

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav materiálového inženýrství**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Master's thesis**

**OPTIMALIZACE ŽÁROVÉHO NÁSTŘIKU  
ELEKTRICKÝM OBLOUKEM**

**Electric arc wire spray optimization**

**Autor práce:**

**Bc. Petr Nepovím**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.**

**Rok:**

**2018**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nepovím** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **464973**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optimalizace žárového nástřiku elektrickým obloukem**

Název diplomové práce anglicky:

**Electric arc wire spray optimization**

Pokyny pro vypracování:

Cíl: Optimalizovat proces žárového nástřiku nahrazením používaného drátu typu NiCrAl drátem FeCrAl při zachování požadovaných vlastností vytvářeného povlaku za současného poklesu ceny procesu.

Postup:

1. Literární rešerše
2. Seznámení se s experimentálními materiály a příprava vzorků
3. Měření a vyhodnocení požadovaných vlastností
4. Diskuse a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] SOARES, Claire. Gas turbines: a handbook of air, land, and sea applications. Boston: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0-7506-7969-5.
- [2] PAWŁOWSKI, Lech. The science and engineering of thermal spray coatings. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
- [3] BREEZE, Paul A. Power generation technologies. Burlington: Newnes, 2005. ISBN 978-0-7506-6313-7.
- [4] AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00347-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

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

**Ing. Tomáš Novotný, Solar Turbines EAME s.r.o.**

Datum zadání diplomové práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



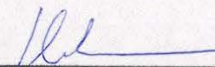
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## 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.

17.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace žárového nástřiku elektrickým obloukem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu zdrojů.

V Praze dne 25. 4. 2018

.....

Petr Nepovím

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucí mé diplomové práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za její cenné rady, připomínky a neustálou podporu. Děkuji také prof. Ing. Dr. Pavlu Chráskovi, DrSc., Ing. Katěrině Klimčákové, Ing. Tomáši Novotnému, Brentu Cottomovi a Ing. Tomáši Tesařovi za všechny cenné rady a zkušenosti, které mi během psaní této práce dokázali předat.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá optimalizací žárového nástřiku elektrickým obloukem při generální opravě komponent průmyslových plynových turbín ve společnosti Solar Turbines EAME s.r.o.. Optimalizace spočívá v nahrazení používaného drátu typu NiCrAl za drát FeCrAl, při zachování požadovaných vlastností za současného poklesu ceny procesu. Pro analýzu testovaných materiálů jsou využity techniky elektronové a světelné mikroskopie a mechanické zkoušky. Výsledky práce jsou konzultovány s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines v San Diegu a Ústavem fyziky plazmatu AV ČR. Vzhledem ke splnění stanovených požadavků na experimentální materiál bude přistoupeno k jeho aplikaci na specifické komponenty průmyslových plynových turbín.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Žárový nástřik, plynové turbíny, žárový nástřik elektrickým obloukem, Solar Turbines, FeCrAl, NiCrAl

## **ABSTRACT**

The work deals with electric arc wire spray optimization during the overhaul process of industrial gas turbine components at Solar Turbines EAME s.r.o.. The optimization lies in replacing currently used NiCrAl wire with FeCrAl wire while maintaining the desired properties and lowering the process price. Electron and light microscopy and mechanical tests are used to analyse the tested materials. The results of the work are consulted with the Solar Turbines research institute in San Diego and the Institute of Plasma Physics of the CAS. Having met all the requirements, the experimental material will be applied to specific components of industrial gas turbines.

## **KEYWORDS**

Thermal spray, gas turbines, electric arc wire spray, Solar Turbines, FeCrAl, NiCrAl

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	13
1 ÚVOD .....	15
2 TEORETICKÁ ČÁST .....	17
2.1 Představení firmy Solar Turbines Incorporated.....	17
2.2 Průmyslové plynové turbíny.....	18
2.2.1 Pracovní cyklus plynové turbíny .....	19
2.2.2 Vstupní ústrojí.....	20
2.3 Kompresorová část .....	21
2.3.1 Spalovací komora.....	22
2.3.2 Turbínová část.....	23
2.3.3 Výstupní ústrojí.....	25
2.3.4 Možnosti pro zvýšení termické účinnosti .....	25
2.4 Žárové nástřiky .....	28
2.4.1 Metody žárového nástřiku.....	29
2.4.2 Struktura kovového povlaku .....	29
2.4.3 Vlastnosti povlaku .....	30
2.4.4 Přídavné materiály .....	31
2.4.5 Technologický postup vytváření povlaku.....	33
2.4.6 Použití žárových nástřiků v praxi .....	34
2.4.7 Žárový nástřik elektrickým obloukem.....	34
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
3.1 Aplikační zařízení.....	37
3.2 Experimentální materiál.....	39
3.2.1 Přídavný materiál typu NiCrAl.....	40
3.2.2 Přídavný materiál typu FeCrAl.....	40
3.3 Příprava zkušebních vzorků.....	41
3.4 METODY KONTROLY .....	45
3.4.1 Vizuální kontrola .....	45
3.4.2 Metalografický rozbor a měření tloušťky povlaku .....	45
3.4.3 Rozbor chemického složení .....	48
3.4.4 Měření tvrdosti.....	49
3.4.5 Zkouška přilnavosti nástřiku.....	50

3.5	Výsledky experimentů .....	52
3.5.1	NiCrAl – Nerez .....	52
3.5.2	NiCrAl – Litina .....	56
3.5.3	FeCrAl – Nerez .....	61
3.5.4	FeCrAl – Litina .....	65
3.6	Ekonomické zhodnocení .....	70
4	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	71
5	ZÁVĚR.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	81

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>Symbol</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
p	tlak	[Pa]
v	měrný objem	[m <sup>3</sup> /kg]
hm. %	hmotnostní procenta	
X	množství nenatavených částic	[%]
P <sub>1</sub>	počet uzlů zasahujících do nenatavené částice	
P <sub>2</sub>	počet uzlů dotýkajících se nenatavené částice	
EDS	energie disperzní spektrometrie	
RTG záření	rentgenové záření	
HVOF	vysokorychlostní nástřik plamenem	
TBC	povlaky tepelných bariér	



# 1 ÚVOD

V teoretické části této práce je cílem vytvořit ucelený přehled o technologii žárového nástřiku a jejím využití při generální opravě dílů plynových turbín. Experimentální část práce je zaměřena na optimalizaci žárového nástřiku elektrickým obloukem. Optimalizace spočívá v nahrazení používaného drátu typu NiCrAl drátem FeCrAl při zachování požadovaných vlastností vytvářeného povlaku za současného poklesu ceny procesu.

Všeobecně je známo, že plynová turbína je mechanický stroj s vnitřním systémem spalování, který přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivu na mechanickou práci v podobě rotačního pohybu. Termín plynová turbína je odvozen od slova plyn, který představuje vzduch okolního prostředí. Ten vstupuje do motoru, v tomto případě do turbíny, a slouží jako pracovní látka při přeměně chemické energie na mechanickou práci. První spalovací turbínu si nechal patentovat v roce 1791 John Barber z Anglie. Ve druhé polovině 19. století byly patentovány modernější verze plynových turbín, ale všechny tyto turbíny nebyly reálně použitelné, jelikož výkon potřebný k pohonu kompresoru převyšoval výkon generovaný turbínou. Největší rozvoj nastal v období 2. světové války, kdy se světové velmoci snažily vynalézt nové letecké pohony. Poznatky z vojenských aplikací se později dostaly i do komerční sféry a došlo ke vzniku prvních průmyslových turbín. Plynové turbíny menších výkonů nacházejí využití převážně jako lodní a letecké motory, jelikož svými výkony převyšují pístové motory. Turbíny s velkými výkony se používají zejména v energetickém průmyslu pro pohon generátorů při výrobě elektrické energie, ale slouží také k pohánění kompresorů a čerpacích systémů při těžbě zemního plynu a ropy. [1], [2]

Požadavky na zvýšení účinnosti, snížení emisí a zvýšení životnosti plynových turbín při současném snížení provozních nákladů stále vytvářejí nové výzvy pro jejich výrobce. Výkon průmyslových plynových turbín je silně závislý na prostředí, ve kterém pracují. V posledních letech došlo k významným pokrokům ve vývoji nových materiálů, které dokáží odolávat i těm nejnáročnějším provozním podmínkám. V určitých prostředích je však zapotřebí dodatečná povrchová úprava pro dosažení požadovaných vlastností. Proto se ve značné míře používají ochranné povlaky. Povlaky chrání kovové povrchy turbíny proti působení oxidačního a korozního prostředí, kterému jsou vystaveny. [3]

Žárový nástřik definoval R. F. Bunshah v roce 1982 jako proces nanášení částic, při kterém jsou úplně nebo částečně roztavené či pevné částice nanášeny na podklad. Výsledná struktura povlaků vychází z tuhnutí a spékání částic. Povlak dodává součásti vynikající povrchové vlastnosti, jako je korozivzdornost, tepelná odolnost nebo odolnost proti opotřebení. K prvním aplikacím žárových nástřiků docházelo na počátku 20. století. V té době se tento proces využíval k vytvoření zinkové protikorozní vrstvy pro ochranu povrchů. V 50. a 60. letech byl zdokonalen hořák pro aplikaci plazmového nástřiku, čímž se otevřela možnost pro komerční použití vysokoteplotních materiálů. Kromě nástřiku plamenem a plazmatického nástřiku se v dnešní době ve velké míře používají metody, které jsou charakteristické vysokou rychlostí nanášených částic překračující hodnotu 1000 m/s. Žárové nástřiky díky svým výborným vlastnostem nacházejí využití zejména v leteckém a energetickém průmyslu, mimo jiné na díly proudových motorů, plynových turbín, kompresorů nebo čerpadel. V této práci bude zaměřena pozornost zejména na žárový nástřik elektrickým obloukem. [4], [5]

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Představení firmy Solar Turbines Incorporated

Společnost Solar Turbines Incorporated se sídlem v San Diegu ve Spojených státech je dceřinou společností společnosti Caterpillar Inc. a je jedním z předních světových výrobců průmyslových plynových turbín. Více než 70 % produktů firmy je z USA vyváženo a tyto produkty jsou následně prodávány a opravovány ve 43 různých lokalitách po celém světě. Solar má v 98 zemích více než 14 500 jednotek a realizuje v nich více než 1,7 miliardy provozních hodin. [6]

Solar Turbines vyrábí středně velké průmyslové plynové turbíny určené pro použití při výrobě elektrické energie, stlačování plynů a u čerpacích systémů. Celkem vyrábí 6 řad plynových turbín, kam patří Saturn®, Centaur®, Mercury™, Taurus™, Mars® a Titan™ o výkonech 1200 až 22500 kW. Mezi další produkty firmy patří 10 modelů Solar® odstředivých kompresorů, které jsou dodávány samostatně nebo v setu spolu s turbínou. Solar turbíny jsou dále dodávány zákazníkům jako zdroje mechanických pohonů nebo jako sady generátorů s výkony v rozmezí 1,1 až 22 MW. Na obrázku 2.1 jsou uvedeny průměrné rozměry a váhy setů jednotlivých motorů s generátory. [7]

Motor	Délka m (ft-in)	Šířka m (ft-in)	Výška m (ft-in)	Suchá hmotnost kg (lb)
Titan 250	18.2 (59' 6")	3.4 (11' 1")	3.9 (12' 9")	141 150 (311,100)
Titan 130	14.2 (46' 6")	3.2 (10' 11")	3.2 (10' 7")	94 395 (208,100)
Mars 100	14.2 (46' 6")	2.8 (9' 2")	3.8 (12' 6")	82 145 (181,000)
Taurus 70	11.1 (36' 3")	2.9 (9' 2")	3.7 (12' 1")	61 775 (136,215)
Taurus 65	9.8 (32' 2")	2.6 (8' 6")	3.3 (10' 9")	39 600 (87,300)
Taurus 60	9.8 (32' 2")	2.6 (8' 6")	3.2 (10' 5")	37 920 (83,600)
Mercury 50	11.2 (36' 6")	3.2 (10' 5")	3.7 (12' 3")	45 660 (100,700)
Centaur 50	9.8 (32' 2")	2.6 (8' 6")	3.2 (10' 5")	37 785 (83,300)
Centaur 40	9.8 (32' 2")	2.6 (8' 6")	3.2 (10' 5")	30 460 (67,150)
Saturn 20	6.7 (22' 0")	2.4 (8' 0")	2.7 (8' 11")	10 205 (22,500)



**Obrázek 2.1:** Průměrné rozměry a hmotnosti balení jednotlivých setů motorů (turbína + generátor)

Plynové turbíny Solaru mohou být poháněny širokou škálou paliv, včetně zemního plynu (i ve zkapalněné formě), destilátů, metanu, vodíku a paliv z obnovitelných zdrojů, což jsou například skládkové nebo odpadní plyny. [7]

V České republice je společnost Solar Turbines zastoupena značkou Solar Turbines EAME s.r.o. Zkratka EAME pod sebou zahrnuje spojení Europe, Africa and Middle East. Celkem se v České republice nacházejí 3 pobočky, které poskytují podporu převážně zákazníkům z Evropy, Afriky a Blízkého východu. Veškerou výrobní činnost a obchodní aktivity koordinuje centrální kancelář v Praze. Největším výrobním závodem Solaru v Čechách je opravárenské centrum v Žatci (obrázek 2.2). To je součástí celosvětové sítě a spolu s dalšími závody v USA patří mezi světovou špičku v oblasti oprav komponent plynových turbín a kompresorů. Zde se provádí generální opravy plynových turbín, kdy komponenty rozebrané turbíny projdou podrobnou inspekcí, čištěním a renovací. Tyto komponenty jsou následně použity k opětovnému sestavení turbíny. Závod v Žatci je vybaven mnoha moderními technologiemi, mezi které patří žárový nástřík, niklování nebo elektronová mikroskopie. V roce 2017 bylo vybudováno testovací centrum v Žebráku. V tomto závodě dochází ke kompletaci a testování turbín, které jsou dopravovány ze Žatce a jiných opravárenských center ze zahraničí. Odtud putuje turbína ke konečnému zákazníkovi. [6]

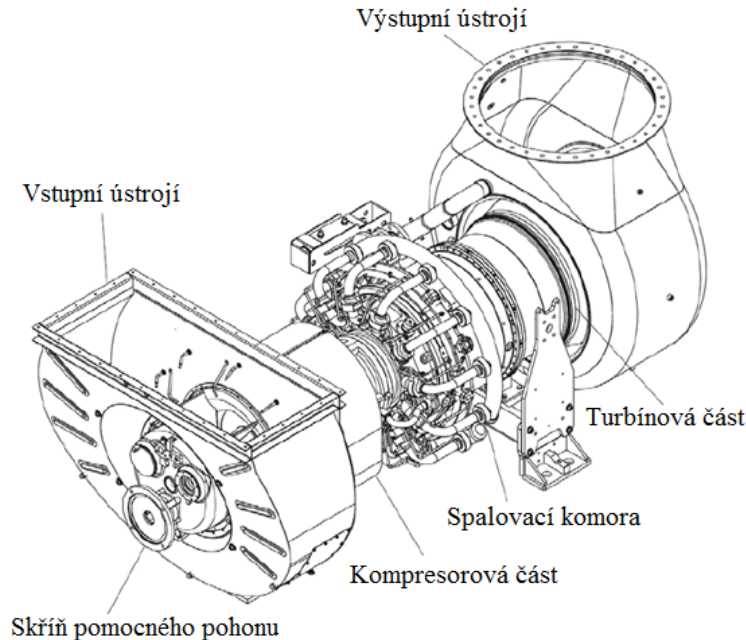


**Obrázek 2.2:** Opravárenské centrum v Žatci

## 2.2 Průmyslové plynové turbíny

Plynovou turbínu lze rozdělit na pět základních částí, a to jmenovitě na vstupní ústrojí, kompresorovou část, spalovací komoru, turbínovou část a výstupní ústrojí. Vstupní ústrojí zajišťuje vstup vzduchu do kompresorové části, kde je v jednotlivých stupních kompresoru vzduch stlačován. Kompresor zároveň předává vzduchu mechanickou energii rotačního pohybu. Stlačený vzduch následně vstupuje do spalovací komory, kde dochází ke vzniku hořlavé směsi paliva a stlačeného vzduchu, která hoří kontinuálně. Vzhledem ke spalování paliva ve spalovací komoře dochází k uvolnění obrovské tepelné energie, což má za následek expanzi plynu. Horký expandující plyn vstupuje do turbínové části vysokou rychlostí a pomocí aerodynamicky tvarovaných lopatek dochází k přeměně

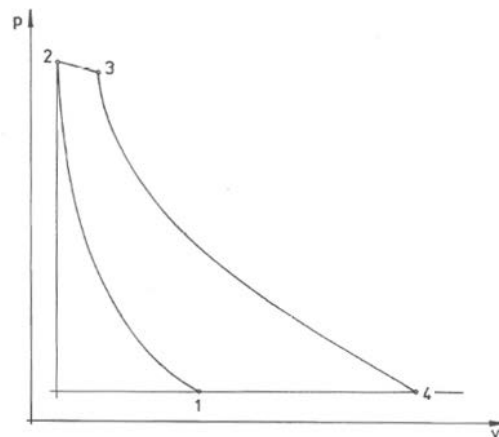
této mechanické a tepelné energie na mechanickou práci<sup>1</sup>. Vystupující horké spaliny jsou z turbíny odváděny výstupním ústrojím. Zbytková tepelná energie vystupujících plynů může být dále využívána v různých průmyslových procesech. Téměř  $\frac{3}{4}$  výkonu generovaného turbínou jsou použity pro pohon vlastního kompresoru a zbývající  $\frac{1}{4}$  zajišťuje pohon generátoru nebo jiného připojeného zařízení. Na obrázku 2.3 je znázorněna turbína Taurus 70 od společnosti Solar Turbines s popisem jednotlivých částí.



**Obrázek 2.3:** Turbína Taurus 70 s dvouhřídelovým uspořádáním [8]

### 2.2.1 Pracovní cyklus plynové turbíny

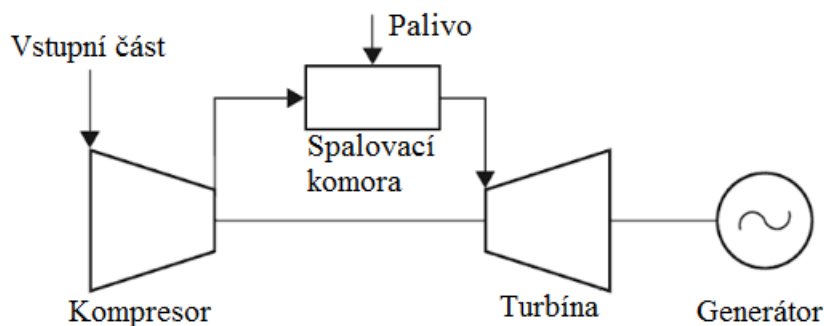
Pro popis oběhu plynových turbín je nejčastěji používán Braytonův otevřený cyklus. Pro popis funkce turbínového motoru se zakreslují jednotlivé stavy plynu do pracovních diagramů. Změna stavu plynu v jednotlivých částech motoru je znázorněna na obrázku 2.4 Braytonovým oběhem v p-v diagramu.



**Obrázek 2.4:** p-v diagram turbínového motoru [9]

<sup>1</sup> v podobě rotačního pohybu

Vzduch je ve stavu 1 nasáván z okolního prostředí do kompresorové části. Práce předaná vzduchu kompresorem se projeví jako nárůst tlaku a teploty na stav 2. Teplota po kompresi bývá obvykle v rozmezí 400 až 450 °C. Další energii vzduchu předá palivo ve spalovací komoře. Tlak mírně vlivem ztrát poklesne, ale teplota se mohutně zvýší na stav 3, ve kterém dosahuje hodnot okolo 1400 °C. Vzniklé spaliny vstupují vysokou rychlostí do turbínové části, kde dochází k přeměně mechanické a tepelné energie na mechanickou práci. To se projeví poklesem tlaku i teploty na stav 4. Po ukončení expanze dochází k vyfukování spalin do okolního prostředí. Při výfuku do ovzduší mají spaliny teplotu přibližně 500-600 °C. Na obrázku 2.5 je znázorněno schéma plynové turbíny s otevřeným oběhem. [9], [10]



**Obrázek 2.5:** Schéma plynové turbíny s otevřeným oběhem [10]

### 2.2.2 Vstupní ústrojí

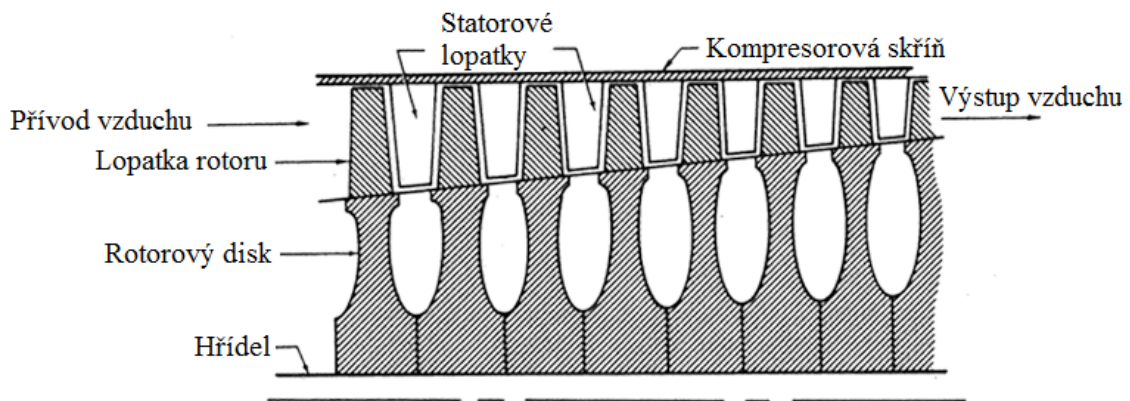
Spalovací proces plynové turbíny vyžaduje stabilní a kontinuální proudění čistého vzduchu. Vstupní část turbíny musí být navržena tak, aby podporovala optimální přívod vzduchu. Povrch vstupního ústrojí musí být hladký, a proto se při jeho návrhu volí co nejjednodušší obrysy. Na životnost plynových turbín má obrovský vliv volba vhodného filtračního systému. Ten chrání vnitřní části turbíny proti vnikání nečistot, které mohou být zachyceny na lopatkách kompresoru nebo jsou unášeny proudem vzduchu dále do motoru, kde mohou způsobit korozivní i erozivní poškození dílů turbíny. Také může docházet k dočasnému připékání nečistot na povrchu kompresorových lopatek, což vede ke značným ztrátám výstupního výkonu. Filtrační systém však musí kromě ochrany proti nečistotám zároveň způsobovat co nejmenší pokles tlaku vzduchu vstupujícího do kompresoru. Tyto dvě podmínky postupně vedly k návrhu filtračního systému, který umožňuje prostup určitého množství malých částic. Ty v průběhu provozu zůstávají v kompresorové části a je tedy potřeba je odstranit. Z toho důvodu je velká část turbín vybavena čistícími systémy. Čištění se provádí kapalinou, která je do kompresorové části vstřikovává tryskami, a probíhá většinou při odstavení turbíny. Existují však i systémy čištění, které mohou pracovat za plného provozu. [8], [10], [11]

Výběr vstupního ústrojí plynových turbín se provádí s ohledem na místo, kde bude turbína instalována a také s ohledem na její použití. Volba filtračního systému, jeho konstrukčního provedení a správné velikosti filtru je velmi závislá na prostředí, ve kterém bude turbína pracovat. [11]

