

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**OPTIMALIZACE PROCESU ALITOVÁNÍ TURBÍNOVÝCH LOPATEK
THE PROCES OF OPTIMIZATION THE ALUMINIZING PHASE
OF TURBINE BLADES**

AUTOR: Bc. Marie Rohlová

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová Ph.D.

KONZULTANT: Ing. Dana Steffanová

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rohlová Jméno: Marie Osobní číslo: 397307
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 procesu alitování turbínových lopatek

Název diplomové práce anglicky:

The process of optimization the aluminizing phase of turbine blades

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je kvalitativní zhodnocení alitačních vrstev vytvořených z různých druhů prášků, za rozdílných podmínek přípravy a průběhu vlastního difuzního žhánání.

1. Literární rešerše v problematice alitačních vrstev.
2. Výběr typu prášku a podmínek tepelného zpracování lopatek.
3. Návrh a provedení experimentu.
4. Vyhodnocení alitačních vrstev.
5. Závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1.] ZUBČENKO, POD RED. A. S. Alfred. Maročnik stalej i splavov. 2. izd. pererabot i dop. Moskva : Mašinostroenie, 2003. ISBN 52-170-3177-8.
- [2.] HOŘEJŠÍ, Jakub. Hodnocení struktury turbínových lopatek motoru AI - 25TL. Praha: LOM Praha s.p. , 2003.
- [3.] BELAN, J., SKOČOVSKÝ P. Mikrostructural Analysis of Turbine after Long-time Working, Material Engineerin, Vol.9, 2002.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Elena Čížmarová Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Ing. Dana Steffanová, LOM PRAHA s.p.

Datum zadání diplomové práce: 24.04.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 31.07.2017

Platnost zadání diplomové práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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.

25.4.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Práce pojednává o principu a způsobu vytváření alitačních vrstev sloužících jako ochrana proti vysokoteplotní korozi, aplikovaném pro vícestupňové turbomotory. Zkoumá výslednou kvalitu alitační vrstvy v závislosti na předpřípravě základního povrchu, způsobu jejího nanášení a dále pak na podmínkách difuzního žíhání.

Klíčová slova

Alitace, Turbínová lopatka, Difúzní žíhání, Alitační vrstva

Annotation

The thesis deals with the principle and the creating method of the alitation layer which is used as protection against high temperature corrosion in application to the multistage turboengines. The thesis aim is to examines the final quality of the wide range of the alitation layers depending on the preparation of the blade surface, the method of its application and further on the conditions of the diffusion annealing.

Keywords

Alitation, Aluminide coatings, Turbine blade, Diffusion annealing

Poděkování

Ráda bych poděkovala Doc. Ing. Janě Sobotové, Ph.D. za věcné připomínky k práci, Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při práci, konzultantce Ing. Daně Steffanové za poskytnutí potřebných informací a své vedoucí práce Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za vedení.

Obsah

1 Úvod	9
2 Teoretická část	11
2.1 Lopatkové stroje	11
2.1.1 Základní rozdělení lopatkových strojů	11
2.2 Plynové turbíny v letectví	12
2.3 Turbohřídelový motor TV3-117	13
2.3.1 Princip motoru TV3-117	13
2.3.2 Turbína kompresoru	16
2.3.3 Turbínové lopatky na motorech TV3-117	17
2.4 Materiály používané pro lopatky plynových turbín	17
2.4.1 Korozivzdorné slitiny na bázi Ni	18
2.4.2 Žáropevné slitiny Ni a Co	19
2.4.3 Směry vývoje žárovevných superslitin	20
2.5 Difuze	20
2.5.1 Mechanismy difuze	21
2.5.2 Atomová teorie difuze	22
2.5.3 Fenomenologická teorie difuze	22
2.5.4 Degradace difuzních vrstev	23
2.6 Alitace niklových slitin	23
2.6.1 Tepelné bariéry	24
2.6.2 Vazebné povlaky	24
2.6.3 Difúzní vrstvy	24
3 Experimentální část	26
3.1 Hodnocení alitačních vrstev	26
3.2 Výběr lopatek pro zkoušky alitace	26
3.3 Materiál lopatek pro experimentální hodnocení	27
3.4 Obnovení alitované vrstvy	27
3.5 Vyhodnocení alitace	28

3.6	Příprava vzorků pro kontrolu lopatek	28
3.6.1	Leptání vzorků.....	29
3.7	Druhy alitačních prášků	29
3.7.1	Prášek číslo 1	30
3.7.2	Prášek číslo 2.....	30
3.7.3	Alitační barva.....	30
3.8	Doporučený postup opravy alitační vrstvy.....	31
3.9	Možnosti změn postupu alitace	32
3.9.1	Předúprava vzorků	32
3.9.2	Tepelné zpracování.....	33
3.10	Experimentální program	35
3.10.1	Klasická předúprava a klasické tepelné zpracování.....	36
3.10.2	Klasická předúprava a tepelné zpracování s předehřevem	39
3.10.3	Leptání a klasické tepelné zpracování.....	43
3.10.4	Leptání a tepelné zpracování s předehřevem	46
4	Shrnutí.....	49
5	Závěr	52
6	Seznam obrázků	54
7	Citovaná literatura	55
8	Seznam příloh	58

1 Úvod

Mezi nejvíce namáhané díly plynových turbín patří statorové a rotorové lopatky. To platí zejména pro letecké motory, kde je jedním z významných omezení požadavek na co nejnižší hmotnost turbomotoru. Rotorové lopatky jsou technologicky i konstrukčně nejsložitější částí turbomotoru. Každá lopatka je namáhána odstředivou silou na tah a od proudění plynu v mezilopatkovém kanálu na ohyb. Odstředivá síla způsobuje i přídatný ohyb, neboť těžiště jednotlivých řezů jsou posunuta. V případě tohoto kombinovaného namáhání se tedy jedná o dynamické působení sil, jež vyvolává vibrace lopatek. Degradace rotorových lopatek má charakter únavových a creepových procesů za vysokých teplot. Pevnostní rezervy nejsou u leteckých motorů příliš vysoké. Z toho plyne požadavek na to, aby materiál, ze kterého jsou lopatky vyrobeny, neztrácel své mechanické vlastnosti při dlouhodobém působení vysokých teplot. [1] [2]

Materiál musí odolávat vůči creepu, nízko i vysokocyklové únavě, tepelné únavě, vysokoteplotní korozi, oxidaci a erozi. Z pohledu těchto požadavků jsou vyvíjeny nové materiály (niklové slitiny a tzv. superslitiny). Materiálové provedení jednotlivých generací leteckých motorů tak odpovídá stavu vývoje v době jejich vzniku. U již vyrobených a provozovaných motorů se vyvíjejí metody a postupy, jak zlepšit, anebo alespoň co nejdéle udržet jejich materiálové vlastnosti a mechanické parametry. Jedním z dominantních degradačních mechanismů u lopatek leteckých motorů je vysokoteplotní oxidace. Jako ochrana před vysokoteplotní oxidací, slouží nanášení povrchových vrstev na jednotlivé lopatky, které působí jako bariérová ochrana. Pro niklovou slitinu ŽS6K, které je tato práce věnována, byla vyvinuta difúzní bariéra typu alitosilitovaných vrstev (AlSi vrstev). [1] [2]

Schválený postup sestává z nanášení hliníkových vrstev na povrch lopatek a následného tepelného zpracování. Jedná se tedy o difúzní žíhání hliníkem neboli alitaci. Praxe ukázala, že kvalita vrstvy a tím i kvalita ochrany je silně závislá na dodržení technologického postupu od předúpravy povrchu, způsobu nanášení alitačního prášku až po dodržení parametrů následného tepelného zpracování. Podstatnou okrajovou podmínkou je i počet hodin provozní expozice a počet opakování alitačního procesu. V rámci omezení, daných předpisy pro letecké

motory je možné modifikovat postup obnovy alitační vrstvy tak, aby bylo dosaženo kvalitnějších výsledků vzniklé bariérové ochrany. [1] [2]

Cílem práce je zhodnocení alitačních vrstev vytvořených z různých prášků za rozdílných podmínek příprav a průběhu difuzního žíhání. Aktuálně jsou v praxi používány zavedené postupy předúpravy povrchu lopatek, které mohou mít za následek vnesení nečistot již před nanesením alitačního prášku. Další operace, která kvalitu silně ovlivňuje, je vlastní tepelné zpracování. Tato práce, tak může posloužit jako základ pro změny v používaných schválených pracovních a technologických postupech, které povedou ke zkvalitnění ochranné vrstvy.

Teoretická část se po stručném úvodu do oblasti plynových turbín a jejich použití v leteckých motorech zabývá podrobněji turbohřídelovým motorem TV3-117, zejména turbínou kompresoru a jejími lopatkami. Zabývá se i niklovými (super)slitinami používanými na výrobu lopatek, difuzními pochody a procesem alitace.

Experimentální část popisuje komparaci alitačních vrstev u skupin lopatek z turbohřídelového motoru TV3-117, které se od sebe liší dobou provozního zatížení, použitými alitačními prášky a způsobem difuzního žíhání. V práci se hodnotí lopatky po skupinách se shodnou předúpravou a tepelným zpracováním, lišících se způsobem demontáže a použitým alitačním práškem. V závěru práce jsou ve formě návrhu uvedeny rozšířené postupy, které podle dosažených výsledků vedou ke zlepšení výsledné alitované vrstvy. Tyto postupy mohou být použity jako iniciátor pro změny v praxi používaných postupech alitace.

2 Teoretická část

2.1 Lopatkové stroje

Do kategorie lopatkových strojů spadá široká škála zařízení například parní turbíny, plynové/spalovací turbíny, turbokompresory, odstředivá čerpadla, vodní turbíny a další. Hlavní součástí těchto zařízení je rotor po obvodu opatřený lopatkami. Lopatky na rotoru vymezují kanály, ve kterých proudí pracovní médium. K přeměně energie dochází vlivem vzájemného silového působení mezi pracovním médiem a lopatkami. [3] [4]

2.1.1 Základní rozdělení lopatkových strojů

Lopatkové stroje se dělí dle různých kritérií. Rozdělení je dle způsobu práce na generátory (turbíny), kde se přeměňuje kinetická energie na mechanickou energii na hřídeli a na motory (čerpadla, kompresory), kde se naopak přeměňuje mechanická energie na hřídeli na kinetickou, tlakovou energii. Dalším kritériem, může být geometrie vstupu a výstupu pracovní kapaliny do lopatkového stroje. Lopatkové stroje se podle toho následně dělí na axiální, radiální a diagonální. Nebo lze lopatkové stroje dělit dle působícího média, a to na parní, plynové a paroplynové. [3] [4] [5]

Parní turbíny

Parní turbíny se používají hlavně u větších výkonů, jako například v tepelných elektrárnách, k pohonu lodí a pracovních strojů velkých příkonů. [6] [7] [8]

Plynové turbíny

Plynové turbíny se používají jak v tepelných elektrárnách, teplárnách tak i k pohonu lodí či letadel. Plynové turbíny jsou nejčastěji realizací Braytonova oběhu. Mají široké využití i v dopravě, díky poměru výkonu a rozměrů (hmotnosti). Předností je plynulá regulace, rychlý náběh a odstavení. [6]

Spalování paliva ve spalovací komoře turbíny je na rozdíl od klasických spalovacích motorů nepřetržitě (kontinuální) a tím i ve většině případů ekologičtější než například v případě pístových spalovacích motorů.

Vzhledem ke své konstrukci a velikosti se spalovací turbíny hodí i do extrémních podmínek. Nevýhodou spalovací turbíny může být potřeba

ušlechtilého paliva. Lze zvolit i méně ušlechtilá paliva, avšak jejich spalování může způsobovat komplikace například zanášením a opotřebením lopatek. [6] [8]

Turbokompresory

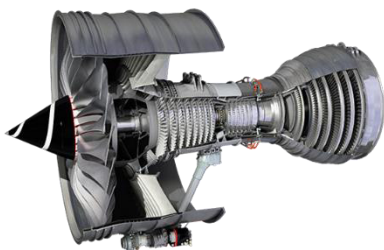
Vřazením turbokompresoru do soustavy je možné využít energii spalin k pohonu vzduchového kompresoru. Turbokompresory se používají ve strojírenství, kde je velká spotřeba vzduchu pro pneumatické pohony, v chemickém průmyslu, v chladicí technice, kompresních stanicích, a také jako součást většiny typů plynových turbín. [6]

2.2 Plynové turbíny v letectví

Historicky jsou plynové turbíny v letectví hodnoceny podle hodnoty nazývané tah, což je ekvivalent síly vyvozované vrtulí vrtulového pohonu. Moderní konstrukce leteckých motorů používají vícehřídelová provedení (dvou i trojhřídelová) z důvodu dosažení co nejvyšší účinnosti. [6] [9]

Výkon a parametry proudového motoru záleží na potřebné rychlosti letounu a jeho operační výšce. Aktuálně je motor s největším tahem 360 kN typu turbofan Trent 900 Rolls-Royce (Obr. 1), používaný například v Airbusech A380 (Obr. 2). [6] [9]

Jedním z prvních letounů s proudovým motorem, který obletěl svět bez doplnění paliva (2005) byl Virgin Atlantic GlobalFlyer, vybaven motorem William FJ44-3 ATW turbofan. [6] [9]



Obr. 1: Trent 900 Rolls-Royce [10]



Obr. 2: Airbus A380 [11]

2.3 Turbohřídelový motor TV3-117

Turbohřídelový motor TV3-117 (Obr. 3) byl cíleně vyvinut v roce 1972 pro vrtulníky Mi-24 a Mi-4. Masově vyráběn začal být od roku 1974. Byl instalován do 95 % všech helikoptér vyrobených inženýrským centrem Mil a Klamov. Od roku 1974 bylo vyrobeno přes 25 000 kusů tohoto typu motoru, včetně jeho modifikací. Konkrétně najdeme tento motor a jeho modifikace ve vrtulnících Mi-14P, Mi-17, Mi-172, Mi-28, Mi-8AT, a to zejména pro jeho dobré vlastnosti. Motory TV3-117 které jsou hlavní pohonnou jednotkou vrtulníků Mi-17/171 se montují i na letouny Antonov-140. Tento motor má výkon 2000 až 2400 koňských sil (tzn. 1491 kW až 1790 kW). V Armádě České Republiky působí několik variant tohoto motoru. V ČR byla v předchozích desetiletích vybudována rozsáhlá opravárenská kapacita pro tyto motory, která je dodnes domácími i zahraničními uživateli těchto motorů využívána. [12] [13] [14]

