovou elektrodou (katodou, - pól) a navařovanou součástí (anodou, + pól). Návar je vytvořen pomocí přídavného materiálu ve formě prášku, který je nejprve přiveden do proudu plazmatu pomocí podávacího plynu a poté dopadá do tavné lázně. [11] [12] [13]

Teplota plazmatu se pohybuje od 9 000–20 000 °C, proto je plazmatron vybaven vnitřními kanálky, které jsou napojeny na vodní chladicí obvod a zabezpečují tak dostačující odvod tepla. [14]

Úspěšné vytvoření návaru určuje mnoho parametrů jako je například průtok plazmového, ochranného a podávacího plynu, kinematika plazmatronu, velikost a tvar částic prášku, rychlost podavače prášku a proud hlavního oblouku. Schéma plazmatronu lze vidět na *Obrázku 6*. [11]



Obrázek 6 Schéma plazmatronu (PTA) [15]

## 2.2 Plyny při navařování prášku plazmatem (PTA)

### 2.2.1 Plazmový plyn

Je definován jako plyn proudící kolem wolframové elektrody. V dnešní době se nejvíce využívá plazmového plynu argonu. Podle druhu a tloušťky základního materiálu lze použít i argon ve směsi s vodíkem nebo heliem. Plazmový plyn nesmí chemicky reagovat s materiálem katody a trysky. Snadná ionizace je ovlivněna ionizační energií. Nízká ionizační energie podporuje zapálení oblouku. Průtok se volí od cca  $0,5\text{--}9\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Hodnoty ionizačních energií, teploty varu a hustoty vybraných plynů lze vidět v *Tabulce 1*. Při použití vodíku či dusíku je třeba uvažovat disociační energii (dusík cca  $9,8\text{ eV}$ , vodík cca  $4,5\text{ eV}$ ). Výstupní rychlost plazmového plynu během navařování je  $200\text{--}500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vysoká hodnota výstupní rychlosti je způsobena zvýšením objemu plynu při jeho zahřívání. [12][15][16]

Tabulka 1 Ionizační energie, teploty varu a hustota plazmových plynů. [12]

Plyn	Relativní hustota (vzduch = 1)	Teplota varu (°C)	Ionizační energie (eV)
Helium	0,14	-268,9	24,56
Argon	1,38	-185,9	15,76
Vodík	0,06	-252,9	13,59
Dusík	0,91	-195,8	14,55

## 2.2.2 Podávací plyn

Funkce podávacího plynu je přenos a usměrnění toku přidavného materiálu ve formě prášku do místa navařování. Stejně jako u plazmového plynu se využívá argon nebo jeho směs s vodíkem nebo heliem. [13]

## 2.2.3 Ochranný plyn

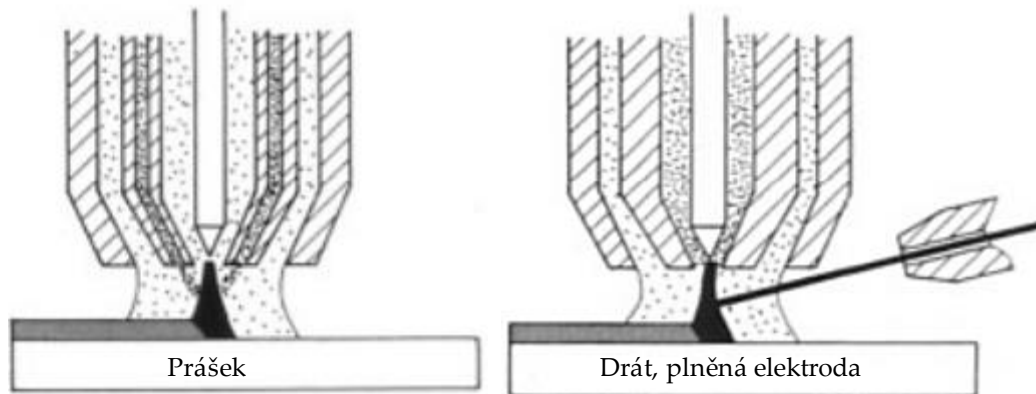
Ochranný plyn zabraňuje oxidaci návaru a slouží jako ochrana svarové lázně před okolní atmosférou. Tento plyn nesmí negativně působit a ovlivňovat vlastnosti základního materiálu. U slitin na bázi niklu se využívá směs argon/vodík. Průtok plynu se volí přibližně do 20 l·min<sup>-1</sup>. [10] [16]

## 2.3 Přídavný materiál

Přídavný materiál může být ve formě: prášku, drátu nebo plněných elektrod (viz Obrázek 7). Pohyb prášku je zajištěn pomocí podávacího plynu, který prášek přenesl hadicí až do plazmatronu. Prášek následně dopadá do plazmatu, kde dochází k jeho natavení a vzniku navařované plochy. Přídavný materiál ve formě drátu je přiveden do proudu plazmatu mimo plazmatron. [12] [17]

Nejpoužívanější přídavné materiály jsou na bázi slitin niklu, kobaltu nebo železa. Tyto materiály jsou doprovázeny dalšími prvky jako je chrom, vanad, wolfram, uhlík nebo bór a křemík. Velikost částic prášku se pohybuje od cca 45–200 μm. Pro kvalitní

výsledek navařování je třeba, aby zrna byla homogenní a kulovitěho tvaru. Zrna s ostrými hranami nejsou vhodná. [12] [18]



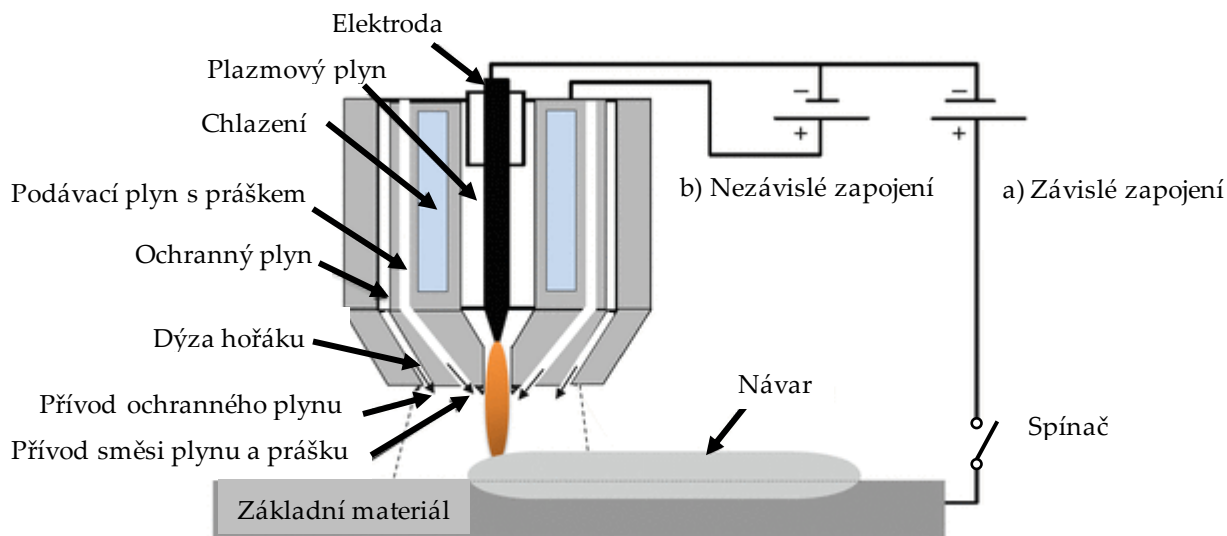
Obrázek 7 Typy přídavných materiálů pro plazmatické navařování [19]

## 2.4 Plazmové hořáky

Nejčastěji se používají plazmové hořáky (plazmatrony) s elektrickým obloukem napájeným stejnosměrným proudem (150-250 A). Dle typu zapojení lze hořáky rozdělit na tři základní druhy [16] [17]:

- a) s přeneseným obloukem (závislé zapojení)
- b) s nepřeneseným obloukem (nezávislé zapojení)
- c) kombinovaná forma zapojení s přeneseným i nepřeneseným obloukem

Při technologii navařování PTA se používají dva typy zapojení a) s přeneseným obloukem (Obrázek 8) nebo b) kombinovaný typ zapojení. V případě a) je plazmový oblouk vytvořen mezi wolframovou elektrodou (katodou, - pól) a navařovaným základním materiálem (anodou, + pól). Výhoda c) kombinovaného zapojení oproti nezávislému je vyšší životnost dýzy, z důvodu menšího tepelného opotřebení. Proto je kombinované zapojení využíváno pro svařování, řezání a navařování. [12] [13] [17]



Obrázek 8 Schéma plazmatronu [20]

Při zapojení b) s nepřeneseným obloukem (Obrázek 8) je plazmový oblouk tvořen mezi wolframovou elektrodou (katodou, - pól) a měděnou tryskou (anodou, + pól). Jelikož je hubice vystavena vysokým teplotám, je zapotřebí značného chlazení, aby nedocházelo k rychlému opotřebení. Tento typ zapojení se používá pro nástřiky a nevodivé materiály, protože nezávisí na navařované součásti.

Plazmatron (Obrázek 9) obsahuje měděné tělo, dýzu, wolframovou elektrodu, kanály na chlazení a systém pro podávání prášku. Konstrukce plazmového hořáku je vytvořena dle geometrie navařovaných povlaků (například pro zakřivené plochy nebo úzké otvory). Je také ovlivněna přídavným materiálem, který je ve formě prášku nebo drátu. Pohyb plazmového hořáku ovlivňuje rozsah tepelné oblasti základního materiálu a geometrii návaru. Základní poloha technologie navařování pomocí plazmatu je ve směru shora dolů, a proto je hybnost plazmatronu a navařované části přizpůsobená tak, aby byla svislá osa plazmatronu udržována během navařování všech ploch. Příklady plazmatronů lze vidět na Obrázku 9. Jsou vybaveny dvěma porty pro přívod prášku, a proto lze aplikovat i jejich směs. Lze vyměňovat libovolné části hořáku v případě jejich poškození. [12] [13] [17] [21]



Obrázek 9 Příklady plazmatronů [21]

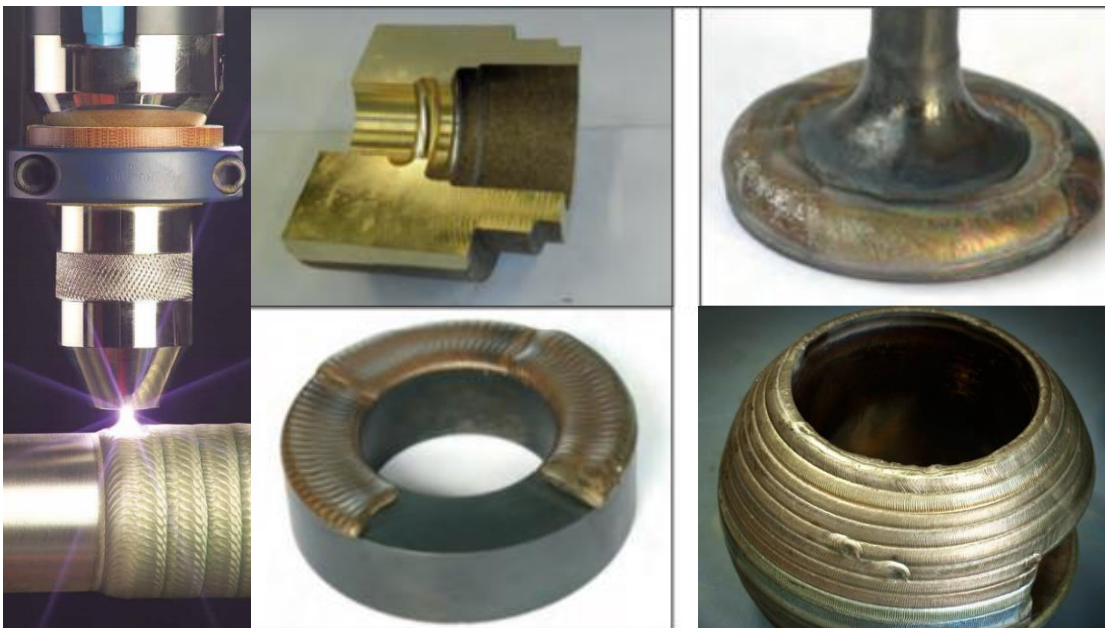
## 2.1 Materiály určené pro navařování (PTA)

Navařování pomocí plazmatu je vhodné téměř pro všechny typy ocelí a slitin. Mezi nejpoužívanější materiály pro navařování patří: rychlořezné, nízkolegované, korozivzdorné, vysoce chromové oceli a niklové slitiny. Jejich aplikace lze najít v petrochemickém, námořním, sklářském, automobilovém, energetickém a stavebním průmyslu a také v zemědělství. Použití materiálů pro navařování lze rozdělit podle fyzikálně chemických vlastností a odolnosti vůči zátěži. Využívá se dvou skupin materiálů [19] [22] [23]:

- 1) materiály s maticí na bázi železa
  - a) martenzitické
  - b) austenitické
  - c) slitiny s vysokým obsahem karbidů
- 2) slitinové materiály z neželezných kovů.
  - a) slitiny kobaltu (Stellite 6)
  - b) slitiny niklu
    - konstrukční (slitiny Ni-Cu, Ni-Cr)
    - žárovevné a žáruvzdorné
    - slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi



Martenzitické návary se využívají v podobě tvrdonávarů pro obnovu tvaru. Výhoda je jejich odolnost vůči rázům (nízké opotřebení a vysoká oteruvzdornost). Mezi nevýhody patří nižší korozní odolnost. Austenitické materiály mají zejména význam pro svou odolnost vůči rázům, dobré obnovení tvaru, velmi širokou škálu použití a vysokou mez kluzu. V porovnání s martenzitickými návary je oteruvzdornost obdobná, ale jejich tvrdost je nižší. Výhody návarů s obsahem karbidů jsou vysoká oteruvzdornost, odolnost i při zvýšených teplotách a akceptovatelná korozivzdornost. Využití nezelezných slitin na bázi kobaltu a niklu je ekonomicky nejnáročnější. Využívají se pro aplikace při zvýšených teplotách a ve vysoce korozivním prostředí. Na *Obrázku 10* lze vidět příklady návarů vytvořené technologií PTA. [22] [24] [25]



Obrázek 10 Příklady návarů metodou PTA [18] [21] [26]

## 2.2 Výhody a nevýhody PTA

Hlavní výhodou je možnost navaření materiálu s odlišnými vlastnostmi v porovnání se základním materiálem (ZM) a minimální promísení návaru se ZM. V současné době lze proces dobře automatizovat pomocí moderních strojů umožňující navařování pulzním proudem. Strojové řízení hořáku zajišťuje kvalitu návaru a dohromady s polohovadlem lze vytvořit rovnoměrnou plochu s tolerancí v rozmezí 0,5 mm. Lze tedy docílit vysoké přesnosti povrchu návaru a minimalizovat tak náklady na obrábění. Nastavení správných parametrů umožňuje navařovat povlaky libovolné tloušťky s minimálními deformacemi základního materiálu. Mezi další výhody PTA patří vysoká rychlost navařování (viz *Tabulka 2*) a nízká ztráta prášku. [12] [27] [28]

*Tabulka 2 Porovnání metod svařování v rámci rychlosti [27]*

<b>Metoda</b>	<b>Rychlost svařování (mm·min<sup>-1</sup>)</b>
<b>TIG (drát)</b>	200
<b>MIG (automatický)</b>	350
<b>PTA (automatický)</b>	500

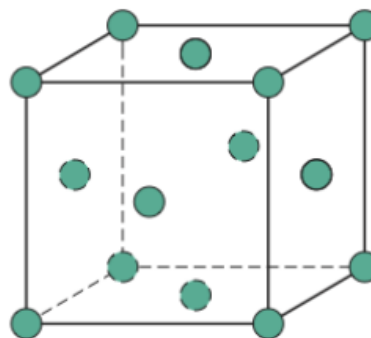
Hlavní nevýhody PTA jsou vysoká teplota a vyzařování plazmatu, které je příčinou zhoršení pracovních podmínek obsluhy. Vysoká teplota způsobuje degradaci základního materiálu, proto může docházet i k odpařování legujících prvků. Pořizovací cena přídavného materiálu ve formě prášku je vyšší ve srovnání s drátem. [12] [27] [28]

### 3 Nikl

Nikl (symbol Ni, atomová hmotnost = 58,71, atomové číslo = 28) byl objeven v roce 1751. Je lesklý, stříbřitě bílý (*Obrázek 11*), kujný a tažný kov s teplotou tání 1453 °C. Řadí se mezi přechodné kovy. Mezi jeho vlastnosti patří relativně nízká tepelná a elektrická vodivost, pevnost a houževnatost při zvýšených teplotách. Je feromagnetický, inertní ve vodě a na vzduchu, a využívá se jako legující prvek do dalších slitin. Čistý nikl má plošně centrovanou kubickou mřížku (FCC) (*Obrázek 12*). Souhrn jeho vlastností lze vidět na *Obrázku 13*. Výskyt v přírodě je ve formě sloučenin i v ryzím stavu. [29] [30]



*Obrázek 11 Nikl [31]*



*Obrázek 12 Mřížka čistého niklu [32]*



*Obrázek 13 Vlastnosti niklu [33]*

### 3.1 Použití niklu

S ohledem na tyto vlastnosti je nikl široce používán pro produkty ve spotřebitelských, průmyslových, vojenských, dopravních, leteckých, námořních a architektonických aplikacích. Ve formě slitiny se nikl využívá pro výrobu mincí nebo pro elektrolytické nanášených povlaků na oceli (niklování). Spolu s dalšími kovy se používá při výrobě korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí, které lze najít v průmyslu a stavebnictví, ale také pro výrobky v domácnosti jako jsou hrnce, pánve a kuchyňské dřezy. [29] [30]

## 4 Niklové slitiny

Slitiny na bázi niklu mají několik vlastností, které jsou pro moderní průmysl důležité. Jsou schopny odolávat těžkým pracovním podmínkám, vysoce koroznímu prostředí, vysokým provozním teplotám a namáhání. Především se využívají materiály na bázi nikl-chrom, nikl-železo, nikl-měď, nikl-molybden nebo nikl-kobalt, popřípadě jejich kombinace. Obvykle se rozdělují podle použití na [23] [24]:

- 1) Slitiny konstrukční
- 2) Slitiny žáruvzdorné a žárovevné
- 3) Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

V posledních letech vzrostl zájem společností o vývoj niklových slitin pro energetiku a další odvětví. Předmětem jejich výzkumu je vynález, vývoj a výroba slitin niklu a kobaltu. Ve výrobním programu společností lze zaznamenat více než 100 druhů slitin a svařovacích materiálů, z nichž si většinu vyrábí ve vlastních laboratořích. Společnosti mají i své vlastní ochranné známky slitin jako je například Inconel<sup>®</sup>, Incoloy<sup>®</sup>, Nimonic<sup>®</sup>, Brightray<sup>®</sup>, Nilo<sup>®</sup>, Hastelloy<sup>®</sup>. [34]

### 4.1 Slitiny konstrukční

#### 4.1.1 Slitiny Ni-Cu

Slitiny Ni-Cu (Monely) jsou složeny z 29-33 % Cu a dalších prvků (Fe, Mn, Al, Si atd.). Značí se písmeny R, K, H, S, dle typu přísadových prvků. Mezi nejvíce frekventované v průmyslu patří 3 druhy Monelů a to Monel-400, Monel R-405 a Monel K-500, jejichž chemické složení je znázorněno v *Tabulce 3*. [23] [35] [36]

Tabulka 3 Chemické složení vybraných Monelů v hm. %. [36]

Označení	Cu	Al	Ti	Fe	Mn	Si	Ni
<b>Monel 400</b>	28-34	-	-	2,5 max	2,0 max	-	63 min
<b>Monel 405</b>	28-34	-	-	2,5 max	2,0 max	0,5 max	63 min
<b>Monel K-500</b>	27-33	2,3-3,15	0,35-0,85	2 max	1,5 max	-	63 min

Obsah niklu v těchto slitinách je až 67 %, zbytek je tvořen prvky železa, manganu, uhlíku nebo křemíku. Mechanické vlastnosti závisí na chemickém složení a tepelném zpracování. Pro zvýšení pevnosti při vysokých teplotách se přidává hliník a titan. [23] [36]

Monel 400 je slitina s vysokou odolností proti korozi, mořské vodě, alkalickým roztokům, solím a organickým (sírovým, fluorovodíkovým a fosforečným) kyselinám. Hlavní využití této slitiny jsou ventily, čerpadla, tepelné výměníky, elektrické a elektronické součástky, ložiska a hřídele pracující v magnetizačním prostředí, dokonce i v zařízeních námořního a ropného průmyslu. Monel 400 je možné používat i v teplotách pod nulou. Nevýhoda této slitiny je nízká odolnost proti opotřebení, která je způsobena nízkou tvrdostí, což znemožňuje použití tohoto materiálu v aplikacích, kde je možnost adhezivního opotřebení. Ke zvýšení tvrdosti povrchu se obvykle používá nitridace. [23] [36] [37]

Odolnost těchto slitin vůči kyselinám a zásadám se využívá v chemickém průmyslu. Vytvrzením získají tyto slitiny za normální i zvýšené teploty vysokou pevnost (až 1200 MPa). Mezi jejich další výhody patří houževnatost a tepelná vodivost. Využití těchto slitin je ve výměnících tepla, hudebních nástrojích, potrubních systémech, palivových a vodních nádržích, kuchyňských dřezech a zastřešení. Dříve byla místo slitiny Monel používána korozivzdorná ocel. [23] [35] [37]

### 4.1.2 Slitiny Ni-Cr

Tyto slitiny známé pod komerčním názvem Inconely obsahují 16-29 % chromu, 6-19,5 % železa a případně 13-16 % molybdenu. Jsou odolné proti korozi a stabilní v extrémním prostředí. Zahřátím vytvoří silnou stabilní pasivující vrstvu oxidu, která slouží jako ochrana povrchu před dalším poškozením. Výhody slitiny Ni-Cr je zachování pevnosti v širokém teplotním rozsahu, proto jsou atraktivní pro vysokoteplotní aplikace. Případná modifikace pomocí molybdenu nebo mědi zvyšuje odolnost vůči korozi. [23] [38]