## 2.3 Kompresorová část

V kompresorové části plynové turbíny dochází k nárůstu tlaku a teploty vstupujícího vzduchu. Kompresor je spolu s turbínou na jedné hřídeli a je turbínou poháněn. U průmyslových turbín byly ze začátku používány velice často radiální kompresory, jelikož byly teoreticky propracovanější než kompresory axiální a dosahovaly tak vyšších účinností. Se vzrůstajícím výkonem motoru však roste hlnost<sup>2</sup> kompresoru, což má za následek zvětšování jeho průměru. U motoru s radiálním kompresorem dochází k neúměrnému nárůstu čelní plochy a tím také k nárůstu čelního odporu. Tato skutečnost vedla k intenzivnímu vývoji axiálních kompresorů. Motory s radiálními kompresory jsou v dnešní době využívány pouze ojediněle a to v malých průmyslových jednotkách a v leteckých pohonných jednotkách. [2], [9], [10]

Axiální kompresor (na obrázku 2.6) je vícestupňový kompresor tvořený statorem a rotorem. Každý stupeň se skládá z jedné řady rotorových lopatek, které jsou usazeny na disku nebo na bubnu kuželového tvaru a z jedné řady nepohyblivých statorových lopatek zasazených do tělesa kompresoru. Před první stupeň stroje bývá vložen vstupní sator, který zajišťuje správný směr relativní rychlosti vstupujícího plynu vůči rotorovým lopatkám a zabraňuje tak vzniku rázů. [10], [12]

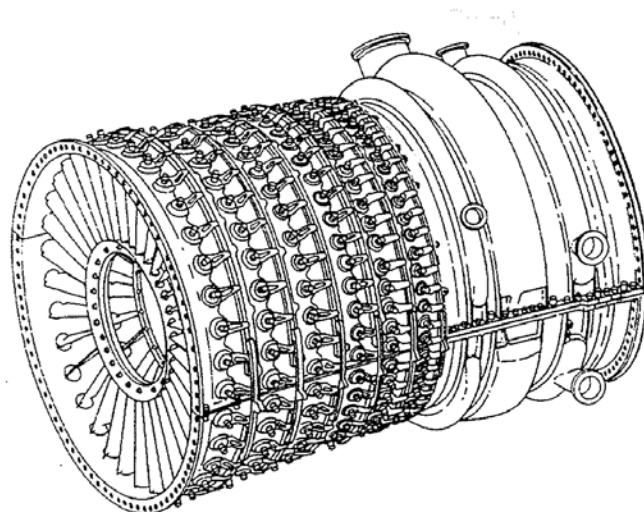


**Obrázek 2.6:** Řez axiálním kompresorem [13]

Rotorové lopatky axiálního kompresoru předávají energii proudícímu plynu. Energie předávaná rotorovými lopatkami se mění na kinetickou a potenciální energii. Úloha statorových lopatek spočívá v usměrnění proudu do rotorových lopatek následujícího stupně. Kompresorová skříň se statorovými lopatkami je znázorněna na obrázku 2.7. Lopatkování stroje může být přetlakové nebo rovnotlaké. U přetlakového lopatkování dochází k nárůstu tlaku v rotorových i statorových lopatkách, zatímco u rovnotlakého lopatkování statorové lopatky pouze usměřňují proudící plyn do dalšího stupně. Axiální kompresory nacházejí využití zejména u turbín velkých výkonů. [9], [12]

---

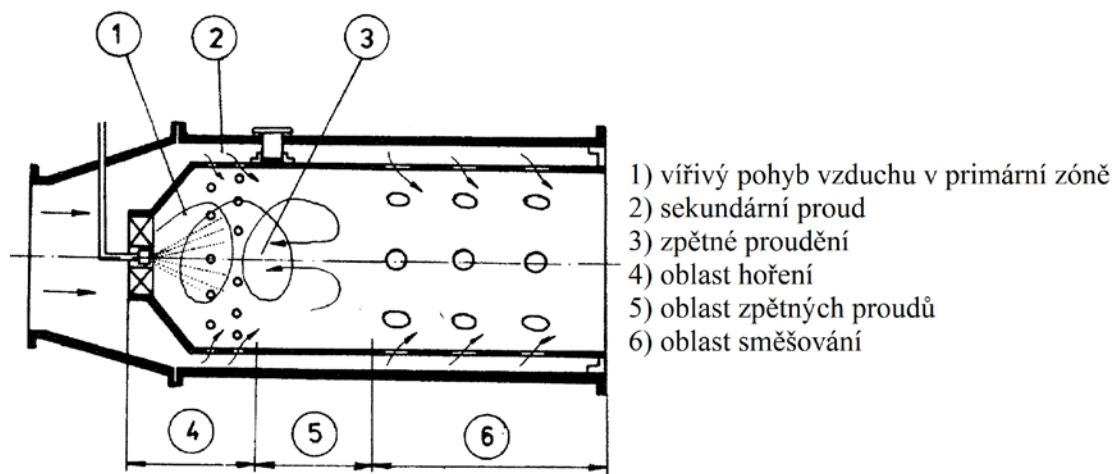
<sup>2</sup> množství vzduchu, které projde kompresorem za 1 sekundu



**Obrázek 2.7:** Olopatkovaná podélně dělená kompresorová skříň [9]

### 2.3.1 Spalovací komora

Ve spalovací komoře dochází k přeměně chemické energie obsažené v palivu na tepelnou energii, což má za následek expanzi plynu. Spalovací komory se skládají z vnějšího pláště a vlastního plamence. Princip jejich funkce je znázorněn na obrázku 2.8. [9]



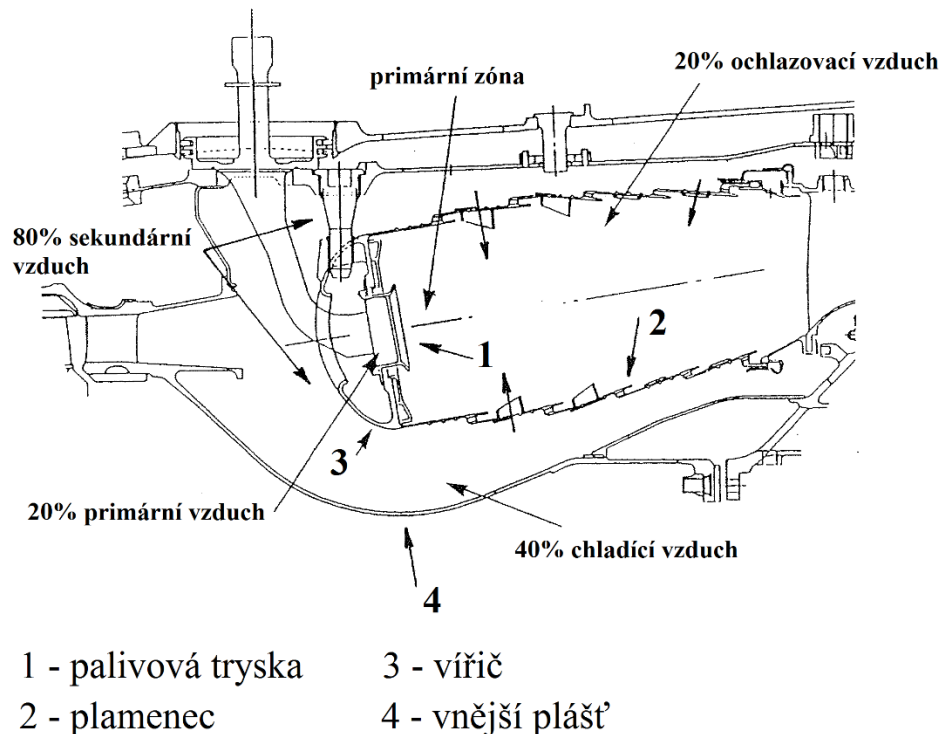
**Obrázek 2.8:** Princip funkce spalovací komory [9]

Stlačený vzduch vystupující z kompresoru je před vstupem do spalovací komory zpomalen v difuzoru, kde zároveň dochází k nárůstu tlaku. Následně se vzduch rozděluje do dvou proudů. Primární proud vzduchu<sup>3</sup> vstupuje do spalovací komory a účastní se vlastního hoření. Primární vzduch musí být při vstupu do plamence řádně rozvířen a pro správnou funkci spalovací komory je důležité vytvořit v oblasti hoření zpětné proudění. Větší část vzduchu, neboli sekundární proud, obtéká kolem vnějšího pláště spalovací komory a plamence, čímž dochází k intenzivnímu chlazení spalovací komory. Také dochází k promíchání sekundárního a primárního proudu vzduchu, což má

<sup>3</sup> přibližně 20% z celkového množství

za následek ochlazení spalin vstupujících do turbíny. Spalovací komora je jednou z nejvíce tepelně namáhaných součástí plynové turbíny. Spaliny uvnitř komory dosahují teplot až 1400 °C a při takto vysokých teplotách by mohlo dojít k natavení lopatek v turbínové sekci. Proto je velmi důležité chlazení spalovací komory proudem stlačeného vzduchu, což vede ke snížení teploty spalin na přijatelnou hodnotu. Schéma spalovací komory je znázorněno na obrázku 2.9. [2], [9], [13]

Palivo lze do spalovací komory dopravit několika způsoby a to zejména vstříkáváním pomocí trysek, použitím rozstřikovacího kroužku nebo odpařováním paliva ve speciálně upravených spalovacích komorách. [9]

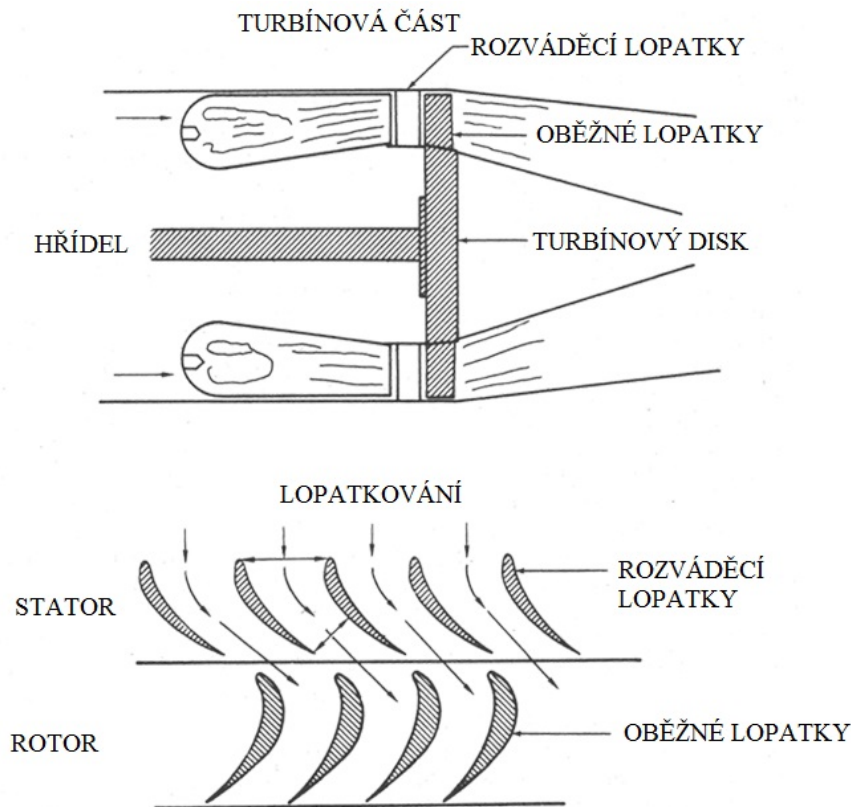


**Obrázek 2.9:** Schéma spalovací komory [9]

### 2.3.2 Turbínová část

Turbína je nejdůležitější částí celého motoru a slouží k pohonu kompresoru a připojených zařízení. Jedná se o tepelný stroj, který se skládá z rozváděcího kola, neboli statoru, ve kterém se tepelná energie mění na kinetickou a oběžného kola (rotoru), kde se kinetická energie plynů mění na mechanickou práci. Plynové turbíny mívají obvykle 1 až 8 stupňů. Stupeň turbíny se skládá z lopatkové mříže rozváděcího kola a oběžného kola. Součástí rotoru turbíny je hřídel, disk a oběžné lopatky zavěšené na obvodě disku. Stator turbíny je tvořen rozváděcími lopatkami a skříní motoru. Turbínová část a lopatkování turbíny jsou schematicky znázorněny na obrázku 2.10. [9], [10]

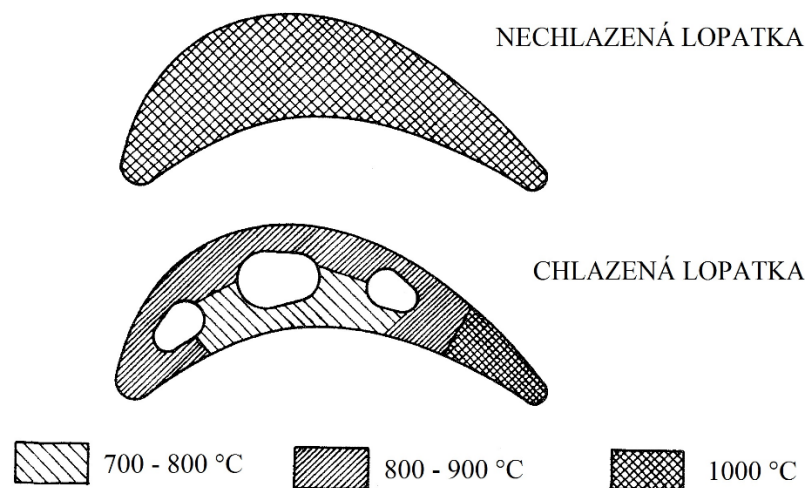




**Obrázek 2.10:** Turbínová část a lopotkování turbíny [13]

Podle směru průtoku plynu turbínou se plynové turbíny dělí na axiální a radiální. Také se rozdělují podle místa expanze plynů na akční, u kterých nastává expanze pouze ve statoru, a na reakční, kde nastává expanze ve statoru i rotoru. Radiální turbíny se používají především u malých plynových turbín a u mikroturbín, které díky svým dobrým vlastnostem postupně nahrazují pístové spalovací motory. U průmyslových turbín velkých výkonů se používají výhradně axiální reakční turbíny. [9], [10]

Z konstrukčního hlediska jsou nejcitlivější součásti celého motoru oběžné lopatky. Lopatka se skládá z pracovní části a zámku, pomocí kterého je zavěšena v disku. Pracovní část lopatky musí splňovat kromě termodynamických a aerodynamických hledisek také zvýšené nároky na pevnost a odolnost proti vibracím. Lopatky se vyrábějí ze žárupevných slitin několika způsoby. Patří sem metoda přesného lití bez dodatečného obrábění, elektrochemické opracování nebo přesné kování s následným obráběním. Strukturu materiálu lze vhodně ovlivnit ochlazováním tak, že růst krystalů probíhá rychleji v radiálním směru, čímž se podstatně zvyšuje pevnost lopatky v tahu za vyšších teplot. Volbou vhodných ochlazovacích podmínek lze také docílit toho, že vznikne lopatka monokrystalická (tvořena jediným krystalem speciální slitiny). Oběžné lopatky jsou vystaveny extrémním teplotám, a proto je důležité jejich dostatečné chlazení. K němu se používá stlačený vzduch, který je odebírán z kompresorové části. Ten je přiváděn do otvorů uvnitř lopatek, čímž dochází k jejich intenzivnímu chlazení. Na obrázku 2.11 je znázorněno teplotní pole chlazené a nechlazené lopatky. [9], [10]



**Obrázek 2.11:** Teplotní pole chlazené a nechlazené lopatky [9]

V průmyslovém prostředí se používají plynové turbíny s jednohřídelovým nebo dvouhřídelovým uspořádáním. U jednohřídelového uspořádání slouží výkon turbíny k pohonu kompresoru a připojeného zařízení. Dvouhřídelové uspořádání využívá tzv. koncepci volné turbíny, která neslouží k pohonu kompresoru, ale pouze dodává požadovaný výstupní výkon.

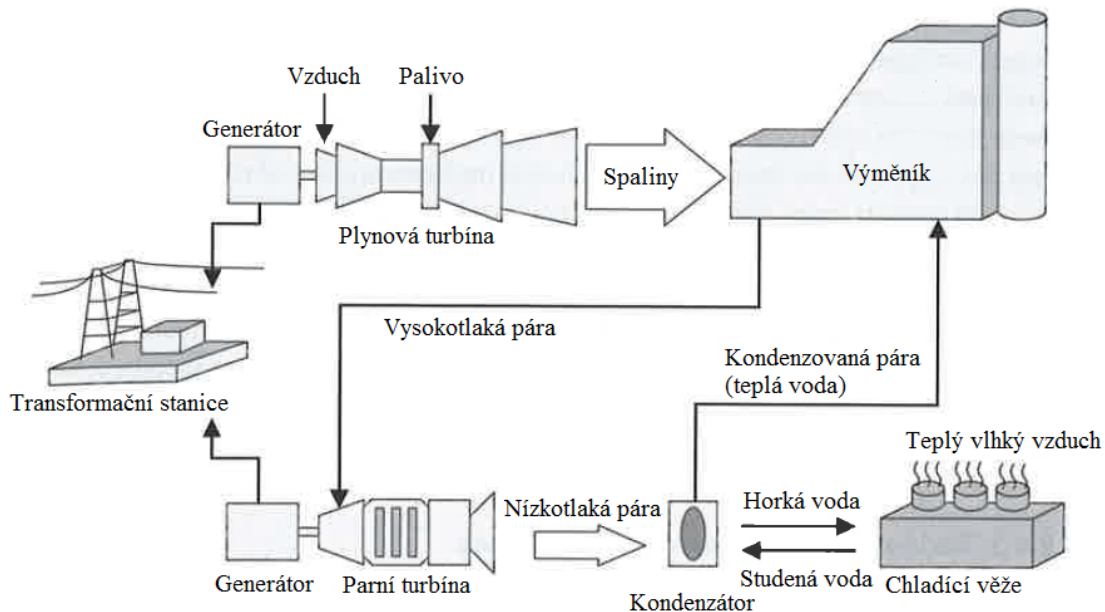
### 2.3.3 Výstupní ústrojí

Výstupním ústrojím proudí z turbíny do ovzduší spaliny, přebytečný vzduch, zbytky nespáleného paliva a vzniklé teplo. Obvykle se výstupní systém u průmyslových turbín skládá z tlumiče zvuku a potrubí, které zajišťuje snadný a plynulý odvod spalin. Část odvádějícího potrubí má zvlněný tvar, čímž dochází k potlačení vlivu tepelné roztažnosti součástí výstupního ústrojí. Vyústění výfukového potrubí musí být konstruováno s ohledem na zamezení vstupu unikajících spalin do vstupního ústrojí a olejového chladiče. Veškeré komponenty výstupního ústrojí musejí odolávat vysokým teplotám proudících plynů, a proto se pro jejich výrobu používají zejména vysokoteplotní slitiny niklu a kobaltu. Vzhledem ke značné proměnlivosti teplot na výstupu z turbíny musí být montáž výstupního ústrojí a spojení jednotlivých částí provedeno tak, aby při jejich tepelné dilataci nedocházelo k deformaci či poškození. V případě, že je u procesu potřeba snížit hluk motoru na co nejnižší úroveň, se určité části na výstupu vyrábějí z akustických materiálů. V dnešní době, kdy je po celém světě snaha dosáhnout co nejnižší zátěže na životní prostředí, se v mnoha případech spaliny nevypouští přímo do ovzduší, ale jsou používány jako zdroj tepla pro další aplikace. Využitím tepla obsaženého ve spalinách ke zvýšení termické účinnosti plynových turbín se bude zabývat následující kapitola. [8], [11]

### 2.3.4 Možnosti pro zvýšení termické účinnosti

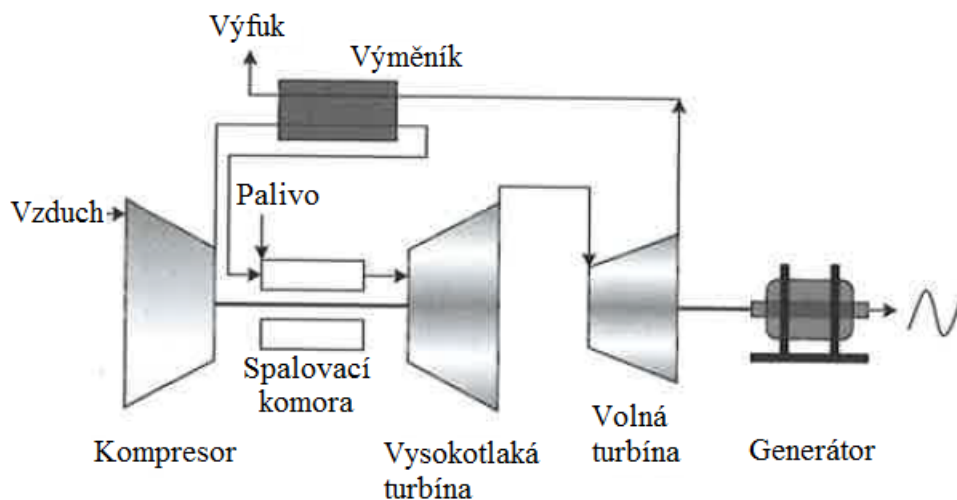
Plynová turbína dosahuje v základním uspořádání termické účinnosti 25 až 40 %. Toto uspořádání představuje vstupní část, kompresor, spalovací komoru, vlastní turbínu a výstupní část. Přidáním dalších komponent do oběhu, případně využitím tepla unikajících spalin, lze termickou účinnost plynových turbín značně zvýšit.