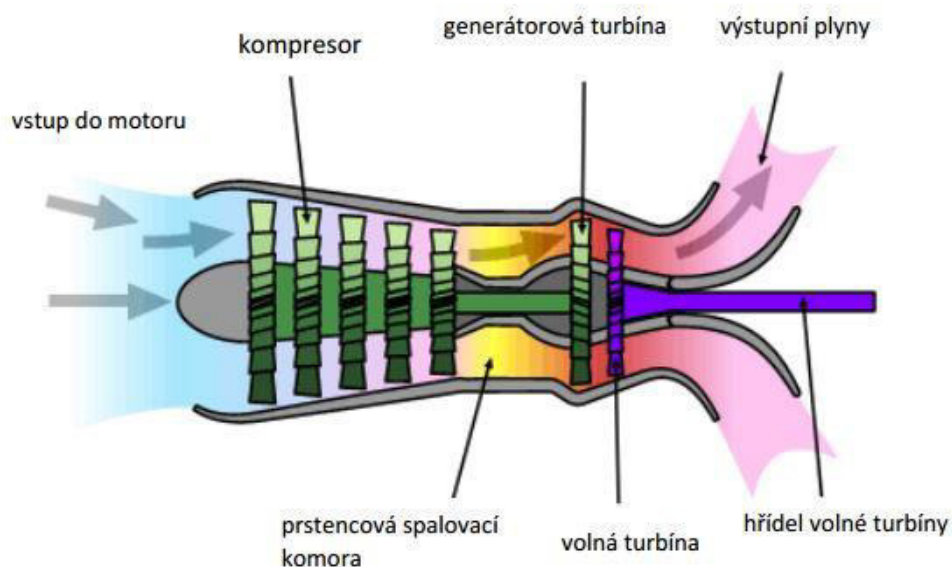


Obr. 3: Turbohřídelový motor TV3-117 [15]

2.3.1 Princip motoru TV3-117

Schéma motoru TV3-117 je uvedeno na Obr. 4. Vstupující proud vzduchu do motoru je stlačován ve dvanáctistupňovém axiálním kompresoru. Hořením paliva vznikají spaliny, jejichž energie je využita v generátorové turbíně k pohonu kompresoru a následně ve dvoustupňové volné turbíně. Výkon volné turbíny je přenášen přes drážkovaný torzní hřídel do reduktoru a ten jej předává dál k pohonu rotorů a agregátů. Výstupní nátrubek slouží k odvádění výstupních plynů ve směru od draku letadla na danou stranu dle montáže motoru. Maximální

pracovní teploty působící na generátorovou turbínu při jednotlivých režimech jsou uvedeny v Tab. 1. [15] [16]

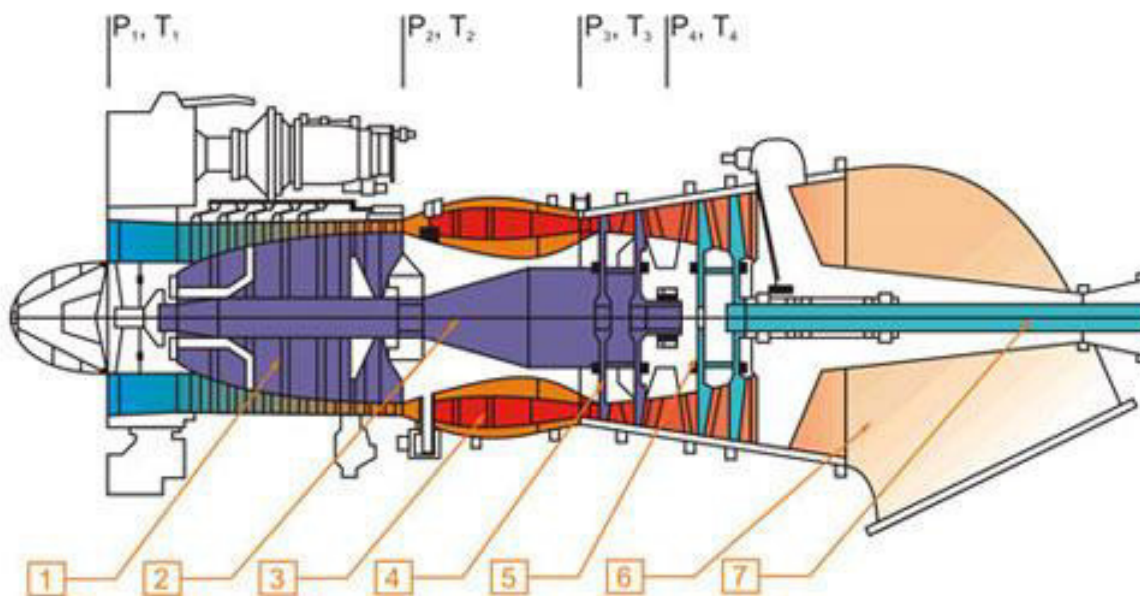


Obr. 4: Schéma principu turbohřídelového motoru [15]

Tab. 1: Maximální přípustné teploty naměřené před turbínou při všech rychlostech a výškách letu [15]

Režim	Teplota
Nominální	955 °C
I. Cestovní	910 °C
II. Cestovní	870 °C

Na Obr. 5 je zobrazeno schéma motoru TV3-117. Zleva první je pod číslem 1 vyznačen dvanáctistupňový axiální kompresor, který stlačuje vzduch pro prstencovou spalovací komoru. Za spalovací komorou se nachází dvoustupňová turbína označena číslem 4 a následně volná turbína pod číslem 5, která je axiální a reakční. Největší teplotní expozici, a tedy potřebu ochrany před vysokoteplotní oxidací vykazují první a druhý stupeň generátorové turbíny označené číslem 4. Tyto lopatky je nutné chránit bariérovými vrstvami. [15] [16]



Obr. 5: Schéma motoru TV3-117, 1. Kompresor 12. Stupňový, 2. Hřídel spojující dvoustupňovou turbínu s kompresorem, 3. Prstencová spalovací komora, 4. Dvoustupňová turbína, 5. Volná turbína, 6. Výfuková roura 7. Hřídel od volné turbíny do reduktoru [15]

V aplikaci motoru TV3-117 je vždy zachována duplicita, tím je myšleno použití motorů v párech. Oba motory na vrtulníku pracují nezávisle, což umožňuje samostatnou práci jednoho motoru v případě poruchy druhého. Motor je spouštěn pomocí APU (pomocná energetická jednotka – auxiliary power unit), která vytváří proud vzduchu. Ten je přiváděn na turbínu vzduchového spouštěče. Spouštěč roztáčí kompresor motoru a při určených otáčkách dojde k zapálení paliva, odpojení spouštěče, a motor je již schopen akcelarovat a udržovat volnoběžné otáčky. Jeho technické parametry jsou uvedeny v Tab. 2 a Tab. 3. [15] [16]

Tab. 2: Základní údaje motoru TV3-117 [15] [16]

Smysl otáčení hřídele:	Levý
Druh motoru:	Turbohřídelový s volnou turbínou
System spouštění:	Vzduchový
Protinámrazový systém:	Vzducho-tepelný
Hmotnost motoru:	285 ± 5,7 kg
Délka motoru celková:	2055 mm
Šířka:	650 mm
Výška:	728 mm
100 % otáček turbokompresoru:	19 500 min ⁻¹
100 % otáček volné turbíny:	15 000 min ⁻¹

Tab. 3: Limity motoru TV3-117 [15][16]

Teplota vzduchu na vstupu:	$\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Relativní vlhkost vzduchu:	do 100 %
Rychlost letu:	0 až 350 km/h
Doba spouštění:	max. 60 s

2.3.2 Turbína kompresoru

Turbína kompresoru zabezpečuje přeměnu tepelné a tlakové energie na mechanickou práci, která se využívá pro pohon kompresoru a agregátů motoru. Turbína kompresoru je axiální, reakční, dvoustupňová. Lopatky jsou v discích upevněny v stromečkových zámčích. Na koncích lopatek jsou bandáže (hřebínky) s břity těsnění, které zvyšují pevnost lopatek při kmitání a zároveň utěšňují rotor plynové turbíny kompresoru. První stupeň rotoru turbíny má 133 lopatek a druhý 101 lopatek. Zobrazení řezu turbíny motoru TV3-117 je na Obr. 6, kde je vlevo patrná turbína kompresoru a vpravo volná turbína.



Obr. 6: Řez motorem TV3-117 – dvoustupňová turbína (vlevo), pohánějící kompresor a volná turbína (vpravo), pohánějící rotor a agregáty [17]

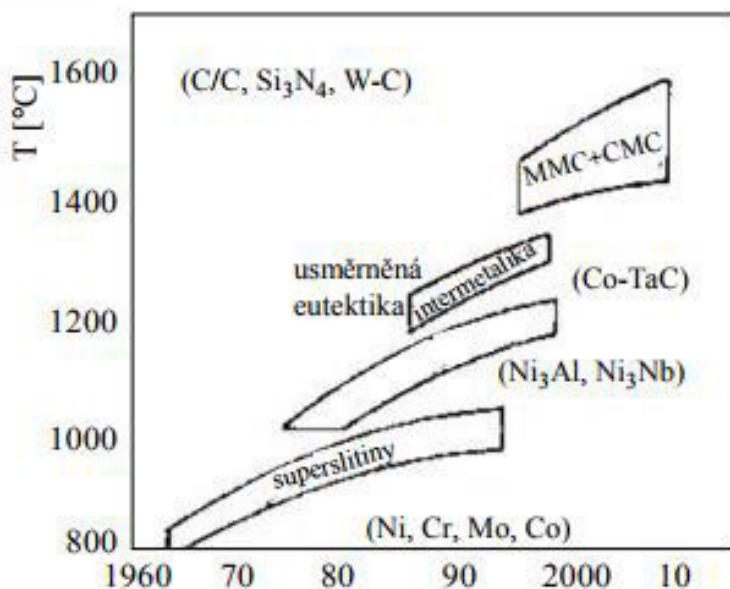
2.3.3 Turbínové lopatky na motorech TV3-117

Motory TV3-117 jsou vybaveny základní kompresorovou dvoustupňovou turbínou (1° a 2°) a následně volnou turbínou (3° a 4°). Do alitačního procesu jdou lopatky základní kompresorové dvoustupňové turbíny, která je blíže spalovací komoře. Dle předešlého popisu se tedy jedná o 1° a 2°. A to z důvodu rozdílných teplot na vstupu a výstupu turbíny. Na dvoustupňovou turbínu působí teploty okolo 900 °C a na volnou turbínu působí teploty již jen okolo 700 °C. Při spalování paliva ve spalovací komoře dochází ke vzniku velmi oxidického prostředí (směs vzduchu a spalinových exhalátů ze spalování kerosinu), které přímo působí na lopatky dvoustupňové turbíny. Kromě alitační vrstvy je zde nutná také kontrola mikrostruktury na přehřátí následkem provozu i mimořádných provozních stavů. [18]

2.4 Materiály používané pro lopatky plynových turbín

Slitiny na bázi niklu jsou nejvyužívanějším konstrukčním materiálem pro vysokoteplotní aplikace. Na tyto materiály jsou kladeny vysoké požadavky. Požadována je odolnost vůči creepovému porušení, dlouhodobá strukturní stabilita a odolnost vůči agresivnímu provoznímu prostředí. Začátek vývoje superslitin nastal koncem první světové války, kdy nikl-železné slitiny nachází uplatnění v parních turbínách, nikl-chromové slitiny jako žáruvzdorné dráty a slitiny nikl-hliník-titan jako první precipitačně vytvrzené slitiny v leteckém průmyslu. V průběhu druhé světové války dochází k prudkému vývoji metalurgickou cestou (Cr, W, Mo, Ta, Nb, aj. prvky). Původně tvářené slitiny se postupně nahrazují slitinami odlévanými (polykrystalické – s usměrněnou krystalizací – monokrystalické). [19]

Kromě snahy o vylepšení vlastností superslitin metalurgickou a technologickou cestou jsou rozvíjeny i techniky ochrany povrchu. Pokrok ve výpočetní technice umožňuje optimalizaci návrhu systému vnitřního chlazení lopatek. V současné době je v leteckém průmyslu nejčastěji využíváno monokrystalických superslitin na bázi niklu s obsahem až 70 % vytvrzující fáze v základní matici. Jejich vývoj metalurgickou cestou vykazuje konstantní růst provozních teplot o 5 až 10 °C/rok. Na Obr. 7 jsou schematicky znázorněny nárůsty spalovacích teplot leteckých motorů. [20]



Obr. 7: Nárůst spalovacích teplot leteckých motorů a použité materiály [20]

Na lopatky se běžně využívají slitiny v kombinaci s difuzními i tepelnými bariérami. U povrchových vrstev je potřeba mít neustále na paměti, že jejich ochranné vlastnosti nejsou trvalé a v průběhu provozu degradují a je tedy nutno tyto povrchové vrstvy obnovovat.