Tyto slitiny se využívají u lopatek, těsnění a spalovacích zařízení plynových turbín, dále u rotorů a těsnění turbodmychadel, upevňovacích prvků pro vysoké teploty, chemických aplikací, tlakových nádob, trubek tepelných výměníků, tlumičů hluku pro střelné zbraně a výfukových systémů Formule 1. North American Aviation vytvořila letoun X-15 ze slitiny Inconel známé jako "Inconel X". [23] [38]

### 4.1.3 Slitiny Ni-Mo

Slitiny Ni-Mo (Hastelloy) jsou složeny z 26-32 % molybdenu a minoritního množství dalších přísad. Pro svou odolností vůči kyselině chlorovodíkové a chloridům jsou využívány jako kyselinovzdorné materiály. V případě, že obsahují chrom, jsou schopny odolat i oxidačnímu prostředí. Tyto slitiny lze svařovat všemi běžnými metodami a jsou velmi všestranné. [23] [39]

Hlavní využití těchto slitin lze nalézt v chemickém, farmaceutickém, ekologickém a ropném průmyslu a plynárenství. Pro svou odolnost proti koroznímu praskání a neoxidujícím kyselinám jsou tyto slitiny používány v mnoha aplikacích včetně obložení komínů, reakčních nádobách, tepelných výměnících, topných tělesech kabin letadel nebo přenosových potrubích. [23] [39]

#### 4.1.4 Slitiny Ni-Fe

Slitiny obsahují přibližně 30 % niklu a železa, 5 % molybdenu a 20 % chromu. Jsou odolné vůči agresivním formám koroze, zejména ve vodném prostředí. Dolegováním pomocí titanu, niobu a mědi je snížena náchylnost k mezikrystalické korozi. Mezi jejich výhody patří vynikající odolnost vůči mořské vodě, slanému nálevu, kyselým plynům a prostředí s vysokým obsahem chloridů, a proto jsou oblíbené především v ropném a plynárenském průmyslu. Odolávají vysoce koncentrované kyselině sírové, a proto jsou používány v nejnáročnějším chemickém prostředí. [23] [40]

Mezi známé komerčně dostupné Ni-Fe slitiny patří Hypernik (50 % Ni, 50 % Fe) a Permalloy (82 % Ni, 18 % Fe). Jsou využívány zejména pro své magnetické vlastnosti. Používají se v aplikacích jako jsou nízkofrekvenční magnetické stínění a jádra transformátorů. [23] [40]

## 4.2 Slitiny žáruvzdorné a žárovevné

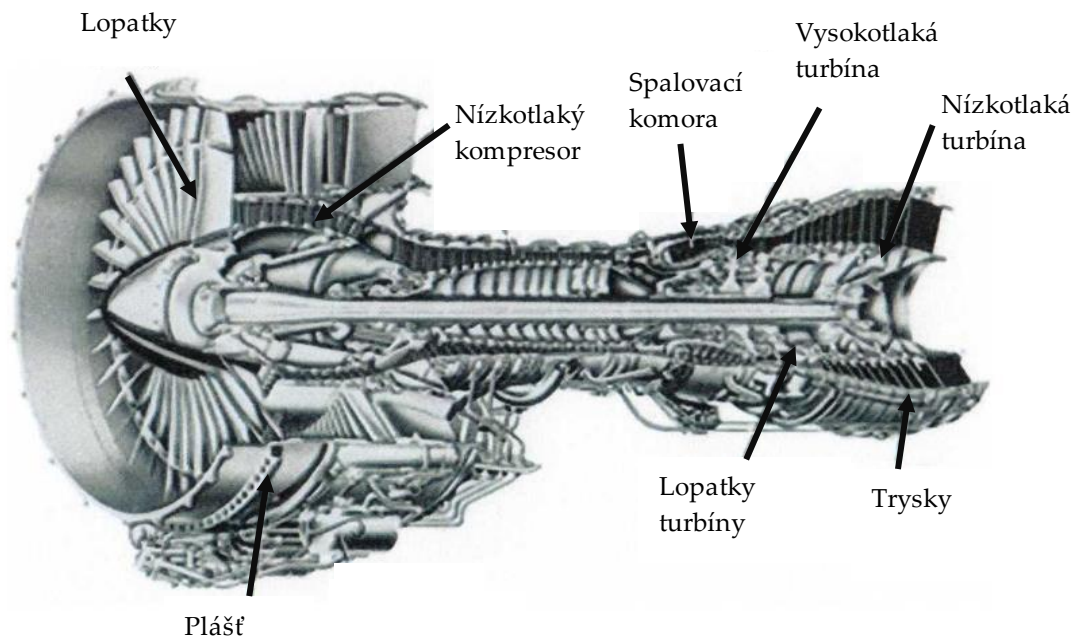
Tyto slitiny, zvané též jako superslitiny jsou významné zejména pro svou žárupevnost (odolnost vůči mechanickému namáhání za vyšších teplot) a žáruvzdornost (odolnost vůči oxidaci za vyšších teplot). Jsou známy pod komerčním názvem Nimonic. Slitinou tohoto typu je například NiCr20TiAl (Nimonic 80 A). [14]

Pro legování těchto slitin se využívají prvky jako je chrom, molybden, železo, hliník, titan, wolfram, tantal, kobalt, zirkon, niob a další. Struktura těchto slitin je tvořena tuhým roztokem s kubickou plošně centrovanou (FCC) mřížkou, která je zpevněna pouze substitučně. Základním legujícím prvkem je chrom, jehož obsahy ve slitinách bývají až 30 %. Vyšší než 15 % obsah chromu výrazně zvyšuje žáruvzdornost a odolnost proti korozi, příčinou je tvorba pasivační vrstvy na povrchu. Přídavek železa do slitin snižuje jejich cenovou dostupnost a zároveň se zpevňuje tuhý roztok. Molybden zlepšuje korozní odolnost a pevnostní vlastnosti. Titan a hliník umožňují precipitační vytvrzování. Hliník rovněž přispívá tvorbě povrchové oxidické vrstvy, čímž zlepšuje žárupevnost.



Ostatní legující prvky zlepšují pevnostní vlastnosti za vysokých teplot, a to zpevněním tuhého roztoku a také tvorbou stabilních karbidů. [14] [41]

Aplikace těchto slitin jsou nejrozšířenější v leteckém průmyslu u proudových motorů (Obrázek 14). Jako příklad lze uvést slitinu Nimonic 105, které je pro svou pevnost při vysoké teplotě využívána v lopatkách, discích, šroubech a prstencích plynových turbín. Tato slitina poskytuje výrazné zlepšení mechanických vlastností jako je pevnost v tahu za tepla a odolnost proti tečení ve srovnání s vlastnostmi předchozí řady jako je Nimonic 80 A a Nimonic 90. [42]



Obrázek 14 Aplikace slitin u proudového motoru [43]

## 4.3 Niklové slitiny pro energetiku

Při výrobě energie je důležitá odolnost používaných materiálů v nejnáročnějších prostředích, mezi které patří například jaderné, tepelné, vodní, větrné, solární a přílivové elektrárny. Pro svou pevnost při vysokých teplotách a odolnost proti korozi se využívají slitiny na bázi niklu. V energetice se uplatňují hlavně niklové slitiny, které jsou známe pod komerčním označením: Inconel, Waspaloy, Nimonic, Monel, Incoloy, Udimet a Rene. [44] [45]

Jako zástupce v oblasti energetiky lze zmínit Inconel 738 a Inconel 939, jejichž hlavní uplatnění je u součástí stacionární turbíny. Tyto slitiny se liší svým chemickým složením. Obsah těchto slitin tvoří hlavně nikl (In 738 – 61 %, In 939 – 48 %), chrom (In 738 – 16 %, In 939 – 22 %), kobalt (In 738 – 8 %, In 939 – 19 %) a v minoritním množství hliník, titan, uhlík, bor a zirkonium. Další slitinou využívanou v energetice je Inconel 625 a Inconel 617. Výhody Inconelu 625 jsou vynikající mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi a pevnost v extrémních podmínkách. Obsah této slitiny tvoří nikl, chrom a molybden s niobem. Tato kombinace prvků poskytuje slitině zvláště vysokou pevnost. Pro svou odolnost vůči vysokým teplotám je její hlavní aplikace v jaderných elektrárnách (regulační tyče v reaktoru). Slitinu Inconel 617 tvoří směs niklu, chromu, kobaltu a molybdenu, která dává slitině velmi vysokou pevnost a stabilitu při zvýšených teplotách a zároveň udržuje její dobrou odolnost proti korozi. Proto je její hlavní využití v široké škále komponentů používaných v elektrárnách. [51] [44] [45] [46]

### 4.3.1 Slitina Inconel 718

Inconel 718 je materiál z niklu a chromu vysoce odolný proti korozi. Chemické složení slitiny je zobrazeno v *Tabulce 4*. Výhoda této slitiny je vysoká pevnost ( $R_m \sim 1000$  MPa při 20 °C a vynikající odolnost proti tečení do teplot kolem 705 °C a proti oxidaci kolem 980 °C. Vyšší obsah molybdenu může být příčinou větší náchylnosti ke šterbinové nebo důlkové korozi. Z hlediska tváření za tepla je tento materiál jeden z nejnáročnějších. Vysoká pevnost umožňuje tváření za teplot 900–1120 °C s použitím strojů, které jsou schopny vyvinout potřebný tlak. Při ohřevu se využívá lehce redukční

atmosféry s minimálním množstvím CO. Pomocí klasických metod (podobně jako u ocelí) je možné i tváření za studena. Možnost obrábění ztěžují podmínky jako je velká pevnost, zpevnění a tvrdost materiálu (až 425 HV). [47] [48] [49]

*Tabulka 4 Chemické složení slitiny INCONEL 718 [49]*

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Mn	Si
<b>Min [hm. %]</b>	50	17	13	4,75	2,8	0,65	--	0,2	--	--
<b>Max [hm. %]</b>	55	21	17	5,5	3,3	1,15	1	0,8	0,35	0,35

Tepelné zpracování této slitiny lze rozdělit na dva způsoby [47] [50] [51]:

- 1) Žihání za teploty 930-1010 °C a poté rychlé ochlazení vodou. Následuje vytvrzení při 720 °C po dobu 8 hodin a ochlazení na 620 °C. Celková doba stárnutí činí cca 18 hodin. Proces končí ochlazením na vzduchu.
- 2) Žihání za teploty 1038-1066 °C, po kterém následuje ochlazení ve vodě a vytvrzení při teplotě 760 °C po dobu 10 hodin. Dalším krokem je ochlazení na 650 °C a udržování této teploty. Celková doba stárnutí je cca 20 hodin s následným ochlazením na vzduchu.

Tepelné zpracování (TZ) 1) poskytuje nejvyšší únavovou pevnost, mez kluzu a pevnost v tahu při pokojové teplotě. Jedná se o optimální tepelné zpracování pro materiály, u kterých je potřeba vysoká vrubová houževnatost. TZ 2) se využívá v případech, kdy je u materiálu vyžadována nízká teplota, jelikož při ní slitina vykazuje nejlepší mez v tahu a rázovou houževnatost. [47] [51]

Pro svou vynikající pevnost při zvýšených teplotách, odolnosti vůči namáhání, opotřebení, korozi a příznivé svařitelnosti se používá pro širokou škálu aplikací. Používá se v leteckém, jaderném průmyslu a energetice (plynové turbíny, části reaktorů, kryogenní nádrže, turbodmychadlové rotory, jaderné reaktory). Využívá se u produktů vyrobených odléváním, tvářením nebo práškovou metalurgií. Inconel 718 je jedna z nejvíce atraktivních

žáropevných slitin používaná u součástí leteckých motorů, (rotující části, nosné konstrukce a tlakové nádoby), čímž tvoří více než 30% celkové hmotnosti moderního leteckého motoru. Nicméně vysoká tvrdost a nízká tepelná vodivost slitiny způsobuje potíže při použití konvenčních procesů obrábění a tváření, zejména při výrobě složitých dílů. [48]

### 4.3.2 Slitina Waspaloy

Slitina Waspaloy je registrovaná ochrannou známkou společnosti Pratt & Whitney, United Technologies Company. Waspaloy patří mezi superslitiny na bázi niklu. Vyznačuje se dobrou pevností i při teplotách přibližně do 980 °C. Chemické složení slitiny je zobrazeno v *Tabulce 5*. Tuto slitinu lze tvářet za studena, nebo za tepla při teplotách 1040 °C. Z důvodu náchylnosti k praskání je svařitelnost omezena. [52] [53]

*Tabulka 5 Chemické složení slitiny Waspaloy [54]*

	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	Mn	Zr	Si	Cu
<b>Min [hm. %]</b>	50	18	12	3,5	2,75	-	-	0,02	-	-
<b>Max [hm. %]</b>	55	21	15	5	3,25	2	0,1	0,08	0,15	0,1

Waspaloy se používá u plynových turbín a součástí motorů (spalovací komora, disky, lopatky, pouzdra a výfukové systémy), kde se vyžaduje mechanická pevnost a odolnost vůči korozi při vysokých provozních teplotách. Dále lze najít potenciální aplikace u kompresorů, rotorových disků, hřídele, rozpěrky, těsnění, spojovacích a dalších prvků motoru a také u konstrukce letadla a raketových systémů. [52] [53]

### 4.3.3 Porovnání slitiny Inconel 718 a Waspaloy

Inconel 718 a Waspaloy jsou precipitačně vytvrzené slitiny. Waspaloy vykazuje vyšší pevnost při tečení viz *Obrázek 15* (450 MPa) než Inconel 718 (370 MPa), což umožňuje aplikace za vyšší provozní teploty. Slitina Inconel 718 (1138 MPa) má vyšší mez kluzu ve srovnání s Waspaloy (800 MPa). Waspaloy vykazuje vyšší tažnost a obsah kobaltu (namísto železa přítomného v Inconel 718), což způsobuje vyšší odolnost vůči teplotě, která může být až 870 °C. Naopak hodnota kritické teploty Inconel 718 je nad 700 °C. Mez pevnosti slitiny Inconel 718 dosahuje vyšších hodnot (1413 MPa) než u slitiny Waspaloy (1300 MPa). Tvrdost pro obě slitiny se pohybuje kolem 425 HV. Na *Obrázku 15* lze vidět mechanické vlastnosti a vysokoteplotní odolnosti obou slitin. [47] [52] [55] [56]

Slitina	mechanické vlastnosti						vysokoteplotní odolnost						
	Měrná hmotnost	Mez pevnosti	Mez kluzu 0,2%	Tažnost	Tvrdost	Pevnosti při tečení <sup>*)</sup>	Pevnost a stabilita	Oxidace	Nauhičování	Sulfidace	Nitridace	Karbonitridace	Roztavené soli
	g cm <sup>-3</sup>	MPa	MPa	%	HV	MPa							
<b>INCONEL® alloy 718<sup>a</sup></b>	8,19	1 413	1 138	20	425	370	☀	☀	☀	▲	☀	☀	☀
<b>Waspaloy<sup>a</sup></b>	8,19	1 300	800	25	N	450	☀	☀	N	N	N	N	N

\*) 1000 h při 700 - 760 °C

Tepelné zpracování:

- <sup>a</sup> vytvrzený stav
- <sup>b</sup> po uvolnění pnutí
- <sup>c</sup> po tažení
- <sup>d</sup> žíhaný

Korozní odolnost:

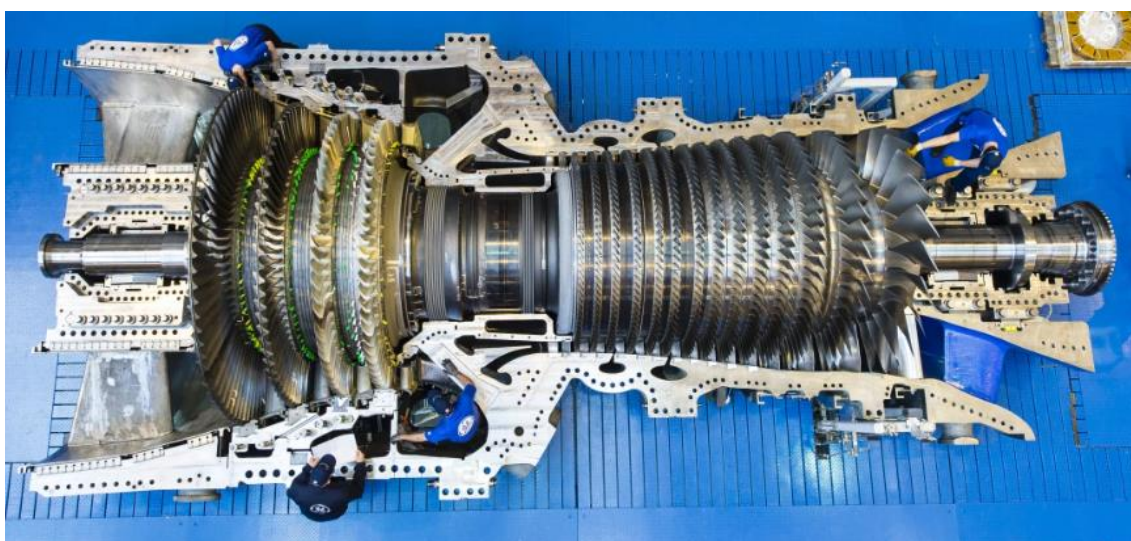
- ☀ dobrá až vynikající odolnost
- ▲ vyhovující odolnost
- nevhovující odolnost
- N neuvedeno

*Obrázek 15 Mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718 a Waspaloy [56]*

Vzhledem k tomu, že v době experimentálních prací nebyly k dispozici popisované materiály, byly zvoleny materiály náhradní, podobných vlastností, které jsou stručně popsány v kapitole „experimentální část“.

## 5 Plynové turbíny

První vynález, který obsahoval všechny prvky moderní plynové turbíny, byl popsán a patentován Johnem Barberem v roce 1791. Obsahoval klíčové komponenty moderní plynové turbíny: kompresor, spalovací komoru a turbínu, ale nebyl schopen trvalého provozu. Taková plynová turbína byla postavena až norským inženýrem Aegidiem Ellingem v roce 1903. Vyráběla energii nad rámec energie potřebné k pohonu svých součástí s čistým výkonem 8 kW. V porovnání se současnou nejvýkonější a zároveň největší plynovou turbínou na světě Harriet (Obrázek 16), která disponuje výkonem až 600 MW a účinností kolem 61 %, došlo k významnému rozvoji. Turbína Harriet byla vyrobena v roce 2015 z nejmodernějších superslitin, aby byla schopna odolávat teplotám až 1600 °C. [57] [58]



Obrázek 16 Největší plynová turbína na světě (Harriet) [58]

Plynovou turbínu je možné charakterizovat jako malou „elektrárnu“, která produkuje velké množství energie v poměru ke své velikosti a hmotnosti. Hlavní aplikace plynových turbín lze najít v energetice, letectví a petrochemickém průmyslu. Plynová turbína má schopnost nepřetržitého spalování a větší průtok plynu než píst spalovacích motorů, a proto je vhodná jako vysoce výkonný motor. Z tohoto důvodu je její hlavní využití u proudových motorů letadel. Během posledních dvaceti let došlo k velkému rozvoji

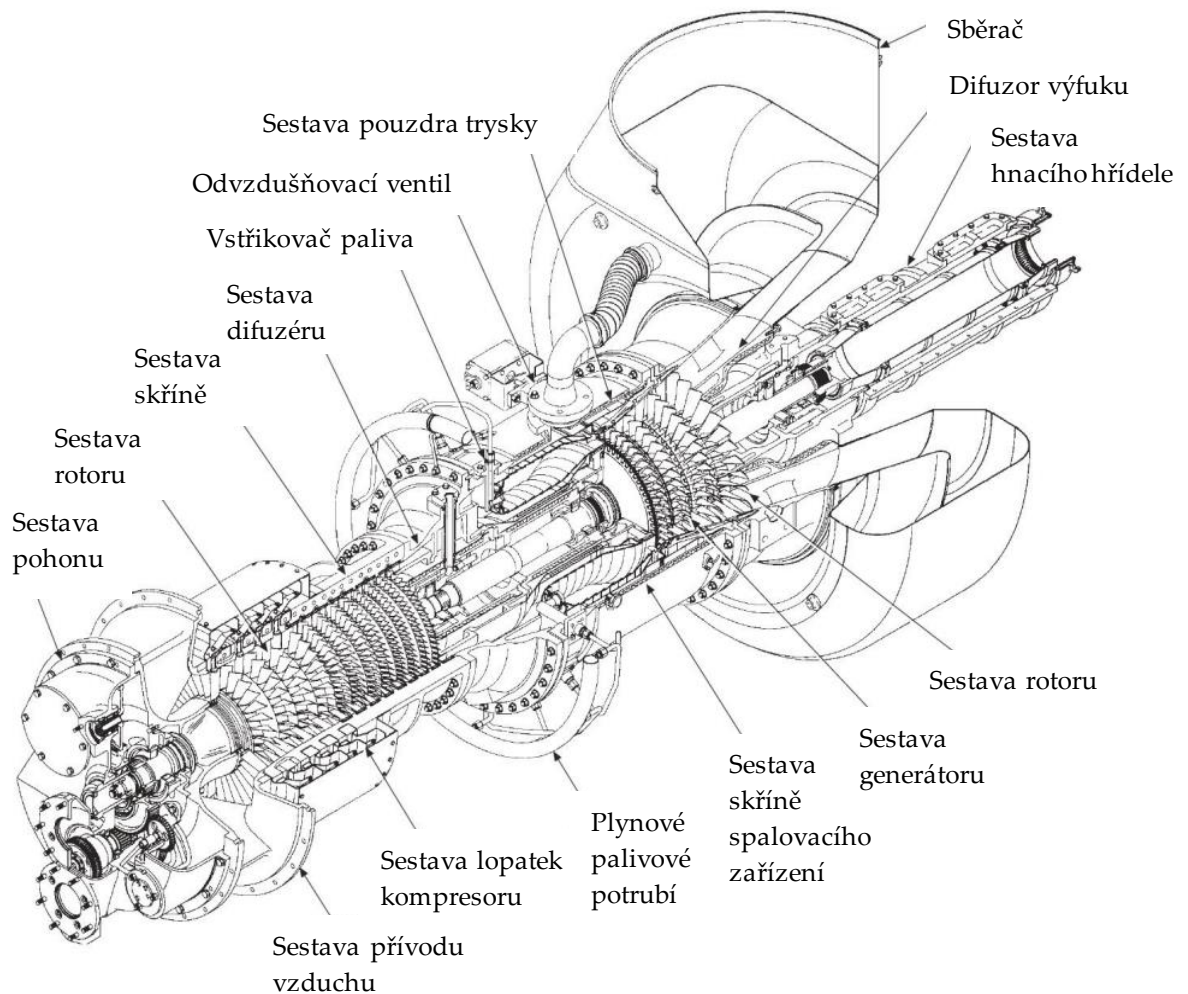
v oblasti nových materiálů, povlaků a technologií chlazení. Důsledkem tohoto vývoje (a zároveň zvýšením tlakového poměru kompresoru) došlo ke zvýšení účinnosti plynových turbín z cca 15 % na více než 60 %. [59] [60]

## 5.1 Princip plynové turbíny

Plynová turbína se skládá ze tří hlavních komponent [59] [60]:

- 1) **Kompresor**, který nasává vzduch do motoru, stlačuje ho a přivádí do spalovací komory vysokou rychlostí.
- 2) **Spalovací komora**, kde dochází ke vstřiku paliva a mísení se vzduchem. Směs se spaluje při teplotách vyšších než 1090 °C. Spalování vytváří proud plynu o vysoké teplotě a tlaku, který postupuje do turbínové sekce.
- 3) **Lopatky turbíny**, které se roztáčí důsledkem proudícího plynu o vysoké teplotě a tlaku. Pohyb lopatek plní dvojí funkci: pohánějí kompresor, aby do spalovacího úseku přicházelo více stlačeného vzduchu, a zároveň otáčejí generátorem. Otáčející generátorový magnet vytváří silné magnetické pole, které shlukuje elektrony kolem měděných cívek a způsobí jejich pohyb. Výsledkem pohybu těchto elektronů je elektřina.