Teplo obsažené ve spalínách se využívá zejména ve výměnících, v nichž dochází k přeměně vody na páru, která dále pohání parní turbínu. Kombinace plynové a parní turbíny zvyšuje termickou účinnost procesu o 15 až 20 %. Při tomto spojení dodává plynová turbína dvě třetiny celkového výkonu a parní turbína zbývající třetinu. Schéma kombinovaného cyklu plynové a parní turbíny je znázorněno na obrázku 2.12. [11], [14]



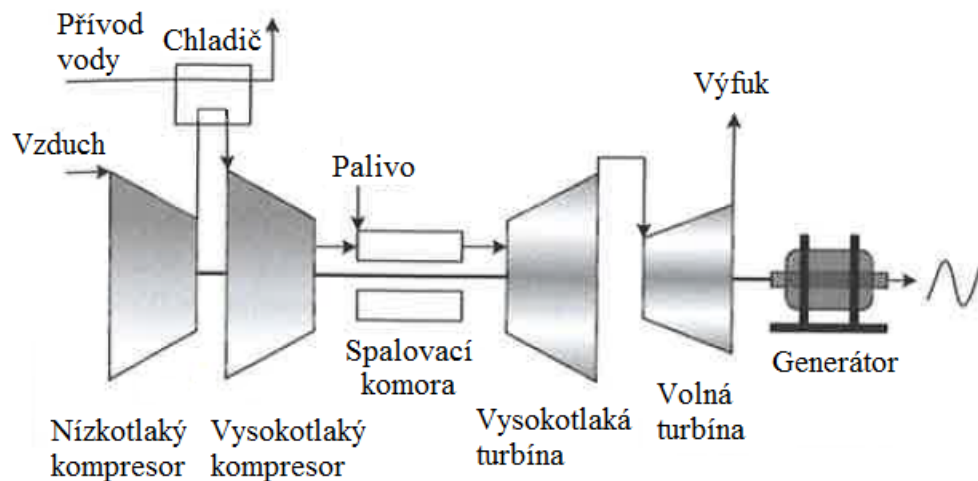
**Obrázek 2.12:** Využití parní a plynové turbíny při výrobě elektrické energie [14]

Dalším způsobem, jak zvýšit termickou účinnost, je zařazení výměníku mezi kompresor a spalovací komoru. Spaliny vycházející z turbíny o teplotě kolem 500 °C ohřívají ve výměníku stlačený vzduch po kompresi, který je následně přiváděn do spalovací komory. Zvýšení teploty vzduchu má za následek snížení množství paliva, potřebného k dosažení požadované teploty na výstupu ze spalovací komory. Schéma turbíny s výměníkem je na obrázku 2.13. [2]



**Obrázek 2.13:** Schéma plynové turbíny s výměníkem [14]

Termickou účinnost plynových turbín lze zároveň zvýšit zařazením dělené komprese<sup>4</sup>. Po prvním stupni komprese je zařazen chladič, který vzduchu odebírá teplo. Dochází tak ke snížení objemu vzduchu, se kterým se pracuje v dalším stupni. S tím souvisí také snížení kompresní práce a zvýšení termické účinnosti. Schéma turbíny s dělenou kompresí je znázorněno na obrázku 2.14. [2]



**Obrázek 2.14:** Schéma plynové turbíny s dělenou kompresí [14]

Životnost součástí plynové turbíny je značně ovlivněna teplotou působící na jejich povrch, typem používaného paliva a počtem provozních cyklů turbíny. Snaha výrobců neustále zvyšovat teplotu spalování klade vysoké nároky na používané materiály. Pro dosažení požadovaných vlastností je v mnoha případech nutné používat ochranné povlaky, jelikož bez nich není možné u materiálů dosáhnout požadované pevnosti a zároveň odolnosti proti korozi v extrémních podmínkách. V následující kapitole bude zaměřena pozornost na žárové nástřiky. [15]

---

<sup>4</sup> nejčastěji dvoustupňová

## 2.4 Žárové nástřiky

Žárové nástřiky v sobě zahrnují skupinu procesů, při kterých se kovové a keramické materiály, cermety a některé druhy polymerů v práškové formě, ve formě drátu nebo suspenzí přivádí do zdroje tepla, kde dojde k jejich ohřátí na teplotu blízkou teplotě tání daného materiálu.<sup>5</sup> Takto částečně či zcela natavené částice jsou následně urychlovány proudem přiváděného plynu a vystřelovány na připravený podkladový materiál. Při dopadu na jeho povrch se částice deformují a dochází k jejich plošnému rozprostření a rychlému ztuhnutí. Tím dojde ke vzniku povlaku s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi. Výsledná tloušťka povlaku je obvykle tvořena několika průchody povlakovacího zařízení. Princip procesu je znázorněn na obrázku 2.15. [4], [16]



**Obrázek 2.15:** Proces žárového nástřiku [17]

První zmínka o žárovém nástřiku pochází ze Švýcarska z roku 1911, kdy M. U. Schoop vynalezl proces nazvaný nástřik plamenem. Mezi další důležité metody žárových nástřiků patří nástřik elektrickým obloukem, detonační nástřik (R.M. Poorman, H.B. Sargent a H. Lamprey), plazmatický nástřik (R.M. Gage, O.H. Nestor a D.M. Yenni) a vysokorychlostní nástřik plamenem (G.H. Smith, J.E. Pelton a R.C. Eschenbach). [16]

Hlavní výhodou žárového nástřiku je možnost použití široké škály přídavných materiálů. Dalším přínosem této metody je schopnost vytvářet povlaky na podklad bez nutnosti jeho výrazného předehřevu. To znamená, že lze provádět žárový nástřik i na tepelně zpracované díly po finálním obrobení, aniž by docházelo ke změně jejich vlastností nebo rozměrů vlivem zvýšené teploty. Naopak nevýhodou žárového nástřiku je rozměrové omezení. Povlaky lze vytvořit pouze na těch místech, kam se podaří dostat nástřikovou pistolí. [16]

Žárový nástřik nachází využití zejména při aplikaci povlaků na strojní zařízení a jejich části. Slouží k opravě opotřebovaných ploch na dílech poškozených při provozu, k opravě rozměrů u špatně obroběných či poničených dílů a ke zvýšení životnosti optimalizací fyzikálních vlastností povrchu součástí vytvářením ochranných bariér. Rozšířené použití žárového nástřiku je dáno značně nižší cenou procesu opravy použitého dílu oproti ceně nového výrobku. [18]

<sup>5</sup> v některých případech dochází k ohřevu nad teplotu tavení, čímž dojde k roztavení materiálu

### 2.4.1 Metody žárového nástřiku

Podle druhu tepelného zdroje použitého k natavení nanášeného materiálu lze rozdělit metody žárového nástřiku do dvou skupin:

- Tepelná energie vzniká hořením směsi paliva a kyslíku – nástřik plamenem, detonační nástřik (D-Gun) a vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF, HVOF)
- Tepelná energie z elektrického zdroje – plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem

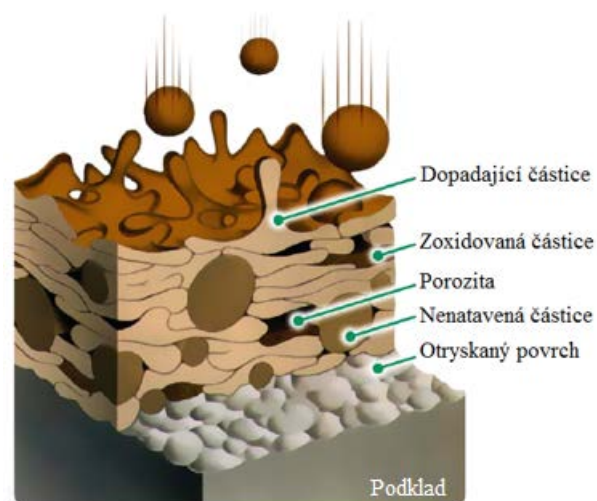
Základní charakteristiky jednotlivých technologií, forma, ve které se materiál pro nástřik používá, teplota dosažitelná použitým zdrojem tepla, charakteristická rychlost částic, typické vlastnosti povlaků, používané materiály a vhodné aplikace jednotlivých technologií jsou uvedeny v tabulce 2.1. [19], [20]

**Tabulka 2.1** Základní charakteristiky technologií žárových nástřiků [17], [19], [21]

Technologie nástřiku	Forma materiálu	Teplota zdroje [°C]	Rychlost částic [m/s]	Typické materiály	Vlastnosti povlaku	Vhodné aplikace
Nástřik plamenem	prášek/ drát	< 3200	50 – 150	kovy, slitiny, plasty	vyšší pórovitost a obsah oxidů	méně náročné aplikace
Detonační nástřik	prášek	< 6000	> 1000	kovy, slitiny, cermety	vysoká tvrdost, nízká pórovitost a obsah oxidů	ochrana proti opotřebení
HVOF	prášek	< 3200	< 600	kovy, slitiny, cermety	velká hustota, výborná adheze, tlakové pnutí	ochrana proti korozi a opotřebením
Plazmatický nástřik	prášek	< 15 000	< 500	keramika, slitiny	porézní v případě keramik	tepelné bariéry, izolátory
Nástřik el. obloukem	drát	< 4000	< 200	kovy, slitiny, cermety	větší tloušťka, vysoká hustota	otěruvzdorné povlaky, renovace

### 2.4.2 Struktura kovového povlaku

Z podstaty vytváření žárového nástřiku vyplývá, že výsledný povlak má lamelární strukturu, která je tvořená jednotlivými deformovatelnými částicemi, nenatavenými nebo jen částečně natavenými částicemi, póry a oxidickými částicemi. Základní stavební jednotkou povlaku je tedy deformovaná částice, neboli splat. V ideálním případě by měl mít splat diskovitý tvar. Vlastnosti výsledného povlaku jsou závislé na vazbách mezi částicemi a podkladem, způsobu formování částic a na vazbách mezi jednotlivými částicemi. Přílnavost mezi povlakem a základním materiálem i vzájemná soudržnost jednotlivých deformovaných částic je dána mechanickým zakotvením částic, meziatomovými vazbami, difuzí a vznikem lokálních svarů. Mezi těmito mechanismy převládá mechanické zakotvení částic na nerovnostech povlakovaného materiálu. Řez povlakem je znázorněn na obrázku 2.16. [4], [19], [20]



**Obrázek 2.16:** Řez povlakem [17]

Po dopadu na podklad dochází k velmi rychlému ochlazení částic, což má za následek vznik jemnozrnné struktury a zabránění segregace rovnovážných fází. Rozložení prvků ve struktuře povlaku je velmi homogenní a odpovídá rozložení v původním materiálu. [19]

S rostoucím obsahem oxidů roste tvrdost povlaku, ale zároveň dochází ke zvyšování křehkosti. Shlukováním oxidů může také docházet ke snížení kohezní pevnosti povlaku. Množství oxidů obsažených ve struktuře kovových povlaků je jedním z faktorů charakterizujících jejich kvalitu. Výsledný obsah oxidů ve struktuře povlaku lze snížit zkrácením doby setrvání částice v plamenu, zabráněním interakce částic s kyslíkem použitím ochranné atmosféry inertních plynů, snížením teploty povrchu nanášeného materiálu, případně použitím vhodnější velikosti částic prášku. [19], [20]

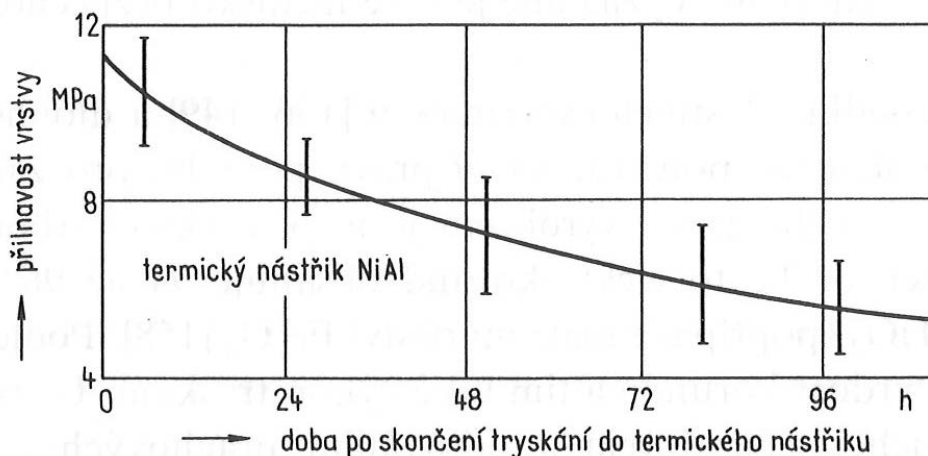
Kromě obsahu oxidů je dalším faktorem kvality povlaku pórovitost. Zvýšený obsah pórů ve struktuře vede ke snížení kohezní pevnosti, praskání, odlupování povlaku a také snížení korozivzdornosti. Přítomnost pórů zároveň zhoršuje kvalitu povrchu povlaku a snižuje jeho tvrdost. Největším zdrojem pórovitosti jsou nenatavené nebo špatně natavené částice. Tuhé nenatavené částice, které ulpí na povrchu, se stávají součástí struktury a v jejich těsném okolí vznikají mezery a póry. Ty již nemohou být zaplněny dopadem dalších částic. Mezi další zdroje pórovitosti patří zejména nástřík pod ostrým úhlem a přítomnost oxidů ve struktuře povlaku. [16], [19]

### 2.4.3 Vlastnosti povlaku

Vlastnosti výsledného povlaku určují jeho chování při různých podmínkách zatěžování. Jsou ovlivněny zejména jednotlivými strukturními komponentami a jejich vlastnostmi a také stavem povrchu podkladu. Mezi nejsledovanější vlastnosti žárových nástříků patří adheze povlaku k základnímu materiálu, kohezní pevnost povlaku, tvrdost, obrobiteľnosť, korozivzdornost a také tepelné a elektrické vlastnosti. Adhezní pevnost je definována jako pevnost spojení mezi povlakem a podkladem, zatímco kohezní pevnost je definována jako pevnost spojení mezi jednotlivými částicemi. [4]

Adheze povlaku k podkladu velmi ovlivňuje spolehlivost povlaku při provozním zatěžování a některé fyzikální vlastnosti. Před samotným nástříkem musí být povrch základního materiálu zdrsňen a zbaven veškerých nečistot a oxidů. Ke zdrsňení povrchu

a zvětšení jeho plochy se nejčastěji používá tryskání. Při této operaci dochází ke zlepšení podmínek pro vytvoření vazeb mezi podkladem a nanášeným materiálem. Zároveň se povrch základního materiálu chemicky aktivuje v důsledku uvolnění meziatomových vazeb povrchových atomů. Tato chemická aktivita se však v důsledku chemické absorpce plynů z atmosféry a oxidace rychle snižuje, což může vést ke snížení přilnavosti nanášeného povlaku. Vliv doby prodlevy mezi tryskáním a nanášením žárového nástřiku na přilnavost povlaku je znázorněn na obrázku 2.17. [4], [19]



**Obrázek 2.17:** Vliv prodlevy mezi tryskáním a žárovým nástřikem na přilnavost povlaku pro nanášený materiál NiAl [20]

Při žárovém nástřiku je první vrstva částic v přímém kontaktu s povrchem základního materiálu, zatímco další částice již dopadají na předchozí ztuhlou vrstvu povlaku. Pevnost povlaku je dána pevností spojení nově dopadajících částic s předcházející vrstvou. [19]

#### 2.4.4 Přídavné materiály

Pro dosažení správné funkce povlaku, je důležité zvolit správný přídavný materiál. Ten může být ve formě prášků, drátů nebo tyčinek. [20]

Přídavné materiály lze rozdělit z hlediska jejich chemického složení do několika skupin a to na přídavné materiály:

- na kovové bázi
- na keramické bázi
- s exotermickým účinkem
- speciální
- na bázi plastů

##### Přídavné materiály na kovové bázi

Pro žárový nástřik lze využít téměř všechny čisté kovy a jejich slitiny, včetně vysokotavitelných kovů jakými jsou wolfram, niob nebo molybden. Do této skupiny



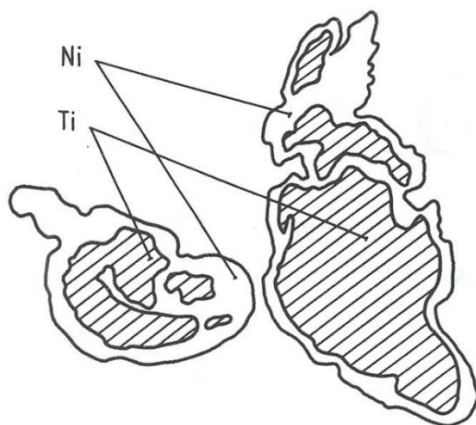
se zároveň řadí intermetalické fáze<sup>6</sup>, které však bývají velmi reaktivní za vysokých teplot, a proto se při nástřiku používá inertní ochranná atmosféra. Výhoda kovových nástřiků spočívá v jejich vysoké tvrdosti, korozivzdornosti a odolnosti proti opotřebení. Mezi hlavní oblasti použití patří automobilový průmysl, chemický průmysl, vytváření povlaků na lopatky turbín a těžebních zařízení, i pro ochranu mostů a dalších strojních konstrukcí. [20], [22]

#### Přídavné materiály na keramické bázi

Keramika se pro žárový nástřik používá ve formě prášku i drátu. Mezi nejpoužívanější typy patří oxidy na bázi kovů ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  a stabilizovaný  $\text{ZrO}_2$ ), karbidy ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$  a  $\text{SiC}$ ), nitridy ( $\text{TiN}$ ) a spinely. Povlaky vytvářené z těchto materiálů slouží především pro zvýšení odolnosti proti opotřebení, korozivzdornosti a na vytváření povlaků tepelných bariér (TBC). Nejpoužívanějším procesem pro vytváření keramických povlaků je pro svou vysokou teplotu plazmatický nástřik. [4], [22]

#### Přídavné materiály s exotermickým účinkem

Jedná se o přídavné materiály na bázi Ni-Al a Ni-Ti, které se vyrábějí ve formě drátu i prášku. Obsah hliníku a titanu bývá v rozmezí 5 až 8%. Tyto materiály se používají pro vytváření vazných povlaků, což vede ke zvyšování jejich přilnavosti. V průběhu exotermické reakce během nástřiku a částečně také po dopadu částice na podklad dochází k uvolňování tepla, což má za následek zvýšení přilnavosti vazného povlaku, a tím také vlastního funkčního povlaku. Na obrázku 2.18 je znázorněn řez částicí přídavného materiálu Ni-Ti s exotermickým účinkem. [20]



**Obrázek 2.18:** Řez částicí přídavného materiálu typu Ni-Ti [20]

#### Speciální přídavné materiály

Do této skupiny se obvykle řadí cermety a také přídavné materiály složené z několika složek (zpravidla kovových a nekovových), které však nelze zařadit mezi cermety, jelikož neobsahují keramickou složku. Cermety v sobě spojují výhody kovových (tažnost, houževnatost) a keramických (tvrdost, vysoká teplota tavení) materiálů,

---

<sup>6</sup> nejpoužívanější intermetalika jsou  $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{NiAl}$  a  $\text{MoSi}_2$

čímž umožňují vytvoření povlaků s velmi specifickými vlastnostmi. Dalším významným přídatným materiálem, který se však neřadí mezi cermety, je slitina Ni-grafit. Nikl obklopuje částice grafitu, čímž je chráněn proti oxidaci a rozpadu při vysokých teplotách. Tento materiál nachází využití při žárovém nástřiku výstelek a labyrintových ucpávek proudových motorů. [20], [23]

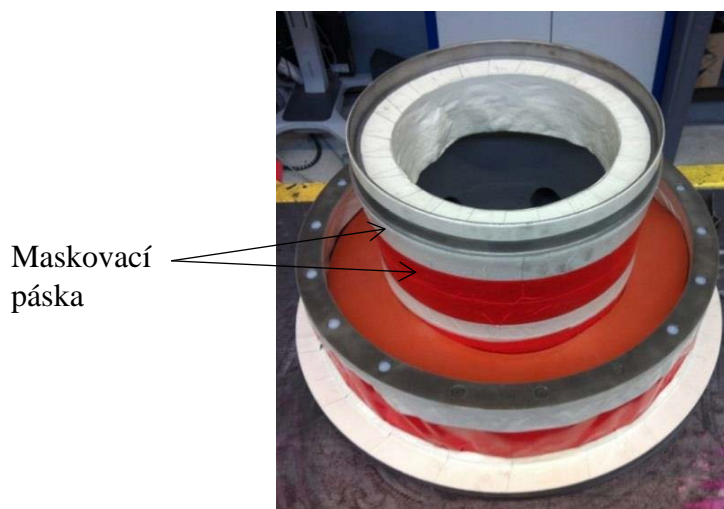
#### Přídavné materiály na bázi plastů

Tyto materiály jsou pro žárový nástřik dodávány ve formě prášků, jelikož u přídatných materiálů ve formě tyčinek docházelo k problémům s jejich podáváním. Komerční použití žárového nástřiku plastů se datuje do roku 1980. Od té doby došlo k významnému rozšíření používaných materiálů, mezi které patří zejména termoplasty a reaktoplasty. Nejpoužívanějším termoplastem je polyethylen s velikostí částic v rozmezí 150 až 175  $\mu\text{m}$ . V případě reaktoplastů se jedná nejčastěji o epoxidové pryskyřice, u nichž dochází během žárového nástřiku k polymerační reakci. Jako vytvrzující látka se obvykle používá kyselina ftalová. Mezi metody používané pro žárový nástřik plastů patří zejména konvenční nástřik plamenem a vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF. [20], [22]

#### **2.4.5 Technologický postup vytváření povlaku**

Technologický postup vytváření žárového nástřiku se skládá ze 3 hlavních částí: příprava základního materiálu pro nástřik, vytvoření vrstvy při vhodné volbě technologických parametrů nástřiku a výsledné opracování vzniklého povlaku na požadované rozměry. [19]

Příprava základního materiálu je velmi důležitá, jelikož kvalita povrchu má přímý vliv na vlastnosti vznikajícího povlaku. Ovlivňuje zejména přilnavost povlaku k základnímu materiálu při mechanickém namáhání. Nejprve je provedena vstupní kontrola povrchu a rozměrů povlakovaného dílu, dále mechanické opracování, chemické čištění, maskování součástí v místech, kde nemá být nanesen povlak, tryskání a případně předehřev dílu v peci. Pro maskování součástí se nejčastěji používají pásy, plechy, speciální pasty, případně ochranné nátěry. Na obrázku 2.19 je znázorněno maskování ložiskového domku pomocí maskovací pásy. [4], [19]



**Obrázek 2.19:** Maskování ložiskového domku pomocí maskovací pásy

Po přípravě základního materiálu následuje samotný žárový nástřik. Parametry nástřiku musí být zvoleny tak, aby bylo dosaženo dostatečného natavení částic a aby nedošlo k tepelnému ovlivnění a deformaci povlakované součásti. Dílčí parametry, jako je velikost protékajícího proudu nebo množství a typ inertního plynu jsou voleny s ohledem na jednotlivé díly a na typ používaného přídavného materiálu. [19]

Po ukončení nástřiku je třeba nechat díl vychladnout (přibližně na teplotu okolí). Poté následuje odstranění veškerého maskování, vizuální kontrola povrchu povlaku (kontrola celistvosti, trhlin) a závěrečná kontrola rozměrů. Pokud to operace vyžaduje, následuje po kontrolním měření ještě konečná úprava povlaku třískovým obráběním, případně broušením. [4], [19]

#### **2.4.6 Použití žárových nástřiků v praxi**

Technologie žárových nástřiků se používá téměř ve všech oblastech průmyslu a to především díky své schopnosti nanášet širokou paletu materiálů na značné množství podkladů. Mezi hlavní cíle tvorby ochranných povlaků patří zvyšování užitných vlastností výrobků, prodloužení životnosti výrobků, úspora materiálů a renovace poškozených součástí. [4], [20]

V řadě případů jsou technologie žárově stříkaných povlaků nezastupitelné a sehrávají klíčovou roli při výrobě. Praktický dopad povlaků na kvalitu výrobků spočívá zejména v ekonomickém a technickém zvyšování užitných vlastností a to jak v prvovýrobě, tak i v oblasti renovací. Povlaky můžeme s ohledem na jejich vlastnosti rozdělit do několika základních skupin:

- povlaky odolné proti mechanickému opotřebení (abraze, eroze)
- povlaky odolné proti oxidaci, korozi a proti působení agresivního chemického prostředí
- povlaky odolné proti extrémně vysokým teplotám
- elektroizolační a elektricky vodivé povlaky
- biokompatibilní, zdravotně nezávadné povlaky
- povlaky se speciálními fyzikálními vlastnostmi (odolnost proti záření, supravodivost)
- samomazné, kluzné a těsnící povlaky. [19], [20]

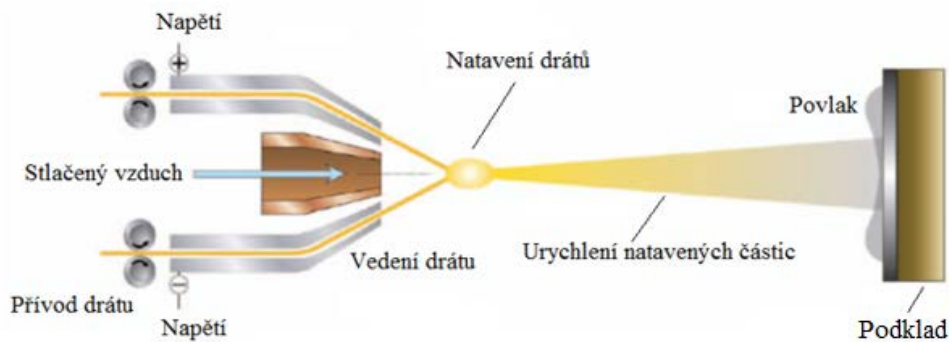
#### **2.4.7 Žárový nástřik elektrickým obloukem**

##### Princip procesu

Princip této technologie spočívá v hoření elektrického oblouku mezi dvěma vodivými přídavnými materiály (ve formě drátu), čímž dochází k jejich natavení. Vzniklá tavenina je rozprašována pomocí stlačeného plynu<sup>7</sup> pod tlakem 0,4 až 0,6 MPa. Stlačený plyn uděluje nanášeným částicím vysokou rychlost, což značně ovlivňuje výslednou kvalitu povlaků. Takto urychlené částice jsou proudem plynu unášeny na připravený podklad a vytvářejí požadovaný povlak. Proces žárového nástřiku elektrickým obloukem je znázorněn na obrázku 2.20. [19], [22]