Především se jedná o slitiny na bázi Ni a Co. Oba typy materiálu spojuje austenitická struktura, podobná hustota $\rho_{Ni} = 8,9 \text{ g.cm}^{-3}$ a $\rho_{Co} = 8,85 \text{ g.cm}^{-3}$ a blízká teplota tání T_T , Ni = 1453 °C a Co = 1495 °C. Oproti tomu mají podstatný rozdíl a tím je alotropická schopnost, kterou má pouze kobalt. Mění svou kubickou plošně středěnou mřížku K12 na hexagonální H12 při teplotě 417 °C. Podle užití se superslitiny dělí na dvě základní skupiny, na korozivzdorné a žáropevné. [20]

2.4.1 Korozivzdorné slitiny na bázi Ni

Základní korozivzdornou superslitinou na bázi Niklu je Duranickel 301, legovaný Al a Ti. Ni slitiny dělíme do tří základních skupin [21]:

- a) Monely – slitiny Ni a 30 % až 32 % Cu – vykazují vysokou korozní odolnost na vzduchu, ve vodě, včetně mořské a proti neorganickým kyselinám. Používají se při stavbě lodí, v ropných rafinériích a farmaceutickém průmyslu. Jsou nejčastějším materiálem používaným na kondenzátorové trubky.

- b) Inconely – slitiny Ni, 16 % až 29 % Cr a 6 až 19,5 % Fe. Používají se v silně oxidačních prostředcích. Odolávají kyselině solné. Pro zvýšení korozi vzdornosti jsou dále modifikovány Mo, popřípadě Cu.
- c) Incoloy – slitiny 30 % až 40 % Ni, cca. 5 % Mo, cca. 20 % Cr a cca. 30 % Fe. Odolávají vysoce koncentrované kyselině sírové. Přilegováním Ti, Nb a Cu se snižuje jejich náchylnost k mezikrystalické korozi.

2.4.2 Žáropevné slitiny Ni a Co

Omezení použitelnosti žárovevných slitiny je dáno teplotou cca 1150 °C. Zjednodušeně se označují jako Nimoniky dle původní slitiny vyrobené v Anglii právě pod názvem Nimonic. Žáropevnost zaručuje legování chromem do 20 %, Ti a Al (vždy do 5 %). Žáropevnosti se dosahuje díky zpevňující fázi typu Ni₃TiAl, případně fází typu TiC a TiN. Aby slitiny byly žárovevné nad 1100 °C je nutné je dolegovat 2 až 11 % Mo a 2 % až 10 % W. Dále lze žárovevnost zvýšit legováním 14 %-16 % Co. Pro zpevnění hranic je legována B a Zr. Lepších pevnostních vlastností za vysokých teplot dosahují slitiny lité než tvářené. Lité se dále tepelně nezpracovávají oproti tvářeným, které se vytvrzují při 700 °C až 900 °C po dobu 12 až 20 hodin. [20]

Tzv. slitiny ODS (Oxyde dispersion Stregthening) dosahují nejvyšší žárovevnosti ze superslitin. Jedná se o slitiny disperzně vytvrzené oxidy yttria. Tyto slitiny se vyrábějí práškovou metalurgií. Y₂O₃ se do slitiny přidávají mechanickým legováním. Aby bylo dosaženo teploty žárovevnosti 1250 °C pokrývají se tyto slitiny keramickými ochrannými vrstvami (Ca, Mg, Y). V Tab. 4 jsou uvedena teplotní maxima použitelnosti vybraných superslitin a jejich označení dle EN (určující chemické složení). [20]

Tab. 4: Teplotní maxima vybraných superslitin [20]

Označení slitiny	Chemické složení	Max. pracovní teplota
Nimonic 118	NiCo15Cr15Mo4Al5Ti4	1000 °C
LVN 9	NiCR10W5Mo4Co4Al5Ti3ZrB	1000 °C
MAR M 322	CoCr22W9Ta5Zr2Ti	1000 °C
MA 754	NiCr20TiAl(Y ₂ O ₃)	1150 °C

2.4.3 Směry vývoje žárovevných superslitin

Žáropevnost narůstá legováním superslitin vzácnými prvky jako jsou Hf, Re, La, Ce a Y. Zvyšuje se tím pevnost hranic za vysokých teplot. Dosažení použitelnosti za teplot 1200 °C lze docílit skrze usměrnění krystalizace pomocí termomechanického zpracování a tvorbou rekrytalizované textury špičkově až vytváření monokrystalických výrobků. [20]

Ve vývoji žárovevných materiálů jsou kvalitativním skokem intermetalika (hlavně typu Ni₃Al). Tyto intermetalické sloučeniny vznikají jen při úzkém stechiometrickém rozmezí a jejich vlastnosti jsou velmi citlivé na technologii výroby. Ni₃Al se často označuje jako fáze γ' s parametrem mřížky 0,3589 nm při 75 mol% Ni. [20]

Aspektem ovlivňujícím vlastnosti Ni₃Al je makrolegování Cr, Mo, Ta a Nb, které v kombinaci s mikrolegurami zvyšuje odolnost proti oxidaci a proti creepu za vysokých teplot. Mikrolegováním je myšleno přidávání legujících přísad asi do 1 %, oproti tomu za makrolegování se považuje legování několika % legur. Pro dosažení vyšší meze kluzu a zároveň odolnosti proti creepu se jako legury používají Hf a Zr. Zirkonium také zlepšuje chování slitin v oxidační, chlorační a nauhličující atmosféře při teplotách 1000 °C. [20]

2.5 Difuze

Vzhledem k tomu, že proces alitace je difuzním pochodem, jsou v následující kapitole vysvětleny stručně základy difuze.

Difuze je jediným způsobem přenosu hmoty v pevném skupenství, při kterém se částice (atomy, ionty, molekuly), i vakance pohybují vzhledem k sousedním částicím. Podstatou difuze je tepelně aktivovaný pohyb částic hmoty, a proto je její intenzita a rychlost výrazně závislá na teplotě. K difuzi dochází v jakémkoliv skupenství, avšak v tuhém skupenství je jediným možným způsobem přenosu hmoty. O difuzi mluvíme, jestliže se zmenšují koncentrační rozdíly látek, pokud jde o opačný případ mluvíme o obrácené difuzi. V jednosložkové soustavě nebo fázi mluvíme o autodifuzi. Sledování autodifuze je možné ovšem pouze za pomoci radioaktivních izotopů daného prvku. Intenzita

difuze je výrazně závislá na teplotě, jelikož podstatou difuze je tepelný pohyb částic hmoty. [22]

Difuze je z technického významu jak prospěšná, tak škodlivá ve změnách koncentrace a ve fázových či strukturních přeměnách, v povrchových vrstvách výrobku nebo v celém jeho objemu. Prospěšné fázové přeměny, které získáváme pomocí difuze v celém objemu výrobku, jsou přeměny při některých druzích žíhání. Na rozdíl od toho ke škodlivým strukturním přeměnám patří difuze vakancí, které se při tečení spojují na hranicích zrn polykrystalického materiálu v kavity, čímž začíná mezikrystalový lom. Difuze je také velmi významná při procesech odlévání, tváření za tepla, svařování, pájení, plátování, slinování a v četných dalších technologických procesech. [22]

Problematika může být řešena pouze fenomenologicky, což znamená užívání jen obecných zákonů přenosových jevů, popisujících kinetiku, aniž by předpokládaly mechanismy. Nebo může být zvolen přístup fyzikální, který vychází z podrobných představ o pohybu částic hmoty. Druhý přístup fyzikální umožňuje vyjádřit vztahy mezi neuspořádaným a náhodným pohybem částic a jejich makroskopickým tokem a ve shodě s obecnými poznatky o přenosových jevech dojít k popisu koncentračních změn při nestacionárních dějích. Fyzikální přístup je také důležitý pro výraznou závislost kinetiky difuze na poruchách krystalové mřížky, což umožní jejich studium. [22]

2.5.1 Mechanismy difuze

Představy o mechanismech difuze jsou založeny na poznacích o různé pohyblivosti částic v různých skupenstvích hmoty. Podle kinetické teorie je neuspořádaný pohyb molekul v plynech charakterizován velkými hodnotami jejich střední kvadratické rychlosti a volné dráhy. V tuhé fázi jsou atomy po delší dobu vázány k určitým polohám, tzn. že pohyb atomů (iontů) v kondenzovaných fázích je značně omezen oproti pohybu molekul v plynech. [22]

Mechanismy difuze v krystalických materiálech rozdělujeme na individuální a na skupinové. Individuální mechanismy jsou mechanismy, kdy se pohybuje jen jedna částice či vakance nezávisle na ostatních. Do této skupiny patří mechanismus intersticiální a vakantní. Skupinové mechanismy jsou mechanismy,

kteře charakterizuje koordinovaný pohyb částic. Za skupinové považujeme mechanismy výměnné, kruhové a nepřímé intersticiální. [22]

2.5.2 Atomová teorie difuze

Předpokladem přeskoků atomů v krystalických materiálech je, že jejich pohyby jsou nespojitě a tepelně aktivované. Každý atom kmitá poměrně dlouhou dobu v určité rovnovážné pozici krystalové mřížky, než jeho energie umožní přeskok do jiné rovnovážné pozice mřížky. Úkolem atomové difuze je najít vztah mezi náhodnými přeskoky atomů, z nichž každý má délku mezi rovinné vzdálenosti a jejich makroskopickým přemístěním. Je tedy nutné zjistit, jak daleko se atomy vzdálí z dané výchozí atomové roviny, je-li dána frekvence jejich přeskoků. [22]

2.5.3 Fenomenologická teorie difuze

Fenomenologické neboli deterministické pojetí difuze se soustředí na celkový makroskopický výsledek difuze, bez uvažování neustálých nahodilých přeskoků jednotlivých atomů. Základním aparátem tohoto přístupu jsou tzv. Fickovy zákony. Jejich důležitou veličinou je objemová koncentrace difundující látky, která závisí na čase a na poloze vymezené kartézskými, polárními nebo sférickými souřadnicemi. Důležitý je zde také gradient koncentrace, který je v tomto pojetí považován za hybnou sílu difuze. [22]

První Fickův zákon

První Fickův zákon popisuje rychlost difuze v závislosti na látkovém množství dané látky prošlou za jednotku času určitou plochou. Popisuje tedy závislost difuzního toku J na gradientu koncentrace ∇c vztahem (1).

$$J = -D \cdot \nabla c \quad (1)$$

Druhý Fickův zákon

Druhý Fickův zákon vyjadřuje změnu koncentrace c difundující látky v závislosti na čase τ a na poloze v prostoru (2).

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla(D \cdot \nabla c) \quad (2)$$

V případě, že je pro daný prvek D konstantní (3).

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla(D \cdot \nabla c) = D \Delta c \quad (3)$$

Stacionární a nestacionární difuze

Dle hodnoty, které nabývá levá strana rovnice popisující difuzi, se rozlišuje stacionární difuze, při níž se koncentrace v daném místě v průběhu času nemění $\frac{\partial c}{\partial \tau} = 0$ a nestacionární difuze, u které v závislosti na čase ke změně koncentrace v daném místě dochází $\frac{\partial c}{\partial \tau} \neq 0$. Zjednodušeně lze říci, že stacionární difuze se vyznačuje tím, že rychlost změny koncentrace difundující látky v každém bodě uvažovaného prostředí zůstává stálá a s časem se nemění. Ve většině reálných případů dochází k nestacionární difuzi, kde se v uvažovaném bodě soustavy mění rychlost změny koncentrace difundující látky v závislosti na čase. [22]

Ze skutečnosti vyplynulo, že kromě gradientu koncentrace mohou být hybnou silou difuze také gradienty jiných termodynamických veličin. Fenomenologické pojetí přesto považuje původní Fickovo pojetí stále za základní, neboť v souladu s ním byly v kombinaci experimentu s výpočtem stanoveny hodnoty koeficientů difuze pro mnoho prvků a bylo nalezeno velké množství řešení diferenciálních rovnic difuze. Původní Fickovo pojetí je často pro použitelnost nutné korigovat a zjednodušovat. [22]

2.5.4 Degradace difuzních vrstev

V průběhu provozní tepelné expozice probíhají mezi vrstvou a základním materiálem interakce řízené difuzí v obou směrech. Mechanismus a kinetika těchto interakcí je závislá na počátečním chemickém a fázovém složení vrstvy a niklové slitiny, výšce teploty a době výdrže na teplotě v průběhu tepelné expozice. Počet provozních hodin motoru TV3-117 mezi repasemi motoru s pojenými i s obnovou difuzní ochranné vrstvy je v současnosti nastaven tak, že se degradací difuzní vrstvy není nutné podrobněji zabývat. V případě prodloužení period oprav by celkové hodnocení kvality alitace lopatek muselo být rozšířeno i o problematiku degradačních pochodů.

2.6 Alitace niklových slitin

Alitace niklových slitin je jednou skupin povrchových úprav pro vysokoteplotní aplikace. Podle technologie jejich přípravy, resp. principu jejich funkce je možné definovat tři skupiny.