Příklad plynové turbíny a popis jejích částí lze vidět na *Obrázku 17*. [59]



Obrázek 17 Plynová turbína Taurus 60 (Solar Turbines) [61]

### 5.1.1 Druhy paliv pro plynové turbíny

Druhy paliv plynových turbín lze rozdělit do 3 skupin: a) plynná paliva (zemní plyn, bioplyn, methan nebo vysokopecní plyn) b) kapalná paliva (nafta, ropa nebo lehký topný olej) c) tuhá paliva (biomasa nebo uhlí, které je potřeba zplyňovat, aby nedocházelo k zanášení lopatek turbíny pevnými částicemi spalin). [59] [60]

### 5.1.2 Typy plynových turbín

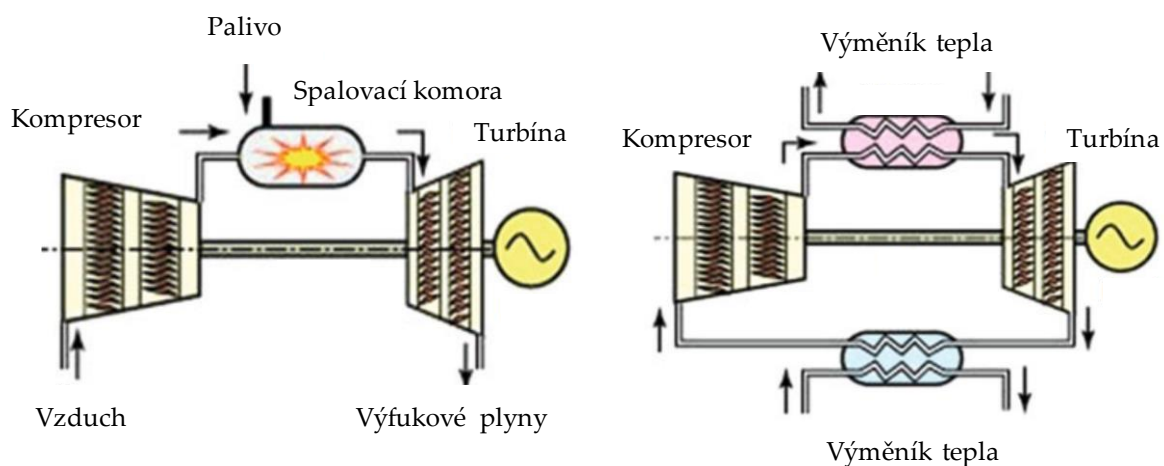
Existují 3 typy cyklů plynových turbín viz *Tabulka 6*, kde je porovnání jejich účinností. [61]



Tabulka 6 Rozdělení plynových turbín [61]

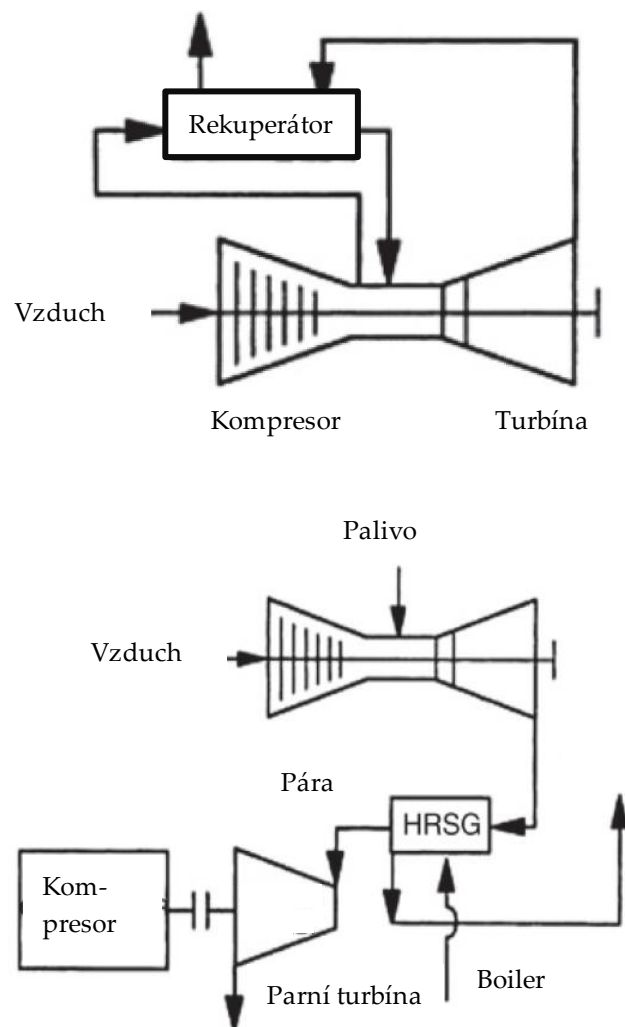
Cyklus	Účinnost (%)
1) Základní cyklus	20–30
2) Regenerační cyklus	30–45
3) Kombinovaný cyklus	55–60

Obecně lze základní cyklus (Obrázek 18) rozdělit na otevřený a uzavřený. Mezi základní komponenty obou typů patří kompresor, spalovací komora a turbína. V otevřeném cyklu je vzduch nasáván z atmosféry do kompresoru a následně stlačován. Stlačený vzduch je převeden do spalovací komory, kde se mísí s palivem a dochází ke spalování za konstantního tlaku. Vzniklý proud plynu postupuje do turbíny a předává kinetickou energii lopatkám turbíny. V uzavřeném cyklu je místo spalovací komory použit tepelný výměník (ohřívač). Ve výměníku je stlačený vzduch za pomoci vnějšího zdroje tepla zahříván. Vzniklý plyn prochází turbínou a pokračuje do dalšího výměníku (chladič). Zde dochází k ochlazení plynu a zpětnému návratu do kompresoru. Otevřený cyklus je (oproti uzavřenému cyklu) používanější a ekonomicky výhodnější pro svou jednoduchost a spolehlivost. [59] [60] [61]



Obrázek 18 a) otevřený a b) uzavřený typ plynové turbíny [60]

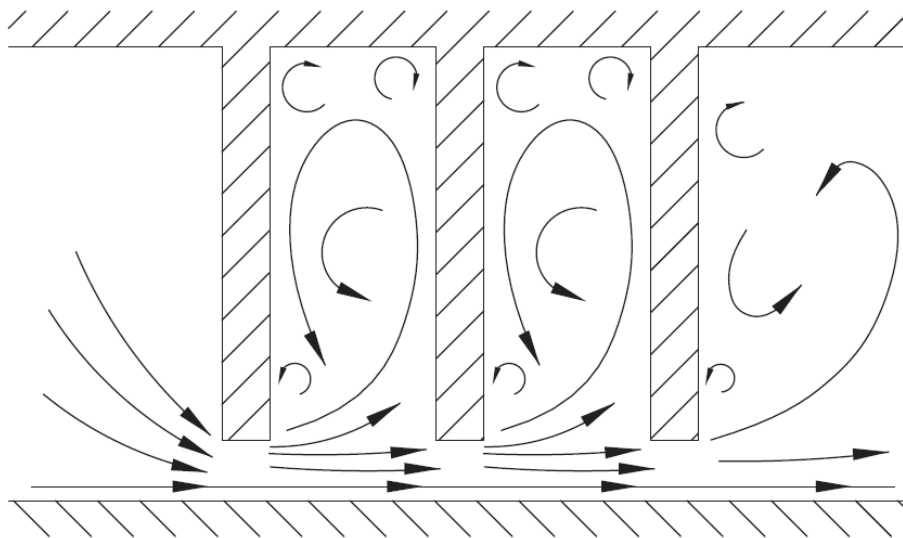
Účinnosti turbíny lze zvýšit instalací rekuperátoru nebo parního generátoru (HRSG). Regenerační cyklus (Obrázek 19a) disponuje rekuperátorem, který zachycuje odpadní teplo z výfukového systému turbíny a předehřívá tak odcházející vzduch z kompresoru před vstupem do spalovací komory. V kombinovaném cyklu (Obrázek 19b) se využívá HRSG, kde je vytvořena pára, která může být použita k výrobě další elektrické energie (parní turbína). [59] [60] [61]



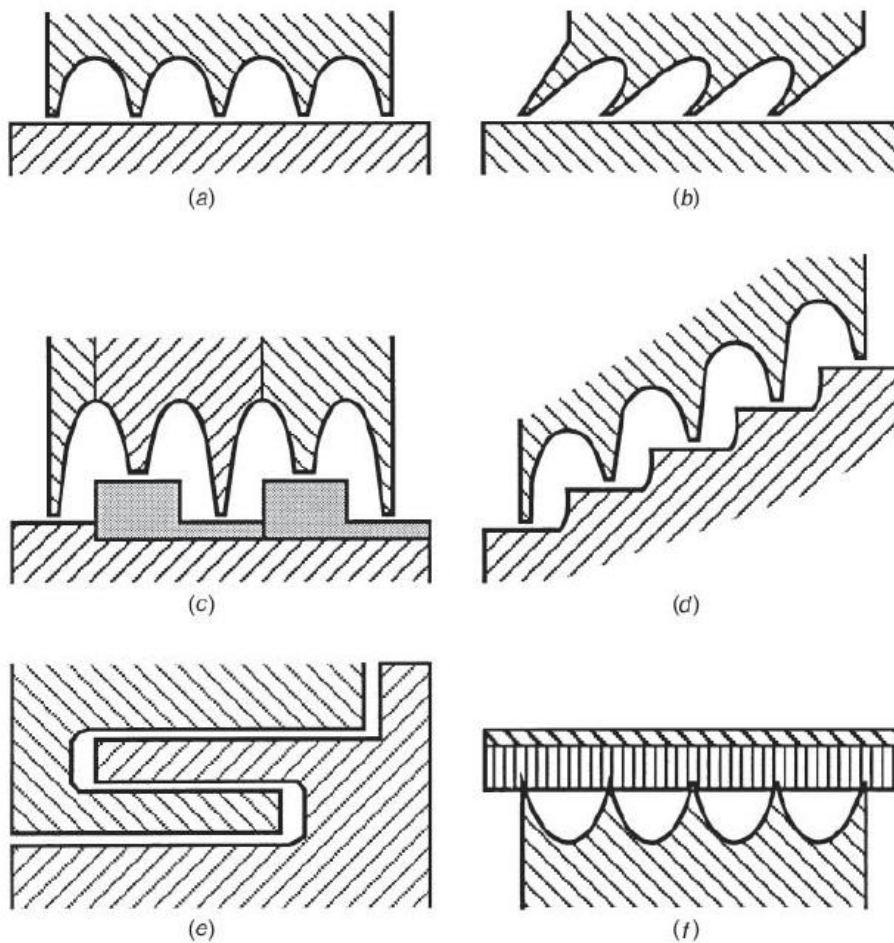
Obrázek 19 Schéma a) regeneračního a b) kombinovaného cyklu plynové turbíny [61]

## 5.2 Labyrintové těsnění rotoru plynové turbíny

Labyrintové těsnění je nedílnou součástí rotoru plynové turbíny a zásadně ovlivňuje její účinnost. Toto těsnění je složeno ze dvou částí statoru a rotoru. Tyto části jsou odděleny malou mezerou (cca 0,08 mm, dle výrobce). Proto nedochází k přímému kontaktu částí a riziko opotřebení se minimalizuje. Mezera mezi rotorem a storem tvoří labyrint, který může mít rozmanitý tvar. Pomocí turbulentního proudění uvnitř labyrintu (*Obrázek 20*) dochází k vylučování nečistot. Tvary a uspořádání labyrintových těsnění se mohou lišit dle výrobce. Těsnění lze rozdělit na 6 základních typů dle geometrie viz *Obrázek 21*. [62] [63] [64] [65] [66]



Obrázek 20 Turbulentní proudění uvnitř labyrintu [62]



Obrázek 21 Základní rozdělení labyrintových těsnění [66]:

*a) přímé labyrinty, b) přímé labyrinty se šikmými zuby, c) odstupňované labyrinty,  
d) stupňovité labyrinty, e) drážkové labyrinty, f) opotřebitelné labyrinty*

Volba tvaru geometrie labyrintu závisí na dané aplikaci. Stupňovité labyrinty d) jsou používány jako těsnění turbín, protože průtok přes tento typ je o 40 % nižší než přes přímý labyrint a). Naopak stupňovité labyrinty vyžadují více prostoru v radiálním směru a jsou náročnější na výrobu v porovnání s přímými labyrinty.

## 5.2.1 Materiál labyrintového těsnění

Mezi materiály, které se používají k výrobě labyrintového těsnění patří kovy, plasty, elastomery a keramika. Lze najít i materiály, které jsou primárně vyvinuty, aby vyhovovaly požadavkům těsnění (speciální elastomery, speciální vláknité materiály). Srovnání různých materiálů těsnění je znázorněn v *Tabulce 7*. [63] [64] [65]

*Tabulka 7 Srovnání různých materiálů těsnění [63]*

Materiál	Nitrilový kaučuk (BUNA-N)	Neopren	Tetrafluoroethylen (TFE)	Fluorokarbon (VITON)
<b>Teplotní rozsah [°C]</b>	- 4 ÷ 107	- 4 ÷ 107	- 37 ÷ 204	- 37 ÷ 204
<b>Klady</b>	vysoká odolnost vůči ropě	účinné pro chladiva a amoniak	kompatibilní s běžnými tekutinami	kompatibilní s mnoha syntetickými tekutinami
<b>Zápory</b>	nízká odolnost vůči slunečnímu záření	degraduje v přítomnosti olejů na bázi esterů	nízká elasticita při instalaci	nízká odolnost vůči žíravinám

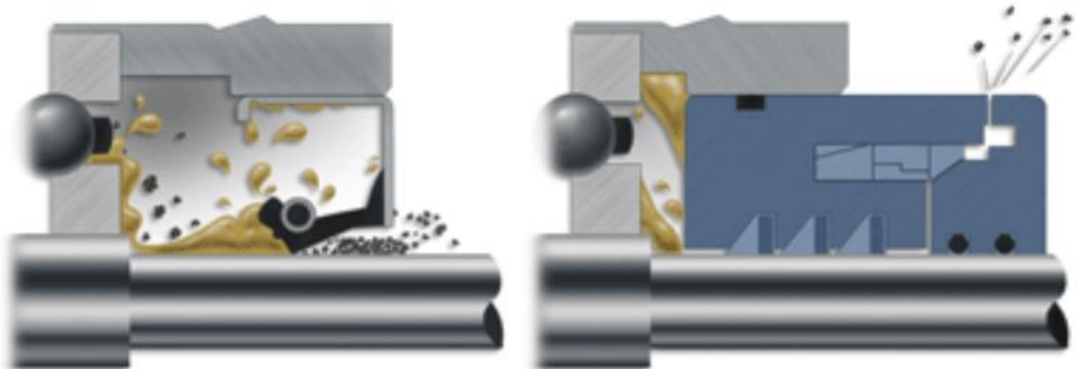
Aplikace elastomerů je velmi častá a pokrývá celou řadu statických a dynamických těsnění. Jednotlivé typy elastomerů mají extrémně široký rozsah vlastností a závisí na složení přísad a výrobním procesu. Mezi nejznámější elastomery patří butyl, chloropren, nitril a silikon. Velkou výhodou použití elastomerů je cenová dostupnost. [64] [67]

Labyrintové těsnění může být vyrobeno celé z plastu nebo pouze jeho součástí. Používají se plasty jako polyamid, PTFE, PEEK, PI nebo PPS. Přísady mohou být skleněná nebo grafitová vlákna (nebo prášky), bronzové nebo jiné kovové prášky. Přísady zvyšují pevnost, tepelnou vodivost. Oproti elastomerům mají plasty širší teplotní rozsah použití. [64] [68]

Labyrintové těsnění se také vyrábí z řady kovů, dle dané aplikace v průmyslu, jako jsou korozivzdorné oceli, bronz, hliník a slitiny niklu. Korozivzdorné oceli jsou spíše používány pro součásti mechanických těsnění. Mezi nejvýznamnější patří S30400 (AISI 304), S31600 (AISI 316) a další. Pro vysokou odolnost proti korozi a vysokou teplotu se používají různé niklové slitiny. Převážně Ni-Cr slitiny (Inconely), Ni-Cu slitiny (Monely) nebo žárupevná slitina niklu pod komerčním názvem Nimonic 80 A. [64] [69]

### 5.2.2 Výhody a nevýhody labyrintového těsnění

Hlavní výhodou labyrintového těsnění v porovnání s ostatními typy (břitová a mechanická těsnění) je mnohem vyšší úroveň těsnosti zabraňující vstup nečistot a únik menšího objemu mazadel viz *Obrázek 22*. Další výhody a nevýhody jsou uvedeny v *Tabulce 7*.



*Obrázek 22 Porovnání standardního (břitového) a labyrintového těsnění [63]*

Výhody plastů [63] [64] [66]:

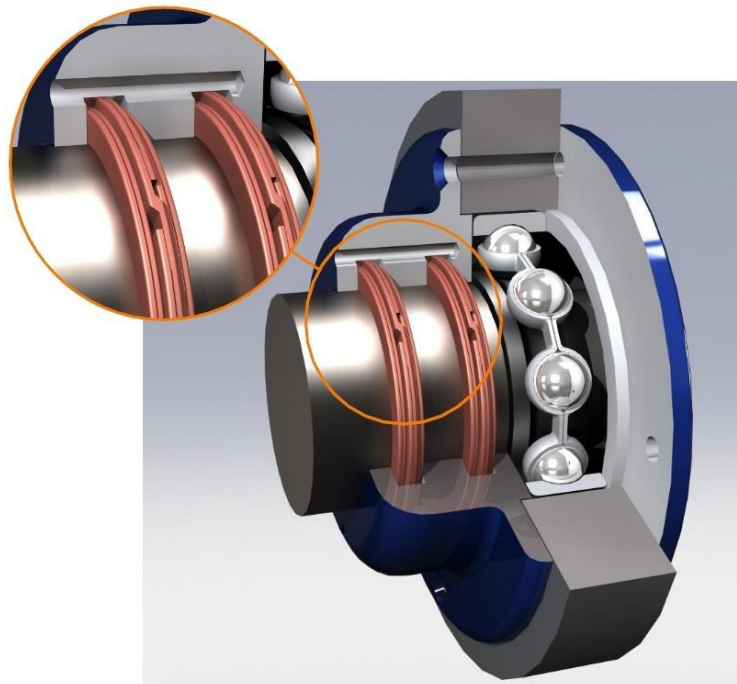
- minimální tření
- žádné opotřebení (bezkontaktní konstrukce)
- odolnost proti znečištění
- tolerance vůči velkým teplotním změnám
- lze použít i při vysokých otáčkách a vysoké teplotě
- široké uplatnění
- vysoká životnost
- jednoduchost a spolehlivost
- flexibilita vůči systému a výběru materiálu
- minimální účinek na dynamiku rotoru redukce zpětné difúze

Nevýhody [63] [64] [66]:

- vysoký nárok na přesné uložení (minimální axiální pohyby)
- riziko ucpání dutiny důsledkem nízké rychlosti plynu
- vyšší pořizovací cena

### 5.2.3 Použití labyrintového těsnění

V současnosti lze na trhu nalézt labyrintové těsnění s téměř 100 % těsností. Jsou odolné proti chemikáliím a mají velkou životnost. Labyrintová těsnění jsou pro svou dlouhodobou spolehlivost a schopnost pracovat za vysokých otáček (až  $450 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), tlaku (cca 1,7 MPa) a teplot ( $\geq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ) využívány v celé řadě aplikací, včetně motorů s plynovými turbínami, hydraulických hnacích strojů a leteckých motorů. Přednostně se používají k ochraně ložisek viz *Obrázek 23* a utěsnění turbín. Jejich uplatnění je i v zařízeních, které pracují při teplotách pod  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (raketová turbočerpadla). Dále se využívají v textilním průmyslu, kde se při výrobě papíru během výrobního procesu využívají různé kapaliny a prášky. Pomocí labyrintových těsnění jsou chráněny všechny rotující součásti, které jsou potřebné k pohybu papíru v továrně. Lze je najít i v chemickém (vakuové technologie) a potravinářském průmyslu. Labyrintová těsnění musí v potravinářském průmyslu splňovat několik podmínek: 1) funkce a odolnost v provozních podmínkách 2) konstrukce těsnění a materiály musí být vhodné pro styk s potravinami a 3) konstrukce těsnění musí být vhodná pro způsob čištění nebo sterilizaci. [66] [70] [71] [72]