---

<sup>7</sup> nejčastěji používaným plynem je čistý, suchý vzduch



**Obrázek 2.20:** Proces žárového nástřiku elektrickým obloukem [21]

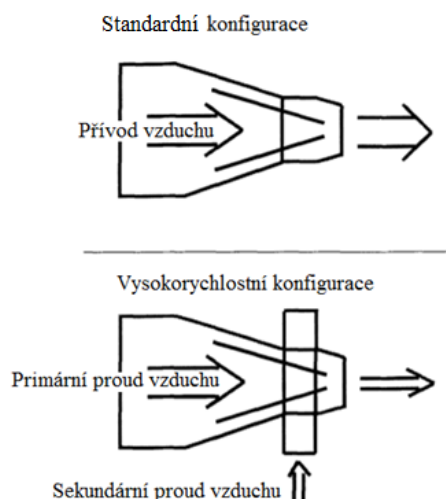
### Výhody nástřiku elektrickým obloukem

Mezi hlavní výhody této metody patří jednoduchost, nízké provozní náklady, vysoký výkon a široké spektrum přídavných materiálů. Oproti ostatním metodám u nástřiku elektrickým obloukem dochází k teplotnímu ovlivnění povlakované součásti pouze teplem přineseným na povrch roztavenými částicemi. To umožňuje nanášet povlak i na podkladové materiály, u kterých nesmí dojít k tepelnému ovlivnění (např. polymery, dřevo, sklo). Kvalita výsledného povlaku je ovlivněna převážně stabilitou zdroje elektrického proudu a plynulostí podávání drátu. [19], [20]

### Použití v praxi

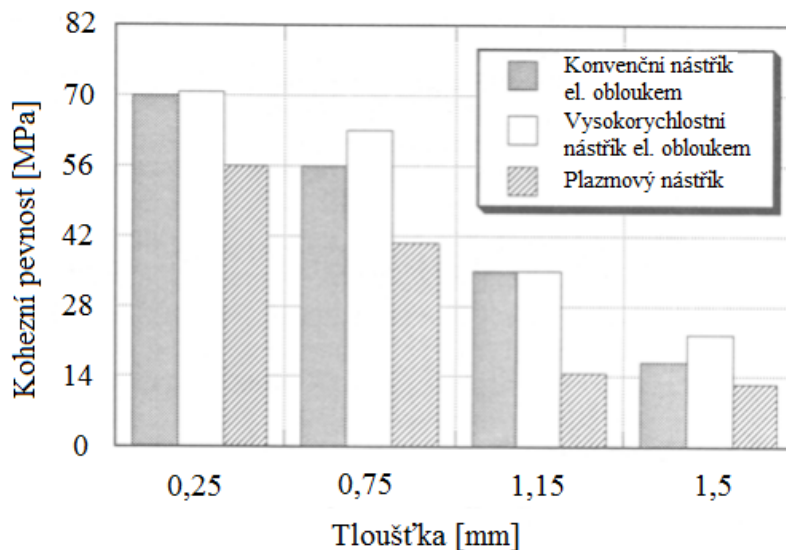
Žárový nástřik elektrickým obloukem se v praxi využívá při tvorbě povlaků chránících povrch proti opotřebení, abrazi, atmosférické korozi a korozi za vyšších teplot. Mezi další použití patří vytváření elektricky vodivých a chemicky odolných povlaků a také obnova rozměrů renovovaných dílů na původní hodnoty. [4], [17]

V průmyslu se také začíná ve velké míře používat vysokorychlostní nástřik elektrickým obloukem. U této technologie se používá speciálně upravená tryska s přívodem sekundárního proudu vzduchu, což má za následek zvýšení rychlosti částic a vznik jemnější struktury oproti konvenční technologii. Tím je dosaženo zlepšení mechanických vlastností vzniklého povlaku. Schéma konvenční a vysokorychlostní trysky je znázorněno na obrázku 2.21. [24]



**Obrázek 2.21:** Schéma konvenční a vysokorychlostní trysky pro žárový nástřik elektrickým obloukem [24]

U průmyslových plynových turbín se v poslední době stále více používá nástřik elektrickým obloukem jako náhrada za plazmatický nástřik. Velkou roli v tom hraje ekonomický přínos, jelikož dochází až k 50% úspoře času při zachování stejných nebo dosažení lepších vlastností (zlepšení obrobitelnosti, jemnější struktura, zvýšení mechanických vlastností). Graf na obrázku 2.22 znázorňuje srovnání závislosti kohezní pevnosti<sup>8</sup> na tloušťce povlaku pro plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem (podklad – nerezová ocel, materiál povlaku – Ni-5Al). [25]



**Obrázek 2.22:** Srovnání závislosti kohezní pevnosti na tloušťce povlaku u nástřiku plazmou a elektrickým obloukem (materiál povlaku Ni-5Al, podklad z nerezové oceli) [25]

<sup>8</sup> pevnost spojení částic uvnitř povlaku

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Aplikační zařízení

Zařízení používaná pro nástřik elektrickým obloukem mají v závislosti na aplikaci povlaku různou konstrukci. Liší se především tvarem, průměrem přiváděného drátu nebo velikostí výstupní trysky. Různé konstrukce těchto zařízení umožňují dosažení rozdílných průtoků vstupujícího plynu (nejčastěji vzduchu) a také mají vliv na množství vnesené energie. Pro každý typ materiálu existují specifické hodnoty napětí a proudu, při kterých dojde k optimálnímu natavení. Stupeň natavení přídavného materiálu je velmi důležitý, jelikož zabezpečuje vznik stabilní a kompaktní vrstvy, čímž přímo ovlivňuje kohezní pevnost vzniklého povlaku. [16]

Ve firmě Solar Turbines mají operátoři k dispozici 2 boxy pro žárový nástřik (obrázek 3.1), ve kterých se provádí nástřik elektrickým obloukem a plazmatický nástřik. Zařízení pro žárový nástřik elektrickým obloukem použité pro provedení experimentu v této diplomové práci bylo vyrobeno firmou Hardface Alloys a nese označení ARCote 9140.



**Obrázek 3.1:** Boxy pro aplikaci žárového nástřiku

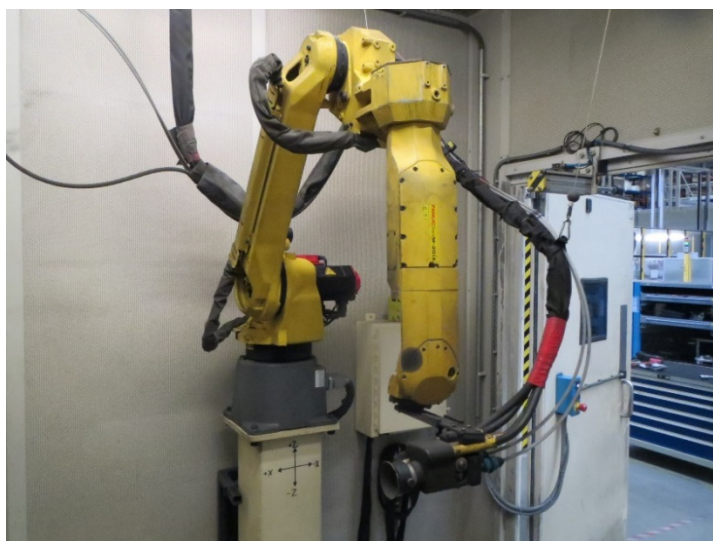
Zařízení ARCote 9140 se skládá z podavače drátu (obr. 3.2), zdroje napájení (obr. 3.3) a nástřikové pistole (obr. 3.4). Pistole je umístěna na rameni manipulačního robotu uvnitř ochranného boxu, což umožňuje velmi snadnou manipulaci ulehčenou dálkovým ovládáním. Pro žárový nástřik se používají přídavné materiály ve formě drátu o průměru 1,6 mm, 2 mm, 2,3 mm nebo 2,5 mm.



**Obrázek 3.2:** Podavač drátu



**Obrázek 3.3:** Zdroj napájení



**Obrázek 3.4:** Nástřiková pistole upevněná na rameni manipulačního robotu

U zařízení ARCote 9140 lze nezávisle na sobě měnit jednotlivé pracovní parametry: napětí, proud nebo tlak protékajícího vzduchu. Nastavení hodnot těchto parametrů má podstatný vliv na výslednou kvalitu povlaku, a proto je při jejich nastavování nutné brát v potaz doporučení stanovená výrobcem. Každý přídavný materiál má specifické hodnoty pracovních parametrů, které je důležité dodržovat. Rozsahy jednotlivých parametrů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

**Tabulka 3.1** Rozsahy pracovních parametrů zařízení ARCote 9140

Proud [A]	Napětí [V]	Tlak protékajícího vzduchu [MPa]
0 – 350	18 – 45	0 – 0,45

### 3.2 Experimentální materiál

V praktické části této práce bude zaměřena pozornost na optimalizaci procesu žárového nástřiku elektrickým obloukem nahrazením používaného drátu typu NiCrAl drátem FeCrAl. Cílem tohoto experimentu je dosažení požadovaných vlastností vytvářeného povlaku za současného poklesu ceny procesu.

Původní myšlenka nahradit aktuálně používaný materiál, který je vzhledem k vysokému obsahu niklu poměrně drahý, vychází z oblasti použití daného nástřiku. Momentálně se nástřik elektrickým obloukem s použitím přídavného materiálu na bázi niklu používá výhradně pro obnovu rozměrů statických komponent plynových turbín<sup>9</sup>. Převážná část těchto komponent je vyrobena z litiny s kuličkovým grafitem, tudíž mechanické vlastnosti výsledného povlaku převyšují vlastnosti základního materiálu.

Přestože by se mohlo zdát, že zvolit nový materiál není složité, opak je pravdou. Při výběru vhodného materiálu, který by byl vhodnou alternativou pro aktuálně používaný typ, bylo nutné vycházet z mnoha požadavků. Kromě snížení procesních nákladů, což byl jeden z hlavních aspektů, musel nový materiál splňovat následující požadavky:

- Kohezní pevnost  $\geq 40$  MPa
- Tvrdost povlaku 60 – 95 HRB
- Drsnost povrchu  $R_a$  základního materiálu před nástřikem minimálně 3,2  $\mu\text{m}$
- Kompatibilita s materiály na bázi železa
- Tepelná odolnost do teploty min. 550 °C
- Dostupnost ve formě drátu daného průměru
- Mikrostruktura výsledného povlaku srovnatelná s materiálem na bázi niklu

Výsledná volba materiálu typu FeCrAl vzešla z kombinace studia vědeckých prací, technických zpráv a rozsáhlých diskuzí s odborníky z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a odborníky z vývojového centra společnosti Solar Turbines sídlícího v San Diegu.

<sup>9</sup> jedná se o komponenty sloužící pro uložení rotačních částí plynové turbíny (např. skříňě kompresorů, skříňe pro uložení ložisek, vstupní a výstupní ústrojí apod.



### 3.2.1 Příkladný materiál typu NiCrAl

Dosud používaný přídatný materiál typu NiCrAl nesoucí označení Metco 8443 byl dodán společností Oerlikon Metco ve formě plněného trubičkového drátu o průměru 1,6 mm. Tento materiál se vyznačuje výbornou korozivzdorností i za zvýšených teplot, dobrou obrobiteľnosť a vytvářením povlaků s homogenní strukturou. Mezi jeho hlavní použití patří obnova rozměrů u dílů z uhlíkových a korozivzdorných ocelí, tvorba povlaků odolných proti erozi, vytváření mazných mezivrstev pro keramické nástřiky a tvorba korozivzdorných povlaků pro použití za vyšších teplot (až do teploty 1000 °C). Základní chemické složení tohoto materiálu je uvedeno v tabulce 3.2.

**Tabulka 3.2** Chemické složení materiálu Metco 8443

Materiál	Hm. %				
	Ni	Cr	Al	Mn	Ostatní
Metco 8443	Zákl. složka	18	6	2	>1

### 3.2.2 Příkladný materiál typu FeCrAl

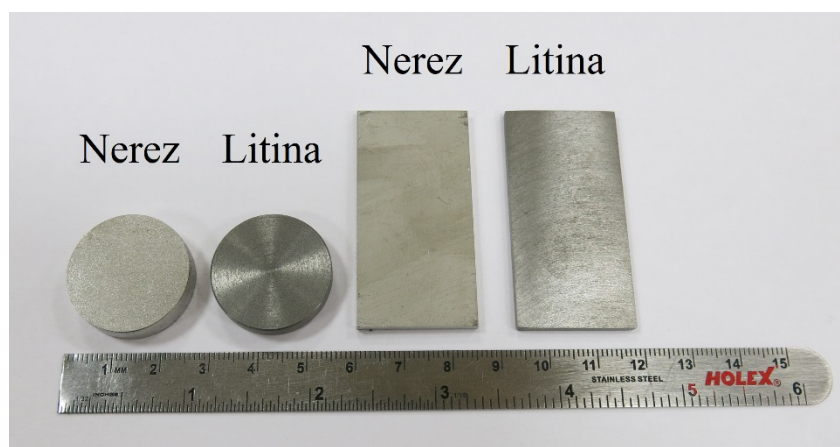
Jako alternativa pro používaný drát Metco 8443 byl zvolen přídatný materiál typu FeCrAl od společnosti Oerlikon Metco s označením Metco 8236. Na rozdíl od předchozího materiálu byl dodán ve formě plného drátu o průměru 1,6 mm. Vzniklý povlak se vyznačuje se především kombinací vysoké pevnosti, dobré obrobiteľnosti a vynikající korozivzdornosti. Mezi jeho další přednosti patří vysoká tvrdost a odolnost proti působení chemických látek. Použití nachází zejména v zemědělském, textilním a energetickém průmyslu při tvorbě korozivzdorných povlaků a povlaků odolných proti erozi a abrazi, při obnově rozměrů opotřebovaných dílů a při tvorbě ochranných povlaků v agresivním mořském prostředí. V tabulce 3.3 je uvedeno jeho základní chemické složení.

**Tabulka 3.3** Chemické složení materiálu Metco 8236

Materiál	Hm. %					
	Fe	Cr	Al	C	Si	Ostatní
Metco 8236	Zákl. složka	25	5	0,25	0,25	>1

### 3.3 Příprava zkušebních vzorků

Dle interní směrnice společnosti Solar Turbines je pro správné provedení testu žárového nástřiku zapotřebí 3 vzorků ve formě kvádrů o rozměru  $50 \times 25 \times 2$  mm a 3 válečků o rozměru  $\text{Ø}25 \times 5$  mm. Přestože je většina stříkaných dílů vyrobena z tvárné litiny, byla jedna sada vzorků především z důvodu snadné výroby zhotovena z chrom-niklové korozivzdorné austenitické oceli nesoucí označení 1.4301. V další části práce budou tyto vzorky označovány jako nerezové. Podstata spojení povlaku se základním materiálem vychází z mechanického zakotvení částic na povrchu a tudíž by druh základního materiálu neměl ovlivňovat výsledky testování. Z důvodu ověření této teorie byla vyrobena ještě druhá sada vzorků a to vyřezáním z poškozené kompresorové skříně. Materiálem této sady vzorků je litina s kuličkovým grafitem s feriticko-perlitickou matricí, používaná pro výrobu většiny statických komponent plynové turbíny. Přesné označení této litiny nemůže být uvedeno z důvodu zachování obchodního tajemství společnosti Solar Turbines. V další části práce budou tyto vzorky označovány jako litinové. Součástí práce bude tedy kromě srovnání vlastností povlaků NiCrAl a FeCrAl provedeno zároveň ověření vlivu základního materiálu na vlastnosti výsledného povlaku. Jednotlivé vzorky jsou v základním stavu k vidění na obrázku 3.5.



**Obrázek 3.5:** Testovací vzorky v základním stavu

Před samotným nástřikem bylo nutné zvětšit povrch vzorků. Za tímto účelem bylo provedeno otryskání povrchu základního materiálu tvrdým abrazivem. Parametry procesu jsou uvedeny v tabulce 3.4.

**Tabulka 3.4** Parametry tryskání

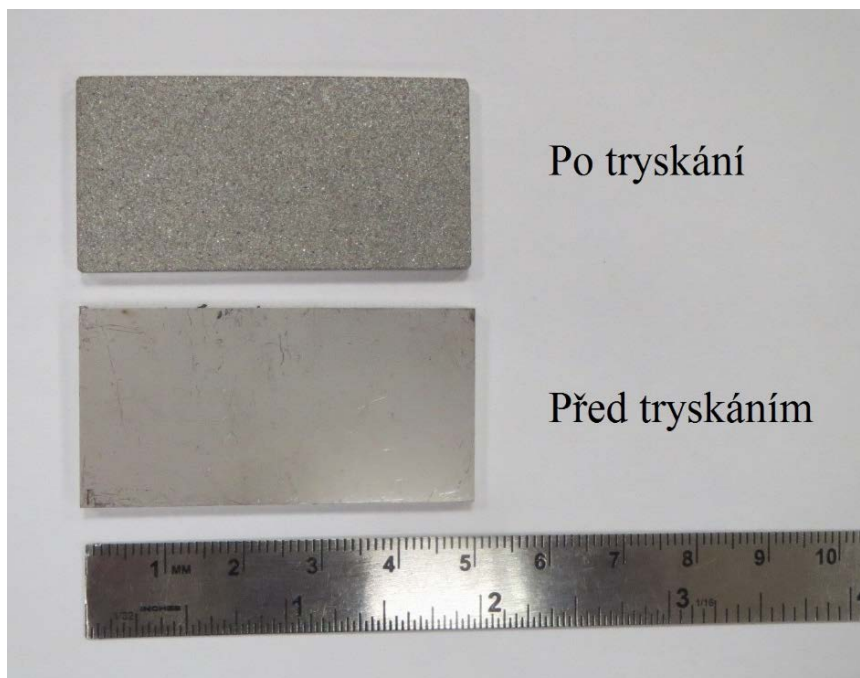
Typ abraziva	Střední průměr zrna	Pracovní tlak vzduchu
Umělý hnědý korund $\text{Al}_2\text{O}_3$	745 $\mu\text{m}$	0,25 MPa

Při této operaci byl vždy otryskán jeden vzorek navíc, který byl následně použit pro měření drsnosti povrchu. Toto měření probíhalo pomocí přístroje MarSurf M 300 C

od společnosti Mahr (obrázek 3.6). U vzorků z nerez a litiny bylo naměřeno celkem 5 hodnot, ze kterých byla získána výsledná drsnost pomocí aritmetického průměru<sup>10</sup>. Rozdíl ve vzhledu mezi vzorkem z nerez před trykáním a po trykání je znázorněn na obrázku 3.7.



**Obrázek 3.6:** Měření drsnosti povrchu pomocí přístroje MarSurf M 300 C



**Obrázek 3.7:** Srovnání vzorků z nerez před a po trykání

---

<sup>10</sup> při výpočtu výsledné drsnosti nebyla uvažována nejvyšší a nejnižší naměřená hodnota

V tabulce 3.5 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností testovaných vzorků ve srovnání s požadovanou hodnotou.

**Tabulka 3.5** Naměřené hodnoty drsností ve srovnání s požadovanou hodnotou

Základní materiál	Požadovaná hodnota drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná hodnota drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Nerez	$\geq 3,2$	$7,6 \pm 0,4$
Litina		$7,1 \pm 0,7$

Z tabulky vyplývá, že u obou sad testovaných vzorků bylo dosaženo vyhovující hodnoty drsnosti. Otryskané vzorky byly následně pomocí oboustranné pásky připevněny ke speciálnímu přípravku. Přípravek se vzorky byl usazen na rotační stůl, což umožňovalo rovnoměrné nanesení vrstvy povlaku (viz obrázek 3.8).



**Obrázek 3.8:** Přípravek s testovacími vzorky upevněný k rotačnímu stolu

Aby bylo možné nanést povlak o požadované tloušťce, muselo být před žárovým nástřikem provedeno kontrolní měření tloušťky vybraných vzorků. Po naměření požadovaných hodnot byl přípravek přemístěn do stříkacího boxu, kde došlo k provedení žárového nástřiku (obrázek 3.9). Procesní parametry žárového nástřiku byly zvoleny stejné pro materiál NiCrAl i FeCrAl a jsou uvedeny v tabulce 3.6.



**Obrázek 3.9:** Průběh žárového nástřiku testovacích vzorků

**Tabulka 3.6** Zvolené procesní parametry žárového nástřiku

Procesní parametr	Hodnota
Proud	150 A
Napětí	31 V
Tlak protékajícího vzduchu	0,4 MPa
Stříkací vzdálenost	100 mm
Úhel nástřiku	20°

Stříkací vzdálenost v tomto případě označuje vzdálenost povrchu podkladu od ústí nástřikové pistole a úhel nástřiku značí úhel osy proudu částic vůči kolmici ke stříkanému povrchu.

Vždy po určitém počtu cyklů došlo k zastavení procesu a bylo provedeno kontrolní měření tloušťky. Proces žárového nástřiku probíhal dokud nebylo dosaženo požadované tloušťky vrstvy. Po dosažení požadované tloušťky povlaku byl proces žárového nástřiku ukončen a bylo přistoupeno k opatrnému sejmutí vzorků z přípravku. Takto připravené vzorky byly následně podrobeny testování, jehož výsledky jsou uvedeny v kapitole 3.5.

## 3.4 METODY KONTROLY

Při vyhodnocování jednotlivých vzorků byla použita vnitřní směrnice společnosti Solar Turbines, která specifikuje konkrétní požadavky pro daný typ povlaku. Kontrola je rozdělena celkem na 6 částí: vizuální kontrolu, metalografický rozbor, rozbor chemického složení, měření tloušťky povlaku, tvrdosti a adhezně/kohezní pevnosti.

### 3.4.1 Vizuální kontrola

V tomto kroku probíhá kontrola výsledného povrchu pouhým okem, při které dochází k vyhodnocení celistvosti povlaku. Na povrchu se nesmí vyskytovat žádné velké defekty (např. trhliny nebo dutiny). Zároveň musí být povrch dílu zbaven veškerého maskovacího materiálu. Povlak by měl být nanesen rovnoměrně po celé ploše vzorku a neměl by vykazovat známky odlupování či praskání. Jelikož se nejedná o normalizovanou zkoušku, vychází se při ní zejména ze zkušeností a znalostí laboratorních techniků.

### 3.4.2 Metalografický rozbor a měření tloušťky povlaku

Dalším stupněm je kontrola mikrostruktury a měření tloušťky povlaku pomocí světelné mikroskopie. Pro hodnocení mikrostruktury se používá obrazová analýza v místě řezu povlakem, vedeným kolmo k rozhraní mezi povlakem a základním materiálem. Velká pozornost musí být věnována zejména na metalografickou přípravu zkoumaného vzorku, jelikož při volbě nevhodných podmínek může dojít ke zkreslení naměřených hodnot. V tabulce 3.7 jsou uvedeny požadavky, které musí výsledný povlak splňovat.

**Tabulka 3.7** Požadavky na výsledný povlak z hlediska mikrostruktury

Kritérium	Přípustná hodnota
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem	$\leq 25 \%$
Pórovitost	$\leq 8 \%$
Množství oxidů	$\leq 25 \%$
Množství nenatavených částic	$\leq 10 \%$

Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii spočívá v odebrání vzorku, broušení a leštění. Během přípravy metalografického výbrusu je nutné vyhnout se vzniku vad, které by mohly negativně ovlivnit výsledky měření. Nejčastěji se objevující vadou výbrusů jsou uvolněné a vypadané tvrdé částice, které vytvářejí stopy připomínající póry, čímž zvyšují naměřenou pórovitost. [19]

Veškerá zařízení použitá při přípravě metalografických vzorků byla vyrobena společností Struers. Z testovaných vzorků byly na kotoučové pile Axitom nařezány vzorky ve tvaru kvádrů, které byly použity pro hodnocení mikrostruktury vzniklého povlaku. Po nařezání následovalo zalití vzorků za studena v přístroji CitoVac, broušení a leštění. Základní informace týkající se těchto dvou procesů jsou uvedeny v tabulkách 3.8 a 3.9. Vyleštěné vzorky jsou k vidění na obrázku 3.10.