2.6.1 Tepelné bariéry

Základním principem tepelných bariér je vytvoření co největšího tepelného odporu na chráněném kovu. Podmínkou funkce těchto systémů je dostatečný odvod tepla z chráněného kovu (v případě lopatek vytvoření husté sítě kanálků pro proudění chladicího média), který podmiňuje vznik teplotního gradientu na povrchové (nejčastěji keramické) vrstvě. Tento systém je používán u plynových turbín, kde umožňuje zvýšit teplotu spalin a tím i výkon turbíny při zachování plánované provozní životnosti. Častěji se ale touto úpravou řeší podstatné prodloužení provozní životnosti turbín při zachování stávajících provozních teplot. [23]

2.6.2 Vazebné povlaky

Tyto povlaky bývají nejčastěji připravovány technologiemi žárových nástříků např. napařovací depozicí elektronovým svazkem z pevné fáze (EB-PVD) nebo v současnosti i laserovým plátováním. Z pohledu chemického složení tyto postupy vychází z komplexní materiálové soustavy M-CrAlY, kde M je nikl, kobalt nebo jejich kombinace, přizpůsobující vazebný povlak vlastnostem základního materiálu, na jejichž povrch jsou nanášeny. Chrom a hliník, stejně jako v případě difúzních vrstev zajišťují korozní a oxidační odolnost povlaku za velmi vysokých teplot. V ČR byly prováděny experimenty na lopatkách leteckého motoru DV2, které jsou ze stejného materiálu, tj. ŽS6K, kde vrstva byla nanášena plazmovým hořákem. Publikované výsledky naznačují, že by se v budoucnosti mohlo jednat o vhodnou metodu. [24] [25]

2.6.3 Difúzní vrstvy

Do této skupiny patří alitace. Zde se pro tvorbu povrchové vrstvy přednostně využívá metod sycení povrchu základního materiálu prvky, jako je Al, umožňující tvorbu stabilních vrstev intermetalických fází AlNi anebo AlNi₃ (tj. intermetalických fází binární soustavy Al-Ni bohatých na Ni), jejichž primárním úkolem je zajištění požadované odolnosti povrchu základního materiálu vůči vysokoteplotní oxidaci. Dále pak například Pt, Si nebo Cr, jejichž intermetalika naopak podporují nárůst korozní odolnosti povrchu materiálů, pracujících za velmi vysokých teplot. Mnohdy jsou také využívány doprovodné přísady Hf, Y, Rh, Zr, W apod., jejichž

základním úkolem je buď přispět ke stabilizaci či nárůstu užitečných vlastností vytvářených intermetalických vrstev na povrchu vysokoteplotních materiálů v průběhu exploatace, nebo mají svůj jiný specifický účel. Alitování lze rozdělit na dvě základní skupiny na nízkoaktivní a vysokoaktivní. [26]

Nízkoaktivní alitování

Difuze se provádí při teplotách 1000 °C – 1100 °C. Vzniká zde dvou zónová struktura. Vnější struktura je tvořena NiAl a obsahuje také různé přísadové prvky v tuhém roztoku, které difundovaly společně s Ni ze slitiny během tvorby vrstvy. Vnitřní zóna je tvořena NiAl obsahující různé precipitáty tvořené ostatními prvky ze slitiny, které jsou buď nerozpuštěny, nebo neúplně rozpuštěny v NiAl. Jako výsledek difuze Ni ze slitiny do vrstvy je pak podkladová vrstva ochuzená o Ni a obohacená slitinovými prvky hlavně Al. Tento stav vede k vytvoření NiAl fáze. Pro tento typ vrstvy je typický malý rozptyl obsahu Al, který se mění jen velmi málo přes celou tloušťku NiAl. Díky tomu jsou pak tyto vrstvy za provozu součástí strukturně velice stabilní. Pouze při zvlášť vysokém obsahu chromu a dalších prvků může vznikat křehká fáze ve vnitřní vrstvě a tím zkřehnout rozhraní lopatky a alitační vrstvy, což se pak může projevit dělením vrstvičky nebo oddělováním této ochranné vrstvy. [18] [27]

Vysokoaktivní alitování

Vysokoaktivní alitování je řízeno při nižší teplotě než nízko aktivní, a to při teplotě 700 °C – 950 °C. NiAl vrstva je tvořena difuzí hliníku do základního materiálu součásti. Na základě toho obsahuje vrstva nejprve Ni_2Al_3 a požadovaná NiAl fáze je poté vytvořena difuzním žháním při teplotě 1050 °C – 1200 °C. Takto vytvořena vrstva vykazuje vysoký gradient hliníku přes vrstvu NiAl a je náchylná k degradaci při provozování za vysokých teplot vlivem vnitřních difuzních dějů mezi vrstvou a základním materiálem součásti. Transformace počáteční Ni_2Al_3 do konečného tvaru NiAl během dalšího difuzního tepelného zpracování je komplexním procesem obsahujícím vnitřní difuzi Al ve vnějších vrstvách a vnější difuzi Ni z povrchu materiálu lopatky přes vnitřní vrstvu NiAl, kde jsou přítomny různé precipitáty jak z původního materiálu, tak vytvořené během povlakování a následného difuzního zpracování, společně s prvky z tuhého roztoku základního materiálu. Vnitřní zóna vytvořená alitováním základního materiálu, je tvořena dvěma vrstvami, které se podobají vrstvám nízko aktivního alitování. [18] [27]

3 Experimentální část

3.1 Hodnocení alitačních vrstev

Pro hodnocení kvality a následné optimalizování procesu alitace, je důležité popsat a vyhodnotit kvalitu alitační vrstvy jednotlivými parametry. Těmito parametry jsou tloušťka alitované vrstvy, která by měla být v rozmezí 20 μm – 50 μm , její homogenita, rovnoměrnost a sklony k praskavosti (náchylnost vrstvy ke vzniku trhlin a lokálních míst, kde došlo ke vzniku puchýřů, případně vylupování se).

Použitou analytickou metodou pro hodnocení těchto parametrů byla skenovací elektronová mikroskopie, a to konkrétně řádkovací elektronový mikroskop s vysokým rozlišením JEOL-JSM 7600F, za použití detekce sekundárních elektronů.

3.2 Výběr lopatek pro zkoušky alitace

Výběr lopatek pro následné zkoušení a hodnocení vrstvy alitace byl limitován dostupným materiálem z praxe. K dispozici byly dvě sady lopatek, demontované z opravovaného provozovaného motoru, které byly po demontáži očištěny podle první, resp. první a druhé části základního pracovního postupu užívaného v praxi. Ani u jedné sady nebyla známa přesná doba předešlého provozu. První sada lopatek na Obr. 8 byla čištěna omíláním, druhá sada na Obr. 9 prošla po provozu pouze elektrolytickým čištěním.



Obr. 8: Omílaná sada lopatek – Sada 1



Obr. 9: Sada lopatek po demontáži – Sada 2

Použitím provozně exponovaných lopatek byl získán již degradovaný materiál, což poskytuje přesně odpovídající podmínky pro následné získání výsledků použitelných pro opravárenské techniky vrstvy alitace. Je tak dosaženo možnosti přímé interpretace výsledků do praxe. Použité lopatky a následné experimenty byly zvoleny tak, aby byla zajištěna co nejpřesnější sada výsledků ve vztahu k provoznímu zacházení a servisním postupům při generální opravě. Dohromady obě sady obsahují 24 kusů lopatek, což odpovídá cca. čtvrtině celkového počtu lopatek druhého stupně generátorové turbíny.

3.3 Materiál lopatek pro experimentální hodnocení

Materiál alitovaných lopatek dvoustupňové turbíny je ŽS6K, jedná se o niklovou slitinu s hlavními legurami Cr a Co. Přesné chemické složení této slitiny převzaté z ruské souborné literatury je vedeno v Tab. 5.

Tab. 5: Chemické složení ŽS6K [28]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Fe [%]
0,13 - 0,18	≤0,4	≤0,4	≤0,015	≤0,015	9,50-12,50	základ	≤2,00
Co [%]	W [%]	Mo [%]	Ti [%]	Al [%]	B [%]	Ce [%]	Zr [%]
4,00-5,50	4,50-5,50	3,50-4,50	2,50-3,20	5,00-6,00	Do 0,01	Do 0,015	Do 0,03

3.4 Obnovení alitované vrstvy

Při obnovení alitované vrstvy, opravárenská technologie počítá s difuzním zažiháváním směsi, určené k alitaci. Jedná se o speciální alitační směs, která se aplikuje nástřikem a následně se zažihává při teplotě $950\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ po dobu 5–6 hodin pro rotorové lopatky. V případě rozváděcích lopatek je doba žihání 2–3 hodiny v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu. Vzhledem k výšce teploty difuzního žihání lze proces alitování v tomto případě považovat za proces hraniční mezi nízko aktivním a vysoko aktivním alitováním. [18]

Modernější technologií obnovy alitovaných vrstev je alitování v práškovém zásypu. Alitace probíhá při teplotě $800\text{ °C} - 820\text{ °C}$ (oblast vysoko aktivního

alitování) v ochranné atmosféře argonu. Po dosažení této teploty se vypne ohřev a spustí se ochlazování. Následně je nutné provést difuzní žíhání ve vakuu v režimu 1000 °C po dobu 2 hodin a ochlazení na 920 °C s výdrží 10 hodin. Tato technologie se používá nejen pro obnovu alitace, ale také pro alitování nových tepelně zpracovaných dílů. Jinou variantou alitace v zásypu je technologie nanášení vrstvy metodou difuze prášku Al v atmosféře vodíku v peci při teplotě 1050±20 °C (nízko aktivní alitování) s následným ochlazením rychlostí odpovídající ochlazení na vzduchu. [18]

3.5 Vyhodnocení alitace

Alitovaný povrch lopatek musí být hladký a tmavě šedý. Puchýře na povrchu, poškození, nebo odlišné zbarvení alitace není přípustné. Naalitované povrchy mohou mít nádech od světle šedé do tmavě šedé barvy. Tloušťka by měla být v rozmezí 20 μm – 50 μm. Tloušťka alitační vrstvy se měří za pomoci optického mikroskopu a programu NIS Elements. Hodnotí se tloušťka homogenní alitované vrstvy, čímž je myšlena vrstva, která se nevytlupuje a není křehká.

3.6 Příprava vzorků pro kontrolu lopatek

Vzorek byl odebrán z lopatky ze směru od hřebínku k zámku, jak je patrné z Obr.10. Odebrání bylo provedeno na laboratorní pile Struers Secotom–50 (Obr. 11). Následné zalisování, broušení a leštění proběhlo na lisu LaboPress–3 (Obr. 12) a brusce/leštičce TegraPol–21 (Obr. 13). Pro kontrolu kvality přípravy vzorků byl zvolen optický mikroskop Olympus PMG–3 (Obr. 14).



Obr.10: Směr odebrání vzorku



Obr. 11: Struers Secotom-50



Obr. 12: Struers LaboPress-3



Obr. 13: Struers TegraPol-21



Obr. 14: Olympus PMG-3 [29]

3.6.1 Leptání vzorků

Po kontrole vizuálního stavu vzorků na optickém mikroskopu, byly vzorky naleptány pro vyhodnocení mikrostruktury nebo pro vyhodnocení alitační vrstvy. Složení použitých leptadel je uvedeno v Tab. 6. Přesné složení leptadel, teploty a doby jsou předmětem schválených interních postupů.

Tab. 6: Chemické složení použitých leptadel

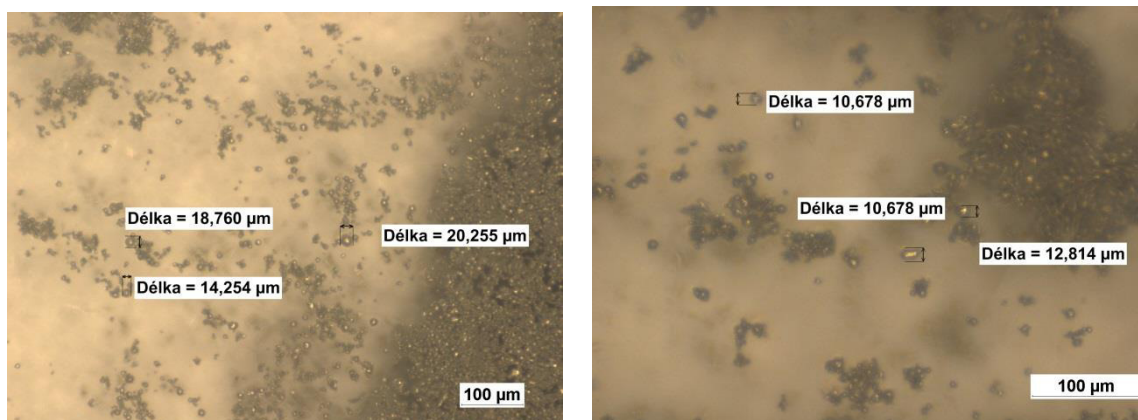
Leptadlo na alitaci	Leptadlo na strukturu
HCl konc.	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
HNO_3 konc.	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
HF 40%	$\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
H_2O	HCl
	H_2O

3.7 Druhy alitačních prášků

Alitační prášek by měl být globulární s co nejmenší zrnitostí. K dispozici pro zkoušky alitace byly 2 prášky a jedna již připravená barva.

3.7.1 Prášek číslo 1

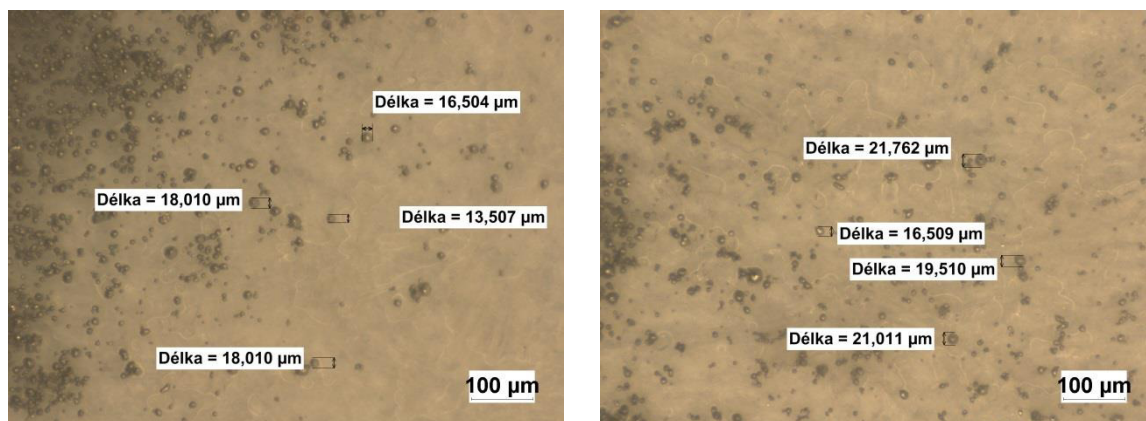
Prášek číslo 1 je globulární alitační prášek s velikostí zrna v rozmezí 13 μm – 22 μm (Obr. 15).



Obr. 15: Zrnitost Prášku číslo 1

3.7.2 Prášek číslo 2

Prášek číslo 2 je alitační prášek s globulárním zrnem velikostí mezi 10 μm – 25 μm (Obr. 16).