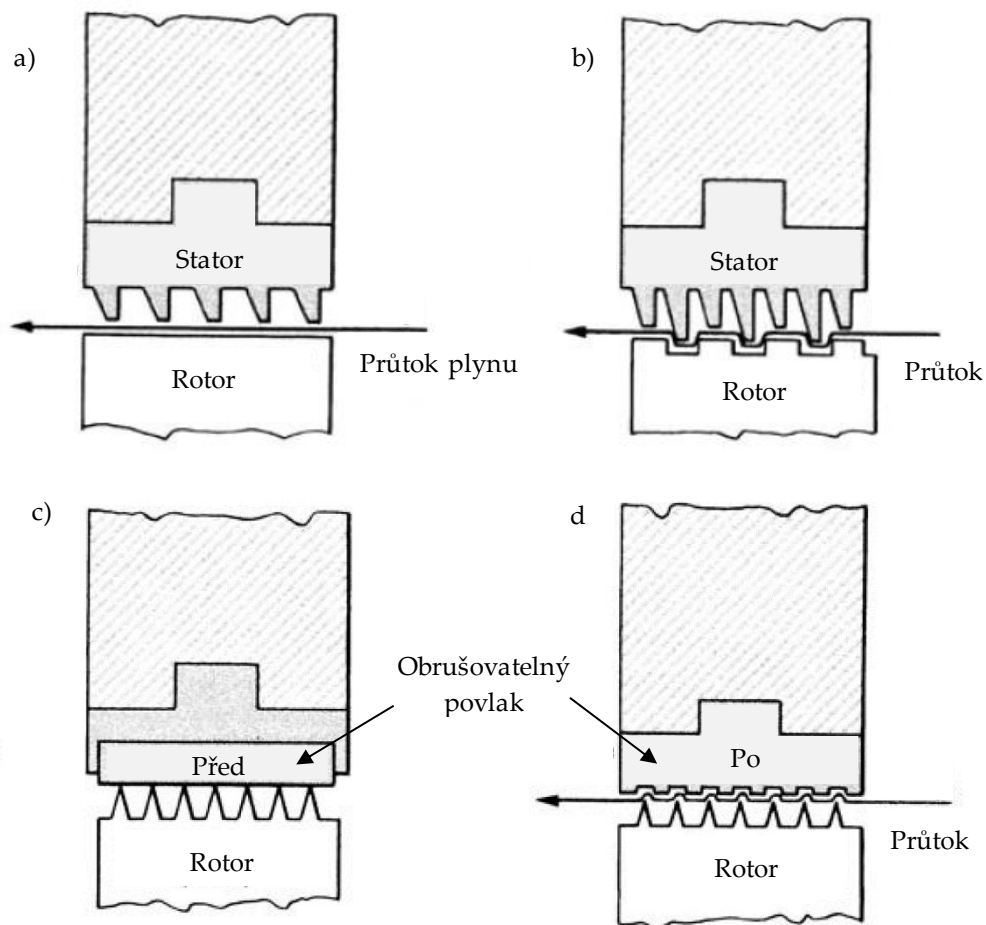


Obrázek 23 Příklad Labyrintového těsnění pro ochranu ložiska [73]



### 5.3 Konfigurace labyrintového těsnění v plynové turbíně

Na *Obrázku 24 a)* lze vidět nejjednodušší formu těsnění (přímé labyrinty). *Obrázek 24 b)* ukazuje drážkované těsnění, jehož těsnící funkce je vyšší, ale výroba náročnější. Na statoru mohou být naneseny obrušovatelné povlaky (abradables, viz *Obrázek 24 c)*, které jsou v přímém kontaktu s lamelami. Radiálním a axiálním pohybem rotoru dochází ke tvorbě drážky na statoru viz *Obrázek 24 d)*. Povlaky zlepšují výkon, snižují spotřebu paliva a zvyšují tak účinnost plynové turbíny. Obvykle jsou složeny z kovové matrice (AlSi, Ni, MCrAlY, NiCrAl) + pórotvorné látky (polyester, keramika) + měkké obrusitelné fáze (hexagonální nitrid boritý, grafit), které snižují součinitel tření. Povlaky jsou nanášeny technologií žárového nástřiku (plazma, plamen). Rotující labyrintové těsnění jsou vyrobené z korozi-vzdorných ocelí nebo slitin niklu. [70]



Obrázek 24 Konfigurace labyrintového těsnění u plynové turbíny [70]

## 5.4 Opatřebování labyrintového těsnění

Kritické problémy selhání labyrintových těsnění vznikají zejména v přechodných stavech spouštění, vypínání a restartu plynové turbíny za vysoké teploty. Protože tepelná/mechanická expanze a axiální pohyb rotoru/statoru způsobují uzavření radiální mezery mezi rotorem a státorem, labyrintové zuby umístěné na rotoru/statoru se otírají o stator/rotor a opotřebávají se. V těchto případech dochází často ke vzniku nečistot, což vede k poškození zubů. Poškození labyrintového těsnění vede ke vzniku vůle a odchýlení se od původního provedení, což výrazně ovlivňuje reálný výkon (aerodynamika, přenos tepla, chlazení). Může dojít ke snížení účinnosti turbíny až o 10 %. Obrázek 25 ukazuje běžné poškození labyrintového zubu v důsledku tření. Poškození lze vidět v podobě ohýbání (a), zkroucení (b) nebo odlomení zubu (c). [74] [75]



Obrázek 25 Druhy opotřebenění zubů: a) ohýbání, b) zkroucení c) odlomení [74]

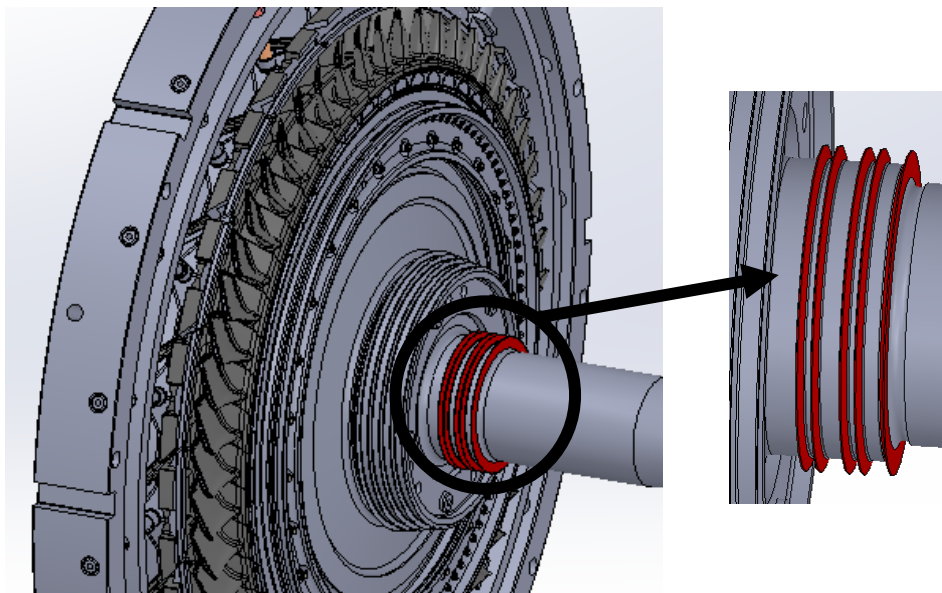
Opatřebování zubu závisí na materiálu zubu a jeho protilehlé části. Zkroucení do tvaru houby (Obrázek 1 b) nastává, když je materiál zubu měkčí (hliník, termoplast) než materiál statoru. Pokud je materiál zubu z tvrdého kovu (niklové slitiny, korozivzdorné oceli) dochází k poškození ohybem a) nebo odlomení c). [74] [75]

## 6 Experimentální část

Experimentální část vznikla ve spolupráci se společností Solar Turbines Incorporated, která sídlí v San Diegu (Kalifornie, Spojené státy) a je 100 % dceřinou společností Caterpillar Inc. U nás se hlavní centrála nachází v Praze a závody sídlí v Žatci a Žebráku. Firma je jedním z předních světových výrobců středně velkých průmyslových plynových turbín (v rozsahu 1-22 MW). Portfolio firmy nabízí i výrobu kompresorů či kompletních jednotek k výrobě elektrické energie. Ve 100 zemích má více než 16 000 jednotek a realizuje více než 3 miliardy provozních hodin. [18]

### 6.1 Cíle a úvod experimentu

Cílem experimentální části bylo optimalizovat vhodné parametry pro navařování odstraněných lamel labyrintového těsnění viz *Obrázek 26*, které se nachází na rotoru plynové turbíny. Následně navařit plochu (rozkyvem hořáku) o šířce 30 mm a výšce 10 mm a poté stěnu o šířce 10 mm a výšce 10 mm.



Obrázek 26 Lamely labyrintového těsnění na rotoru plynové turbíny [76]

Původním záměrem bylo navařit dvě kola ze slitiny Inconel 718 a Waspaloy. Bohužel se nepodařilo získat požadovanou součást ze slitiny Inconel 718. Proto byl jako náhrada zvolen dostupný materiál podobných vlastností Nimonic 901. Porovnání chemického složení slitiny Inconel 718 a Nimonic 901 lze vidět v *Tabulce 8*. V porovnání se slitinou Nimonic 901 obsahuje Inconel 718 navíc prvek niob, což zvyšuje pevnost materiálu. Inconel 718 má mez pevnosti v tahu cca 1400 MPa a Nimonic 901 kolem 1200 MPa. Inconel 718 je odolnější vůči teplotě. Kritická teplota se pohybuje nad 700 °C. Slitinu Nimonic 901 nelze využívat v aplikacích nad 600 °C. Tvrdost slitiny Inconel 718 se pohybuje kolem 425 HV. Slitina Nimonic 901 dosahuje tvrdosti 320–400 HV. Obě tyto slitiny se však využívají v energetice u plynových turbín, kde jsou vyžadovány dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi při vysokých provozních teplotách. [77]

*Tabulka 8 Porovnání chemického složení slitiny Inconel 718 a Nimonic 901 [49] [77]*

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Mn	Si
<b>Inconel 718</b> [hm. %]	50	17	17	4,75	3,3	1,15	1	0,2	0,35	0,35
<b>Nimonic 901</b> [hm. %]	42,5	12,5	17	-	5,75	2,9	1	0,35	0,5	0,4

V první části experimentu bylo provedeno navaření na slitinu Nimonic 901 a v druhé části navařování na slitinu Waspaloy.

## 6.2 Použitá zařízení

### 6.2.1 Navařovací automat

Experimentální část byla provedena na navařovacím automatu PPC 250 R6 (KSK s.r.o, Česká republika), který je znázorněn na *Obrázku 27*. Tento přístroj je složen z podavače prášku (doporučená velikost částic je 50-200 μm), systému řízení, hořáku a polohovadla. Váha automatu je 1100 kg a velikost 1 770 × 1 700 × 2 185 mm (šířka × délka × výška). Tento přístroj primárně slouží k navařování rotačních součástí z čela nebo na obvodu pomocí metody PTA (Plasma Transferred Arc). Přídavný materiál je ve formě prášku. Automat má

možnost navařování pomocí kontinuálního i pulzního plazmového proudu. V případě pulzního navařování lze volit hodnoty proudu 50–250 A a frekvenci od 0–200 Hz. Polohovací systém hořáku je řízen ve 4 osách (X, Y, Z, N) a polohovadlo navařované součásti ve 2 osách (C, R). Průměr stolu je 300 mm s maximální nosností 70 kg. Navařovací automat má možnost předem programovatelného cyklu navařování nebo ručního programování se záznamem dat pomocí metody „teach-in“ . [78]



Obrázek 27 Navařovací automat PPC 250 R6 [78]

Vzdálenost mezi hořákem a základním materiálem byla 10 mm. Jako podávací ochranný a plazmový plyn byl použit argon o čistotě 4.8 (99,998 % Ar).

## 6.2.2 Měřicí stanice

Pro záznam teploty byla použita měřicí ústředna ALMEMO 5690 – 2M (Obrázek 28). Snímání teploty bylo provedeno pomocí termočlánků (Typ K – T190 – 7). Výrobce ústředny a termočlánků je firma Ahlborn (Německo). Měřicí stanici lze ovládat pomocí grafického displeje (128 × 128 bodů) nebo softwarem AMRControl. Při nejvyšší konfiguraci

lze ke stanici připojit až 99 snímačů a využít tak 100 měřených kanálů (až 70 měřících rozsahů). Rychlost snímání lze nastavit od 2,5 až 100 měření za sekundu. Naměřená data se zaznamenávají na SD kartu ve formátu FAT16. [79]



Obrázek 28 Měřící ústředna ALMEMO 5690 - 2M

### 6.2.3 Zařízení pro navařování termočlánků

Ke svařování termočlánků bylo použito zařízení BT-2 (Obrázek 29) od společnosti Svarservis Group, které funguje na principu kondenzátorového výboje. Zařízení disponuje akumulátorem, proto je možné svařovat i v místech bez přívodu síťového napětí. Rozměry tohoto zařízení jsou 130 × 140 × 175 mm a váha 2,5 kg. Ideální parametry pro navařování termočlánků rozdílných průměrů se nastavují na přední straně zařízení (řízení intenzity vybíjení) pomocí regulátoru. Termočlánky a dráty lze svařovat do průměru 1,4 mm. Nabíjecí proud je 150 mA a napájecí napětí 230 V. Přibližný počet výbojů při plném nabití akumulátoru je 800. [80]



Obrázek 29 Zařízení pro navařování termočlánků BT-2 [80]

## 6.2.4 Laboratorní pec

Pro experimentální část byla použita laboratorní pec LE 05/11, která je znázorněna na Obrázku 30. Vnitřní rozměry této pece jsou  $170 \times 130 \times 230$  mm a váha 20 kg. Pec se skládá z regulátoru HT40P, topného tělesa, odvětrání pracovního prostoru, šoupátka pro ovládání přívodu vzduchu, termočlánku typu "K", bezkontaktního spínacího relé pro bezhlučný provoz, koncového spínače pro bezpečné otevření pece a ručně otevíraných dveří směrem dolů. Maximální teplota je  $1100$  °C. Využívá se pro spékání, tavení a přehřev materiálů. [81]



Obrázek 30 Laboratorní pec LE 05/11, regulátor HT40P [81]

## 6.2.5 Mikroskop

K pozorování a dokumentaci struktury materiálů byl použit světelný mikroskop Zeiss Axio Observer D1M, který je znázorněn na *Obrázku 31*. Jedná se o světelný inverzní metalografický mikroskop, kde jsou objektivy umístěny přímo pod sledovaným objektem. Má možnost pozorování ve světlém i tmavém poli a v lineárně polarizovaném světle. Pozorování probíhalo při zvětšení  $1\times$  až  $1000\times$ . U snímků je kromě zvětšení uvedeno i měřítko fotografie. [82]



Obrázek 31 Mikroskop Zeiss Axio Observer [82]

## 6.2.6 Tvrdoměr

K měření mikrotvrdomosti vzorků dle Vickerse byl použit tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104 (*Obrázek 32*). Váha tvrdoměru je 39 kg a parametry  $190 \times 430 \times 520$  mm (šířka  $\times$  hloubka  $\times$  výška). Tento poloautomatický tvrdoměr byl osazen jedním indentorem a dvěma objektivy. [83]



Obrázek 32 Tvrdoměr Buehler IndentaMet 1104



### 6.3 Navaření zkušební vzorku

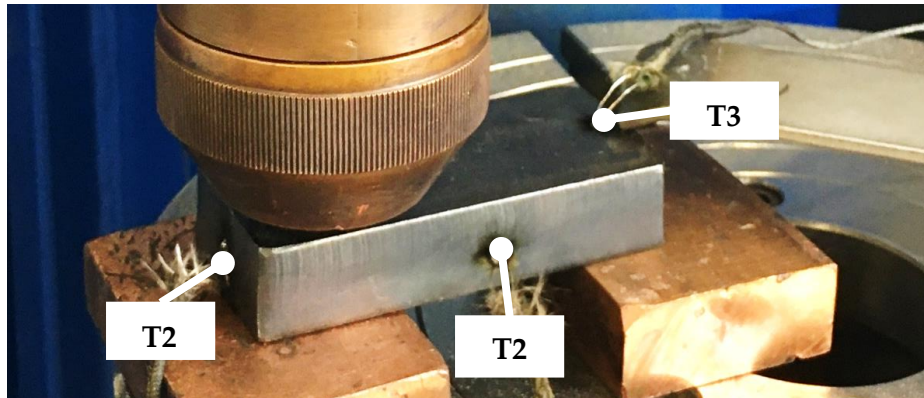
Před samotným experimentem proběhlo zkušební navaření za účelem zjištění vstupních parametrů potřebných pro následné navařování. Jako první testovací vzorek byl použit kvádr o rozměrech 100 × 50 × 30 mm z rychlořezné ocele.

Přídavným materiálem byl prášek Nibasit 625-P (slitina typu Inconel 625) z důvodu dostupnosti a podobných vlastností v porovnání se slitinou Nimonic 901. Chemické složení prášku je uvedeno v *Tabulce 9*. Zrnitost prášku byla 63–200 μm a číslo tavby: 258042. Vzniklý návar na bázi slitiny typu Ni-Cr-Mo (slitina typu Inconel 625) je schopen odolávat agresivnímu koroznímu prostředí. Vyšší obsah molybdenu poskytuje odolnost vůči důlkové korozi (pitting) a stabilizuje materiál protisenzibilizaci během svařování. Molybden s menším přídavkem niobu zpevňuje matici a zaručuje tak vyšší mez pevnosti cca 862 MPa. Je odolný vůči teplotě do 815 °C. Aplikace těchto návarů lze nalézt v energetice, letectví, chemickém a jaderném průmyslu. [56] [84]

*Tabulka 9 Chemické složení prášku Nibasit 625-P [85]*

	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Si	Mn	C
[hm. %]	základ	22	9	4	3,6	< 0,5	< 0,5	< 0,05

Navařování proběhlo bez předehřevu základního materiálu a rozkyvem hořáku (pendl). Teplotu snímaly tři termočlánky viz *Obrázek 33*. Vznikl návar o délce 80 mm a šířce 27 mm (*Obrázek 34*). Během navařování byly operativně měněny parametry v závislosti na kresbě návaru podle zkušeností z předešlých experimentů. Parametry pro jednotlivé části návaru jsou uvedeny v *Tabulce 10*.



Obrázek 33 Rozmístění termočlánků na testovacím

Tabulka 10 Parametry pro jednotlivé části návaru proního zkušební navařování

( $l$  = délka,  $s$  = šířka,  $I_H$  = horní proud,  $I_L$  = dolní proud,  $f$  = frekvence pulzu)

část návaru	$l$ [mm]	$s$ [mm]	$I_H$ [A]	$I_L$ [A]	$f$ [Hz]	podávání prášku [-]
1) začátek	40	27	98	48	133,3	9
2) střed	40	27	105	55	133,3	8
3) konec	40	27	120	60	133,3	9

Z Tabulky 10 je patrné, že v průběhu navařování došlo ke zvýšení proudů  $I_H$  a  $I_L$  z důvodu nenatavení základního materiálu a rozstřiku kovu kolem návaru viz Obrázek 34. Dále bylo potřeba měnit rychlost kroku (cca  $2,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a rozkyvu hořáku (cca  $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) z důvodu tvorby propadliny uprostřed návaru a vytvoření povrchového póru v první třetině návaru viz Obrázek 34.



Obrázek 34 První zkušební návar – vznik póru

Následně byly provedeny dvě další zkušební navařování na vzorek o rozměrech  $125 \times 50 \times 10$  mm. Parametry jsou uvedeny v *Tabulce 11*. Návary jsou zobrazeny na *Obrázku 35*. Došlo k výraznému zlepšení bez propadlin, trhlin a nadměrného převýšení stran. Použité parametry byly vyhovující, a proto se použily pro následný experiment.

*Tabulka 11 Parametry navařování pro 2 a 3 zkušební návar*

(*l* = délka, *s* = šířka, *I<sub>H</sub>* = horní proud, *I<sub>L</sub>* = dolní proud, *f* = frekvence pulzu)

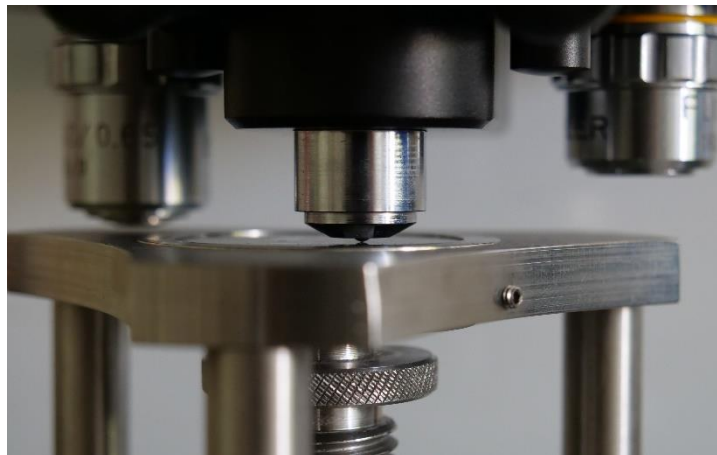
číslo návaru	<i>l</i> [mm]	<i>s</i> [mm]	<i>I<sub>H</sub></i> [A]	<i>I<sub>L</sub></i> [A]	<i>f</i> [Hz]	podávání prášku [-]
2	40	27	130	65	133,3	8
3	40	27	150	70	133,3	9



*Obrázek 35 Druhý a třetí zkušební návar*

## 6.4 Měření mikrotvrlosti

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6507-1 dle Vickerse HV1. Indentor byl osazen diamantem (čtyřboký jehlan, vrcholový úhel  $136^\circ$ ). Zkouška byla provedena na třech metalografických výbrusech (Obrázek 36) pro 1. část experimentu. Doba zatížení byla 11 sekund a zatížení hrotu odpovídalo 1 kilogramu. Vtisky byly vedeny ve středu návaru. Celkem bylo provedeno 90 vtisků ve vzdálenosti 1 mm mezi jednotlivými vpichy (ve svislé i vodorovné poloze). Pro vzorek č. 1 proběhlo celkem 50 vtisků (10 vrstev po 5 vtiskách), hodnoty byly zprůměrovány. Pro vzorek č. 2 a 3 bylo provedeno celkem 40 vtisků (10 vrstev po 2 vtiskách), hodnoty byly taktéž zprůměrovány. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze 1.