**Tabulka 3.8** Parametry broušení

Stroj	Brusný papír	Počet kroků	Doba broušení pro každý papír	Přítlačná síla	Chladicí kapalina
TEGRAMIN - 30	SiC o zrnitostech postupně: #180, #320, #500, #800, #1200, #4000	6	2 min	120 N	voda

**Tabulka 3.9** Parametry leštění

Stroj	Leštící kotouč	Leštící médium	Počet kroků	Doba leštění	Přítlačná síla
TEGRAMIN - 30	MD NAP STRUERS	Diamantová suspenze s velikostí zrna 1 $\mu$ m	1	3 min	100 N

**Obrázek 3.10:** Vzorky připravené pro světelnou mikroskopii. Zleva: NiCrAl/nerez, FeCrAl/nerez, FeCrAl/litina, NiCrAl/litina

Takto připravené vzorky byly podrobeny obrazové analýze na světelném mikroskopu Nikon Eclipse MA200 (obrázek 3.11). Nejprve bylo na 5 místech provedeno měření tloušťky povlaku. Z naměřených hodnot byla pomocí aritmetického průměru získána výsledná tloušťka. Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem byla posuzována také celkem na 5 místech. Vyhodnocení probíhalo při stonásobném zvětšení naměřením velikosti rozhraní a velikosti jednotlivých nečistot. Výsledná kontaminace byla určena jako procentuální zastoupení velikosti nečistot vůči celkové velikosti rozhraní. Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku probíhalo na 3 místech při stonásobném zvětšení. Posloužil k tomu software NIS-Elements, který přesně určil procentuální zastoupení oxidů a pórů. Jako poslední bylo na světelném mikroskopu stanoveno množství nenatavených částic. To probíhalo stejně jako předchozí měření při stonásobném zvětšení na 3 místech. Došlo k vytvoření sítě 20 × 20 čtverců, čímž vzniklo celkem 400 uzlů. Poté bylo posuzováno, kolik z těchto uzlů zasahuje do nenatavené částice, případně kolika uzlů se nenatavené částice dotýkají. Výsledné množství nenatavených částic bylo stanoveno pomocí rovnice (1):

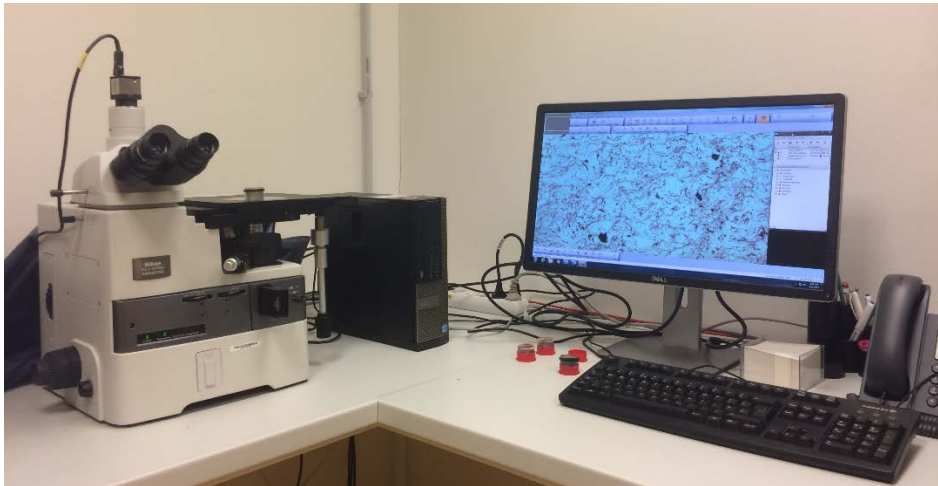
$$X = \frac{P_1 + \frac{P_2}{2}}{400} [\%] \quad (1)$$

X [%] – množství nenatavených částic

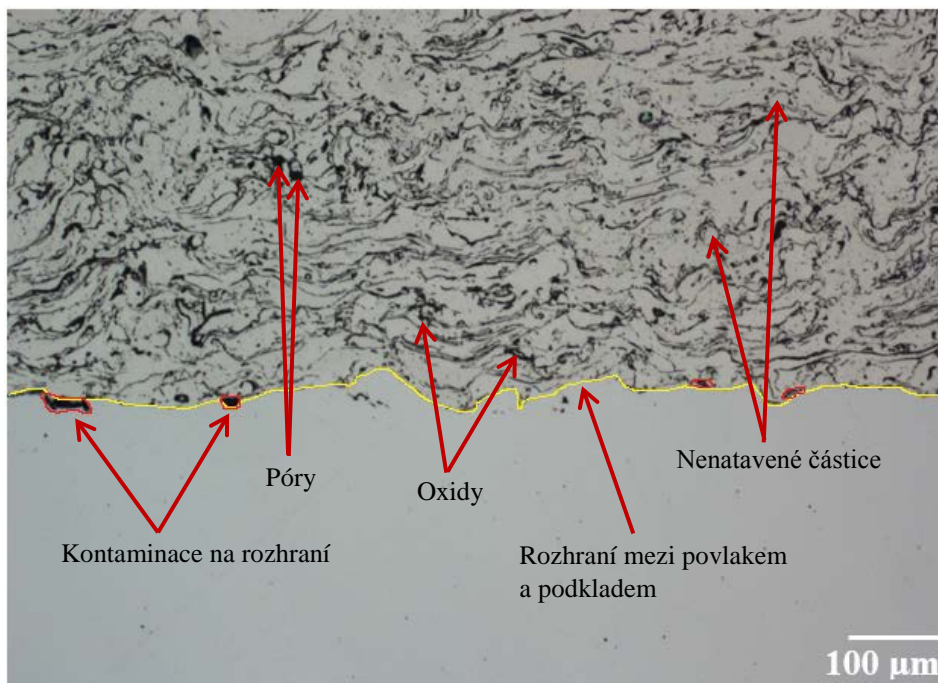
P<sub>1</sub> [-] – počet uzlů zasahujících do nenatavené částice

P<sub>2</sub> [-] – počet uzlů dotýkajících se nenatavené částice

Vyhodnocované položky jako je kontaminace na rozhraní (velikost rozhraní a nečistot), oxidy, póry a nenatavené částice znázorňuje obrázek 3.12.



**Obrázek 3.11:** Metalografický světelný mikroskop Nikon Eclipse MA200



**Obrázek 3.12:** Vyhodnocované položky u mikrostruktury vzorku NiCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem (vrchní část) a podkladem (spodní část), zvětšení 100×



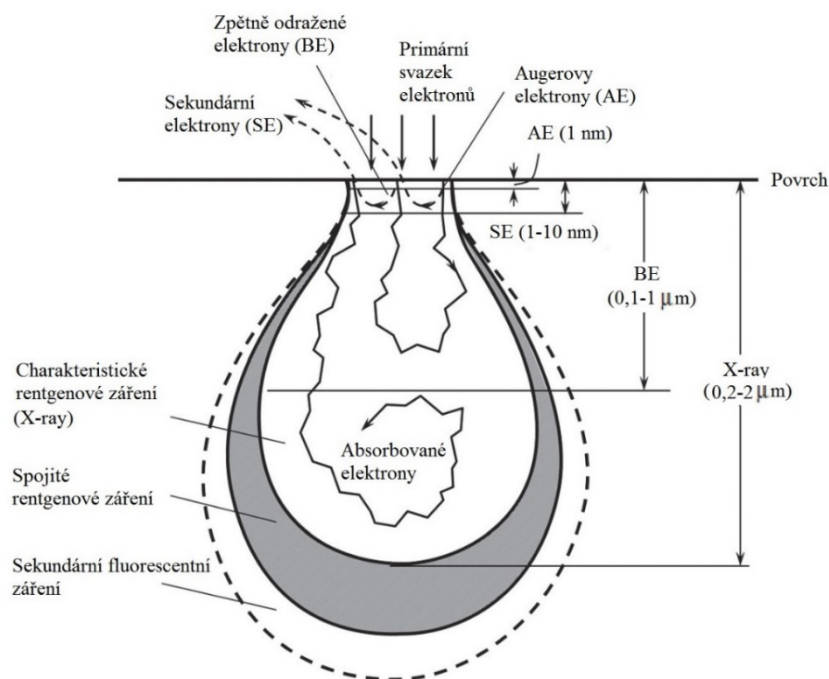
### 3.4.3 Rozbor chemického složení

Stanovení chemického složení povlaku probíhalo na skenovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM-6460LV pomocí přídavného energiově disperzního spektrometru EDAX APOLLO XL (obrázek 3.13). Tato metoda, která pro vyhodnocení chemického složení využívá vznikající charakteristické rentgenové záření, se nazývá energiově disperzní spektroskopie (EDS). Zkoumané vzorky musejí být z vodivého materiálu, aby nedocházelo k nahromadění elektronů na jejich povrchu. To by mělo za následek zkreslení výsledného obrazu. Vzorky tedy byly před samotnou analýzou v elektronovém mikroskopu pouhličeny. Správnost chemického složení byla posuzována porovnáním získané křivky z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál. Ideální křivky jednotlivých materiálů jsou obchodním tajemstvím společnosti Solar Turbines a z toho důvodu nejsou součástí této práce.



**Obrázek 3.13:** Elektronový mikroskop JEOL JSM-6460LV s energiově disperzním spektrometrem EDAX APOLLO XL

Ve skenovacím elektronovém mikroskopu dochází k vyzařování elektronů ze zahřátého vlákna (katoda) směrem k anodě. Svazek elektronů, který je usměřován a zaostřován elektromagnetickými čočkami, dopadá na vzorek. Při interakci svazku urychlených elektronů s povrchem vzorku dochází ke vzniku pozorovaných signálů, ze kterých je pro stanovení chemického složení důležité zejména charakteristické rentgenové záření. Přehled všech vzniklých signálů je znázorněn na obrázku 3.14. [26], [27]

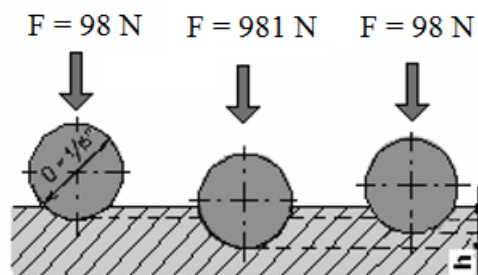


**Obrázek 3.14:** Přehled signálů vznikajících v elektronovém mikroskopu [28]

Charakteristické RTG záření prvků vzniká, pokud jsou zásahem primárních elektronů vyraženy jednotlivé elektrony z vnitřních slupek atomu. Volné místo, které se v dané energetické hladině uvolnilo po vyraženém elektronu, je okamžitě zaplněno elektronem z vyšší energetické hladiny. Vzniklý rozdíl energií je vyzářen jako foton charakteristického rentgenového záření. Toto záření, které pro každý prvek dosahuje rozdílné specifické energie, je detekováno energiově disperzním spektrometrem. V něm dochází k přeměně této energie na elektrické pulsy. Amplituda pulsů odpovídá energii RTG záření a počet pulsů poskytuje informaci o jeho intenzitě. Z těchto hodnot lze stanovit přítomnost jednotlivých prvků ve vzorku a jejich kvantitativní zastoupení. [26], [29]

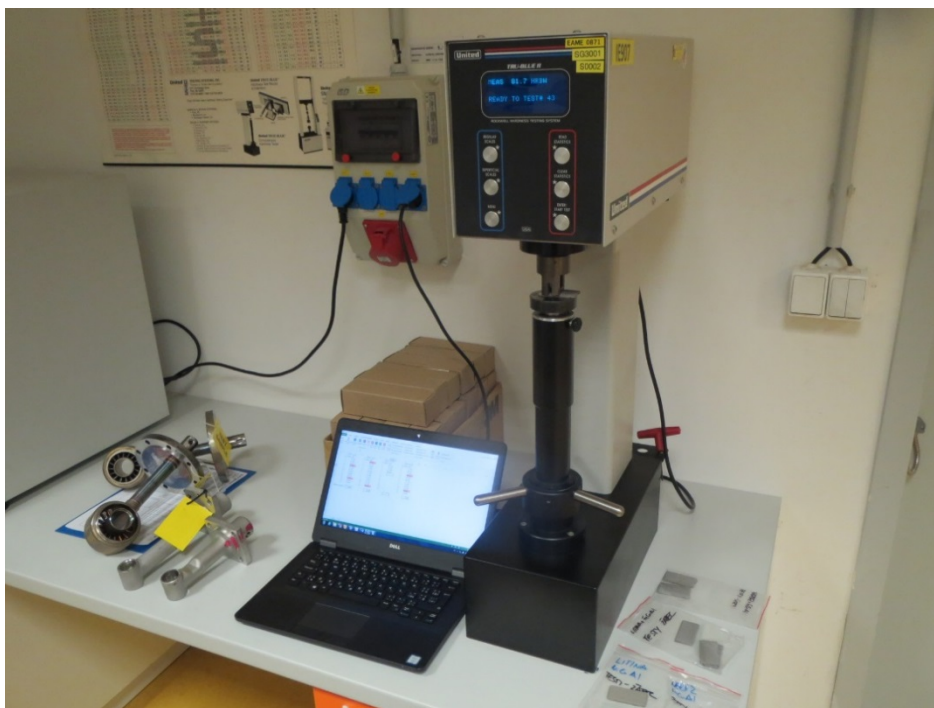
### 3.4.4 Měření tvrdosti

Pro hodnocení tvrdosti vzniklého povlaku byla použita zkouška podle Rockwella se stupnicí B v souladu s normou ASTM E18. Tato zkouška spočívá v zatlačování vnikacího tělesa – v tomto případě kuličky z karbidu wolframu o průměru 1,5875 mm – do zkoušeného materiálu. Výsledná tvrdost se zjišťuje z rozdílu hloubky vtisku při působení předběžné síly a při odlehčení. Účelem předběžného zatížení je vyloučení nepřesnosti povrchových ploch z naměřené hloubky. Karbidová kulička se nejprve zatíží silou o velikosti 98 N, čímž je dosaženo výchozí polohy pro měření hloubky vtisku. Následně dochází k pozvolnému zvětšování zatěžovací síly, aby bylo dosaženo celkového zatížení silou 981 N. Poté se zatěžující síla opět sníží na hodnotu 98 N. V tomto stavu se zjišťuje přírůstek hloubky vtisku oproti stavu ve výchozí poloze. Výhoda této zkoušky spočívá v rychlosti a jednoduchosti provedení a vzhledem ke způsobu měření tvrdosti z hloubky průniku indentoru je možno ji jednoduše zautomatizovat. Princip zkoušky dle Rockwella je znázorněn na obrázku 3.15. [30]



**Obrázek 3.15:** Princip zkoušky měření tvrdosti dle Rockwella [31]

U každého vzorku<sup>11</sup> bylo naměřeno celkem 12 hodnot, ze kterých byla pro zvýšení přesnosti měření největší a nejmenší naměřená hodnota odebrána. Výsledná tvrdost povlaku byla určena aritmetickým průměrem ze zbývajících hodnot společně s určením směrodatné odchylky. Měření tvrdosti probíhalo na přístroji TRU-BLUE II od společnosti United, který je znázorněn na obrázku 3.16.



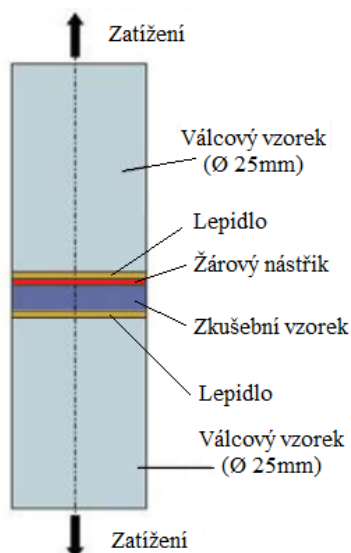
**Obrázek 3.16:** Tvrdoměr TRU-BLUE II

### 3.4.5 Zkouška přilnavosti nástřiku

Pro hodnocení přilnavosti žárového nástřiku k základnímu materiálu byla použita tzv. zkouška přilnavosti. Tato zkouška spočívá v nalepení zkušební vzorku mezi dva válcové protikusy a následném tahovém namáhání tohoto systému (viz obrázek 3.17).

---

<sup>11</sup> pro měření tvrdosti byly využity vzorky ve tvaru kvádrů



**Obrázek 3.17:** Schéma zkoušky přilnavosti [19]

Pro spojení vzorku s protikusy bylo použito lepidlo FM-1000. Za účelem vytvrzení lepidla byly vzorky umístěny do horkovzdušné trouby po dobu 150 minut při teplotě 200 °C. Zkouška byla prováděna ve výzkumném středisku společnosti Solar Turbines v San Diegu na přístroji INSTRON 5982 (obrázek 3.18) v souladu s normou ASTM C633. Po přetržení vzorku bylo důležité vyhodnotit, zda došlo k porušení spoje na rozhraní povlak – základní materiál (adhezní porušení), případně uvnitř povlaku (kohezní porušení). Výsledné porušení může být tvořeno i kombinací těchto dvou případů (adhezně-kohezní porušení). Pokud by došlo k odtržení lepidla od vzorku předtím, než k odtržení povlaku od základního materiálu, zkouška by byla považována za neplatnou. Hodnota přilnavosti povlaku je určena jako podíl maximálního zatížení a průřezu vzorku v místě lomu. [19], [20]



**Obrázek 3.18:** Univerzální trhací stroj INSTRON 5982 [19]

## 3.5 Výsledky experimentů

### 3.5.1 NiCrAl – Nerez

Procesní parametry žárového nástřiku pro daný materiál jsou uvedeny v kapitole 3.3. Jeden cyklus odpovídá průchodu nástřikové pistole směrem dolů a nahoru. Počty cyklů pro jednotlivé zkušební vzorky a naměřené hodnoty tloušťek povlaků jsou uvedeny v tabulce 3.10.

**Tabulka 3.10** Počty cyklů a naměřené tloušťky nástřiku NiCrAl na nerezovém podkladu

Válcové vzorky	Počet cyklů	8
	Naměřená tloušťka	0,56 mm
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,07 mm
Vzorky ve tvaru kvádrů	Počet cyklů	18
	Naměřená tloušťka	1,26 mm
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,07 mm

Při vizuální kontrole naneseného nástřiku nebyly shledány žádné defekty. Povrchy všech testovacích vzorků nevykazovaly stopy po prasklinách, trhlinách ani zbylém maskovacím materiálu. Povlak byl nanesen rovnoměrně po celé ploše vzorků. V důsledku odklonu trysky od normály povrchu základního materiálu došlo k přestřiku na hranách zkušebních vzorků. Zkušební vzorky po depozici žárového nástřiku jsou zobrazeny na obrázku 3.19.



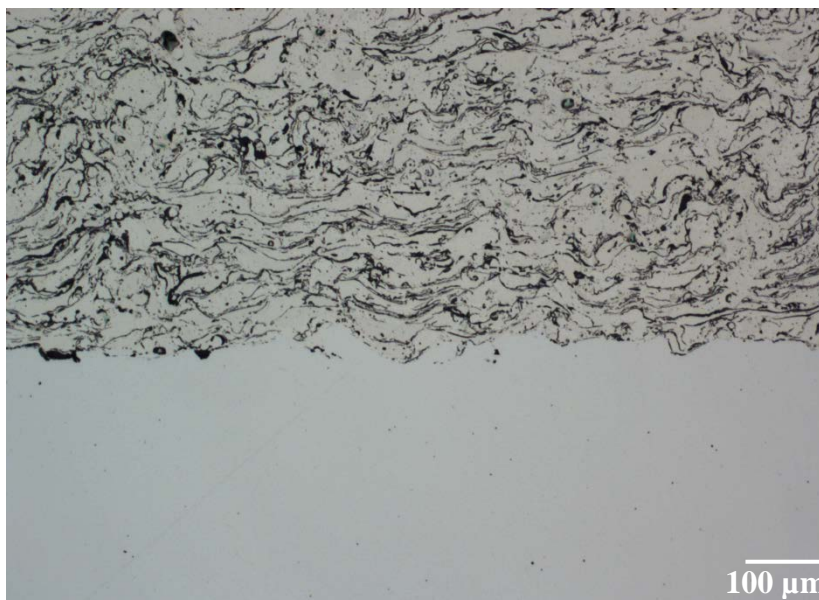
**Obrázek 3.19:** Zkušební vzorky NiCrAl na nerezovém podkladu po provedení žárového nástřiku

Po vizuálním zhodnocení následovalo měření tvrdosti vzniklého povlaku. Výsledky tohoto měření jsou shrnuty v tabulce 3.11. Největší a nejmenší hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou a s ohledem na specifikaci nebyly zahrnuty do výpočtů výsledných hodnot.

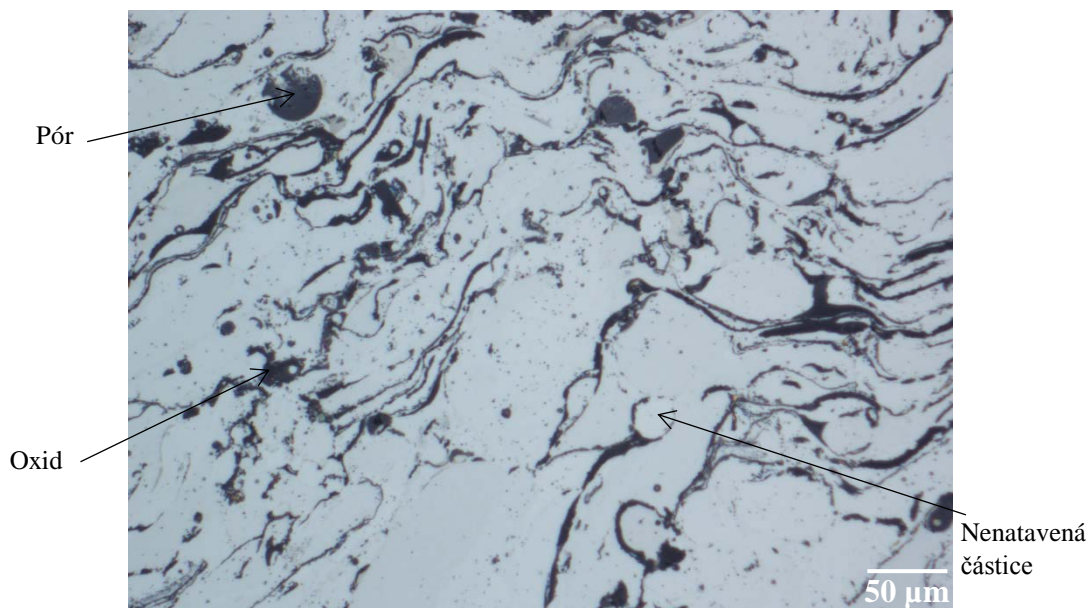
**Tabulka 3.11** Naměřené hodnoty tvrdostí pro materiál NiCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Požadovaná hodnota	Průměrná tvrdost
Tvrdost HRB	77,3	86,1	91,7	59,7	83,5	86,9	77,7	81,4	92	74,7	92,6	75,3	60 - 95	82,7 ± 6,4

Po stanovení tvrdosti HRB povlaku bylo přistoupeno k metalografickému rozboru na světelném mikroskopu, jehož výsledkem bylo určení tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů, množství nenatavených částic a posouzení kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem. Obrázky 3.20 a 3.21 poskytují pohled na mikrostrukturu výsledného povlaku.