Obr. 16: Zrnitost Prášku číslo 2

3.7.3 Alitační barva

Jedná se o anorganickou hliníkovo – křemíkovou suspenzi vyráběnou v USA, která je určena pro ochranu proti vysokoteplotní korozi niklových slitin, a to díky obsahu 0,7–0,8 hm.% oxidu chromového. Tato barva je zahrnuta do skupiny III (hazardní materiály) v listině karcinogenních materiálů. Při práci s touto barvou musí být dodržována příslušná bezpečnostní opatření. Z těchto důvodů byl

nástřik a veškerá manipulace se suspenzí provedena na akreditovaném pracovišti, které je pro tyto činnosti odpovídajícím způsobem vybaveno.

Obecně se jedná o alitační prášek stejně jako u předchozích kap. 3.7.1 a kap. 3.7.2, ale vzhledem k tomu, že se dodává již v namíchaném stavu s pojivem, mluvíme o něm jako o alitační barvě. Protože se jedná o již předpřipravenou směs v tekutém stavu nelze, s experimentálním vybavením dostupným pro řešení diplomové práce, určit velikost zrna.

3.8 Doporučený postup opravy alitační vrstvy

A. Příprava vzorků

1. Odmaštění otryskaných lopatek pomocí štětce
2. Oplach ponorem v odmašťovací lázni
3. Umístění lopatek do přípravku a sušení v sušárně
4. Umístění do přípravku pro nástřik lopatek
5. Maskování lopatek (Zamezení proti nástřiku nechtěných ploch)

B. Příprava a aplikace alitační barvy

6. Smísení alitačního prášku s pojivem a rozmíchávání po předepsanou dobu do úplného promísení
7. Odebrání potřebného množství barvy z míchací nádoby
8. Nástřik lopatek pomocí stříkací pistole

C. Příprava pece

9. Vyjmutí retorty z pece
10. Vyčištění retorty od prachu a nečistot. Odmaštění. Kontrola trubek argonu a jejich profouknutí čistým suchým vzduchem
11. Vložení lopatek v přípravku do retorty
12. Vložení kontrolního termočlánku
13. Uzavření retorty
14. Připojení argonu k retortě a následné profukování retorty stanoveným průtokem argonu po určenou dobu
15. Předehřev pece

D. Teplotní cyklus

16. Vložení retorty do pece. Ohřev s definovaným průtokem argonu
17. Volné ochlazování v peci až do teploty okolí

E. Kontrola

18. Kontrola zápisu teplot
19. Metalografické hodnocení tloušťky alitované vrstvy

3.9 Možnosti změn postupu alitace

3.9.1 Předúprava vzorků

1. Klasická předúprava

Klasická předúprava probíhá ve třech krocích, které se 3–4x opakují dle potřeby, po demontáži lopatek z motoru. Na závěr před nanesením alitačního prášku jsou lopatky ještě tryskané balotinou.

1. Elektrolytické mytí
2. Promytí
3. Ultrazvukové mytí

2. Leptání

Leptání je proces probíhající po demontáži lopatek z motoru. Leptadlem je směs kyselin (kyselina fluorovodíková, kyselina dusičná a oxid chromový, který se po smísení stává kyselinou chromovou).

1. Leptání
2. Oplach
3. Neutralizace
4. Oplach
5. Ultrazvukové čištění
6. Sušení
7. Mechanické čištění

Proces leptání se opakuje, dokud lopatky nejsou vizuálně čisté, maximálně však tak dlouho aby nezačalo docházet k leptání matrice. Přejít k naleptání matrice je vizuálně patrné a je zcela nepřijatelné.

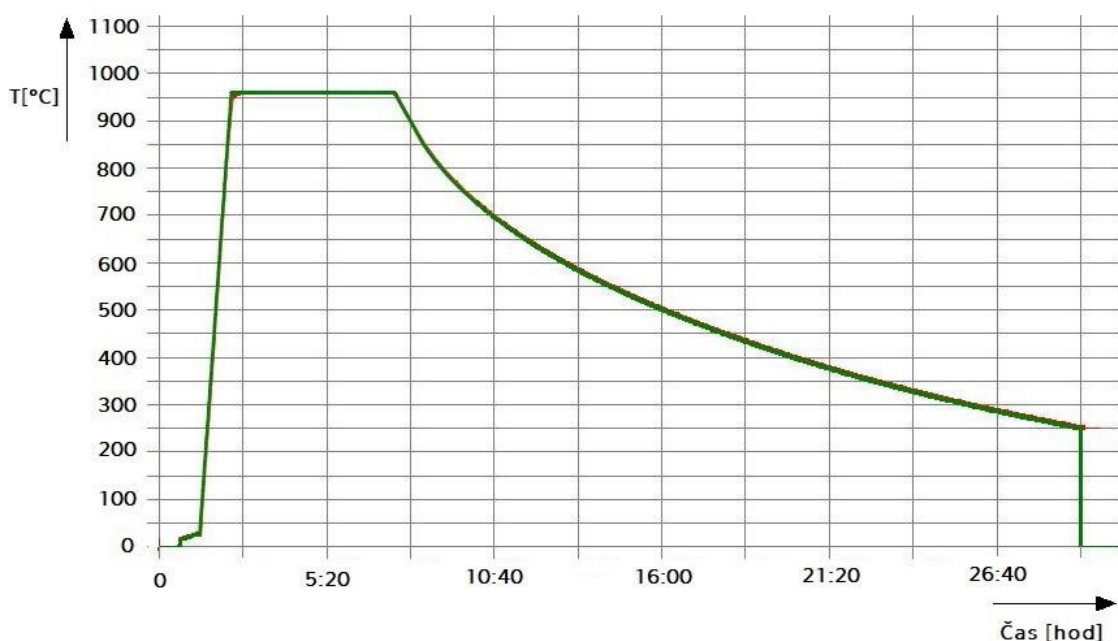
3.9.2 Tepelné zpracování

1. Klasické tepelné zpracování

Jako klasické tepelné zpracování je v experimentální části práce označen postup používaný v provozu za použití přizpůsobených parametrů technickému vybavení. Jedním z cílů této práce je optimalizace tohoto postupu.

Vsázka byla založena k tepelnému zpracování spolu se zapnutím topného systému pece a spuštěním průtoku argonu. Pro zajištění dostatečné ochrany žíhaných lopatek byl nastaven průtok argonu 8 l/min, což je více než je požadovaný průtok dle předpisu. Důvodem pro volbu zvýšeného průtoku argonu bylo, že se nejedná o vakuovou pec, která je dle předpisu požadována a bylo tak zamezeno možnosti přístupu okolní atmosféry do kavity pece.

Doba náběhu na žíhací teplotu byla 2 hodiny a 25 minut. Výdrž na žíhací teplotě byla dle možnosti daných předpisů zvolena maximální a to 300 minut. Po dosažení doby výdrže na teplotě byl vypnut topný systém pece. Ochlazování probíhalo samovolně v uzavřené peci s řízeným průtokem argonu do teploty 200 °C. Této teploty bylo dosaženo po 23 hodinách a 20 minutách. Následovalo volné ochlazení na vzduchu. Během celého procesu tepelného zpracování bylo prováděno měření teploty uvnitř pece. Záznam z průběhu teploty v peci při tepelném zpracování je zobrazen na Obr. 17. Na svislé ose jsou vyneseny hodnoty teploty ve °C. Vodorovná osa udává časový průběh tepelného zpracování.



Obr. 17: Graf průběhu teplot při klasickém tepelném zpracování

2. Tepelné zpracování s předehřevem

Navrženým (optimalizovaným) tepelným zpracováním je nazýváno tepelné zpracování s předehřevem. Byla použita laboratorní pec s retortou, která dosahuje maximální teploty ohřevu 1000 °C.

Vsázka byla vložena do retorty, která byla 30 minut proplachována argonem s průtokem 8 l/min. Pec byla předehřáta na maximální možnou teplotu 1000 °C a poté byla vložena retorta s vsázkou. Při otevření pece došlo k poklesu teploty až na 850 °C, z kterých po uzavření pece během 30 minut bylo dosaženo požadovaných 950 °C. Výdrž na žíhací teplotě trvala maximální možnou dobu dle předpisu a to 300 minut. Následně došlo k volnému ochlazení v ochranné atmosféře argonu na teplotu 200 °C, které trvalo 22 hodin a 5 minut a k následnému ochlazení na vzduchu.

Po dokončení tepelného zpracování byl z řídicího systému pece získán graf naměřených hodnot změn teploty v peci o přesném průběhu. Na ose 1 jsou vyneseny hodnoty změny teploty ve °C. Vodorovná osa označuje časové rozmezí tepelného zpracování. Na Obr. 18 je vidět průběh teplot navrženého difuzního žíhání.



Obr. 18: Graf průběhu teplot při tepelném zpracování s předehřevem

3.10 Experimentální program

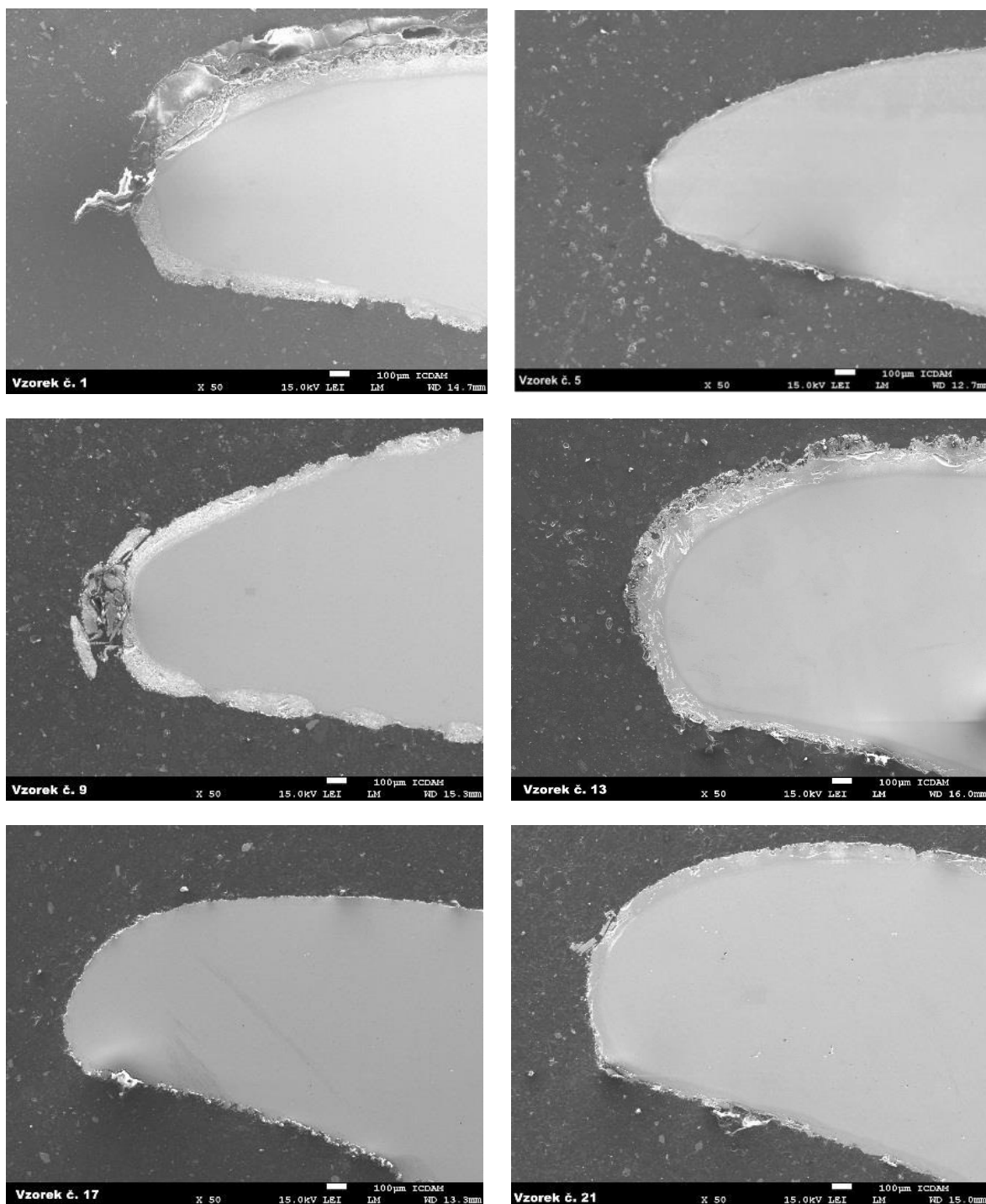
Pro zkoušky byly předány dvě sady lopatek různé předúpravy, jak je zmíněno v kapitole 3.2. Každá sada má v experimentálním programu zahrnutý všechny možné kombinace předúprav a tepelného zpracování. V Tab. 7 jsou vidět všechny použité kombinace s přímým odkazem na číslo vzorku, pro který byly aplikovány.