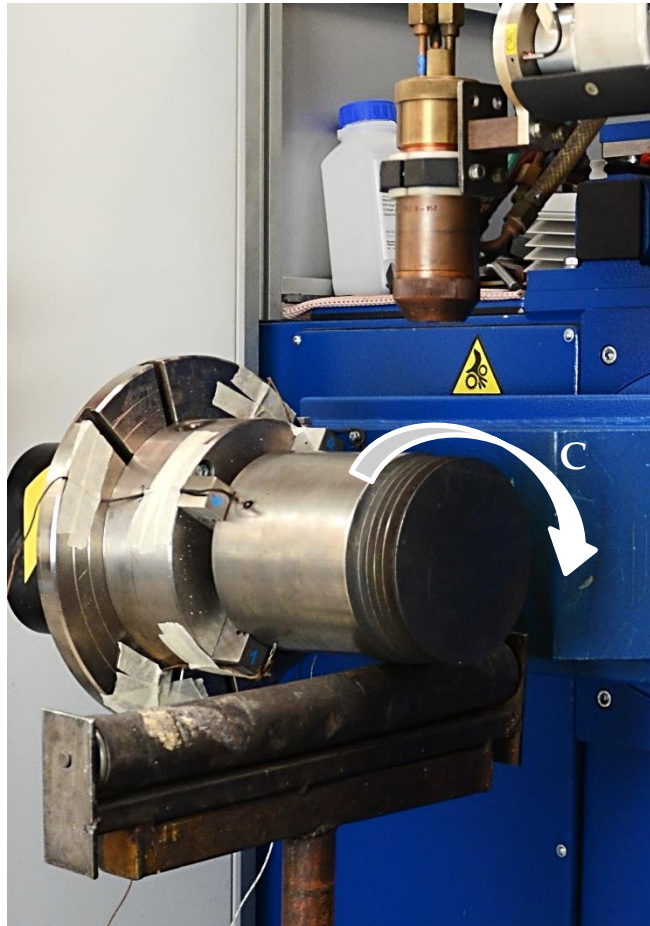


Obrázek 36 Průběh zkoušky mikrotvrlosti dle Vickerse

## 7 Výsledky a diskuze

### 7.1 Část 1 – Navařování na slitinu Nimonic 901

Jako základní materiál pro navařování byl použit válec ze slitiny Nimonic 901 (Obrázek 37) o průměru 147 mm a výšce 180 mm. Na součást byly navařeny celkem 3 návary (první pomocí rozkyvu hořáku, druhý a třetí bez rozkyvu). Součást byla upnuta do čtyřčelistového sklíčidla (pro případ pádu byla k dispozici podpěra). Polohovadlo stroje bylo umístěno do svislé polohy a navařování probíhalo otáčením kolem osy C viz Obrázek 37. Průběh teploty uvnitř navařované součásti zaznamenávaly čtyři termočlánky umístěné od sebe v úhlu 90 ° a 40 mm od spodní plochy válce. Navaření proběhlo bez předehřevu základního materiálu. Po každé vrstvě došlo k posunutí hořáku ve svislé poloze na vzdálenost 10 mm od místa navařování.



Obrázek 37 Příprava navařované součásti ze slitiny Nimonic 901 s umístěnými termočlánky

### 7.1.1 Navařování rozkyvem hořáku

Na základě předběžných zkoušek byly zjištěny parametry, které byly použity pro následné navařování rozkyvem hořáku. Jako přídatný materiál byl použit prášek Nibasit 625-P zmíněný v kapitole 6.3. V *Tabulce 12* jsou uvedeny vstupující parametry pro jednotlivé vrstvy celkového návaru. Jako konstantní parametr zůstala frekvence a délka návaru (průměr válce = 147 mm). Parametry byly upravovány dle výsledků předchozí vrstvy (hodnoty proudů, rychlosti kroku a rozkyvu hořáku). Celkem bylo navařeno 5 vrstev o celkové výšce 10 mm.

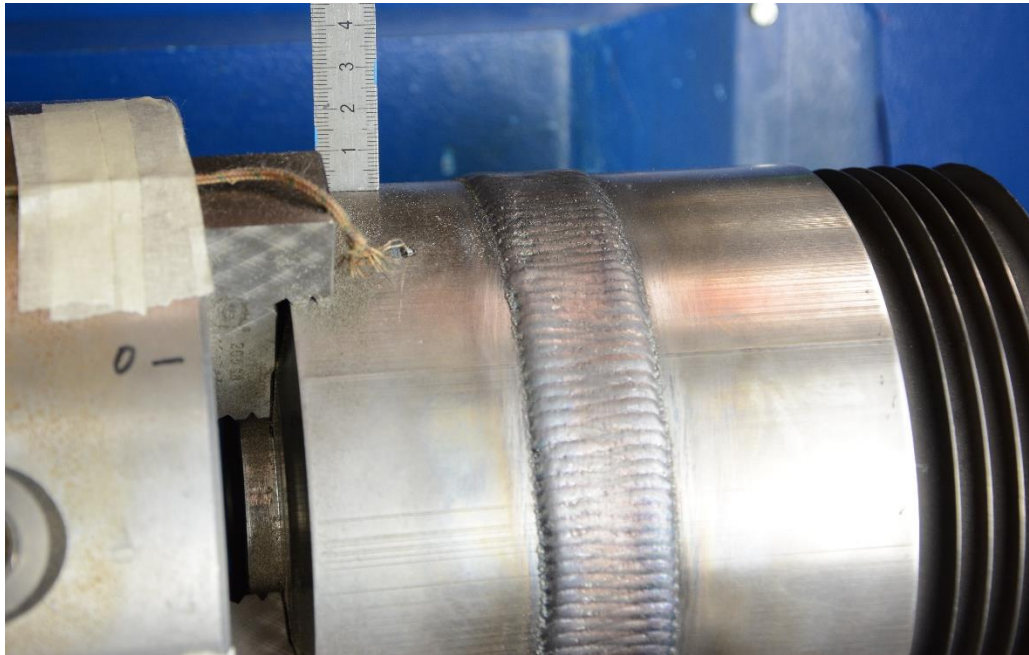
*Tabulka 12 Parametry navařování rozkyvem hořáku pro jednotlivé vrstvy*

(s = šířka, IH = horní proud, IL = dolní proud, f = frekvence pulzu, t = výška vrstvy)

vrstva	s [mm]	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání prášku [-]	t [mm]
1	30	150	70	133,3	9	2
2	30	150	70	133,3	9	2,5
3	28	160	85	133,3	10	2,5
4	27	130	85	133,3	12	1,5
5	26	130	85	133,3	9	1,5
celkem						10

Na *Obrázku 38* lze vidět první navařenou vrstvu o výšce 2 mm. Výsledný návar je uveden na *Obrázku 39*. Po vizuální kontrole v průběhu a po navařování jednotlivých vrstev docházelo ke změnám parametrů z důvodu:

- rozstříku kovu kolem návaru
- nedostatečnému natavení základního materiálu
- propadlinám uprostřed vrstvy
- roztékání tavné lázně
- nadměrnému provaření základního materiálu
- velkého kroku pendlu (nepropojení housenek)



Obrázek 38 První vrstva po navařování rozkyvem hořáku



Obrázek 39 Výsledný návar složený z pěti vrstev (prášek Nibasit 625-P)

## 7.1.2 Navařování stěny

Vedle návaru provedeného rozkyvem byly navařeny 2 stěny o šířce 10 mm. Pro první stěnu byl použit přídatný materiál Nibasit 625-P. Druhá stěna byla navařena práškem s obchodním označením Celsit V-P (slitina typu Stellite 6). Zrnitost prášku byla 63–200  $\mu\text{m}$  a číslo tavby: 256568. Chemické složení prášku je uvedeno v *Tabulce 13*. Návar vzniklý pomocí Celsitu V-P je schopen odolávat teplotám až do 980 °C. Vysoký obsah kobaltu v kombinaci s chromem poskytuje vysokou odolnost vůči korozi, adhezi a abrazi. Teplota tavení se pohybuje mezi 1240–1340 °C. Hodnota tvrdosti činí 380–490 HV (36–45 HRC). Prášek se používá především pro navařování těsnění v energetice. Uplatňuje se při renovaci nástrojů a pohyblivých součástí, které pracují za vysokých teplot (sedla, ventily, klikové hřídele a spalovací motory). [86] [87]

*Tabulka 13 Chemické složení prášku Celsit V-P % [87]*

	Co	Cr	W	C	Fe	Ni
[hm. %]	základ	28	4,5	1,1	1	1

První navařená stěna (prášek Nibasit 625-P) se skládala z 10 vrstev o celkové výšce 10 mm. Parametry navařování jsou uvedeny v *Tabulce 14*. Jako konstantní parametr byla určena frekvence (3 Hz), šířka návaru ( $s = 10$  mm), podávání prášku (11) a hodnota spodního proudu (IL 42 A). Proměnný parametr byla hodnota vrchního proudu (IH), otáčky polohovadla ( $0,32 \text{ min}^{-1}$ ) a rychlost hořáku ( $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Tyto parametry byly operativně měněny v průběhu navařování na základě tvorby návaru. Pro první vrstvu byla zvolena vyšší hodnota vrchního proudu z důvodu zahřátí základního materiálu. Z *Tabulky 14* lze usoudit, že se zvýšením hodnoty vrchního proudu (IH) docházelo k navýšení vrstvy (t). U osmé vrstvy došlo k problému s podavačem prášku, příčina nebyla zjištěna. Řešením bylo restartování stroje. Na *Obrázku 40* je zobrazen výsledný návar.



Tabulka 14 Parametry pro navařování proní stěny (prášek Nibasit 625-P)

(s = šířka, IH = horní proud, IL = dolní proud, f = frekvence pulzu, t = výška vrstvy)

vrstva	s [mm]	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání prášku [-]	t [mm]
1	10	172	42	3	11	2
2	10	140	42	3	11	1
3	10	142	42	3	11	1
4	10	132	42	3	11	1
5	10	152	42	3	11	1,5
6	10	145	42	3	11	1,5
7	10	62	42	3	11	1
8	problém s podavačem prášku					
9	10	78	42	3	11	0,5
10	10	78	42	3	11	0,5
celkem						10



Obrázek 40 Výsledná stěna po navařování (prášek Nibasit 625-P)

Pro druhý návar stěny byl použit prášek Celsit V-P popsaný výše. Bylo navařeno celkem 9 vrstev o celkové výšce 10 mm. Parametry pro jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v *Tabulce 15*. Mezi konstantní parametry patřily: šířka (10 mm), hodnota dolního proudu (IL 42 A) a frekvence (3 Hz). Otáčky polohovadla se pohybovaly kolem  $0,39 \text{ min}^{-1}$  a rychlost hořáku byla  $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z *Tabulky 14* je patrné, že navýšením parametru podávání prášku docházelo k nárůstu výšky vrstvy. Při navařování 8. vrstvy došlo ke vzniku trhliny viz *Obrázek 41*. Příčinou vzniku trhliny byla zřejmě nízká teplota ( $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) základního materiálu. Pro další pokusy byl předeřhříván základní materiál. Na *Obrázku 42* lze vidět výsledný návar stěny.

*Tabulka 15 Parametry pro navařování druhé stěny (prášek = Celsit V-P)*

(s = šířka, IH = horní proud, IL = dolní proud, f = frekvence pulzu, t = výška vrstvy)

vrstva	s [mm]	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání prášku [-]	t [mm]
1	10	105	42	3	9	1
2		105			9	1
3		105			10	1,5
4		105			10	1,5
5		105			10	1,5
6		105			10	1
7		105			10	1
8		90			8	0,5
9		80			8	0,5
celkem						10



Obrázek 41 Trhlina při navařování 8. vrstvy (prášek = Celsit V-P)

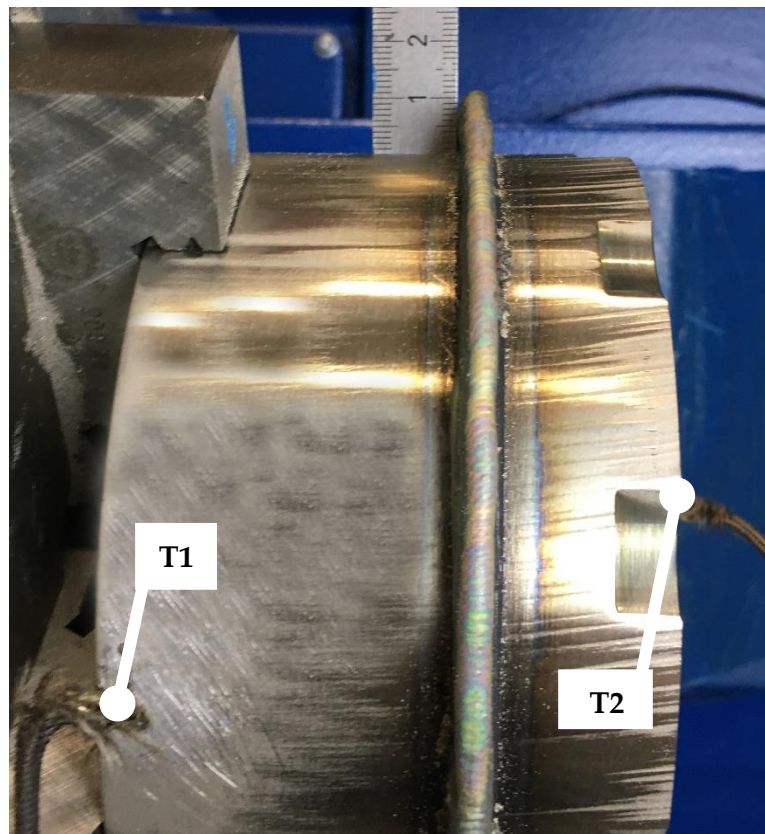


Obrázek 42 Výsledná stěna po navařování (prášek = Celsit V-P)

## 7.2 Část 2 - Navařování na slitinu Waspaloy

### 7.2.1 Navařování stěny

V druhé polovině experimentální části proběhlo navařování na součást (válec o průměru 140 mm a výšce 75 mm) ze slitiny Waspaloy. Teplota byla zaznamenána dvěma termočláňky viz *Obrázek 43*. První termočlánek byl umístěn na boku válce ve výšce 20 mm od spodní plochy. Druhý termočlánek byl připevněn do středu vrchní plochy válce. Před navařováním byla součást předehřátá na cca 200 °C v laboratorní peci. Jako přídatný materiál byl použit prášek Celsit V-P viz předchozí navařování. Výsledný návar je zobrazen na *Obrázku 43*.



*Obrázek 43 Výsledek navařování stěny na slitinu Waspaloy*

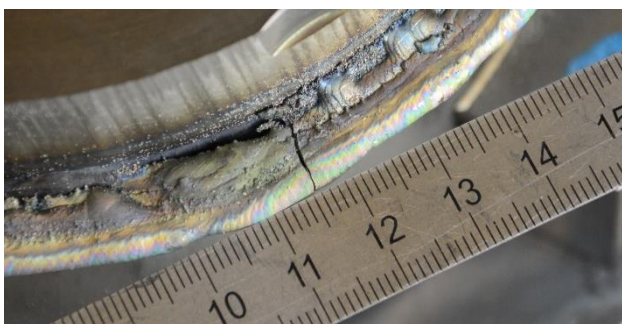
Vstupní parametry jednotlivých vrstev celkového návaru ve formě stěny jsou uvedeny v *Tabulce 16*. Celkem bylo navařeno 9 vrstev o celkové výšce 10 mm. Konstantními parametry byla šířka návaru (10 mm), frekvence (3 Hz), otáčky polohovadla ( $0,409 \text{ min}^{-1}$ ) a rychlost hořáku ( $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Součást byla před navařováním předehřívána v laboratorní peci na cca  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vzhledem k obtížné manipulaci a časové prodlevě při upínání do sklíčidla došlo ke zchladnutí o  $10\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Tabulka 16 Parametry pro navařování stěny na slitinu Waspaloy (prášek = Celsit V-P)*

*(s = šířka, IH = horní proud, IL = dolní proud, f = frekvence pulzu, t = výška vrstvy)*

vrstva	s [mm]	IH [A]	IL [A]	f [Hz]	podávání prášku [-]	teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	t [mm]
1	10	155	85	3	8	180–190	1
2	10	145	85	3	8	200–210	1
3	10	72	45	3	8	210–220	1
4	10	72	45	3	8	220–230	1
5	10	80	45	3	9	230–240	1,5
6	10	72	45	3	9	240–260	1,5
7	10	72	45	3	8	240–260	1
8	10	62	42	3	8	240–260	1
9	10	60	42	3	8	240–260	1
celkem							10

Při navařování 8. vrstvy došlo k výrazné trhlině viz *Obrázek 44*. Příčinou vzniku trhliny bylo zřejmě nedostatečné předehřátí součásti.

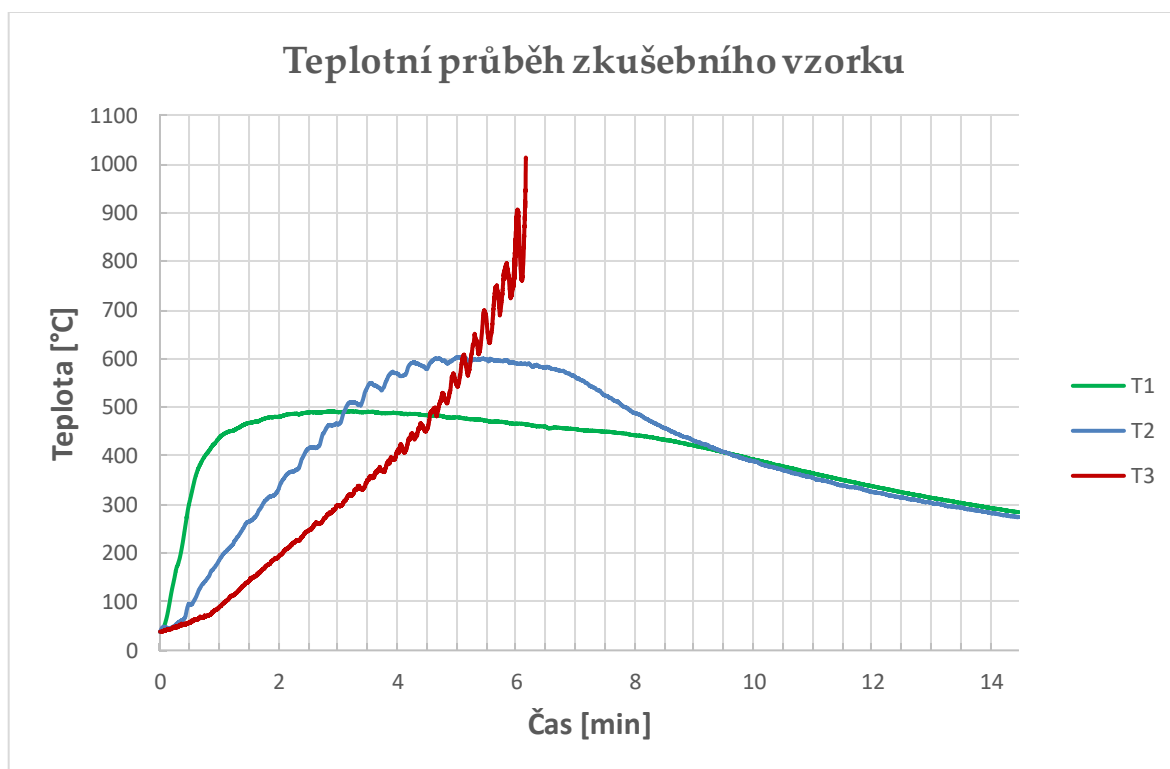


*Obrázek 44 Trhlina vytvořená při navařování 8. vrstvy*

## 7.3 Průběhy teplot při navařování

### 7.3.1 Zkušební navařování

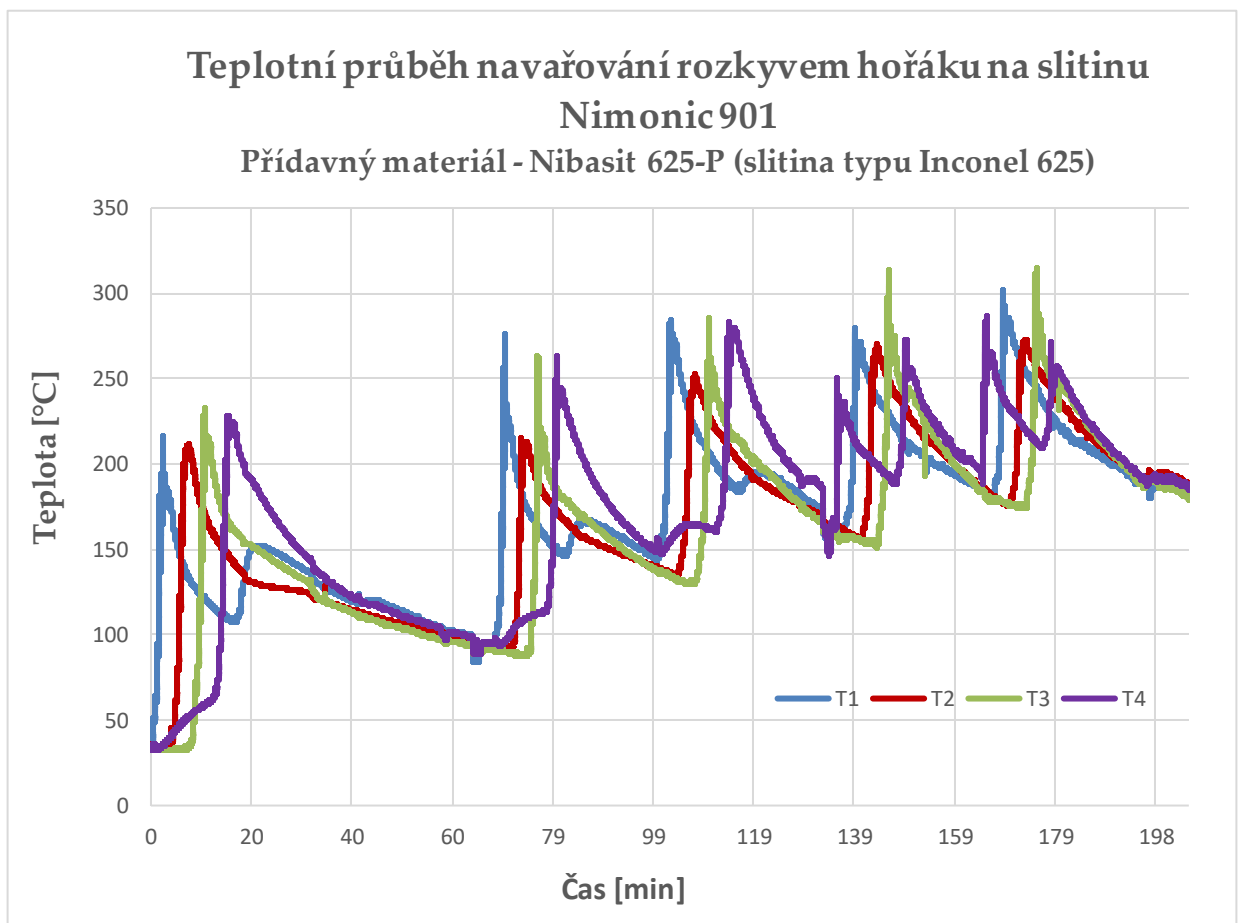
Graf 1 ukazuje teplotní průběh naměřený třemi termočlánky na testovacím vzorku. Z grafu je patrné, že křivky kopírují průběh navařování. Z počátku byl nejvíce zahříván termočlánek T1, následně T2 a v konečné fázi T3, který byl poškozen v důsledku blízkého pohybu hořáku. Navařování probíhalo v rozsahu teplot 0–600 °C.