**Obrázek 3.20:** Mikrostruktura vzorku NiCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem (vrchní část) a podkladem (spodní část), zvětšení 100×

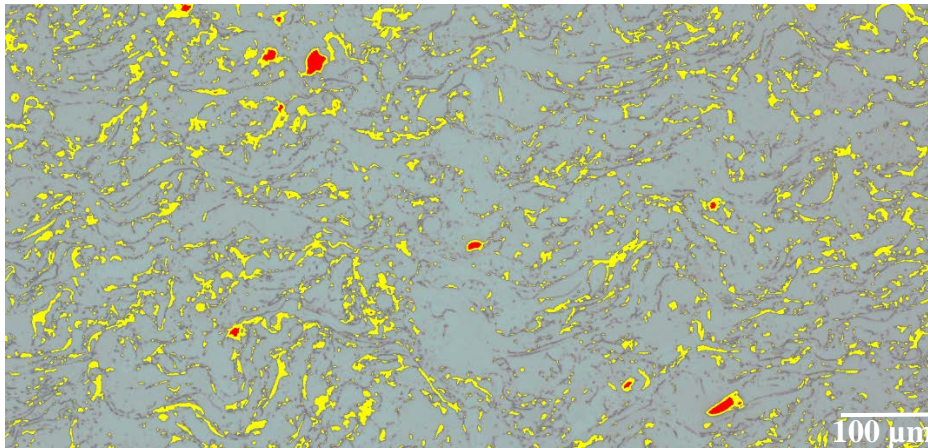


**Obrázek 3.21:** Mikrostruktura vzorku NiCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 500×

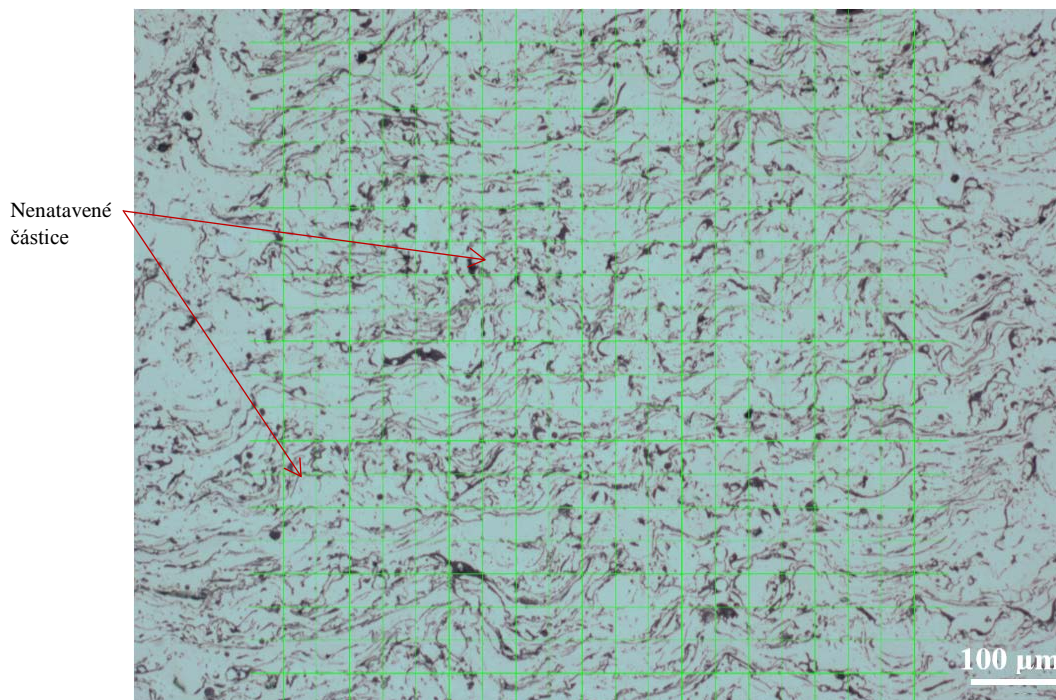
V tabulce 3.12 jsou uvedeny výsledky měření tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů a množství nenatavených částic. Na obrázku 3.22 je barevně znázorněno prahování při stanovení pórovitosti a množství oxidů pomocí softwaru NIS-Elements. Obrázek 3.23 znázorňuje vyhodnocení počtu nenatavených částic.

**Tabulka 3.12** Metalografický rozbor povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	Přípustná hodnota	Výsledná hodnota
Tloušťka [mm]	1,20	1,26	1,29	1,16	1,35	<b>1,10 – 1,40</b>	<b>1,25 ± 0,08</b>
Pórovitost [%]	0,2	0,4	0,3	-	-	≤ 8	<b>0,3 ± 0,1</b>
Množství oxidů [%]	8,1	3,7	3,7	-	-	≤ 25	<b>5,2 ± 2,5</b>
Množství nenatavených částic [%]	5,4	6,4	5,5	-	-	≤ 10	<b>5,8 ± 0,6</b>
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem [%]	20,8	10,9	21,1	4,6	12,6	≤ 25	<b>14,0 ± 7,0</b>



**Obrázek 3.22:** Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.



**Obrázek 3.23:** Mikrostruktura povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100×

Po metalografickém rozboru bylo přistoupeno ke stanovení chemického složení naneseného nástřiku na elektronovém mikroskopu, které je uvedeno v tabulce 3.13. Porovnáním křivky získané z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál bylo potvrzeno požadované chemické složení.

**Tabulka 3.13** Chemické složení povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu

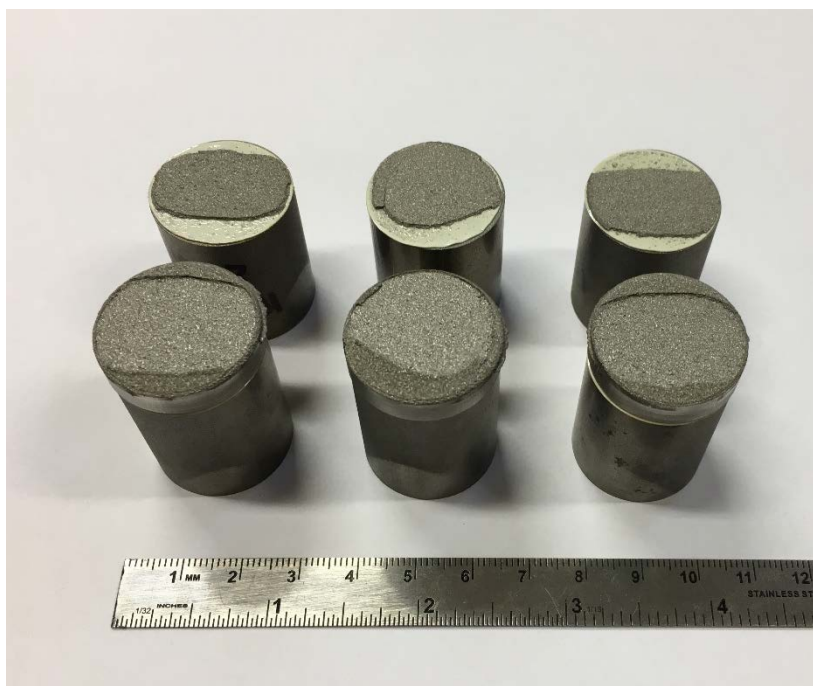
Prvek	Ni	Cr	Al	Mn	Ostatní
Hm. %	70,06	19,24	10,24	0,46	-



Jako poslední proběhlo stanovení přilnavosti žárového nástřiku k základnímu materiálu. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 3.14. Na obrázku 3.24 je fotografie zkušebních vzorků po provedení zkoušky přilnavosti.

**Tabulka 3.14** Adhezně/kohezní pevnost povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	Požadovaná hodnota	Průměrná hodnota
Adhezně/kohezní pevnost [MPa]	41,6	44,9	44,9	$\geq 40$	$43,8 \pm 1,9$



**Obrázek 3.24:** Zkušební vzorky s nástřikem NiCrAl na nerezovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti

Z fotografie na obrázku 3.24 vyplývá, že všechny 3 vzorky byly porušeny uvnitř povlaku. Jedná se tedy o kohezní porušení. U žádného vzorku však neproběhlo odtržení povlaku rovnoměrně. Povlak se kohezně odtrhl pouze v prostřední části, zatímco na bocích vzorku došlo k odtržení v místě spoje povlaku s lepidlem. Tato skutečnost by mohla ovlivnit výsledky testování, jelikož plocha odtržení je menší, než celková plocha vzorku. Vnitřní směrnice společnosti Solar Turbines však stanovuje, že vyhodnocení zkoušky má být provedeno vůči celkové ploše vzorku. Tato odchylka tedy nebude brána v potaz.

### 3.5.2 NiCrAl – Litina

Pro žárový nástřik materiálu NiCrAl na litinový podklad byly použity stejné procesní parametry jako v předchozím případě (tyto parametry jsou zaznamenány v kapitole 3.3). V tabulce 3.15 jsou uvedeny počty cyklů pro jednotlivé zkušební vzorky a naměřené tloušťky povlaků.

**Tabulka 3.15** Počty cyklů a naměřené tloušťky nástřiku NiCrAl na litinovém podkladu

Válcové vzorky	Počet cyklů	8
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,075 mm
	Naměřená tloušťka	0,6 mm
Vzorky ve tvaru kvádrů	Počet cyklů	18
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,07 mm
	Naměřená tloušťka	1,26 mm

Během vizuální kontroly výsledného povlaku nebyly nalezeny praskliny, trhliny ani zbytkový maskovací materiál. Nanesení povlaku proběhlo rovnoměrně po celé ploše vzorků. Stejně jako v předchozím případě došlo ke vzniku přestřiku na hranách podkladů u všech zkušebních vzorků. Fotografie zkušebních vzorků po provedení žárového nástřiku je na obrázku 3.25.

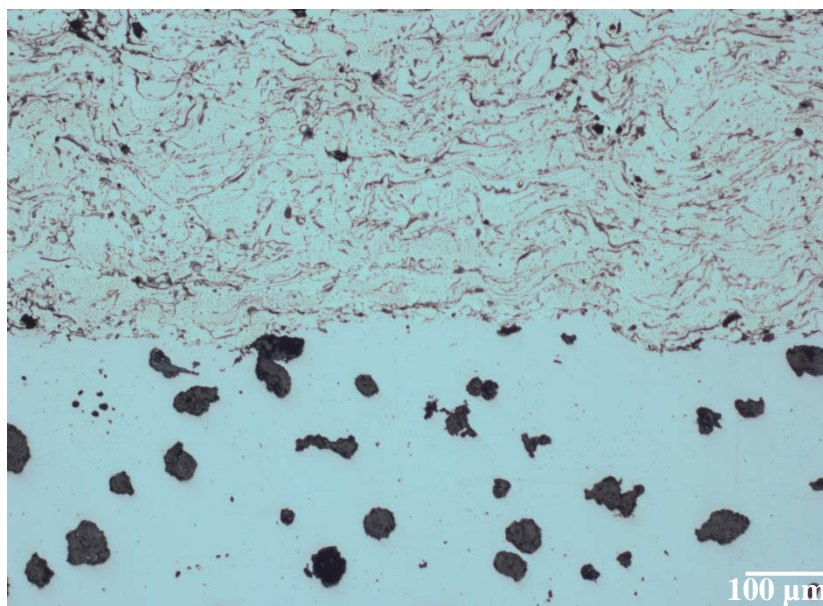
**Obrázek 3.25:** Zkušební vzorky NiCrAl na litinovém podkladu po provedení žárového nástřiku

Po vizuální kontrole následovalo měření tvrdosti výsledného povlaku, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.16. Červeně označené hodnoty (největší a nejmenší) nebyly s ohledem na specifikaci zahrnuty do výpočtů výsledných hodnot.

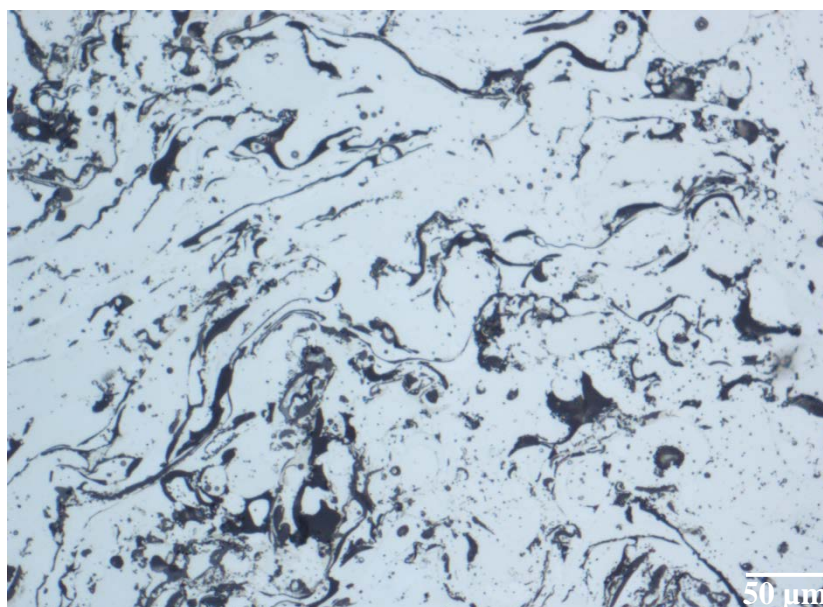
**Tabulka 3.16** Naměřené hodnoty tvrdostí pro materiál NiCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Požadovaná hodnota	Průměrná tvrdost
Tvrdost HRB	39,5	86,3	75,8	85,6	86,2	82,9	85,6	71,1	72,6	81,1	77,7	87,0	60 - 95	80,5 ± 5,8

Dále byl proveden metalografický rozbor povlaku na světelném mikroskopu, jehož výsledkem bylo určení tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů, množství nenatavených částic a posouzení kontaminace mezi podkladem a povlakem. Na obrázcích 3.26 a 3.27 je znázorněn pohled na mikrostrukturu povlaku.



**Obrázek 3.26:** Mikrostruktura vzorku NiCrAl/litina na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100×

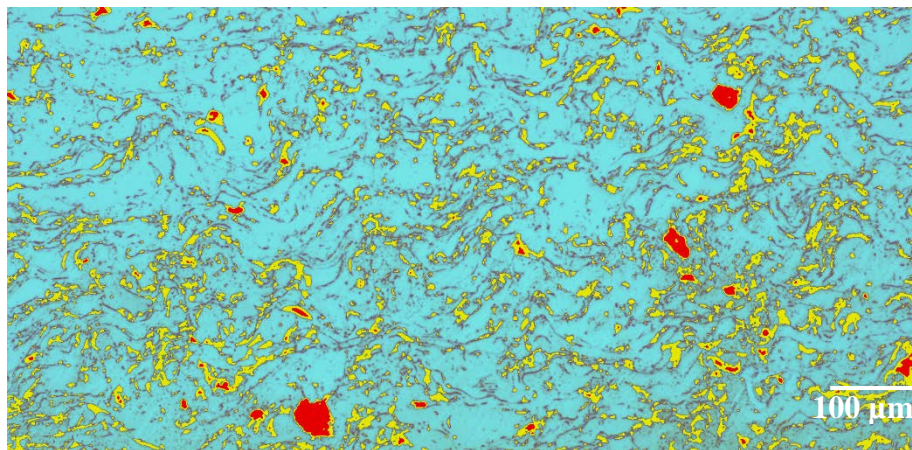
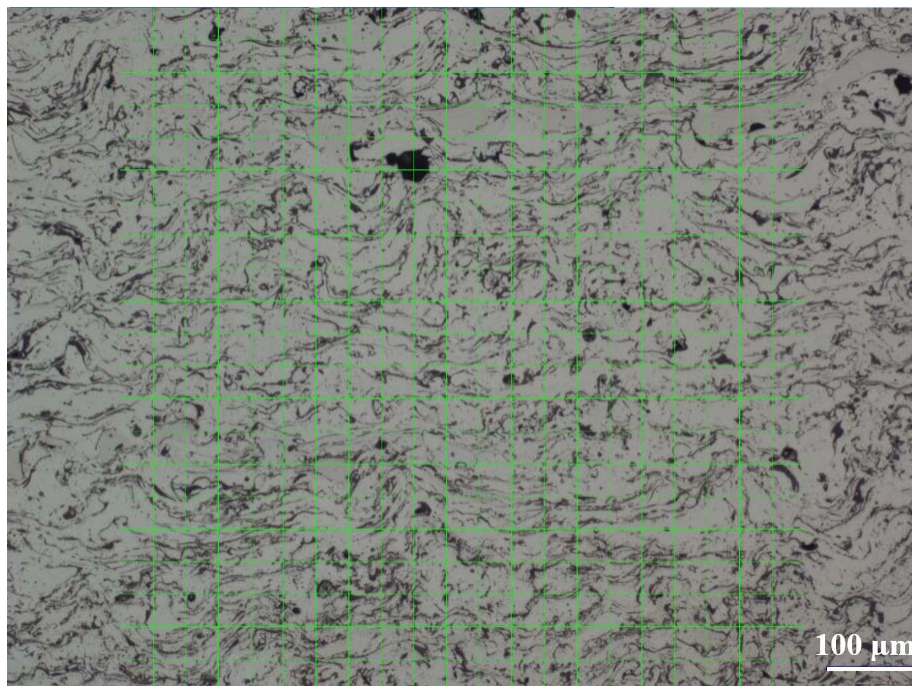


**Obrázek 3.27:** Mikrostruktura povlaku NiCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 500×

V tabulce 3.17 jsou uvedeny výsledky měření tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů a množství nenatavených částic. Obrázek 3.28 zobrazuje prahování při stanovení pórovitosti a množství oxidů pomocí softwaru NIS-Elements. Na obrázku 3.29 je znázorněno vyhodnocení množství nenatavených částic.

**Tabulka 3.17** Metalografický rozbor povlaku NiCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	Přípustná hodnota	Výsledná hodnota
Tloušťka [mm]	1,20	1,26	1,24	1,37	1,25	<b>1,10 – 1,40</b>	<b>1,26 ± 0,06</b>
Pórovitost [%]	0,6	0,4	0,2	-	-	<b>≤ 8</b>	<b>0,4 ± 0,2</b>
Množství oxidů [%]	4,2	5,9	6,0	-	-	<b>≤ 25</b>	<b>5,4 ± 1,0</b>
Množství nenatavených částic [%]	5,0	6,3	6,5	-	-	<b>≤ 10</b>	<b>5,9 ± 0,8</b>
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem [%]	9,1	6,8	11,9	17,4	11,4	<b>≤ 25</b>	<b>11,3 ± 3,9</b>

**Obrázek 3.28:** Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku NiCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.**Obrázek 3.29:** Mikrostruktura povlaku NiCrAl na litinovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100×

Následně bylo přistoupeno ke stanovení chemického složení naneseného nástřiku na elektronovém mikroskopu, které je uvedeno v tabulce 3.18. Porovnání křivky získané z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál potvrdilo požadované chemické složení.

**Tabulka 3.18** Chemické složení povlaku NiCrAl na litinovém podkladu

Prvek	Ni	Cr	Al	Mn	Ostatní
Hm. %	73,91	15,77	9,90	0,42	-

Po určení chemického složení povlaku byla stanovena přílnavost žárového nástřiku k základnímu materiálu. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 3.19. Na obrázku 3.30 je fotografie zkušebních vzorků po provedení zkoušky přílnavosti.

**Tabulka 3.19** Adhezně/kohezní pevnost povlaku NiCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	Požadovaná hodnota	Průměrná hodnota
Adhezně/kohezní pevnost [MPa]	43,7	44,3	51,5	≥ 40	<b>46,5 ± 4,4</b>



**Obrázek 3.30:** Zkušební vzorky s nástřikem NiCrAl na litinovém podkladu po provedení zkoušky přílnavosti

Vzorky byly porušeny stejně jako u předešlého nástřiku uvnitř povlaku. Jedná se tedy znovu o kohezní porušení. Odtržení povlaku neproběhlo rovnoměrně. V prostřední části se povlak odtrhl kohezně, zatímco na bocích vzorku došlo k odtržení v místě spoje povlaku s lepidlem. Vzhledem k výsledným hodnotám nebude stejně jako v předchozí kapitole uvažována možná odchylka způsobená nerovnoměrným odtržením.

### 3.5.3 FeCrAl – Nerez

Pro nástřik zkušebního materiálu FeCrAl na nerezový podklad byly zvoleny stejné procesní parametry jako pro materiál NiCrAl (tyto parametry jsou uvedeny v kapitole 3.3). V tabulce 3.20 jsou uvedeny počty cyklů pro jednotlivé zkušební vzorky a naměřené hodnoty tloušťek povlaků.

**Tabulka 3.20** Počty cyklů a naměřené tloušťky nástřiku FeCrAl na nerezovém podkladu

Válcové vzorky	Počet cyklů	6
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,090 mm
	Naměřená tloušťka	0,54 mm
Vzorky ve tvaru kvádrů	Počet cyklů	20
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,07 mm
	Naměřená tloušťka	1,40 mm

Při provádění vizuální kontroly nebyly shledány žádné praskliny, trhliny ani zbytkový maskovací materiál. Nástřik byl u všech vzorků nanesen rovnoměrně po celé ploše a také v tomto případě došlo k přestřiku na hranách podkladů. Zkušební vzorky ve stavu po žárovém nástřiku jsou zachyceny na obrázku 3.31.



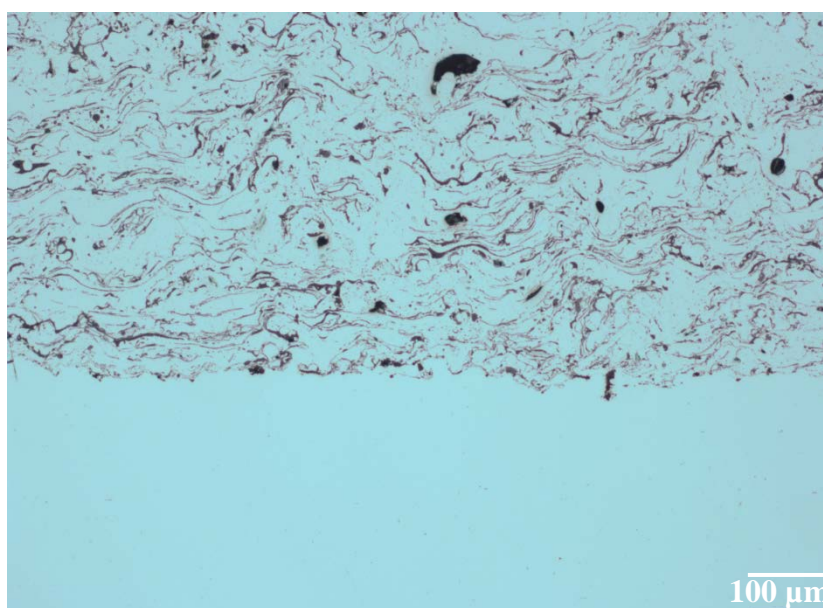
**Obrázek 3.31:** Zkušební vzorky FeCrAl na nerezovém podkladu po provedení žárového nástřiku

Po vizuální kontrole bylo provedeno měření tvrdosti vzniklého povlaku, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.21. Červeně označené hodnoty (největší a nejmenší) nebyly s ohledem na specifikaci zahrnuty do výpočtů výsledných hodnot.