Tab. 7: Varianty zkoušek

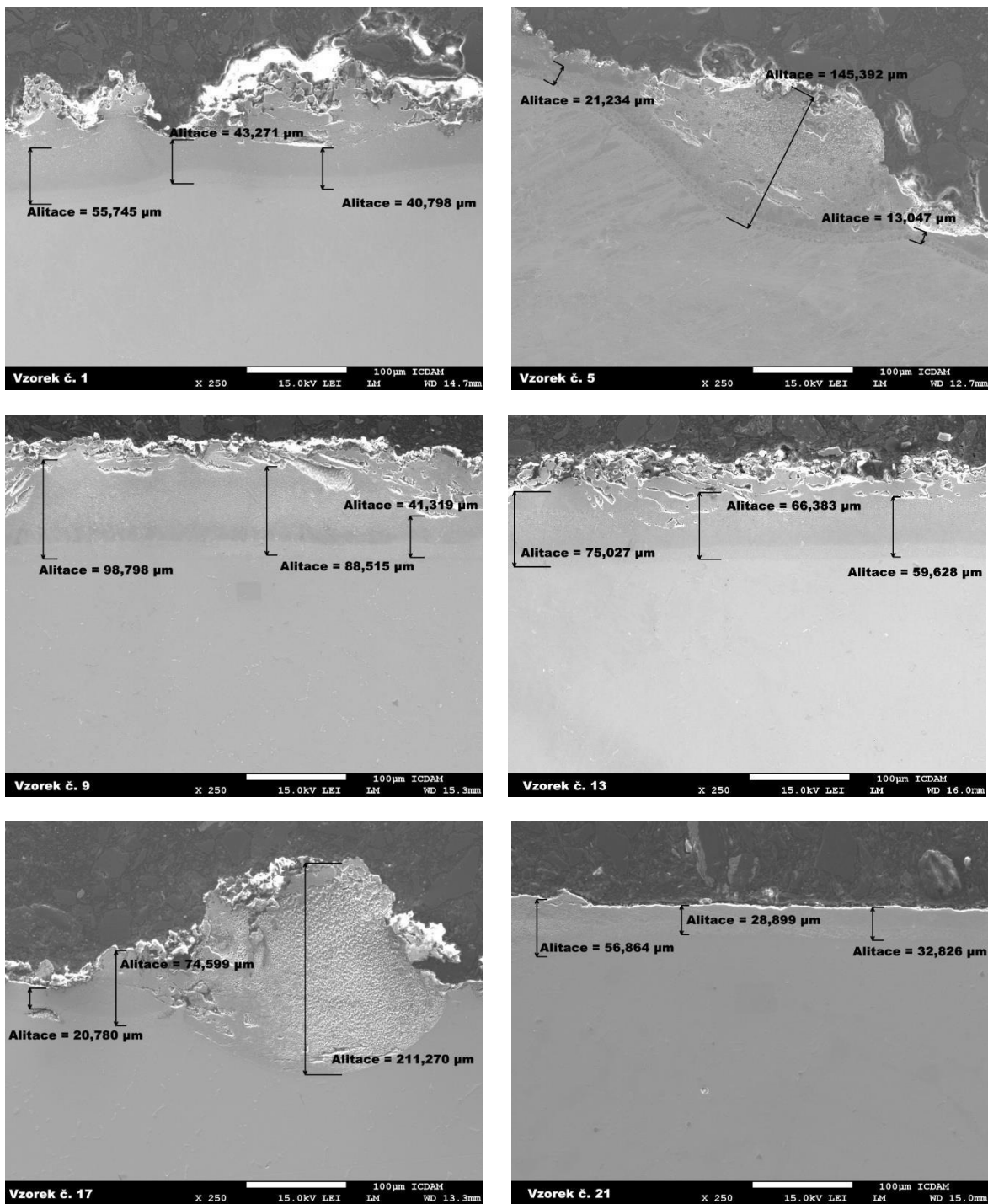
Sada	TYP ALITAČNÍHO PRÁŠKU								
	Prášek číslo 1			Prášek číslo 2			Alitační barva		
	Číslo vzorku	Předúprava	Tepelné zpracování	Číslo vzorku	Předúprava	Tepelné zpracování	Číslo vzorku	Předúprava	Tepelné zpracování
1	1	Klasická	Klasické	5	Klasická	Klasické	9	Klasická	Klasické
	2	Klasická	Předehřev	6	Klasická	Předehřev	10	Klasická	Předehřev
	3	Leptání	Klasické	7	Leptání	Klasické	11	Leptání	Klasické
	4	Leptání	Předehřev	8	Leptání	Předehřev	12	Leptání	Předehřev
2	13	Klasická	Klasické	17	Klasická	Klasické	21	Klasická	Klasické
	14	Klasická	Předehřev	18	Klasická	Předehřev	22	Klasická	Předehřev
	15	Leptání	Klasické	19	Leptání	Klasické	23	Leptání	Klasické
	16	Leptání	Předehřev	20	Leptání	Předehřev	24	Leptání	Předehřev

3.10.1 Klasická předúprava a klasické tepelné zpracování

Řez hranami lopatek (viz Obr. 19), které byly zpracovávány klasickou předúpravou a klasický tepelným zpracováním jsou označeny čísly 1, 5, 9, 13, 17 a 21.



Obr. 19: Porovnání vzorků 1, 5, 9, 13, 17, 21 (náběžná hrana lopatky)



Obr. 20: Porovnání vzorků 1, 5, 9, 13, 17, 21 (hřbet lopatky)

Na základě pozorování lopatek při náběžné hraně (Obr. 19) lze prohlásit vzorky 5, 9 a 17 za nevyhovující. Jsou zde přítomná místa, kde k vytvoření alitovné vrstvy nedošlo a na jiných místech je alitace nerovnoměrná. Na Obr. 20 je patrné, že nerovnoměrnost alitační vrstvy je nepřipustně vysoká, byl měřen rozdíl i více než desetinásobku běžné tloušťky vrstvy. Alitace u těchto vzorků je nehomogenní a výkyvy tlouštěk dosahují obecně stovek mikrometrů. U vzorku 5 byla nejnižší naměřená tloušťka homogenní vrstvy 13 μm, nejvyšší 145 μm. U vzorku 9 je

nejnižší naměřená tloušťka homogenní vrstvy 41 μm , nejvyšší 91 μm . U vzorku číslo 17 je nejnižší naměřená tloušťka homogenní vrstvy 21 μm , nejvyšší 211 μm .

Vzorky číslo 13 a 21 se při zvětšení, použitím na Obr. 19 zdají vyhovující, ale z Obr. 20 je následně patrné, že jejich alitace je nedostatečná, z důvodu špatné kvality vrstvy. Vzorek č. 13 má rovnoměrnou vrstvu po celém obvodu lopatky o tloušťce mezi 50 μm – 90 μm . Vrstva je ovšem velmi křehká, nehomogenní a vylupuje se. Vzorek č. 21 má alitační vrstvu homogenní, ale místně k alitaci nedošlo. Na Obr. 20 – vzorek č. 21 je vidět, že tloušťka alitace se pohybuje okolo 40 μm . Oproti ostatním vzorkům, je alitační vrstva kompaktní a homogenní.

Vzorek č. 1 na Obr. 19 má na náběžné hraně patrná místa bez alitační vrstvy. Na Obr. 20 je zobrazena naměřená tloušťka homogenní vrstvy měřená na hřbetu lopatky, pohybující se okolo 50 μm . Alitace je křehká a nerovnoměrná po celém obvodu. To znamená, že nebylo dosaženo požadavků na kvalitní vrstvu alitace.

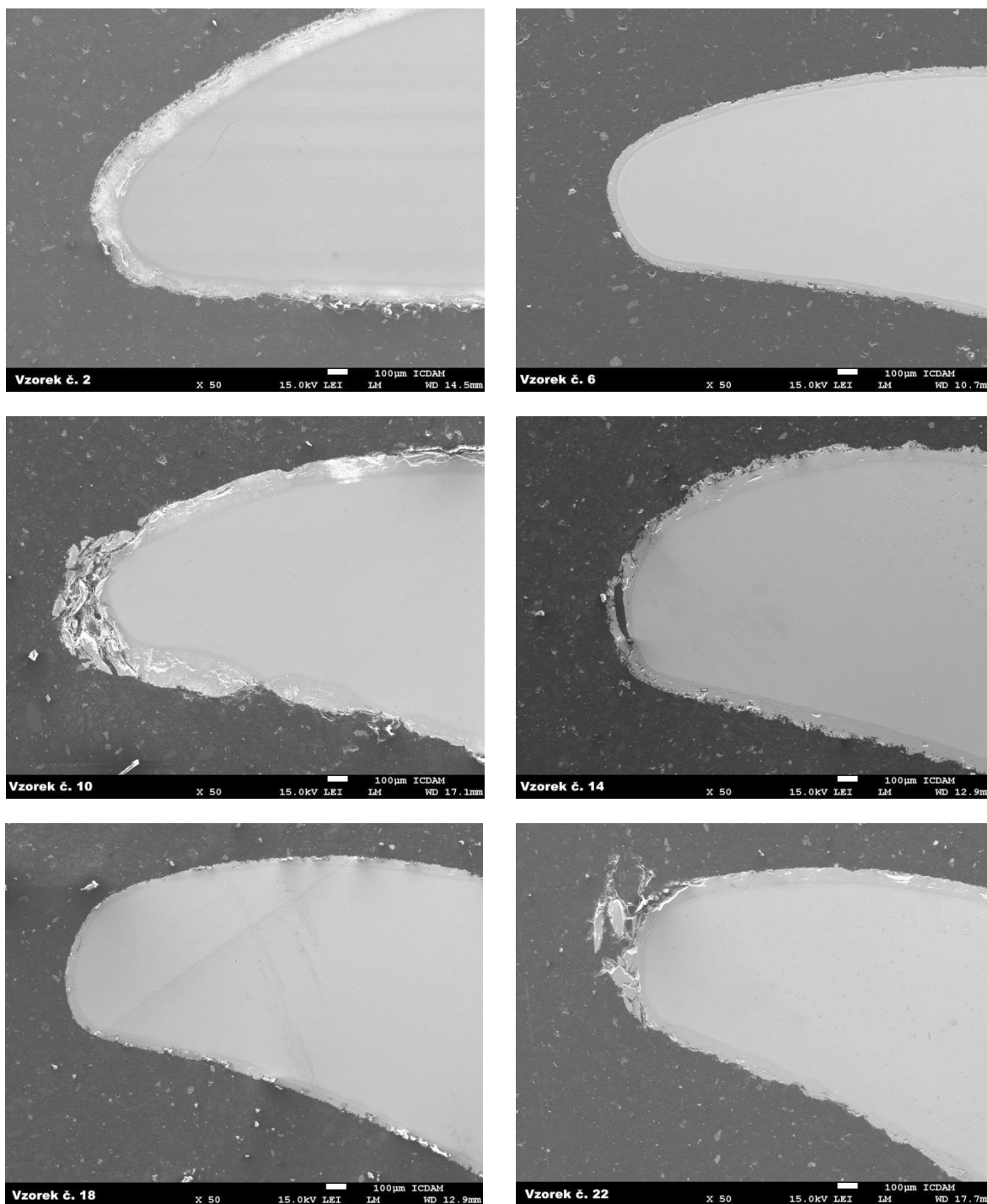
Pro kombinaci klasického tepelného zpracování a klasické předúpravy, tedy nevyhověl ani jeden vzorek, z důvodu nedostatečné kvality alitace nebo k výskytu míst bez alitace. Jedním z důvodů nenaalitování lopatek může být nedostatečné očištění lopatek, a bylo by tedy vhodné cyklus čištění provést s více opakujícími se cykly, nebo zajistit kontrolu dostatečného očištění vzorků. Dalším důvodem může být nedostatečná čistota komory v peci při difuzním žíhání. Nedostatečná čistota by mohla mít vliv i na celkovou výslednou kvalitu alitační vrstvy. Sumarizace poznatků je uvedena v Tab. 8.

Tab. 8: Zhodnocení kombinace Klasické předúprava a Klasického tepelného zpracování

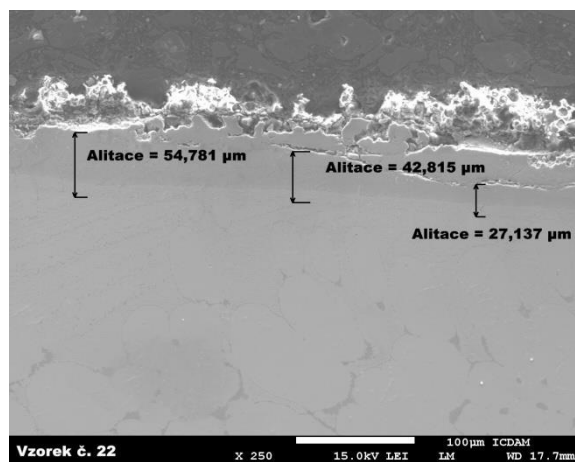
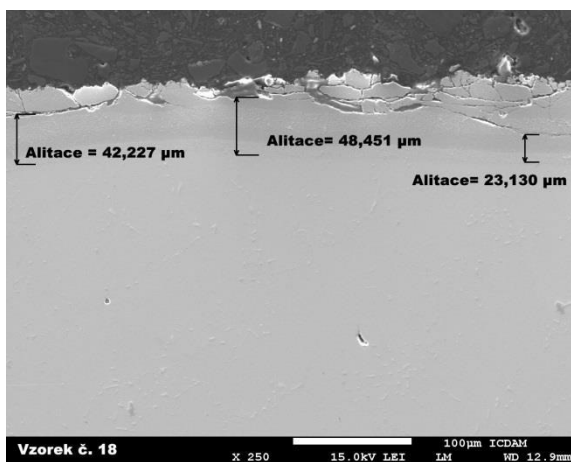
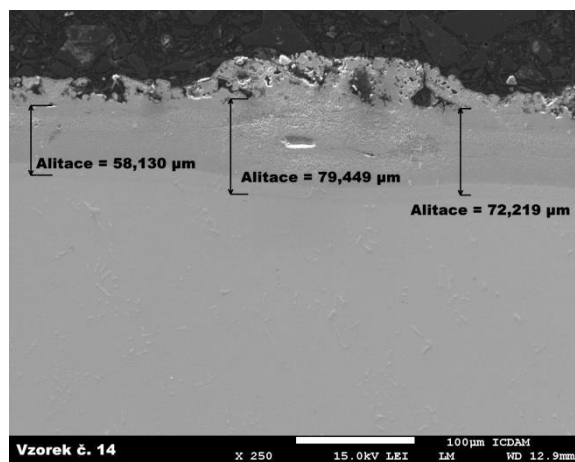
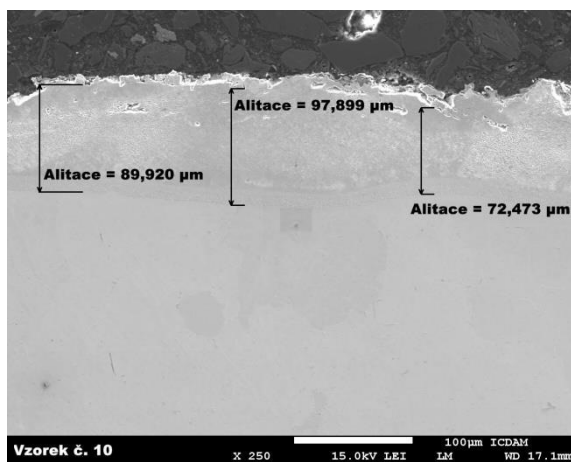
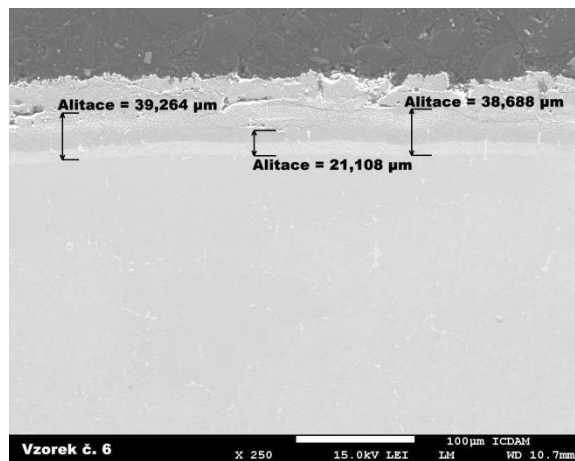
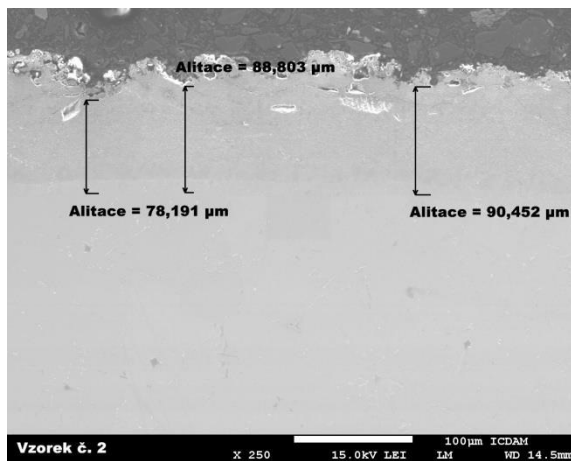
Vzorek č.	Alitační prášek	Hodnocení	Poznámka
1	1	Nevyhovující	Místa bez alitace, nerovnoměrná a křehká vrstva
5	2	Nevyhovující	Nehomogenní, nerovnoměrná alitace, velké výkyvy tloušťek alitace, místy bez alitace
9	Barva	Nevyhovující	Nehomogenní, nerovnoměrná alitace, velké výkyvy tloušťek alitace, místy bez alitace
13	1	Nevyhovující	Křehká, nehomogenní a vylupující se vrstva
17	2	Nevyhovující	Nehomogenní, nerovnoměrná alitace, velké výkyvy tloušťek alitace, místy bez alitace
21	Barva	Nevyhovující	Místy bez alitace