Graf 1 Teplotní průběh prvního testovacího vzorku

### 7.3.2 Část 1 – Navařování na slitinu Nimonic 901

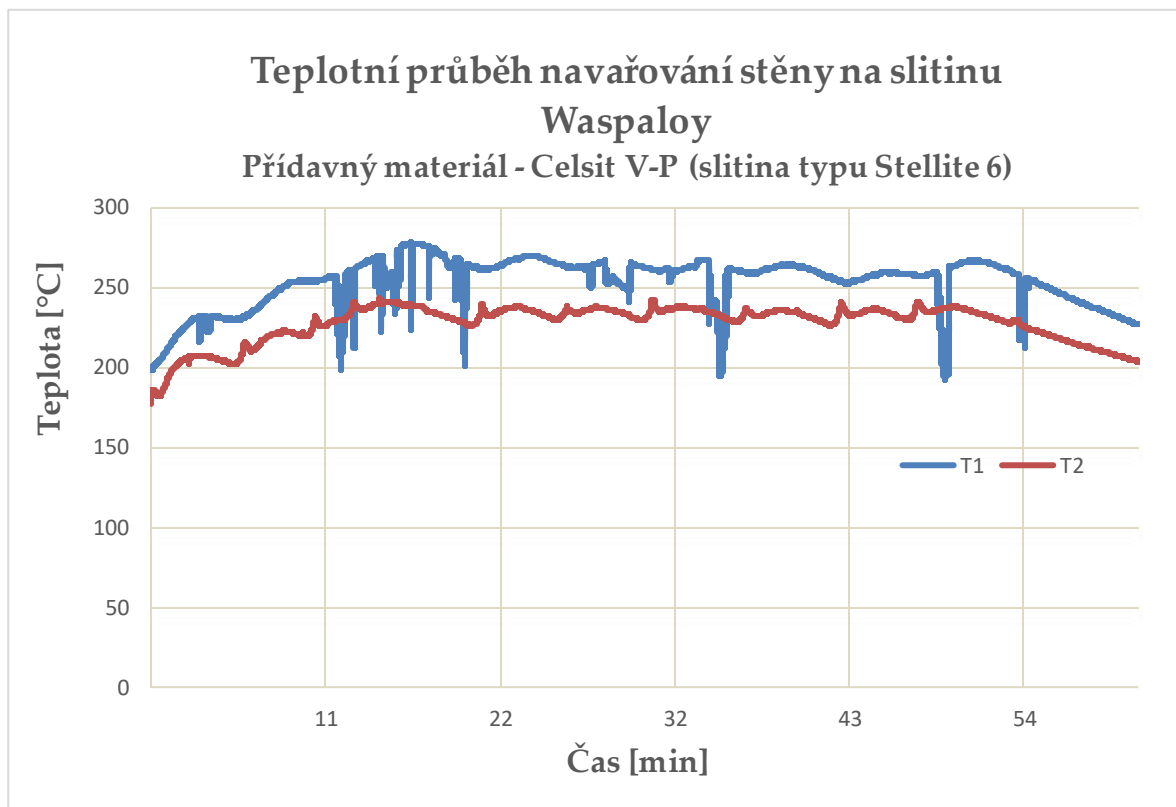
Na *Grafu 2* je zobrazen teplotní průběh navařování rozkyvem hořáku (přídavný materiál: Nibasit 625-P) na součást ze slitiny Nimonic 901. V grafu jsou vidět 4 průběhy teplot, naměřené pomocí termočlánků (T1–T4). Termočlánky byly umístěny na ploše součásti (válce), jejich rozmístění odpovídalo úhlu 90°. Jednotlivé vrstvy jsou rozeznatelné podle oblastí růstu teploty. Celkem bylo provedeno 5 vrstev návaru. Po navaření první vrstvy došlo k problému s pulzací stroje, proto je vidět časová prodleva mezi první a druhou vrstvou (cca 30 min). Problém byl vyřešen změnou režimů navařování v nastavení stroje (přechod z automatického režimu na ruční). Celý průběh navařování probíhal v rozsahu teplot 25–310 °C.



*Graf 2 Teplotní průběh pro navařování rozkyvem hořáku na slitinu Nimonic 901 (přídavný materiál Nibasit 625-P)*

### 7.3.3 Část 2 – Navařování na slitinu Waspaloy

Graf 3 popisuje teplotní průběh během navařování (přídavný materiál: Celsit V-P) stěny na součást ze slitiny Waspaloy. Před navařováním proběhlo předehřátí součásti na cca 230 °C. Vzhledem k náročné manipulaci došlo ke snížení teploty na cca 200 °C. Na součást byly umístěny 2 termočlánky viz *Obrázek 43*. První termočlánek T1 byl umístěn na ploše navařovaného válce. Druhý termočlánek T2 byl připevněn ve středu čelní plochy válce. Z grafu je patrné, že u hodnot naměřených termočlánkem T1 docházelo k fluktuaci. Příčinou zřejmě bylo chybné připevnění termočlánku. Teplota uvnitř součásti se pohybovala okolo 240 °C. Nejvyšší zaznamenaná teplota na povrchu byla 276 °C. Celý průběh navařování probíhal v rozsahu teplot 180–276 °C. Součást byla nedostatečně předehřátá, což způsobilo vznik trhliny. Optimální předehřev pro další pokusy by měl dosahovat až 500 °C.

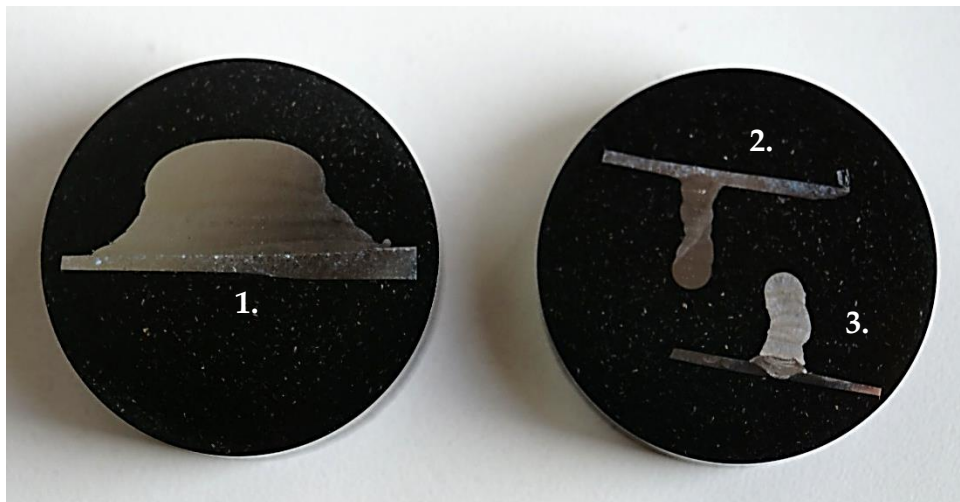


Graf 3 Teplotní průběh navařování stěny na slitinu Waspaloy (přídavný materiál Celsit V-P)



## 7.4 Vyhodnocení metalografie

Po ukončení navařování proběhlo vyřezávání vzorků z návarů pro následné vyhotovení metalografických výbrusů. Vzhledem k velikosti a vysoké teplotě součásti byla manipulace poměrně náročná. Bohužel došlo ke značnému tepelnému ovlivnění struktury, z důvodu komplikované manipulace s navařovanou součástí, což může mít velký vliv na výsledky metalografie. Výsledné vzorky připravené ke zkoumání makro a mikrostruktury jsou zobrazeny na *Obrázku 45*. Vyhodnocení metalografie bylo provedeno pouze pro první část experimentu.

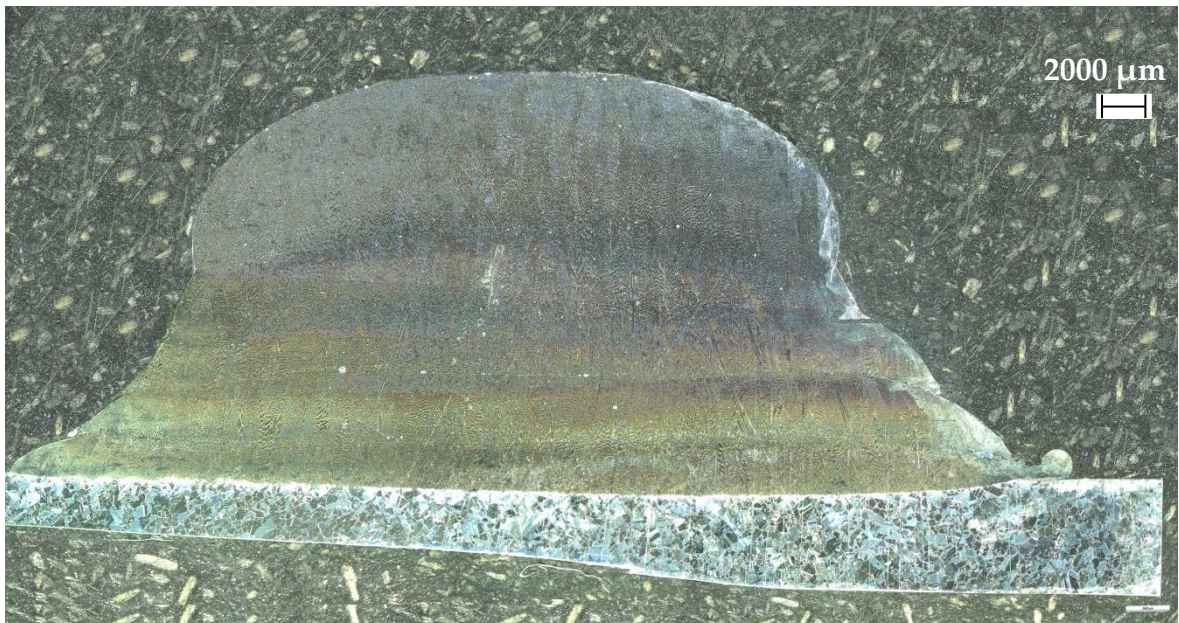


*Obrázek 45 Metalografické výbrusy*

*(vzorek č. 1, 2 – návar Nibasit 625-P, vzorek č. 3 – návar Celsit V-P)*

### 7.4.1 Makroskopie

Nejprve byly vyhotoveny makroskopické snímky metalografických výbrusů. *Obrázek 46* ukazuje 1× zvětšený makroskopický snímek prvního návaru rozkyvem hořáku na slitinu Nimonic 901 (přídavný materiál Nibasit 625-P). Lze vidět barevnou různorodost jednotlivých vrstev, což mohlo zapříčinit tepelné ovlivnění při přípravě metalografických vzorků.

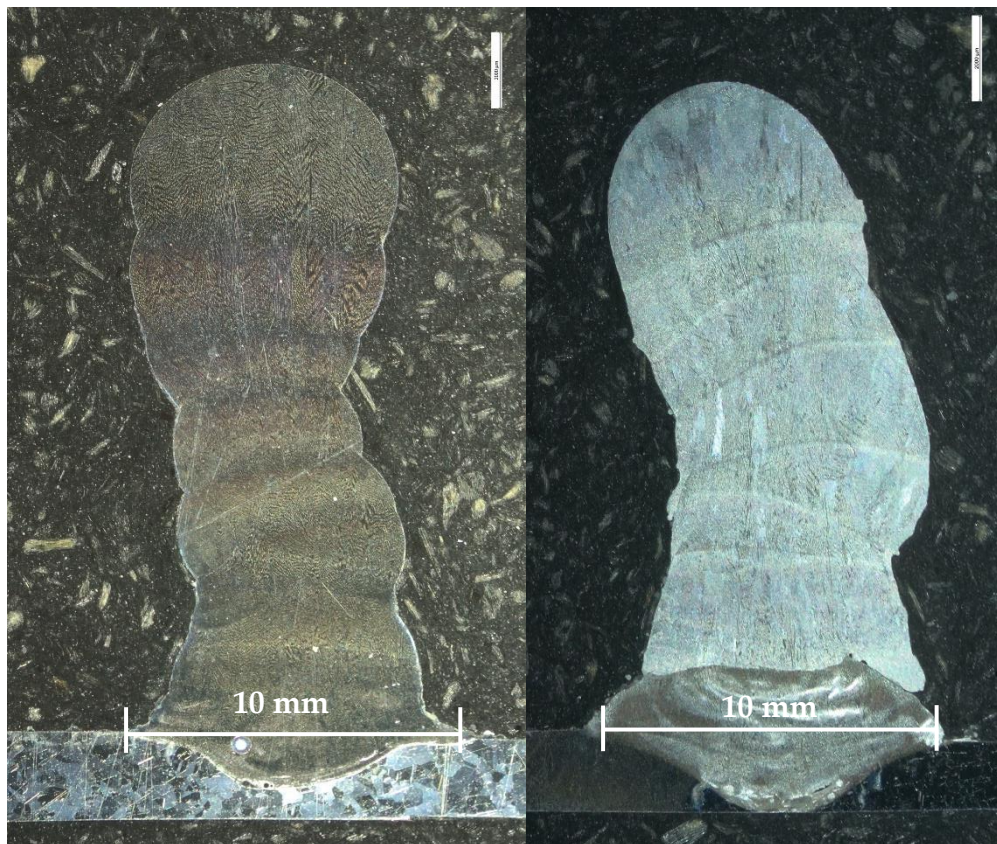


Obrázek 46 První návar provedený rozkyvem hořáku (zvětšení 1×)

Na následujícím *Obrázku 47* jsou znázorněny makroskopické snímky druhého a třetího návaru stěny se zvětšením 1×. Na levém snímku lze vidět rozdílnou strukturu navařovaného materiálu (Nimonic 901) a návaru typu slitiny Inconel 625. Provaření kořene návaru je dostatečné. V návaru se nevyskytují trhliny a vrstvy jsou propojené. Lze tvrdit, že se jedná o homogenní návar.

Na pravém snímku (přídavný materiál Celsit V-P) je zobrazen návar typu kobaltové slitiny Stellite 6. U tohoto návaru došlo k trhlíně (viz *Obrázek 44*), z důvodu nehomogenity navařovaných vrstev a vzniku neznámé fáze spojením první vrstvy se základním materiálem. Dále lze zde vidět nadměrné protavení první vrstvy do základního materiálu.

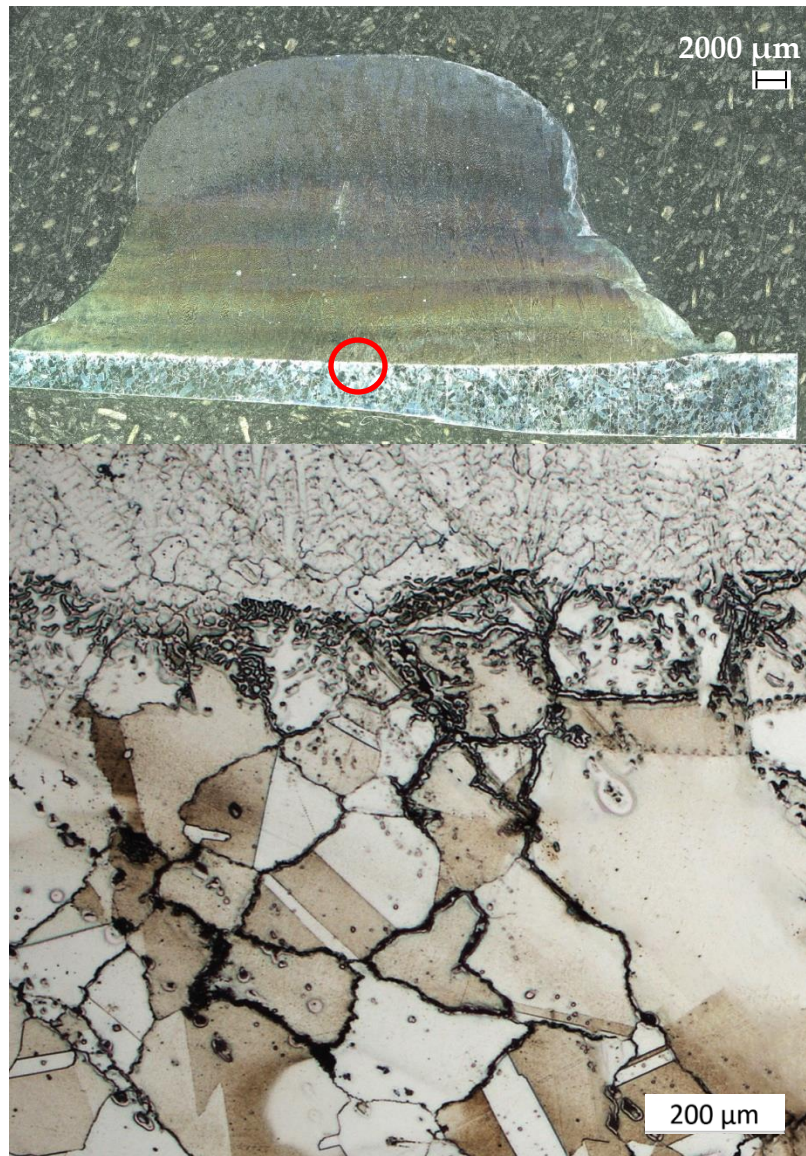
U obou vyhotovených návarů je patrná tvarová nesouměrnost jednotlivých vrstev, proto dochází ke kácení stěny. Je žádoucí, aby hrany vrstev byly co nejvíce kolmé, což je možné docílit optimalizací parametrů navařování.



Obrázek 47 Makroskopické snímky druhého a třetího návaru, zvětšení 1×  
 (vlevo = návar typu slitiny Inconel 625, vpravo návar typu slitiny Stellite 6)

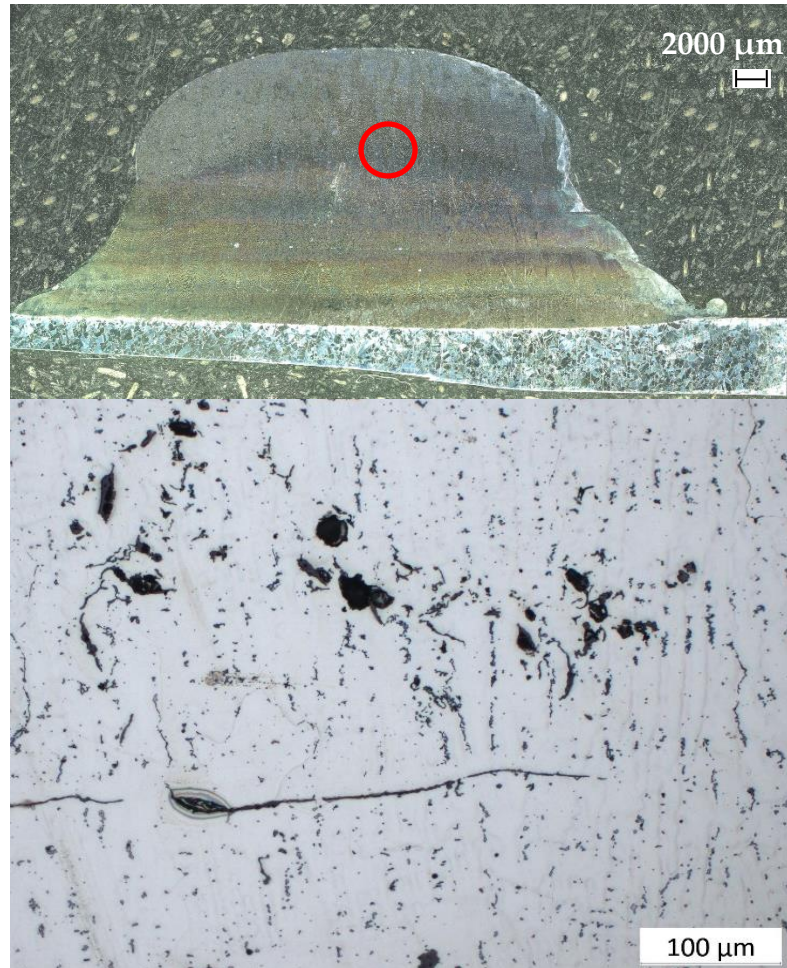
## 7.4.2 Mikroskopie

V další fázi byly vyhotoveny mikroskopické snímky metalografických výbrusů. Obrázky 48, 49 znázorňují mikrostrukturu prvního návaru (přídavný materiál Nibasit 625-P). Na Obrázku 48 lze vidět, že základní materiál byl značně nataven, a proto došlo ke vniknutí přídavného materiálu po hranicích zrn do struktury základního materiálu.