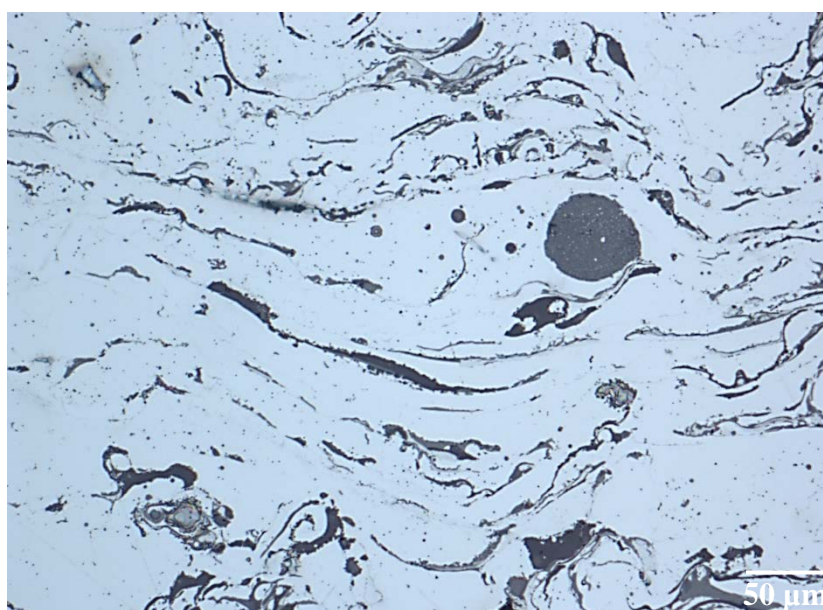
**Tabulka 3.21** Naměřené hodnoty tvrdostí pro materiál FeCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Požadovaná hodnota	Průměrná tvrdost
Tvrdost HRB	69,7	79,7	87,9	89,8	81,7	84,5	92,3	84,6	79,8	88,2	83,8	90,0	60 - 95	85,0 ± 3,9

Dále bylo přistoupeno k metalografickému rozboru povlaku na světelném mikroskopu, při němž byla stanovena tloušťka povlaku, pórovitost, množství oxidů, nenatavených částic a bylo provedeno posouzení kontaminace mezi podkladem a povlakem. Na obrázcích 3.32 a 3.33 je znázorněn pohled na mikrostrukturu povlaku.



**Obrázek 3.32:** Mikrostruktura vzorku FeCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100×

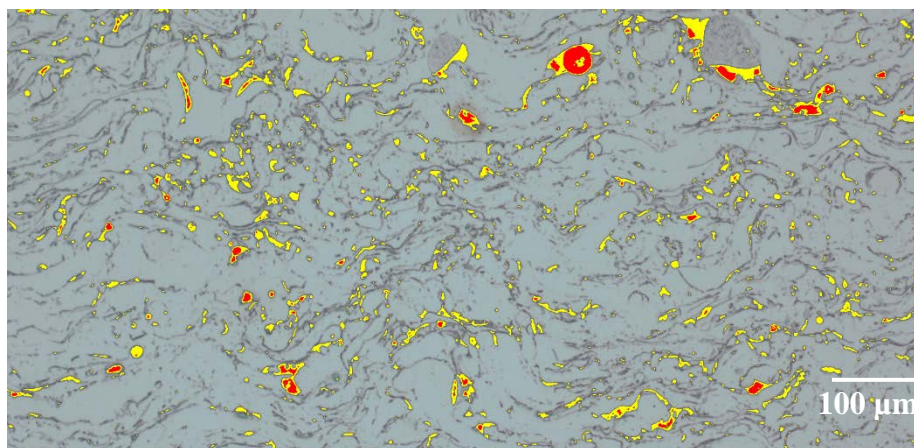


**Obrázek 3.33:** Mikrostruktura povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 500×

V tabulce 3.22 jsou uvedeny výsledky měření tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů a množství nenatavených částic. Obrázek 3.34 zobrazuje prahování při stanovení pórovitosti a množství oxidů pomocí softwaru NIS-Elements. Na obrázku 3.35 je znázorněno vyhodnocení množství nenatavených částic.

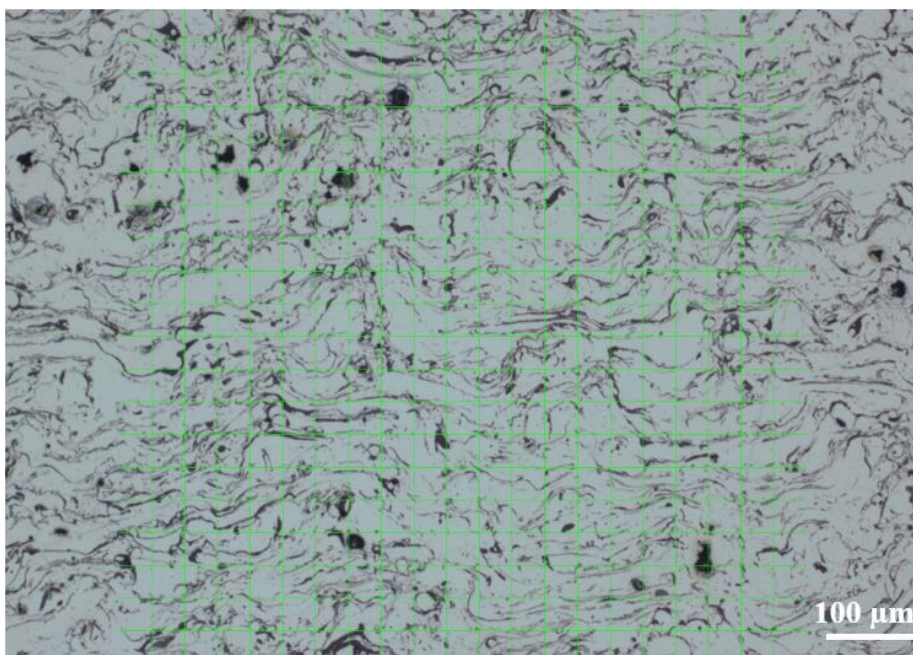
**Tabulka 3.22** Metalografický rozbor povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	Přípustná hodnota	Výsledná hodnota
Tloušťka [mm]	1,47	1,44	1,43	1,24	1,15	<b>1,10 – 1,40</b>	<b>1,34 ± 0,14</b>
Pórovitost [%]	0,6	0,8	0,3	-	-	<b>≤ 8</b>	<b>0,6 ± 0,3</b>
Množství oxidů [%]	3,4	2,4	2,4	-	-	<b>≤ 25</b>	<b>2,8 ± 0,6</b>
Množství nenatavených částic [%]	6,0	4,5	5,3	-	-	<b>≤ 10</b>	<b>5,3 ± 0,8</b>
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem [%]	9,2	14,5	13,1	16,0	7,18	<b>≤ 25</b>	<b>12,0 ± 3,7</b>



**Obrázek 3.34:** Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.





**Obrázek 3.35:** Mikrostruktura povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100×

Po metalografickém rozboru následovalo stanovení chemického složení naneseného nástřiku na elektronovém mikroskopu. Chemické složení povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu je uvedeno v tabulce 3.23. Srovnáním křivky získané z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál došlo k potvrzení požadovaného chemického složení.

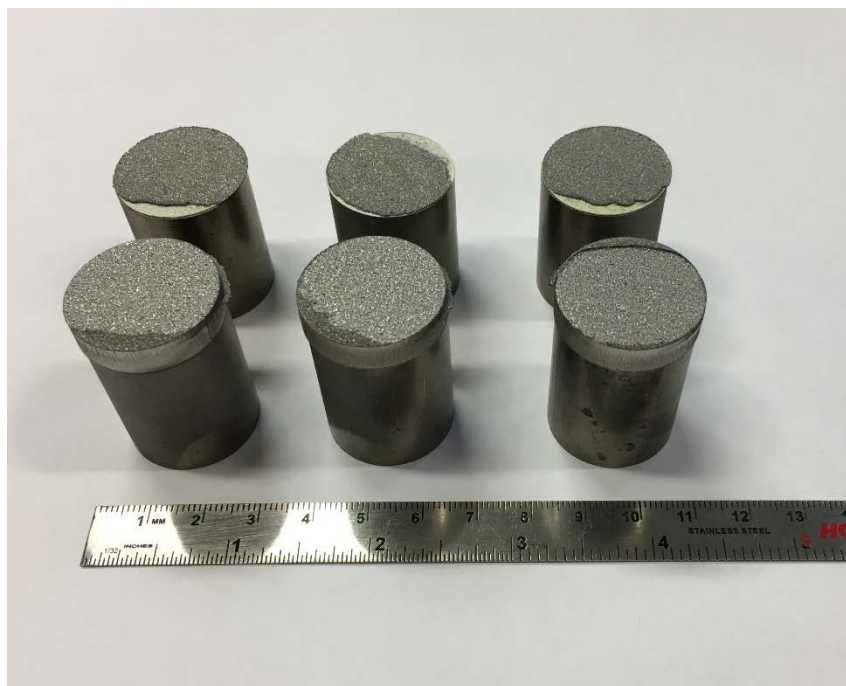
**Tabulka 3.23** Chemické složení povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu

Prvek	Fe	Cr	Al	Si	Ostatní
Hm. %	71,37	20,41	7,90	0,33	-

Jako poslední byla určena adhezně/kohezní pevnost naneseného žárového nástřiku. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 3.24. Na obrázku 3.36 je fotografie zkušebních vzorků po provedení zkoušky přilnavosti.

**Tabulka 3.24** Adhezně/kohezní pevnost povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu

Č. měření	1	2	3	Požadovaná hodnota	Průměrná hodnota
Adhezně/kohezní pevnost [MPa]	35,6	35,4	41,7	≥ 40	37,6 ± 3,6



**Obrázek 3.36:** Zkušební vzorky s nástřikem FeCrAl na nerezovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti

Během zkoušky přilnavosti došlo u všech vzorků ke koheznímu porušení uvnitř povlaku. Na bocích vzorků se však odtrhl povlak od lepidla, což by stejně jako v předchozích případech mohlo ovlivnit výsledky testování. S ohledem na vnitřní směrnici však tato skutečnost nebude brána v potaz.

### 3.5.4 FeCrAl – Litina

Žárový nástřik materiálu FeCrAl na litinový podklad probíhal za použití procesních parametrů, jež jsou uvedeny v kapitole 3.3. Naměřené hodnoty tloušťek povlaků a počty cyklů pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 3.25.

**Tabulka 3.25** Počty cyklů a naměřené tloušťky nástřiku FeCrAl na litinovém podkladu

	Počet cyklů	6
Válcové vzorky	Naměřená tloušťka	0,54 mm
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,09 mm
	Počet cyklů	17
Vzorky ve tvaru kvádrů	Naměřená tloušťka	1,28 mm
	Nárůst tloušťky během 1 cyklu	0,075 mm

Při vizuální kontrole naneseného nástřiku nebyly nalezeny praskliny, trhliny ani přebytečný maskovací materiál. Výsledný nástřik byl nanesen rovnoměrně po celé ploše vzorků. V důsledku odklonu trysky od normály povrchu základního materiálu vznikl přestřik na hranách zkušebních vzorků. Zkušební vzorky po depozici žárového nástřiku jsou zobrazeny na obrázku 3.37.



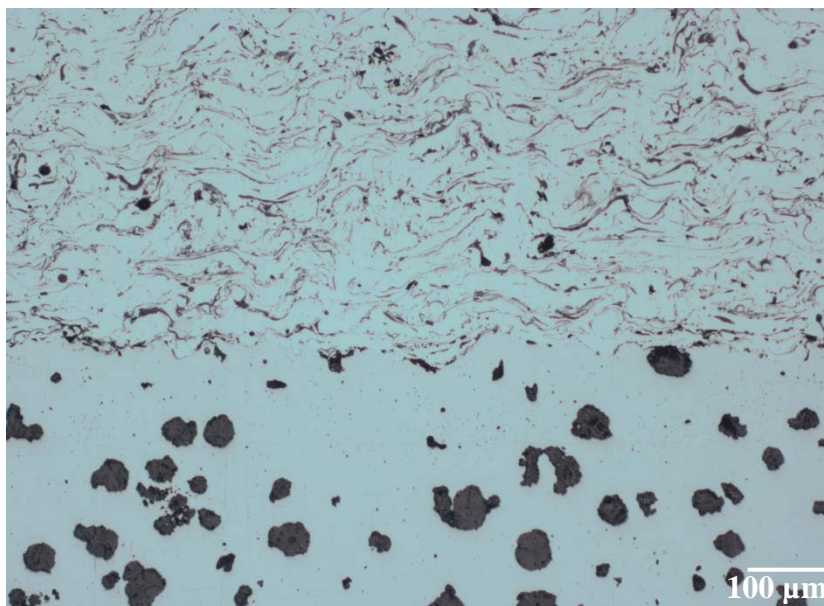
**Obrázek 3.37:** Zkušební vzorky FeCrAl na litinovém podkladu po provedení žárového nástřiku

Následně byly naměřeny hodnoty tvrdosti naneseného povlaku. Výsledky tohoto měření jsou shrnuty v tabulce 3.26. Největší a nejmenší hodnoty jsou zvýrazněny červenou barvou a s ohledem na specifikaci nebyly zahrnuty do výpočtů výsledných hodnot.

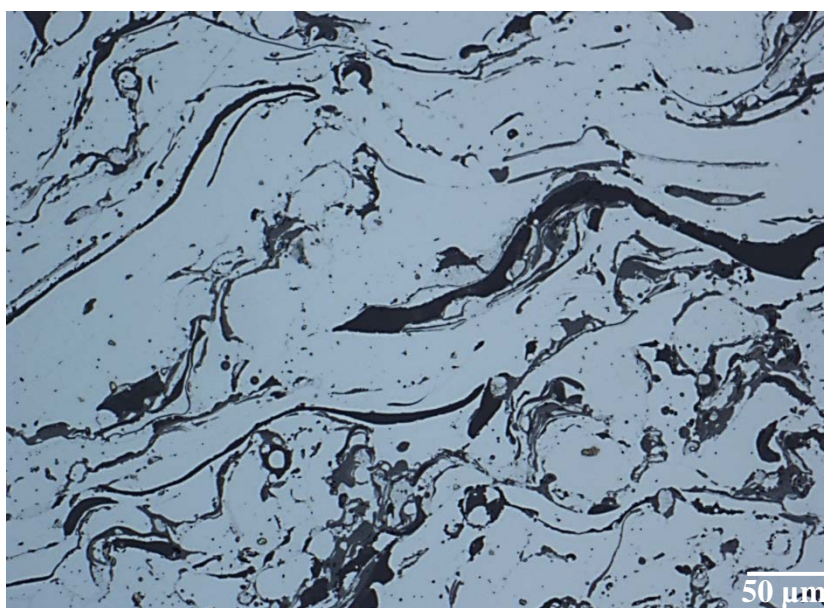
**Tabulka 3.26** Naměřené hodnoty tvrdostí pro materiál FeCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Požadovaná hodnota	Průměrná tvrdost
Tvrđost HRB	76,7	90,3	89,7	91,1	81,7	84,4	79,7	84	82,7	72,3	86,2	85,1	60 - 95	84,1 ± 4,2

Po stanovení tvrdosti HRB povlaku bylo přistoupeno k metalografickému rozboru na světelném mikroskopu. Cílem tohoto rozboru bylo určení tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů, množství nenatavených částic a posouzení kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem. Na obrázcích 3.38 a 3.39 je znázorněn pohled na mikrostrukturu povlaku.



**Obrázek 3.38:** Mikrostruktura vzorku FeCrAl/litina na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100×

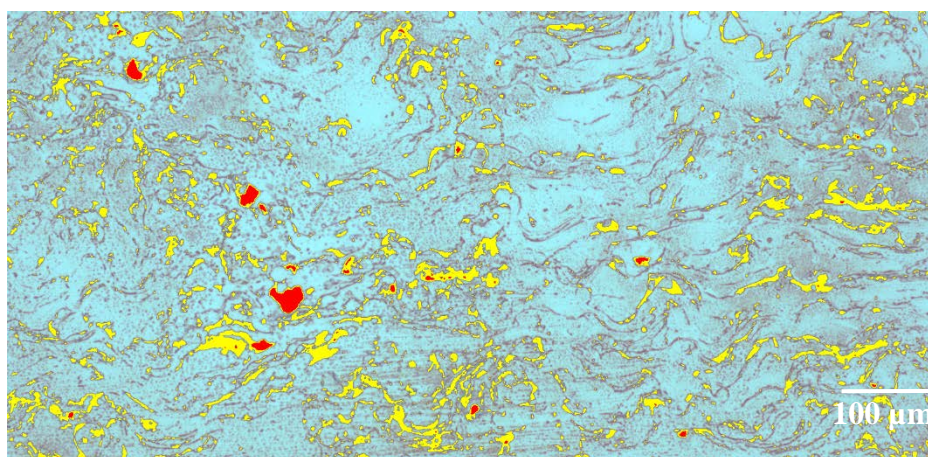
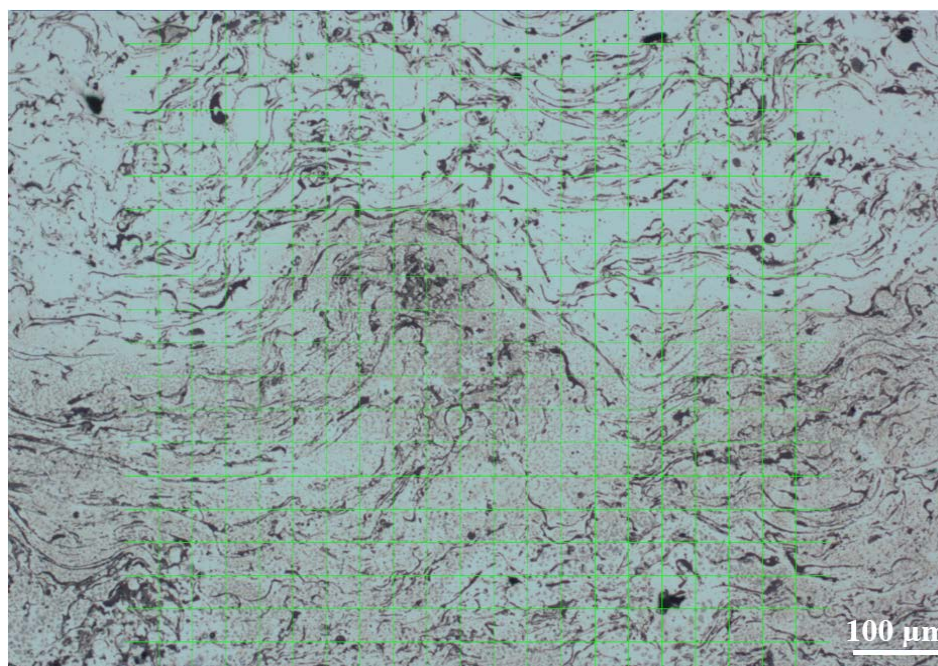


**Obrázek 3.39:** Mikrostruktura vzorku FeCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 500×

V tabulce 3.27 jsou uvedeny výsledky měření tloušťky povlaku, pórovitosti, množství oxidů a množství nenatavených částic. Na obrázku 3.40 je barevně znázorněno prahování při stanovení pórovitosti a množství oxidů pomocí softwaru NIS-Elements. Obrázek 3.41 znázorňuje vyhodnocení počtu nenatavených částic.

**Tabulka 3.27** Metalografický rozbor povlaku FeCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	4	5	Přípustná hodnota	Výsledná hodnota
Tloušťka [mm]	1,19	1,17	1,25	1,25	1,15	<b>1,10 – 1,40</b>	<b>1,20 ± 0,05</b>
Pórovitost [%]	0,1	0,3	0,6	-	-	<b>≤ 8</b>	<b>0,3 ± 0,3</b>
Množství oxidů [%]	3,0	2,78	6,1	-	-	<b>≤ 25</b>	<b>3,9 ± 1,9</b>
Množství nenatavených částic [%]	5,0	5,0	4,3	-	-	<b>≤ 10</b>	<b>4,8 ± 0,4</b>
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem [%]	11,5	9,8	9,3	17,0	20,9	<b>≤ 25</b>	<b>13,7 ± 5,0</b>

**Obrázek 3.40:** Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku FeCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.**Obrázek 3.41:** Mikrostruktura povlaku FeCrAl na litinovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100×

Po metalografickém rozboru bylo přistoupeno ke stanovení chemického složení naneseného nástřiku na elektronovém mikroskopu, které je uvedeno v tabulce 3.28. Porovnání křivky získané z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou pro daný materiál potvrdilo požadované chemické složení.

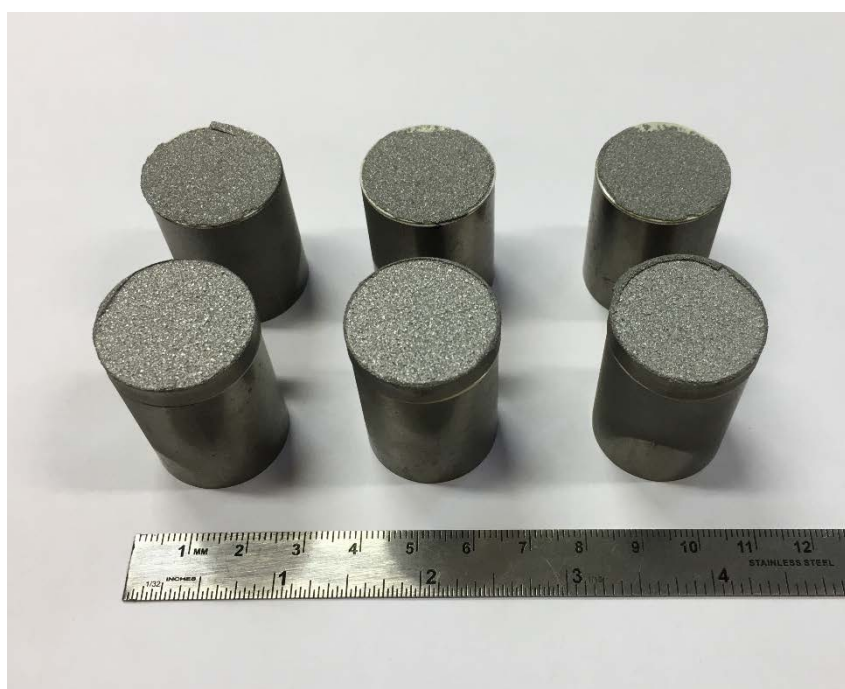
**Tabulka 3.28** Chemické složení nástřiku FeCrAl na litinovém podkladu

Prvek	Fe	Cr	Al	Si	Ostatní
Hm. %	70,69	20,51	8,36	0,44	-

Jako poslední proběhlo stanovení přilnavosti žárového nástřiku k základnímu materiálu. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 3.29. Na obrázku 3.42 je fotografie zkušebních vzorků po provedení zkoušky přilnavosti.

**Tabulka 3.29** Adhezně/kohezní pevnost povlaku FeCrAl na litinovém podkladu

Č. měření	1	2	3	Požadovaná hodnota	Průměrná hodnota
Adhezně/kohezní pevnost [MPa]	39,8	47,1	42,1	$\geq 40$	$43,0 \pm 3,7$



**Obrázek 3.42:** Zkušební vzorky s nástřikem FeCrAl na litinovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti

Stejně jako u předešlých testovaných materiálů došlo také v tomto případě ke koheznímu porušení uvnitř povlaku. Održení povlaku proběhlo rovnoměrně podél celé plochy zkušebních vzorků. Výsledky zkoušky přilnavosti se tedy dají považovat za průkazné.

### 3.6 Ekonomické zhodnocení

Vzhledem k zachování parametrů žárového nástřiku pro nově testovaný materiál bylo provedeno ekonomické zhodnocení pouze z pohledu odebíraného množství a ceny jednotlivých materiálů. Ekonomické zhodnocení změny materiálu z NiCrAl na FeCrAl je uvedeno v tabulce 3.30.