3.10.2 Klasická předúprava a tepelné zpracování s předehřevem

Řez hranami lopatek (viz Obr. 21), které byly zpracovávány klasickou předúpravou a tepelným zpracování s předehřevem jsou označeny čísla 2, 6, 10, 14, 18 a 22.



Obr. 21: Porovnání vzorků 2, 6, 10, 14, 18, 22 (náběžná hrana lopatky)



Obr. 22: Porovnání vzorků 2, 6, 10, 14, 18, 22 (hřbet lopatky)

Na Obr. 21 je přehledné porovnání náběžných hran sledovaných lopatek. Vzorky č. 10 a č. 22 mají křehkou, nerovnoměrnou vrstvu, kde místy k naalitování nedošlo. Na Obr. 22 jsou vidět měřené tloušťky vrstvy na hřbetu lopatek. Vzorek č. 10 má tloušťku vrstvy pohybující se mezi 70 μm – 100 μm a vzorek č. 22 má hodnoty tloušťky mezi 25 μm a 55 μm . Vzorky mají tedy vyhovující tloušťku alitované vrstvy, ale nevyhovující kvalitu.

Homogenní a rovnoměrnou vrstvu alitace vykazuje vzorek č. 2. Z Obr. 21 je patrné, že alitační vrstva není křehká a nevytlupuje se, tento vzorek lze z makroskopického pohledu hodnotit jako vyhovující. Na Obr. 22 jsou vidět tloušťky naměřené vrstvy hřbetu lopatky, které se pohybují mezi 75 μm a 95 μm . Lopatka, tedy kvalitativně vyhovuje, ale pro vrácení zpět do provozu by bylo nutné tloušťku vrstvy snížit na maximální povolenou hodnotu 50 μm . Možnou technologií snížení vrstvy by bylo omílání, ale s nutností experimentálního ověření, zda omílání neubírá i základní materiál z nenaalitovaných částí lopatky a zda je omílání dostatečně efektivní.

Vzorek č. 6 vykazuje nižší hodnoty tloušťky než vzorek č. 2. Na Obr. 21 jsou měřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy na hřbetu lopatky, pohybující se mezi 20 μm a 40 μm . Tento vzorek tedy splňuje mezní hodnoty tloušťky alitace. Na Obr. 22 je zobrazena náběžná hrana s rovnoměrnou alitační vrstvou, která je po celém obvodu lopatky. Oproti vzorku číslo 2, je alitace křehčí, ale nevytlupuje se. Alitační vrstva vyhovuje z hlediska tloušťky i z hlediska kvality.

U vzorku č. 14 jsou hodnoty tloušťky alitace hřbetu lopatky zobrazené na Obr. 22 v rozmezích 50 μm – 80 μm . Tloušťka vrstvy je nadlimitní a musí být pro vrácení do provozu snížena na povolených 50 μm . Z hlediska kvality je vytvořená alitační vrstva křehčí než u vzorku č. 6. Tento vzorek by mohl být hodnocen jako vyhovující po snížení tloušťky alitační vrstvy.

U vzorku 18 je na Obr. 21 patrné, že došlo k vytvoření rovnoměrné alitační vrstvy. Na náběžné hraně lopatky (Obr. 22) byla naměřena tloušťka vrstvy pohybující se mezi 20 μm – 50 μm . Místy však k vytvoření alitace nedošlo. Kvalita vrstvy není dostatečná, alitace je křehká a vylupuje se.

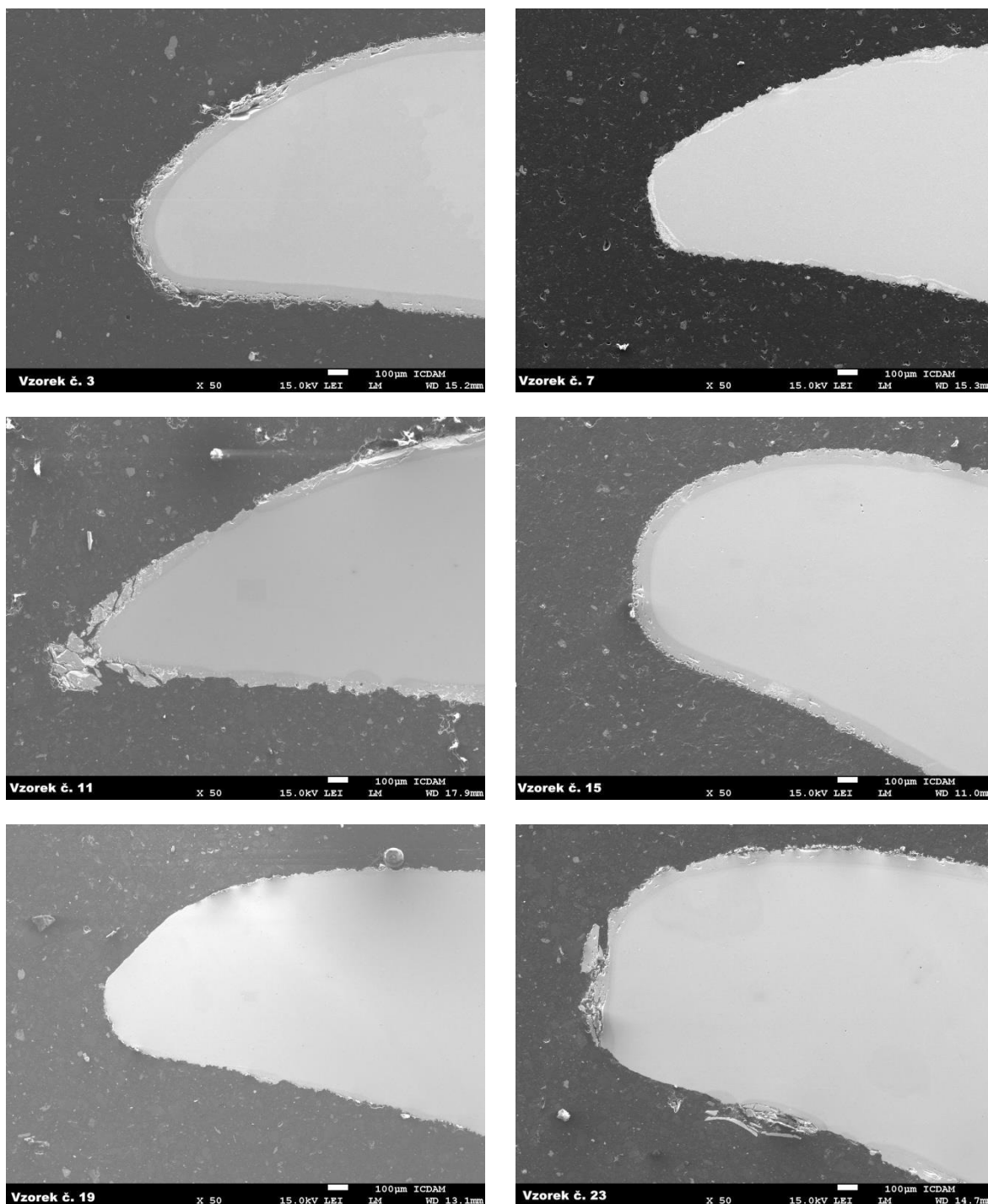
Celkové zhodnocení této kombinace předúpravy a tepelného zpracování je uvedeno v Tab. 9.

Tab. 9: Zhodnocení kombinace Klasické předúpravy a Tepelného zpracování s předeheřevem

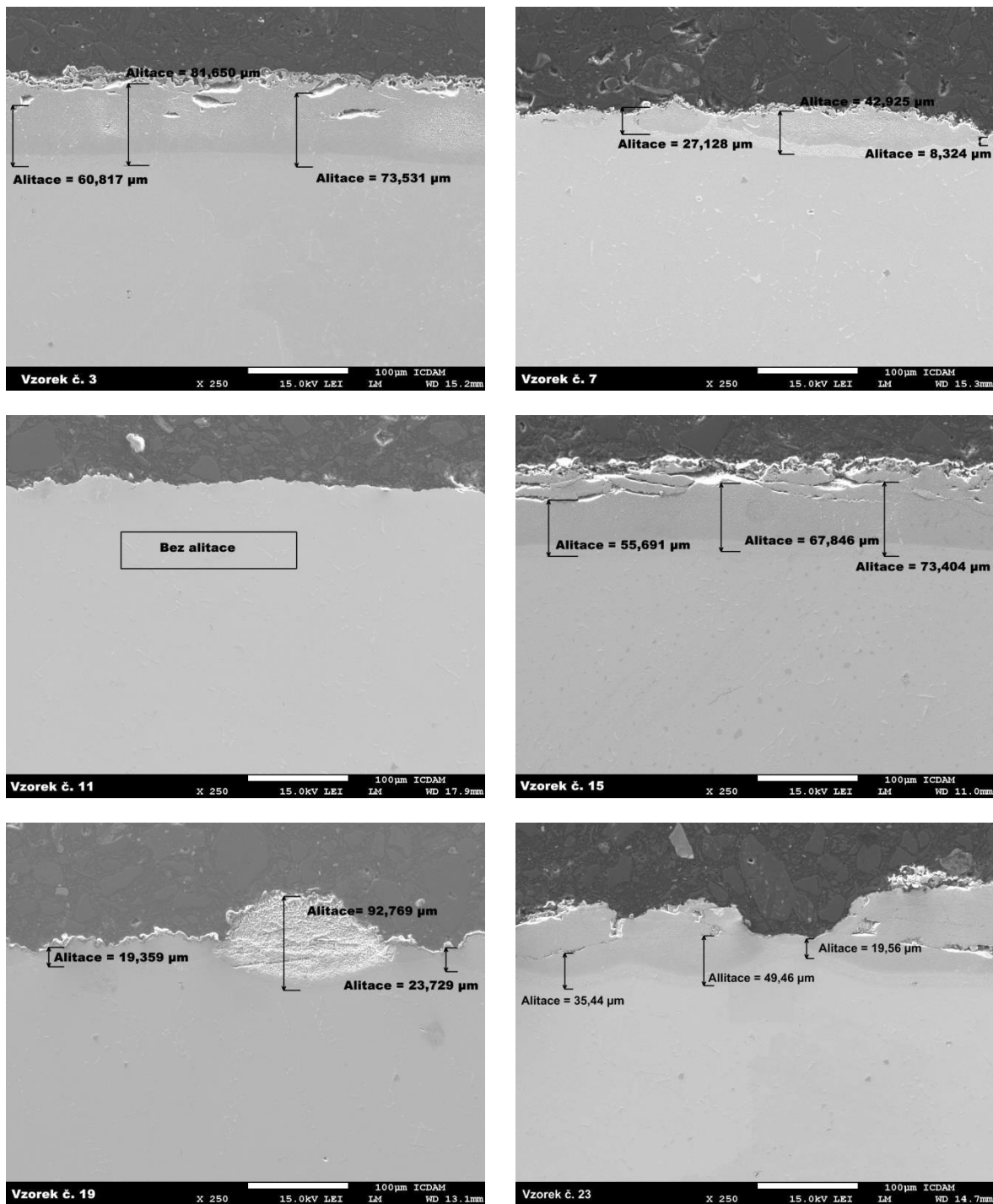
Vzorek č.	Alitační prášek	Hodnocení	Poznámka
2	1	Podmíněně vyhovující	Nutnost snížení tloušťky vrstvy
6	2	Vyhovující	Bez poznámek
10	Barva	Nevyhovující	Místy bez alitace, křehká, nerovnoměrná vrstva
14	1	Podmíněně vyhovující	Nutnost snížení tloušťky vrstvy
18	2	Nevyhovující	Místy bez alitace, křehká, vylupující se vrstva
22	Barva	Nevyhovující	Místy bez alitace, křehká, nerovnoměrná vrstva

3.10.3 Leptání a klasické tepelné zpracování

Řez hranami lopatek (viz Obr. 23), které byly zpracovávány leptáním a klasický tepelným zpracováním jsou označeny čísly 3, 7, 11, 15, 19 a 23.