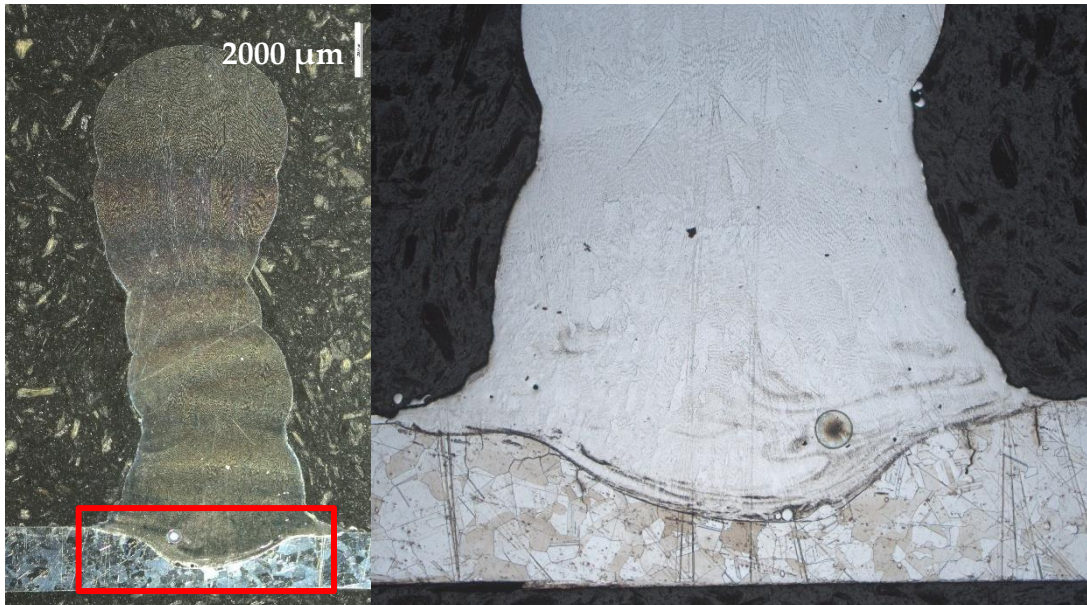
Obrázek 48 Struktura prvního návaru rozkyvem hořáku  
 (horní snímek zvětšení 1×, dolní snímek zvětšení 200×)

Důsledkem snížení hodnoty horního proudu ze 160 na 130 A (*Tabulka 12*) u navařování 4. vrstvy došlo k nedostatečnému natavení předchozí vrstvy, což způsobilo vznik studeného spoje viz *Obrázek 49*. Dále lze vidět přítomnost pórů či vměstků. Pro přesnější vyhodnocení by bylo třeba provést další analýzy.



Obrázek 49 Proní návar rozkyvem hořáku  
 (horní snímek zvětšení 1×, dolní snímek zvětšení 200×)

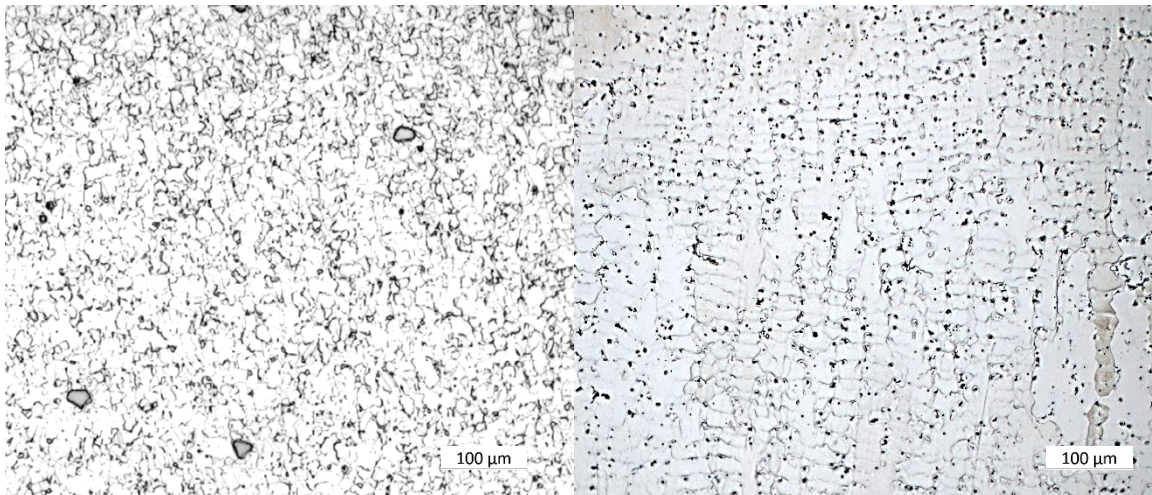
Na *Obrázku 50* je znázorněna mikrostruktura kořene druhého návaru v podobě stěny (přídavný materiál Nibasit 625-P). Na snímku je zobrazen kořen návaru, kde je patrné tepelné ovlivnění a jsou zde vidět trhliny vzniklé především vneseným napětím při přípravě vzorků.



Obrázek 50 Vlevo: Makrostruktura druhého návaru (zvětšení 1×)

Vpravo: Kořen druhého návaru (zvětšení 25×)

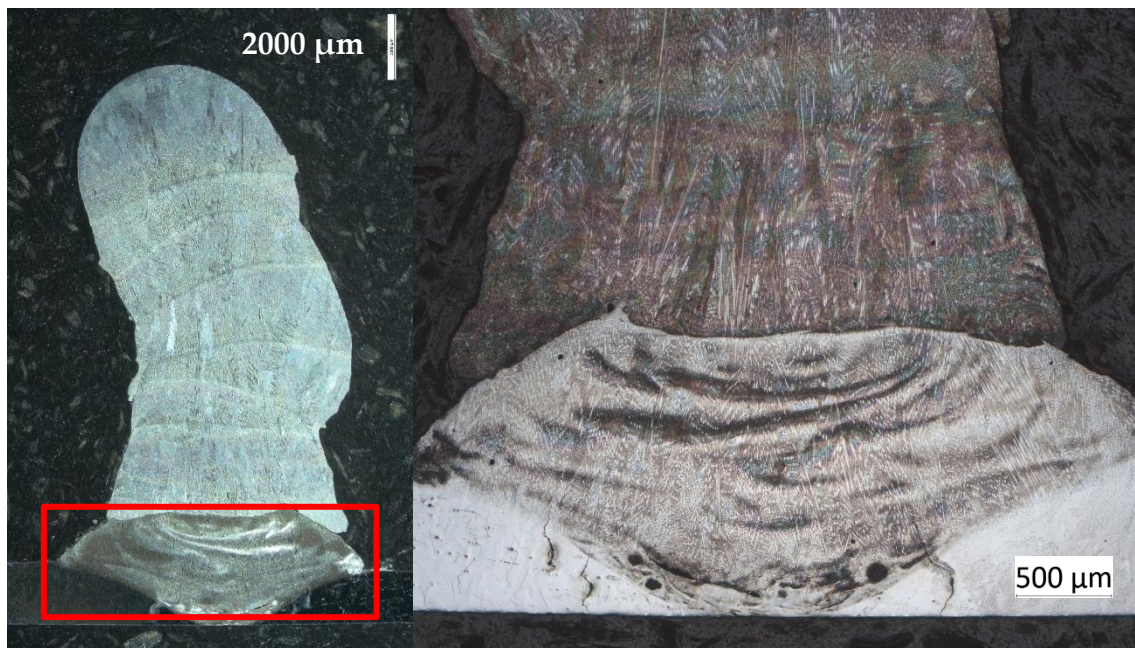
Mikrostruktura slitiny Inconel 625 je znázorněna na Obrázku 51 vlevo. Navařenou mikrostrukturu lze vidět na snímku vpravo Obrázek 51 (poslední vrstva návaru). [88]



Obrázek 51 Vlevo: Mikrostruktura slitiny Inconel 625 (zvětšení 200×) [88]

Vpravo: Dosažená struktura druhého návaru (zvětšení 200×)

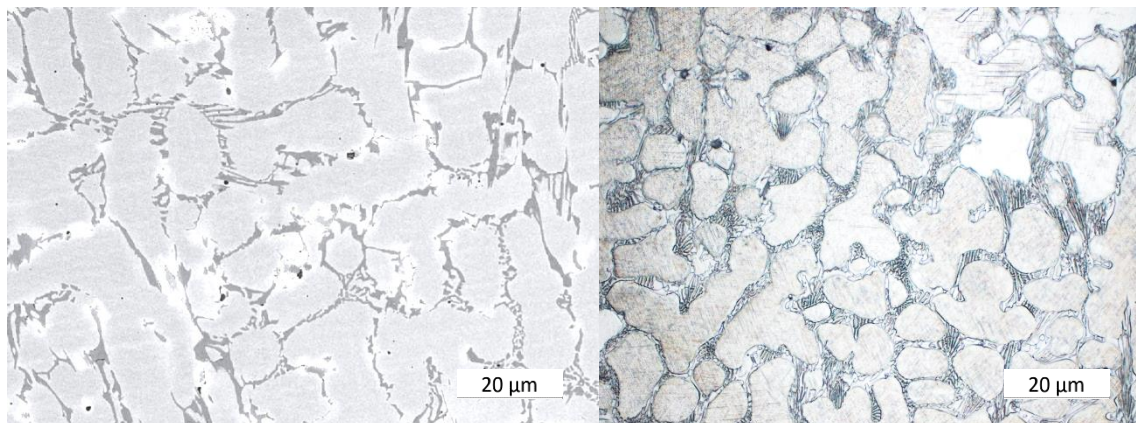
Na *Obrázku 52* vpravo lze vidět snímek (zvětšení 25×) kořene třetího návaru (přídavný materiál Celsit V-P). Nesprávnou volbou parametrů a navařováním bez přehřevu základního materiálu došlo ke tvorbě neznámé fáze u první vrstvy návaru. To zapříčinilo vznik trhliny viz *Obrázek 43*.



*Obrázek 52 Vlevo: Makrostruktura třetího návaru (zvětšení 1×)*

*Vpravo: Kořen třetího návaru (zvětšení 25×)*

Mikrostruktura slitiny Stellite 6 je zobrazena na *Obrázku 52* vlevo a vpravo je znázorněna struktura po navařování poslední vrstvy třetího návaru. Z obrázků lze konstatovat, že bylo dosaženo podobné struktury. [88]



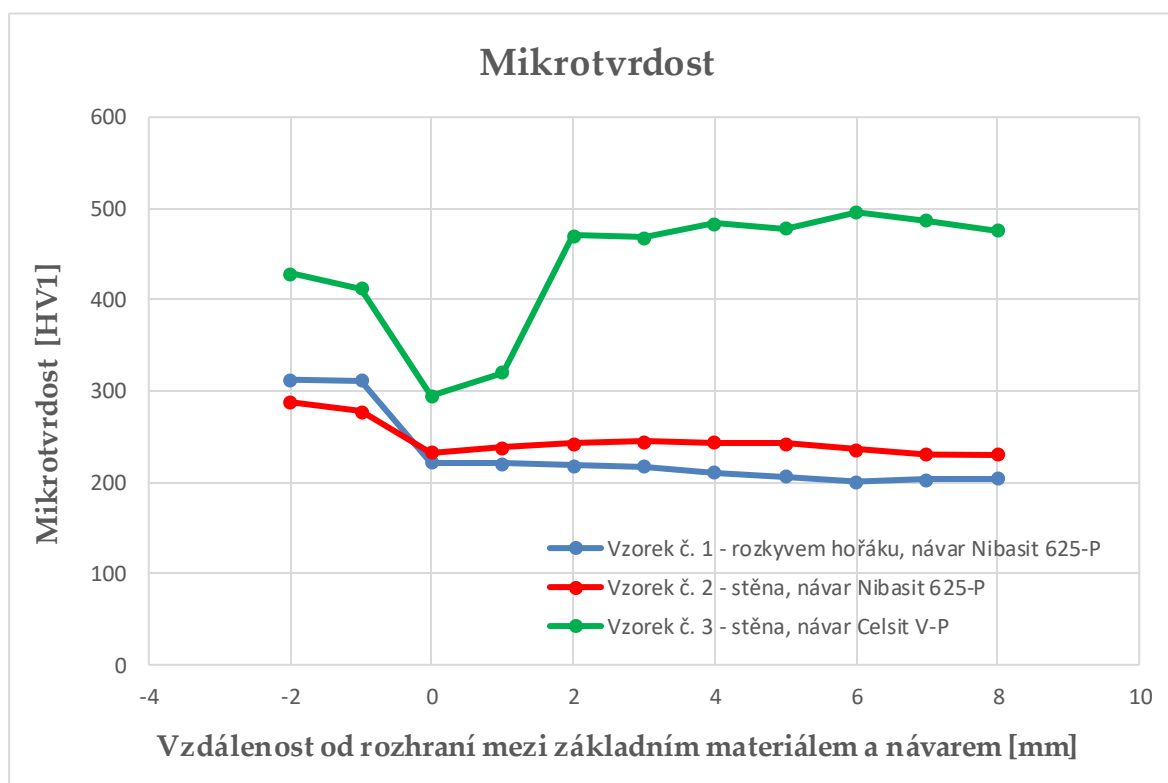
*Obrázek 53 Vlevo: Mikrostruktura slitiny Stellite 6 (elektronový mikroskop, zvětšení 1000×)[88]*

*Vpravo: Dosažená mikrostruktura navařováním (zvětšení 1000×)*

## 7.5 Vyhodnocení mikrotvrdomosti

Graf 4 zobrazuje průběhy mikrotvrdomostí pro jednotlivé vzorky. Všechny vzorky byly vyhotoveny z návarů, které byly provedeny na základní materiál Nimonic 901. Vzorek č. 1 odpovídá navařování rozkyvem hořáku (návar typu slitiny Inconel 625). Vzorek č. 2 odpovídá návaru ve formě stěny (slitina typu Inconel 625). Vzorek č. 3 představuje návar ve formě stěny ze slitiny typu Stellite 6. V grafu lze zaznamenat značné změny tvrdosti v přechodové oblasti ( $-1 \div 1$  mm) mezi základním materiálem a první navařovanou vrstvou. Pokles tvrdosti v této oblasti činil pro vzorek č. 1 kolem 80 HV, vzorek č. 2 cca 40 HV a nejvyšší propad zaznamenal kobaltový návar (vzorek č. 3) kolem 100 HV. Podle relativně konstantních křivek se jeví materiál ve vyšších vrstvách návaru jako homogenní.

Základním materiálem byla slitina Nimonic 901 o tvrdosti v rozmezí 320–400 HV. Naměřená průměrná hodnota odpovídá 338 HV. Tvrdost Inconelu 625 se pohybuje mezi 200–240 HV. Naměřená byla hodnota 224 HV (průměr). Slitina Stellite 6 disponuje tvrdostí 380–490 HV. Průměrná naměřená hodnota byla 457 HV. [89] [90] [91]



Graf 4 Průběhy mikrotvrdomostí pro 3 měřené vzorky (základní materiál Nimonic 901)



## Závěr

Teoretická část diplomové práce se zabývá úvodem do problematiky plazmatu. Dále byla zpracována rešerše na téma technologie navařování plazmatem, která byla aplikována v experimentální části práce. Tato kapitola popisuje princip, plyny, plazmové hořáky, používané materiály určené pro návary a v poslední řadě výhody a nevýhody PTA (Plasma Transferred Arc). Dále se rešeršní část práce zabývá niklovými slitinami se zaměřením na slitiny pro energetiku. Samostatné kapitoly byly věnovány slitinám Inconel 718 a Waspaloy, z důvodu předpokládaného použití těchto slitin v experimentální části. Poslední kapitolou rešeršní části bylo téma plynové turbíny, jejich princip a typy. Byl kladen důraz na téma labyrintového těsnění, které je součástí plynové turbíny a předmětem praktické části. Kapitola labyrintové těsnění popisuje jeho princip, rozdělení, materiál, výhody a nevýhody, konfigurace v plynové turbíně a opotřebení.

Experimentální část vznikla ve spolupráci se společností Solar Turbines EAME s.r.o. Firma je jedním z předních světových výrobců středně velkých průmyslových plynových turbín. Pro upřesnění zadání experimentu byla navštívena pobočka v České republice.

Cílem experimentální části bylo navařit plochu (rozkyvem hořáku) pomocí PTA, která se následně obrobí do tvaru nových lamel labyrintového těsnění. Na toto téma nebyla nalezena žádná publikovaná práce s využitím technologie plazmového navařování. Původním zadáním bylo provést navaření na dva rotory ze slitiny Inconel 718 a Waspaloy s použitím příslušných přídavných materiálů ve formě prášku. Vzhledem k tomu, že nebyla k dispozici požadovaná součást z materiálu Inconel 718 a příslušné přídavné materiály, bylo navaření provedeno na dostupný materiál Nimonic 901 s podobnými vlastnostmi. Dále byly použity přídavné materiály (Nibasit 625-P, Celsit V-P) s obdobnými vlastnostmi ve srovnání se základním materiálem.

V experimentální části byla provedena dodatečná rešerše, z důvodu změny základního materiálu na Nimonic 901. Taktéž byla zpracována rešerše přídavných materiálů Nibasit 625-P a Celsit V-P. Byly provedeny 3 zkušební návary na testovací vzorky pro určení optimálních parametrů pro následné navařování. V první části experimentu

byly navařeny 3 návary na materiál Nimonic 901. První návar se skládal z pěti vrstev a byl proveden rozkyvem hořáku (pendl), tedy navařením plochy o šířce 30 mm a výšce 10 mm. Další dva návary tvořily stěny (9 a 10 vrstev) o šířce a výšce 10 mm. Pro první a druhý návar byl použit přídavný materiál Nibasit 625-P (slitina typu Inconel 625). Třetí návar byl navařen Celsitem V-P (slitina typu Stellite 6), kde došlo k výrazné trhlině z důvodu nedostatečného předehřátí základního materiálu. V druhé části experimentální práce byla navařena stěna o šířce a výšce 10 mm na slitinu Waspaloy. Pro toto navařování byl použit přídavný materiál typu slitiny Stellite 6. Po předehřátí základního materiálu na cca 230 °C došlo opakovaně ke vzniku výrazné trhliny. Pro budoucí realizaci podobného navařování by bylo třeba vyššího předehřevu základního materiálu na cca 500 °C.

V kapitole výsledky a diskuze jsou popsány průběhy teplot při navařování a vyhodnocení z hlediska metalografie a mikrotvrdosti. Velký dopad na výsledky metalografie mělo tepelné ovlivnění struktury a vnesené napětí při přípravě vzorků pro metalografické výbrusy. Při navařování prvního návaru byl základní materiál příliš nataven, a proto došlo k výraznému vniknutí přídavného materiálu po hranicích zm do struktury základního materiálu. Snížení horní hodnoty proudu vedlo k vyšší homogenitě následujících vrstev. Návary vytvořené formou stěny vykazují asymetrii a dochází tak ke ztuhlání. Příčinou byla ruční regulace parametrů během navařování, z důvodu hledání ideálních parametrů pro následující vrstvy. Přesto lze považovat tento způsob obnovy lamel za perspektivní a vhodný pro další použití. Nejvyšší propad mikrotvrdosti se projevil na rozhraní základního materiálu a první navařované vrstvy u návaru kobaltové slitiny cca 100 HV. Průměr naměřených výsledků mikrotvrdosti u vzorků odpovídají hodnotám z rešerše, proto lze tvrdit, že bylo dosaženo návarů s požadovanou tvrdostí.

Dle dosažených výsledků diplomové práce lze doporučit variantu navařování stěny (lamely) oproti navařování plochy (rozkyvem hořáku) z důvodu nižší spotřeby přídavného materiálu. Návary typu slitiny Stellite 6 jsou schopny splnit požadované vlastnosti lamel labyrinthového těsnění pro plynové turbíny. Především z hlediska tvrdosti, která byla naměřena kolem 460 HV, což je vyhovující pro navařování na rotory ze slitiny Inconel 718

---

a Waspaloy, kde se tvrdost pohybuje kolem 425 HV. Získané znalosti, a především optimalizované parametry pro navařování niklových slitin lze využít k budoucím výzkumným pracím v probíhající spolupráci s firmou Solar Turbines EAME s.r.o.

## Literatura

- [1] ELIEZER, Y., ELIEZER, S. *The Fourth State of Matter: An Introduction to Plasma Science*. 2nd ed. Philadelphia: IOP, 2001. ISBN 07-503-0740-4.
- [2] YORK, Thomas and Haibin TANG. *Introduction to Plasmas and Plasma Dynamics* [online]. London: Academic Press, 2015. [vid. 14. 5. 2020]. ISBN 9780128018002. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128016619/introduction-to-plasmas-and-plasma-dynamics#book-description>.
- [3] MAKABE, T., PETROVIC, Z.L. *Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication*. USA: CRC Press, 2006. ISBN: 1420012274.
- [4] *Aldebaran* [online]. Aldebaran Group for Astrophysics. [vid. 14. 5. 2020]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/actions/2015\\_jsma\\_praha/docs/2015\\_jsma\\_plazma.pdf](https://www.aldebaran.cz/actions/2015_jsma_praha/docs/2015_jsma_plazma.pdf)
- [5] MOROZOV, A.I. *Introduction to Plasma Dynamics*. USA: CRC Press, 2012. ISBN 978-1439881323.
- [6] National Research Council. *Plasma Science: Advancing Knowledge in the National Interest*. Washington: The National Academies Press, 2007. ISBN 978-0-309-10944-4.
- [7] MOLEK, Tomáš. Plazmové zplyňování odpadů - princip a využití. In: *OENERGETICE* [online]. OM Solutions, 2015. [vid. 16. 5. 2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/plazmove-zplynovani-odpadu-princip-a-vyuziti?fbclid=IwAR0-YBFnz0w-FPpFMj9PIfv9isbCIqN5Hqor2KtGEBVSbCCnuMvXShAhs>.