**Tabulka 3.30** Ekonomické zhodnocení změny materiálu z NiCrAl na FeCrAl

Druh použitého drátu	Očekávaná roční spotřeba [kg]	Cena za 1 kg [Kč]	Cena drátu/rok [Kč]	Výsledná úspora/rok [Kč]
NiCrAl	5 625	1 289,68	7 254 425	<b>1 829 428</b>
FeCrAl	5 625	964,44	5 424 998	

Z tabulky vyplývá, že pokud by firma přešla na materiál FeCrAl, ročně by ušetřila necelé 2 miliony korun. Toto zhodnocení se však týká pouze opravárenského centra v Žatci. Pokud by se testovaný drát osvědčil v reálném provozu, uvažovala by společnost Solar Turbines o použití materiálu FeCrAl v opravárenských centrech po celém světě. V takovém případě by celosvětová spotřeba byla téměř desetinásobná oproti aktuální spotřebě v žateckém závodě, čímž by se výsledná roční úspora blížila 20 milionům Kč.

## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Testování požadovaných vlastností žárového nástřiku u materiálů NiCrAl a FeCrAl probíhalo na vzorcích ve formě kvádrů a válečků, jejichž rozměry byly stanoveny interní směrnici společnosti Solar Turbines. Jedna sada vzorků byla vyrobena z korozivzdorné austenitické oceli 1.4301, zatímco druhá sada z litiny s kuličkovým grafitem s feriticko-perlitickou maticí. Před žárovým nástřikem bylo nutné zajistit požadovanou drsnost povrchu základního materiálu, a proto byly vzorky otryskány abrazivem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. V tabulce 4.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností testovaných vzorků ve srovnání s požadovanou hodnotou.

**Tabulka 4.1** Naměřené hodnoty drsností ve srovnání s požadovanou hodnotou

Základní materiál	Požadovaná hodnota drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná hodnota Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Nerez	$\geq 3,2$	$7,6 \pm 0,4$
Litina		$7,1 \pm 0,7$

Z tabulky vyplývá, že u obou sad testovaných vzorků bylo dosaženo vyhovující hodnoty drsnosti. Po naměření drsnosti bylo přistoupeno k provedení žárového nástřiku, přičemž procesní parametry byly u obou testovaných materiálů totožné. Při vyhodnocování jednotlivých vzorků byla použita vnitřní směrnice společnosti Solar Turbines, která proces kontroly rozděluje celkem na 6 částí: vizuální kontrolu, metalografický rozbor, rozbor chemického složení, měření tloušťky povlaku, tvrdosti a adhezně/kohezní pevnosti.

Během vizuální kontroly došlo k vyhodnocení celistvosti povlaku. U všech testovaných vzorků byl nástřik nanesen rovnoměrně po celé ploše a vzorky nevykazovaly stopy po trhlinách, dutinách ani jiných defektech. U některých vzorků v důsledku odklonu trysky od normály povrchu základního materiálu došlo ke vzniku přestřiku na hranách, což však nijak neovlivnilo vyhodnocované vlastnosti. Po vizuální kontrole následovalo měření tvrdosti HRB. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 4.2.

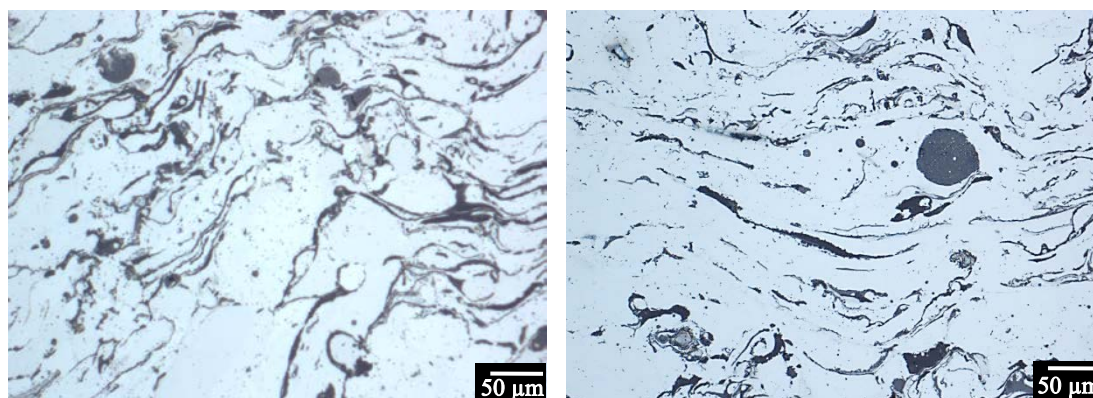
**Tabulka 4.2** Naměřené hodnoty tvrdostí HRB ve srovnání s požadovanou hodnotou

Materiál drátu	Základní materiál	Požadovaná hodnota tvrdosti HRB	Průměrná hodnota tvrdosti HRB
NiCrAl	Nerez	60 - 95	$82,7 \pm 6,4$
	Litina		$80,5 \pm 5,8$
FeCrAl	Nerez		$85 \pm 3,9$
	Litina		$84,1 \pm 4,2$

Naměřené hodnoty tvrdostí u všech zkoumaných vzorků ležely v požadovaném rozmezí 60 – 95 HRB. Největší tvrdosti bylo dosaženo u povlaku FeCrAl na nerezovém



podkladu (85 HRB), zatímco nejnižší tvrdost vykazoval povlak NiCrAl na podkladu z litiny (80,5 HRB). Následně bylo přistoupeno k metalografickému rozboru na světelném mikroskopu s cílem určit tloušťku povlaku, pórovitost, množství oxidů, množství nenatavených částic a posoudit kontaminaci na rozhraní mezi podkladem a povlakem. Na obrázku 4.1 je znázorněn rozdíl v mikrostruktuře vzorků NiCrAl a FeCrAl na nerezovém podkladu při stejném zvětšení. Materiál FeCrAl vykazuje větší míru uspořádání deformovaných částic. V tabulce 4.3 jsou poté shrnuty jednotlivé charakteristiky metalografického rozboru pro všechny zkoumané skupiny vzorků.



**Obrázek 4.1:** Srovnání mikrostruktury jednotlivých povlaků na nerezovém podkladu, zvětšení 500×. Vlevo materiál NiCrAl, vpravo FeCrAl.

**Tabulka 4.3** Charakteristiky získané z metalografického rozboru ve srovnání s požadovanými hodnotami

Zjišťovaná charakteristika	NiCrAl		FeCrAl		Přípustná hodnota
	Podklad nerez	Podklad litina	Podklad nerez	Podklad litina	
Tloušťka [mm]	1,25±0,08	1,26±0,06	1,34±0,14	1,20±0,05	1,10 – 1,40
Pórovitost [%]	0,3±0,1	0,4±0,2	0,6±0,3	0,3±0,3	≤ 8
Množství oxidů [%]	5,2±2,5	5,4±1,0	2,8±0,6	3,9±1,9	≤ 25
Množství nenatavených částic [%]	5,8±0,6	5,9±0,8	5,3±0,8	4,8±0,4	≤ 10
Kontaminace na rozhraní mezi podkladem a povlakem [%]	14,0±7,0	11,3±3,9	12,0±3,7	13,7±5,0	≤ 25

Z výsledků uvedených v tabulce 4.3 vyplývá, že všechny vzorky splnily požadavky stanovené specifikací. Po metalografickém rozboru bylo přistoupeno ke stanovení chemického složení nástřiku pomocí elektronového mikroskopu. Chemické složení bylo vyhodnocováno porovnáním získané křivky z energiově disperzního spektrometru s ideální křivkou daného materiálu. Ve všech případech došlo k dosažení požadovaného chemického složení. Ideální křivky testovaných materiálů jsou majetkem společnosti Solar Turbines, a proto nejsou součástí této práce.

Jako poslední proběhlo stanovení přilnavosti žárového nástřiku k základnímu materiálu. U všech zkoumaných vzorků došlo k porušení uvnitř povlaku – jedná se tedy o kohezní porušení. Výsledky tohoto měření pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 4.4.

**Tabulka 4.4** Kohezní pevnost testovaných vzorků

Materiál drátu	Základní materiál	Požadovaná hodnota kohezní pevnosti [MPa]	Naměřená průměrná hodnota kohezní pevnosti [MPa]
NiCrAl	Nerez	≥ 40	<b>43,8 ± 1,9</b>
	Litina		<b>46,5 ± 4,4</b>
FeCrAl	Nerez		<b>37,6 ± 3,6</b>
	Litina		<b>43,0 ± 3,7</b>

Z tabulky vyplývá, že kromě žárového nástřiku FeCrAl na nerezovém podkladu došlo u všech testovaných vzorků ke splnění stanovených limitů kohezní pevnosti. Po konzultaci s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines bylo i vzhledem k naměřené hodnotě kohezní pevnosti u nástřiku FeCrAl na litinovém podkladu rozhodnuto, že naměřená hodnota u vzorku FeCrAl na nerezovém podkladu bude akceptována.

## 5 ZÁVĚR

Předkládaná práce hodnotí optimalizaci žárového nástřiku elektrickým obloukem při generální opravě komponent průmyslových plynových turbín změnou používaného materiálu. Byly testovány materiály NiCrAl (původně používaný materiál) a FeCrAl (experimentální materiál) na dvou různých typech podkladů. Pro vyhodnocení byly využity techniky elektronové a světelné mikroskopie a mechanické zkoušky.

Po depozici žárového nástřiku následovalo testování specifických vlastností jednotlivých vzorků. Cílem zkoušek bylo zjistit, zda experimentální materiál FeCrAl dosahuje vlastností materiálu NiCrAl, který je používán v současnosti a zda vlastnosti obou zkoumaných materiálů splňují limity určené specifikací společnosti Solar Turbines. Zároveň byla zaměřena pozornost na to, jakým způsobem ovlivňuje typ podkladu výsledné vlastnosti naneseného povlaku.

S ohledem na výsledky provedených testů lze konstatovat, že vlastnosti materiálu FeCrAl se nejenom blíží vlastnostem NiCrAl, ale v mnoha případech je dokonce převyšují. Materiál FeCrAl tak splnil veškeré požadavky, kterých bylo nutné dosáhnout. Pouze u povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu nebylo dosaženo kohezní pevnosti 40 MPa, nýbrž hodnoty 37,56 MPa. Po dohodě s pracovníky výzkumného centra společnosti Solar Turbines v San Diegu bylo i s přihlédnutím k výsledkům zkoušky přilnavosti u litinového podkladu stanoveno, že tato hodnota bude akceptována.

V této práci došlo zároveň ke kontrole vlastností materiálu NiCrAl, který je v současné době společností Solar Turbines používán. Daný materiál splnil veškeré požadavky, které byly určeny vnitřní směrnici, čímž byla ověřena správnost procesu.

Vliv podkladového materiálu na výsledné vlastnosti žárového nástřiku by měl být zanedbatelný, jelikož podstata spojení povlaku se základním materiálem vychází z mechanického zakotvení částic. Tato teorie byla pro testované podkladové materiály v zásadě potvrzena, jelikož vlastnosti stejného materiálu<sup>12</sup> žárového nástřiku na dvou různých podkladech byly téměř totožné. Vzniklé odchylky mohly být způsobeny rozdílnou tepelnou vodivostí litiny a nerez, která má vliv na rychlost tuhnutí žárového nástřiku.

V návaznosti na konzultaci výsledků této práce s výzkumným ústavem společnosti Solar Turbines v San Diegu byl navržen další postup testování, který bude spočívat v nanesení žárového nástřiku FeCrAl na konkrétní díly plynové turbíny. Tyto komponenty budou následně umístěny do testovací turbíny a nechají se určitý počet cyklů v provozu. Pokud by výsledky testování vyšly podle očekávání a společnost by se rozhodla pro záměnu používaného drátu, celková roční úspora by pro žatecký závod činila téměř 2 miliony korun. V případě, že se testovaný drát osvědčí v reálném provozu, uvažuje společnost Solar Turbines o jeho použití v opravárenských centrech po celém světě. V takovém případě by celosvětová spotřeba byla téměř desetinásobná oproti aktuální spotřebě v žateckém závodě, čímž by se roční úspora blížila 20 milionům Kč.

Předkládaná diplomová práce je součástí projektu, který bude v prosinci tohoto roku soutěžit o „Cenu prezidenta společnosti Solar Turbines za rok 2018“.

---

<sup>12</sup> toto tvrzení platí pro materiály NiCrAl i FeCrAl

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] UNGER, Darian a Howard HERZOG. *Comparative Study on Energy R&D Performance: Gas Turbine Case Study* [online]. Massachusetts Institute of Technology, 1998 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/1998/08/MIT-EL-98-003.pdf>
- [2] LANDIS, Fred. *Gas-turbine engine* [online]. Encyclopaedia Britannica, 1999 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/gas-turbine-engine>
- [3] MUTASIM, Z. Z. *Internal Technical Report No. TTS-117-398-2M*. Solar Turbines Inc., 1998.
- [4] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
- [5] WEIDMANN, Elisabeth, A. GUESNIER a B. DUCLOS. *Metallographic preparation of thermal spray coatings* [online]. Copenhagen, Denmark: Struers A/S, s. 6 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://www.struers.com/-/media/Library/Brochures/English/Application-Note-Spray-Coatings.pdf>
- [6] O Solar Turbines. *Solar Turbines* [online]. Solar Turbines Czech Republic, 2015 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://solarturbines.jobs.cz/?page=o-solar-turbines>
- [7] Solar Turbines. *Caterpillar* [online]. Caterpillar, 2017 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.caterpillar.com/en/company/brands/solar-turbines.html>
- [8] *TURBOMACHINERY PACKAGE SPECIFICATION: Taurus™ 70 Compressor Set and Mechanical Drive*. San Diego: Solar Turbines Incorporated, 2009.
- [9] KOCÁB, Jindřich. *Letadlové motory*. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- [10] BREEZE, Paul A. *Power generation technologies*. Burlington: Newnes, 2005. ISBN 978-0-7506-6313-7.
- [11] SOARES, Claire. *Gas turbines: a handbook of air, land, and sea applications*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0-7506-7969-5.
- [12] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [13] HURT, Hugh H. *Aerodynamics for naval aviators*. New York: Skyhorse Pub., 2012. ISBN 9781616084394.
- [14] LIEUWEN, TIMOTHY C. a VIGOR YANG. *Gas Turbine Emissions*. 2. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-0-521-76405-6.

- [15] HARDWICKE, Canan U. a Yuk-Chiu LAU. Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2013, **22**(5), 564-576 [cit. 2017-04-06]. DOI: 10.1007/s11666-013-9904-0. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-013-9904-0>
- [16] TUCKER, Robert C. Thermal Spray Coatings. COTELL, C.M., J.A. SPRAGUE a F.A. SMIDT. *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*. USA: ASM International, 1994, s. 497-509. ISBN 978-0-87170-384-2.
- [17] *Thermal Spray Technology* [online]. Flame Spray Technologies, 2016 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/downloads/pdf/71/thermal-spray-technology.pdf>
- [18] DORFMAN, M.R. a E. NOVINSKI. Let's Talk Thermal Spray. *Basics for Finishers*. Westbury, New York: Metco/Perkin, 1993.
- [19] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka, Radek ENŽL a Olga BLÁHOVÁ. *Žárové nástřiky : moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2003 [cit. 2017-06-27]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20071121025027/http://www.kmm.zcu.cz:80/CD/content/index.html>
- [20] AMBROŽ, Oldřich a Jiří KAŠPAR. *Žárové nástřiky a jejich průmyslové využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00347-4.
- [21] Electric Arc Wire Spray. *Oerlikon Metco* [online]. Oerlikon, 2017 [cit. 2017-06-12]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-services/coating-services-thermal-spray/thermal-spray-processes/processes-electric-arc-wire/>
- [22] DAVIS, J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. 3rd ed. Ohio (USA): ASM International, 2009. ISBN 978-0-87170-795-6.
- [23] Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, (5) [cit. 2017-07-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html>
- [24] ZAJCHOWSKI, P. a H. B. CRAPO. Evaluation of three dual-wire electric arc-sprayed coatings: Industrial note. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 1996, **5**(4), 457-462 [cit. 2017-07-07]. DOI: 10.1007/BF02645276. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02645276>
- [25] SAMPSON, E. R. a M. P. ZWETSLOOT. Arc spray process for the aircraft and stationary gas turbine industry. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 1997, **6**(2), 150-152 [cit. 2017-07-07]. DOI: 10.1007/s11666-997-0006-8. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-997-0006-8>

- [26] PTÁČEK, Luděk et al. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003, xii, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [27] OHRING, Milton. *Engineering materials science.* San Diego: Academic Press, c1995, xviii, 827 p. ISBN 0-12-524995-0.
- [28] SURYANARAYANA, C. *Experimental techniques in materials and mechanics.* Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4398-9523-8.
- [29] CAIS, Jaromír. *Elektronová mikroskopie. Metalografie. Metodická příručka* [online]. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015 [cit. 2017-08-16]. ISBN 978-80-86302-67-6. Dostupné z:  
[http://www.csvs.cz/projekty/2014\\_veda\\_pro\\_zivot/data/11\\_KA3\\_Jaromir\\_Cais\\_2\\_Elektronova\\_%20mikroskopie\\_a\\_%20EDS\\_%20analyza\\_metodicka\\_prirucka.pdf](http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektronova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analyza_metodicka_prirucka.pdf)
- [30] FIALA, Jaroslav, Pavol ŠUTTA a Václav MENTL. *Struktura a vlastnosti materiálů.* Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1223-0.
- [31] Zkouška tvrdosti dle Rockwella. *Converter* [online]. 2002 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Průměrné rozměry a hmotnosti balení jednotlivých setů motorů (turbína + generátor) .....	17
Obrázek 2.2: Opravárenské centrum v Žatci .....	18
Obrázek 2.3: Turbína Taurus 70 s dvouhřídelovým uspořádáním [8].....	19
Obrázek 2.4: p-v diagram turbínového motoru [9].....	19
Obrázek 2.5: Schéma plynové turbíny s otevřeným oběhem [10].....	20
Obrázek 2.6: Řez axiálním kompresorem [13].....	21
Obrázek 2.7: Olopatkovaná podélně dělená kompresorová skříň [9].....	22
Obrázek 2.8: Princip funkce spalovací komory [9] .....	22
Obrázek 2.9: Schéma spalovací komory [9] .....	23
Obrázek 2.10: Turbinová část a lopatkování turbíny [13].....	24
Obrázek 2.11: Teplotní pole chlazené a nechlazené lopatky [9] .....	25
Obrázek 2.12: Využití parní a plynové turbíny při výrobě elektrické energie [14].....	26
Obrázek 2.13: Schéma plynové turbíny s výměníkem [14].....	26
Obrázek 2.14: Schéma plynové turbíny s dělenou kompresí [14].....	27
Obrázek 2.15: Proces žárového nástřiku [17].....	28
Obrázek 2.16: Řez povlakem [17] .....	30
Obrázek 2.17: Vliv prodlevy mezi tryskáním a žárovým nástřikem na přilnavost povlaku pro nanášený materiál NiAl [20] .....	31
Obrázek 2.18: Řez částicí přidavného materiálu typu Ni-Ti [20].....	32
Obrázek 2.19: Maskování ložiskového domku pomocí maskovací pásky .....	33
Obrázek 2.20: Proces žárového nástřiku elektrickým obloukem [21].....	35
Obrázek 2.21: Schéma konvenční a vysokorychlostní trysky pro žárový nástřik elektrickým obloukem [24].....	36
Obrázek 2.22: Srovnání závislosti kohezní pevnosti na tloušťce povlaku u nástřiku plazmou a elektrickým obloukem (materiál povlaku Ni-5Al, podklad z nerezové oceli) [25].....	36
Obrázek 3.1: Boxy pro aplikaci žárového nástřiku.....	37
Obrázek 3.2: Podavač drátu .....	38
Obrázek 3.3: Zdroj napájení .....	38
Obrázek 3.4: Nástřiková pistole upevněná na rameni manipulačního robotu .....	38
Obrázek 3.5: Testovací vzorky v základním stavu .....	41

Obrázek 3.6: Měření drsnosti povrchu pomocí přístroje MarSurf M 300 C .....	42
Obrázek 3.7: Srovnání vzorků z nerezů před a po tryskání .....	42
Obrázek 3.8: Přípravek s testovacími vzorky upevněný k rotačnímu stolu .....	43
Obrázek 3.9: Průběh žárového nástřiku testovacích vzorků .....	44
Obrázek 3.10: Vzorky připravené pro světelnou mikroskopii. Zleva: NiCrAl/nerez, FeCrAl/nerez, FeCrAl/litina, NiCrAl/litina .....	46
Obrázek 3.11: Metalografický světelný mikroskop Nikon Eclipse MA200 .....	47
Obrázek 3.12: Vyhodnocované položky u mikrostruktury vzorku NiCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem (vrchní část) a podkladem (spodní část), zvětšení 100×.....	47
Obrázek 3.13: Elektronový mikroskop JEOL JSM-6460LV s energiově disperzním spektrometrem EDAX APOLLO XL.....	48
Obrázek 3.14: Přehled signálů vznikajících v elektronovém mikroskopu [28] .....	49
Obrázek 3.15: Princip zkoušky měření tvrdosti dle Rockwella [31] .....	50
Obrázek 3.16: Tvrdoměr TRU-BLUE II.....	50
Obrázek 3.17: Schéma zkoušky přilnavosti [19] .....	51
Obrázek 3.18: Univerzální trhací stroj INSTRON 5982 [19] .....	51
Obrázek 3.19: Zkušební vzorky NiCrAl na nerezovém podkladu po provedení žárového nástřiku .....	52
Obrázek 3.20: Mikrostruktura vzorku NiCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem (vrchní část) a podkladem (spodní část), zvětšení 100×.....	53
Obrázek 3.21: Mikrostruktura vzorku NiCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 500×	54
Obrázek 3.22: Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou. ....	55
Obrázek 3.23: Mikrostruktura povlaku NiCrAl na nerezovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100× .....	55
Obrázek 3.24: Zkušební vzorky s nástřikem NiCrAl na nerezovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti .....	56
Obrázek 3.25: Zkušební vzorky NiCrAl na litinovém podkladu po provedení žárového nástřiku .....	57
Obrázek 3.26: Mikrostruktura vzorku NiCrAl/litina na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100× .....	58
Obrázek 3.27: Mikrostruktura povlaku NiCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 500×.	58
Obrázek 3.28: Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku NiCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou. ....	59



Obrázek 3.29: Mikrostruktura povlaku NiCrAl na litinovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100× .....	59
Obrázek 3.30: Zkušební vzorky s nástřikem NiCrAl na litinovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti .....	60
Obrázek 3.31: Zkušební vzorky FeCrAl na nerezovém podkladu po provedení žárového nástřiku.....	61
Obrázek 3.32: Mikrostruktura vzorku FeCrAl/nerez na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100×.....	62
Obrázek 3.33: Mikrostruktura povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 500× .....	62
Obrázek 3.34: Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.....	63
Obrázek 3.35: Mikrostruktura povlaku FeCrAl na nerezovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100× .....	64
Obrázek 3.36: Zkušební vzorky s nástřikem FeCrAl na nerezovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti .....	65
Obrázek 3.37: Zkušební vzorky FeCrAl na litinovém podkladu po provedení žárového nástřiku.....	66
Obrázek 3.38: Mikrostruktura vzorku FeCrAl/litina na rozhraní mezi povlakem a podkladem, zvětšení 100×.....	67
Obrázek 3.39: Mikrostruktura vzorku FeCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 500× ..	67
Obrázek 3.40: Stanovení množství oxidů a pórovitosti povlaku FeCrAl na litinovém podkladu, zvětšení 100×. Póry jsou znázorněny červenou barvou, oxidy žlutou.....	68
Obrázek 3.41: Mikrostruktura povlaku FeCrAl na litinovém podkladu se znázorněnou mřížkou pro výpočet množství nenatavených částic, zvětšení 100× .....	68
Obrázek 3.42: Zkušební vzorky s nástřikem FeCrAl na litinovém podkladu po provedení zkoušky přilnavosti .....	69
Obrázek 4.1: Srovnání mikrostruktury jednotlivých povlaků na nerezovém podkladu, zvětšení 500×. Vlevo materiál NiCrAl, vpravo FeCrAl. ....	72