- [8] SUDNIK, W. *Arc Welding*, Croatia: InTech. 2011. ISBN 978-953-307-642-3.
- [9] Union Carbide Corp. *Arc torch and process*. Inventor: Gage, R.M. 10.09.1957. US Patent 2806124.
- [10] WELCH, R. and P.A. LAMPHIER. *Technical Innovation in American History: An Encyclopedia of Science and Technology*. 3th ed. USA: ABC-CLIO, 2019. ISBN 9781610690942.
- [11] WILDEN, J., J.P. BERGMANN and H. FRANK. Plasma Transferred Arc Welding—Modeling and Experimental Optimization. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2006, 15, pp. 779-784. [vid. 11. 5. 2020]. ISSN 10599630. Dostupné z doi: 10.1361/105996306X146767.
- [12] ROHAN, Pavel, Ladislav KOLAŘÍK, Tomáš KRAMÁR and Zdeněk KRŠKA. Navařování plazmatem - ochranné povlaky ve výrobě i výzkumu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, (2015/1) [vid. 13. 5. 2020]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-vevyrobe-i-vyzkumu.html>.
- [13] MORAVEC, J. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
- [14] GATTO, Andrea, Ellena BASSOLI and M. FORNARI. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, 187, pp. 265-271. [vid. 12. 5. 2020]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.013>.

- [15] PTA-Technology. In: *Kjellberg* [online]. Kjellberg Group © 2015. Dostupné z: [http://www.kjellberg.de/files/Images/Welding/Applications/PTA\\_Technology\\_f.jpg](http://www.kjellberg.de/files/Images/Welding/Applications/PTA_Technology_f.jpg).
- [16] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: Díl 2: Speciální metody tavného svařování*. Brno: 2006. Syllabus přednášek. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [17] SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. *Svět svaru* [online]. 2014, 5, pp. 7-11. [vid. 18. 5. 2020]. ISSN 1214-4983. Dostupné z: <https://adoc.tips/svaovani-plazmovym-obloukem.html>.
- [18] *Kskct* [online]. KSK s.r.o. [vid. 15. 7. 2020]. Dostupné z: <https://kskct.cz/cs>.
- [19] Schéma navařování. In: *DocPlayer* [online]. DocPlayer. © 2020. [vid. 18. 5. 2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1807039-Plazmove-svarovani-navarovani-15.html>.
- [20] BOULOUS M.I., FAUCHAIS, P.L. and E. PFENDER. *Handbook of Thermal Plasmas*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-12183-3.
- [21] Stellite [online]. *PTA STARWELD*. ©2019. [vid. 21. 5. 2020]. Dostupné z: [https://s7d2.scene7.com/is/content/Kennametal/B-19-06066\\_KMT\\_Stellite\\_PTA\\_Starweld\\_Brochure\\_EN\\_LRpdf-2](https://s7d2.scene7.com/is/content/Kennametal/B-19-06066_KMT_Stellite_PTA_Starweld_Brochure_EN_LRpdf-2).
- [22] Stahlben [online]. *Příručka svařování. Opravy a údržba*. ©2011. [vid. 21. 5. 2020]. Dostupné z: [http://stahlben.cz/products/pdf/esab\\_repair\\_maintenance.pdf?fbclid=IwAR27n3Pb1NHNnnDdjCmWYlvrNYhzhAvLm3i8dXXR3rkwURcysZ0VINiBMU4](http://stahlben.cz/products/pdf/esab_repair_maintenance.pdf?fbclid=IwAR27n3Pb1NHNnnDdjCmWYlvrNYhzhAvLm3i8dXXR3rkwURcysZ0VINiBMU4).

- [23] VOJTĚCH, D.: *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, pp. 1-21. ISBN 80-7080-600-1.
- [24] MACHEK, V. *Kovové materiály 3.: speciální kovové materiály*. Praha: ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1.
- [25] BREZINOVA, J., DRAGANOVSKA, D., GUZANOVA, A., BALOG, P. and J. VINAS. Influence of the Hardfacing Welds Structure on Their Wear Resistance. *Metal* [online]. 2016, 6, 1-12. [vid. 21. 6. 2020]. Dostupné z: doi:10.3390/met6020036.
- [26] PLAZMOVÉ NAVAROVÁNÍ (PTA - Plasma Transferred Arc). In: *Servis Armatur* [online]. Servis Armatur spol. ©2020. [vid. 20. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=plasma-powder-surfacing>.
- [27] *The PTA process - Plasma Transferred Arc* [online]. Commersald. [vid. 20. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.commersald.com/the-pta-process-plasma-transferred-arc.htm?fbclid=IwAR2pKcnN4y8LidPotfzLWV37hoBJqzeI3zdZljlwTtVujoDCUIQ257XXmE>.
- [28] D'OLIVEIRA, A.S.C.M PAREDESA, R.S.C. and R.L.C SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2006, 171, pp. 167-174. [vid. 21.6. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.269>.
- [29] GREENWOOD, N. N. *Chemie proků*. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-38-9.
- [30] INSG [online]. International Nickel Study Group. [vid. 20. 02. 2020]. Dostupné z: <https://insg.org/index.php/about-nickel/what-is-nickel/>.

- 
- [31] Chemical Elements A Virtual Museum. In: Images-of-elements [online]. Junk de Webprojects, ©2016 [vid. 17. 5. 2020]. Dostupné z: <https://images-of-elements.com/nickel.php>.
- [32] Face Centered Cubic Structure (FCC). In: *e-education* [online]. The Pennsylvania State University, ©2018. [vid. 17. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2133>.
- [33] *NickelINSTITUTE* [online]. Nickel properties [vid. 18. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.nickelinstitute.org/about-nickel#01-nickel-properties>.
- [34] *SPECIAL METALS* [online]. Precision Castparts Corp [vid. 18. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/products/>.
- [35] BAHADORI, A. *Oil and Gas Pipelines and Piping Systems: Design, Construction, Management, and Inspection*. USA: Gulf Professional Publishing, 2017. ISBN 978-0-12-803777-5.
- [36] BELL, Terence. History and Applications of Monel Alloys. In: *ThoughtCo* [online]. ThoughtCo 2020. [vid. 18. 5. 2020]. Dostupné z: [thoughtco.com/monel-alloys-composition-properties-and-uses-2340255](https://www.thoughtco.com/monel-alloys-composition-properties-and-uses-2340255).
- [37] KRELLING, A.P., MELO, F.S. ALMEIDA, E.A.S., DA COSTA, C.E. and J.C.G. MILAN. Microstructure and properties of borided Monel 400 alloy. *Materials Research Express* [online]. 2019, 6. [vid. 22. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab387a>.
- [38] *ChemEurope* [online]. Lumitos, AG. ©2018. [vid. 17. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.chemeuropa.com/en/encyclopedia/Inconel.html>.



- 
- [39] Neonickel. Slitiny Hastelloy® [online]. NeoNickel Blackburn [vid. 22. 5. 2020].  
Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/slitiny-hastelloy/>.
- [40] ABATINI, Michael, MONACO, Leo and Uwe ERB. Corrosion of nanocrystalline and coarse-grained nickel-iron (Ni-Fe) alloys in neutral and alkaline sulfate environments. *Corrosion Science* [online]. 2020, 163, pp. 108233. [vid. 22. 5. 2020]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108233>.
- [41] CAMPBELL, F.C. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. USA: ASM International, 2008. ISBN: 978-0-87170-867-0.
- [42] ASQARY, Z., ABBASI, S.M., SEIFOLLAHI, M. and M. MORAKABATI. The effect of boron and zirconium on the microstructure and tensile properties of Nimonic 105 superalloy. *Materials Research Express* [online]. 2019, 6. [vid. 23. 5. 2020]. Dostupné z doi: 10.1088/2053-1591/ab4676.
- [43] ALONSO ROMERO, Jabalquinto, PATRICIA ZAMBRANO, Robledo, ABRAHAM VELASCO, Téllez a Reyes BÁRBARA BERMÚDEZ. Feasibility of manufacturing combustion chambers for aeronautical use in Mexico. *Journal of applied research and technology*. 2016, 14, pp. 167-172. [vid. 23. 5. 2020]. ISSN 2448-6736. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.003>.
- [44] *Corrotherm* [online]. Corrotherm International Ltd. [vid. 24. 5. 2020]. Dostupné z: [https://www.corrotherm.co.uk/blog/product-focus-popular-alloys-for-the-power-generation?fbclid=IwAR0KIFqkBUMPGI7U4siKbXiaMHsK0U4qmW\\_VjBjoZ4dT-J\\_a1arRtW9qYM8](https://www.corrotherm.co.uk/blog/product-focus-popular-alloys-for-the-power-generation?fbclid=IwAR0KIFqkBUMPGI7U4siKbXiaMHsK0U4qmW_VjBjoZ4dT-J_a1arRtW9qYM8).

- [45] DUPONT, J. Welding of Nickel-Based Alloys for Energy Applications. *Welding Journal* [online]. 2014, 93, 31-45. [cit. 24. 5. 2020]. Dostupné z: [https://pdfs.semanticscholar.org/a6fd/a21a2c77ef3c8081314ca4aa4f5b95d952c5.pdf?\\_ga=2.209682961.204053522.1590325838-1977120923.1589827537&fbclid=IwAR0uwkk3vEwRq9Y2TJYTS8AQFWmpLx\\_nDdncneBoQP5CvsQo95oEwTeu78o](https://pdfs.semanticscholar.org/a6fd/a21a2c77ef3c8081314ca4aa4f5b95d952c5.pdf?_ga=2.209682961.204053522.1590325838-1977120923.1589827537&fbclid=IwAR0uwkk3vEwRq9Y2TJYTS8AQFWmpLx_nDdncneBoQP5CvsQo95oEwTeu78o).
- [46] DONACHIE, M. J., DONACHIE, S. J. *Superalloys: A Technical Guide. 2nd ed. Materials Park*. USA: ASM International, 2002. ISBN-13: 978-0-87170-749-9.
- [47] SPECIAL METALS [online]. Inconel alloy 718. ©2007. [vid. 07. 09. 2004]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/Inconel/Inconel-alloy-718.pdf>.
- [48] HOSSEINI, E. and Vera Popovich. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, 30, 100877. [22. 5. 2020]. Dostupné z: 10.1016/j.addma.2019.100877.
- [49] *Neonickel*. Alloy 718. [online]. NeoNickel Blackburn. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/alloys/nickel-alloys/alloy-718/>.
- [50] SEMIATIN, S.L. *ASM Handbook Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming*. USA: ASM International, 2005. ISBN: 978-0-87170-708-6.
- [51] AircraftMaterials [online]. Aircraftmaterialsuk. © 2013 [vid. 22. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/718.html?fbclid=IwAR0Cdfo7Fd1xKP16diRflr3CvFtBIVl-xfzoayD2iCxOezH0Wd6MaqMgKuI>.

- 
- [52] SPECIAL METALS [online]. Waspaloy. ©2004. [vid. 24. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/other/waspaloy.pdf>
- [53] VEERAPPAN, G., RAVICHANDRAN, M. and S MARICHAMY. Mechanical properties and machinability of waspaloy for aerospace applications – review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [online]. 2018, 402. [vid. 23. 5. 2020]. Dostupné z doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012039.
- [54] Rolled Alloys [online]. Waspaloy. ©2011. [vid. 22. 5. 2020]. Dostupné z: [https://www.rolledalloys.com/shared-content/technical-resources/datasheets/WASPALOY\\_DS\\_US\\_EN.pdf](https://www.rolledalloys.com/shared-content/technical-resources/datasheets/WASPALOY_DS_US_EN.pdf).
- [55] POLVOROSA, R., SUÁREZ, R., LÓPEZ DE LACALLE, L.N., CERRILLO I., WRETLAND, A. and F. VEIGA. Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2017, 26, 44-56. [vid. 23. 5. 2020]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.01.012>.
- [56] BIBUS [online]. Niklové slitiny. ©2020. [vid. 19. 11. 2018]. Dostupné z: [http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/Niklove\\_slitiny.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf).
- [57] BREEZE, P. *Gas-Turbine Power Generation*. Cambridge: Academic Press, 2016. ISBN 978-0-12-804005-8.

- [58] MAXEY, K. Testing the World's Most Powerful Gas Turbine. Engineering [online]. *Engineering.com*, 2015. [vid. 25. 5. 2020]. Dostupné z: [https://www.engineering.com/PLMERP/ArticleID/9667/Testing-the-Worlds-Most-Powerful-Gas-Turbine.aspx?fbclid=IwAR1zV2C-gpBLjibuyVGGslMbUxGI9admh\\_7v4D3JKubACzsQaBj1N6kxKXM](https://www.engineering.com/PLMERP/ArticleID/9667/Testing-the-Worlds-Most-Powerful-Gas-Turbine.aspx?fbclid=IwAR1zV2C-gpBLjibuyVGGslMbUxGI9admh_7v4D3JKubACzsQaBj1N6kxKXM).
- [59] SOARES, C. *Gas turbines: a handbook of air, land, and sea applications*. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-7506-7969-5.
- [60] ZOHURI, B. *Combined Cycle Driven Efficiency for Next Generation Nuclear Power Plants*. USA: Springer Publishing Company, 2015. ISBN: 978-3319155593.
- [61] FORSTHOFFER, M.S. *More Best Practices for Rotating Equipment*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 9780128114094.
- [62] CHILDS, P.R.N. *Mechanical design engineering handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-08-098283-0.
- [63] CASH, Wes. How Labyrinth Seals Control Contaminant Ingression. *Machinery Lubrication* [online]. Noria Corporation ©2020, 2013 [vid. 24. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29452/using-labyrinth-seals>.
- [64] FLITNEY, R. *Seals and Sealing Handbook*. 6th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-099416-1.
- [65] Labyrinth. In: *Turbomachinerymag* [online]. MultiMedia Pharma SciencesLCC, ©2019. [vid. 20. 5. 2020]. Dostupné z: <https://assets-turbomachinerymag-com.s3.amazonaws.com/uploads/2017/11/Labyrinth.gif>.

- 
- [66] STEINETZ, B.M. SEAL TECHNOLOGY. In: KUTZ, M. *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 3: Manufacturing and Management*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015, 283-323. ISBN 978-1-118-11284-7.
- [67] SHUKLA, R.K. *Electrical Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 9781259006203.
- [68] BERTUCCO, A and G. VETTER. *High Pressure Process Technology: Fundamentals and Applications, Volume 9*. Amsterdam: Elsevier Science, 2001, 684. ISBN 9780444504982.
- [69] JAZI, H.S. *Advanced Plasma Spray Applications*. Croatia: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0349-3.
- [70] LI, G., ZHANG, Q., LEI, Z., HUANG, E., WU, H. and G. XU. Leakage performance of labyrinth seal for oilsealing of aero-engine. *Propulsion and Power Research* [online]. 2019, 8, 13-22. [vid. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2018.12.003>.
- [71] GMNBT [online]. GMN Bearing USA. [vid. 28. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.gmnbt.com/labyrinth-seals/design-solutions/applications-that-use-labyrinth-seals/>.
- [72] JORISH, W. *Vacuum Technology in the Chemical Industry* [online]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. ISBN 9783527653898. Dostupné z: DOI:10.1002/9783527653898.

- [73] Labyrinth Seal via Smalley Steel Ring Co. In: *Globalspec* [online]. IEEE GlobalSpec, ©2020. [vid. 28. 5. 2020]. Dostupné z: [https://www.globalspec.com/learnmore/mechanical\\_components/seals/labyrinth\\_seals\\_clearance\\_seals](https://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/seals/labyrinth_seals_clearance_seals).
- [74] YAN, X., DAI, X., ZHANG, K., LI, J. and K. HE. Effect of teeth bending and mushrooming damages on leakage performance of a labyrinth seal. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018, 32, pp. 4697~4709. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: DOI: 10.1007/s12206-018-0917-y.
- [75] DOGU, Y., SERTCAKAN, M.C., GEZER, K., KOCAGÜL, M., ARICAN, E. and M.S. OZMUSUL. Labyrinth Seal Leakage Degradation due to Various Types of Wear. In: ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition [online]. Seoul, South Korea: 13–17.6 2016. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: DOI: 10.1115/GT2016-57944.
- [76] Firemní materiály. CAD Model rotoru plynové turbíny. Žatec: Solar Turbines EAME s.r.o.
- [77] Specialmetals [online]. *NIMONIC® alloy 901*. 2013. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/nimonic/nimonic-alloy-901.pdf>.
- [78] *Kskct* [online]. KSK s.r.o. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/cs/navarovani/plazmove-navarovaci-automaty/ppc-250-r6>.

- [79] *Ahlborn* [online]. AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>.
- [80] *Svarservis* [online]. Svarservis group s.r.o. [vid. 23. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.svarservis.cz/produkty/prislusenstvi/>.
- [81] *Helago* [online]. HELAGO-CZ s. r. o. [vid. 23. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/eshop-le0511-137473.html>.
- [82] *Bostonmicroscopes* [online]. Boston Microscopes - Powered by Kea Digital. [vid. 23. 7. 2020]. Dostupné z: <https://bostonmicroscopes.com/product/zeiss-axio-observer-d1-inverted-phase-contrast-fluorescence-microscope>.
- [83] *Thermofisher* [online]. Thermo Fisher Scientific Inc. [vid. 23. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.co.nz/Uploads/file/Scientific/Laboratory-Equipment-Furniture/Material-Characterisation-Testing/Materials-Preparation-Analysis/Buehler/pdf/IndentaMet-1100-Series-Indentation-Hardness-Testers.pdf>
- [84] *Specialmetals* [online]. INCONEL® alloy 625. 2013. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>.
- [85] *Kskct* [online]. *Nibasit 625-P. Prášky, návarové materiály a tvrdokovy. Katalog.* ©2017. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.kskct.cz/images/katalog/prasky-navarove-materialy-a-tvrdokovy/dokumentace/Nibasit%20625-P.pdf>.

- [86] Specialmetals [online]. *Stellite 6*. 2008. [vid. 20. 7.2020]. Dostupné z: [http://specialmetals.ir/images/technical\\_info/cobalt\\_base/Stellite\\_6.pdf](http://specialmetals.ir/images/technical_info/cobalt_base/Stellite_6.pdf).
- [87] Kskct [online]. *Celsit V-P. Metallpulver. Katalog*. ©2017. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: [https://www.dewmetallpulver.de/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Deutsch/09.\\_Celsit-V-P\\_CZ\\_Rev\\_1.pdf](https://www.dewmetallpulver.de/fileadmin/files/metallpulver.de/documents/Publikationen/Deutsch/09._Celsit-V-P_CZ_Rev_1.pdf).
- [88] RIVERA, O.G., ALLISON, P.G., JORDON, J.B., RODRIGUEZ, O.L. BREWER, L.N. MCCLELLAND, Z., WHITTINGTON, W.R., FRANCIS, D., SU, J., MARTENS, R.L. and N. HARDWICK. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 625 fabricated by solid-state additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, 694. pp.1-9. [vid. 20. 7. 2020]. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.msea.2017.03.105.
- [89] Specialmetals [online]. *STELLITE 6 alloy*. 2013. [vid. 20. 7.2020]. Dostupné z: [http://specialmetals.ir/images/technical\\_info/cobalt\\_base/Stellite\\_6.pdf](http://specialmetals.ir/images/technical_info/cobalt_base/Stellite_6.pdf).
- [90] GEORGIOPOULOS, I., VOURDAS, N., MIRZA, S., ANDREOULI, C. and V. STATHOPOULOS. LaAlO<sub>3</sub> as overlayer in conventional thermal barrier coatings. *Procedia Structural Integrity*. 2018, 10. pp. 280–287. [vid. 24. 7. 2020]. Dostupné z: DOI: [doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.039](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.039).
- [91] SHAKILA, M., AHMAD, M., TARIQ, N.H., HASAN, B.A., AKHTER, J.I., AHMED, E., MEHMOOD, M., CHOUDHRY, M.A. and M. IQBAL. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L. *Vacuum*. 2014, 110. pp. 121-126. [vid. 22. 7. 2020]. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.08.016.



# Přílohy

Příloha č. 1 – Naměřené hodnoty – zkouška mikrotvrdomosti – 1 část experimentu

(Podmínky měření: Norma = ČSN EN ISO 6507-1, Zatížení = 1 kg, Doba zatížení = 11 s)

Vdálčnost od rozhraní [mm]	VZOREK 1 - plocha, Ni-Ni						VZOREK 2 - lamela, Ni-Ni			VZOREK 3 - lamela, Ni-Co		
	Měření [HV1]						Měření [HV1]			Měření [HV1]		
	1	2	3	4	5	Prům. hodnota	1	2	Prům. hodnota	1	2	Prům. hodnota
-2	315,6	312,7	310,5	309,7	313,6	312,42	290,1	285,5	287,8	426,1	431,5	428,8
-1	312,8	311,5	309,5	312,8	312,4	311,8	284,8	270,6	277,7	415,2	409,3	412,25
0	226,9	222	217,4	221,5	219,8	221,52	230,7	234,6	232,65	294	295,6	294,8
1	222,5	216,3	221,3	222,7	218,1	220,18	241,4	235,7	238,55	321,1	320,2	320,65
2	222,5	219,1	218,9	215,1	214,9	218,1	249,3	235,7	242,5	471,3	470,1	470,7
3	219	219,1	218,9	215,1	214,9	217,4	260	230	245	470,2	467,3	468,25
4	220	201,6	203,8	216,1	209,6	210,22	245	243	244	490	476,2	483,1
5	206,8	206,7	204,4	204,6	211,2	206,74	237	249	243	478	477,2	477,6
6	205,7	196,3	197,7	202,5	201,8	200,8	227	246	236,5	495,2	496,4	495,8
7	198,3	202,1	204,4	202,9	205,3	202,6	215,8	245	230,4	486	487,3	486,65
8	190,4	200,6	209,4	208,5	211,4	204,06	216	246	231	474,2	477,7	475,95
	<b>Průměrná hodnota tvrdosti [HV1]</b>											
Nimonic 901	338											
Inconel 625	224											
Stellite 6	457											