Obr. 23: Porovnání vzorků 3, 7, 11, 15, 19, 23 (náběžná hrana lopatky)



Obr. 24: Porovnání vzorků 3, 7, 11, 15, 19, 23 (hřbet lopatky)

Na Obr. 23 můžeme z hlediska rovnoměrnosti alitační vrstvy, vyhodnotit vzorky č. 3 a č. 15 jako vyhovující. Alitační vrstva na vzorku č. 15 křehčí než u vzorku č. 3. Obr. 24 ukazuje měřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy na hřbetu lopatky. Vzorek č. 3 dosahuje hodnot mezi 50 μm – 85 μm a vzorek č. 15 mezi 55 μm – 65 μm . Z hlediska rovnoměrnosti a tloušťky vrstvy by bylo potřeba ještě tloušťku vrstvy snížit pod požadovanou limitní hodnotu 50 μm . Kvalitativně je vrstva rovnoměrná, křehká a homogenní.

Ze snímků na Obr. 23, je možné konstatovat, že na vzorcích č. 7, 11 a 19 se na mnoha místech alitační vrstva nebyla vytvořena. Vzorek č. 7 má nerovnoměrnou alitační vrstvu po celém obvodu lopatky. Obr. 24 ukazuje hřbet lopatky, kde byla naměřená tloušťka alitační vrstvy mezi 5 μm – 35 μm . Kvalitativně je vrstva homogenní a není křehká, ale z hlediska rovnoměrnosti a tloušťky alitační vrstvy nevyhovuje. Z porovnání vzorku č. 11 se vzorek č. 7 vykazuje vzorek č. 11 velmi křehkou alitační vrstvu. Pro vzorek č. 11 je na Obr. 23 vidět náběžná hrana lopatky, kde jsou vidět místa odlupující se vytvořené alitační vrstvy, její nerovnoměrnost a i místa, kde se alitace nevytvořila. K alitaci nedošlo ani na hřbetu lopatky, jak je vidět na Obr. 24. Vzorek č. 11 je tedy nevyhovující z hlediska rovnoměrnosti tloušťky vrstvy i její kvality. Nerovnoměrnost a nedostatečné vytvoření alitační vrstvy je vidět také u vzorku č. 19 na Obr. 23. Po celém obvodu lopatky jsou místa kde k vytvoření alitační vrstvy nedošlo anebo naopak vytvořená vrstva dosahuje nadměrných hodnot. Na hřbetu lopatky (Obr. 24) je vidět rozdílné hodnoty naměřených tloušťek vytvořené alitační vrstvy, pohybující se mezi 15 μm – 95 μm . Ani tento vzorek tedy není vyhovující ať už z hlediska tloušťky vrstvy nebo z pohledu kvality alitační vrstvy.

Poslední vzorek č. 23 má na náběžné hraně na Obr. 23 několik míst, kde se alitační vrstva odlupuje a je nerovnoměrná po celém obvodu. Vytvořená alitační vrstva je křehká a naměřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy (Obr. 24) na hřbetu lopatky se pohybují mezi 15 μm – 50 μm . Kvalitativně tato lopatka nevyhovuje a z hlediska tloušťky vytvořené vrstvy nesplňuje limitní hodnoty.

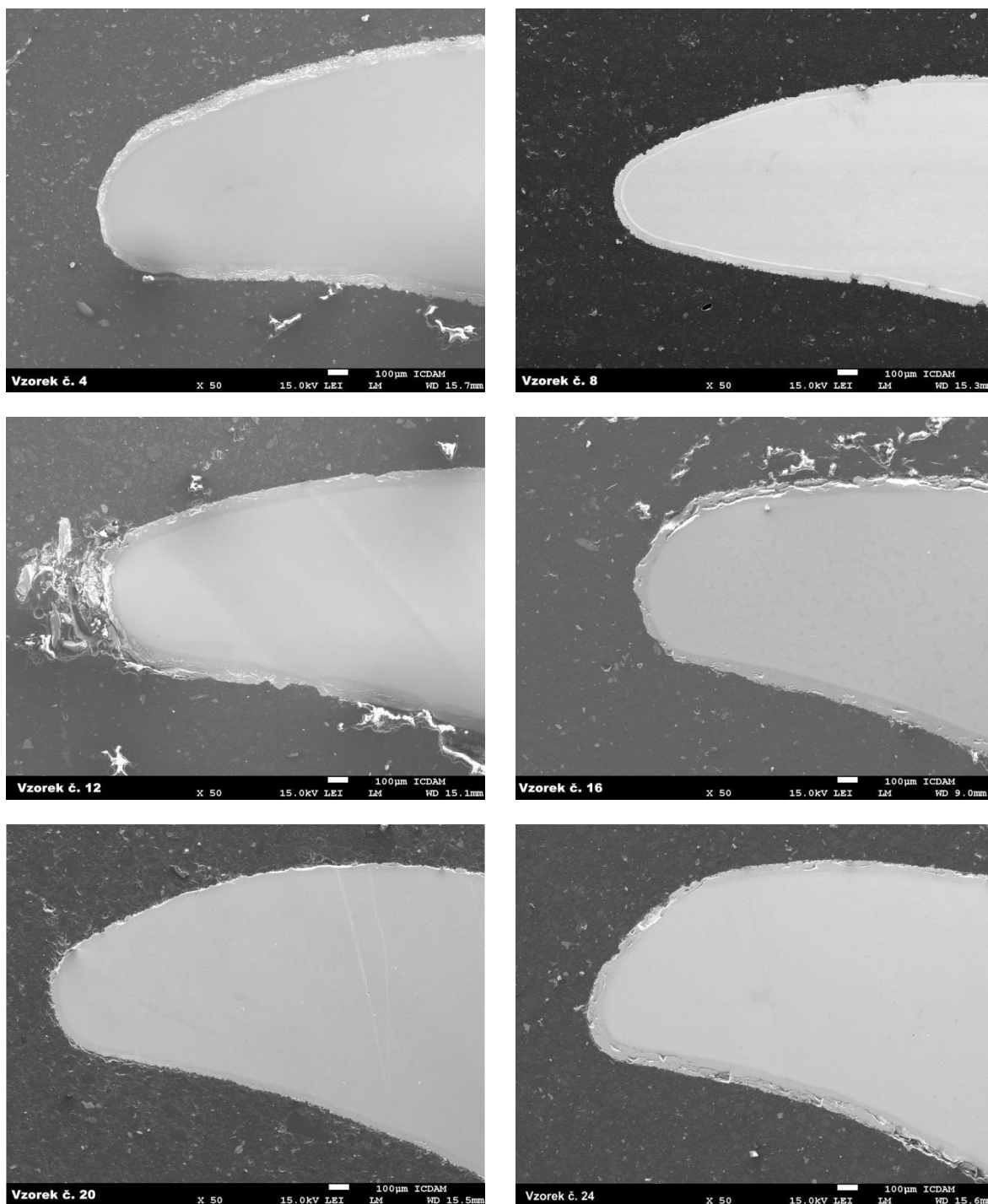
Výsledky této skupiny porovnávaných lopatek jsou shrnuty v Tab. 10.

Tab. 10: Zhodnocení kombinace Leptání a Klasického tepelného zpracování

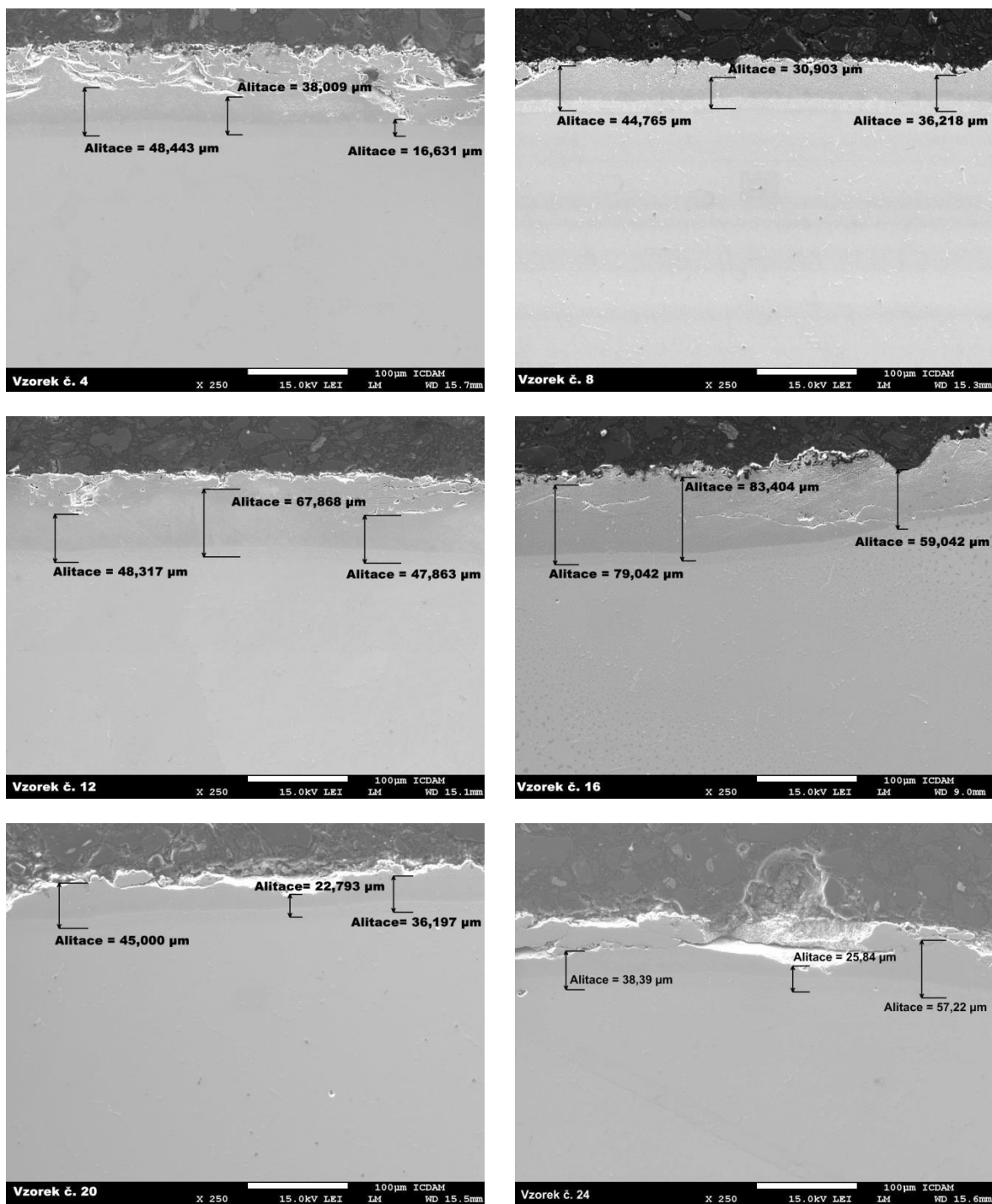
Vzorek č.	Alitační prášek	Hodnocení	Poznámka
3	1	Podmíněně vyhovující	Nutnost snížení tloušťky vrstvy
7	2	Nevyhovuje	Místa bez alitace, malé tloušťky alitace
11	Barva	Nevyhovuje	Křehká alitace, místy bez alitace
15	1	Podmíněně vyhovující	Nutnost snížení tloušťky vrstvy
19	2	Nevyhovuje	Místa bez alitace, nerovnoměrná
23	Barva	Nevyhovuje	Křehká nerovnoměrná vrstva, místy bez alitace

3.10.4 Leptání a tepelné zpracování s předehřevem

Řez hranami lopatek (viz Obr. 25), které byly zpracovávány leptáním a tepelným zpracováním s předehřevem jsou označeny číslem 4, 8, 12, 16, 20 a 24.



Obr. 25: Porovnání vzorků 4, 8, 12, 16, 20, 24 (náběžná hrana lopatky)



Obr. 26: Porovnání vzorků 4, 8, 12, 16, 20, 24 (hřbet lopatky)

Vzorek č. 4 na Obr. 25 lze považovat za kvalitativně vyhovující. Na náběžné hraně lopatky je vidět, že vytvořená alitační vrstva je rovnoměrná a po celém obvodu lopatky. Obr. 26 dokumentuje naměřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy na hřbetu lopatky. Naměřená tloušťka homogenní alitační vrstvy se pohybuje mezi 15 μm – 50 μm. Vzhledem k limitující spodní hranici 20 μm tento vzorek nesplňuje podmínky tloušťky vrstvy.

Na Obr. 25 je viditelné, že vzorek č. 8 má nerovnoměrnou alitační vrstvu, a místy se alitační vrstva nevytvořila. Naměřená tloušťka vrstvy na hřbetu lopatky (Obr. 26) se pohybuje v rozmezí od 30 μm do 50 μm . Vytvořená alitační vrstva je homogenní a nechová se křehce, z hlediska kvality a tloušťky vytvořené vrstvy vyhovuje. Vzorek však nevyhovuje kvůli nerovnoměrnosti vrstvy a místům, kde k vytvoření alitační vrstvy nedošlo.

Vzorek č. 12 má naměřenou tloušťku vytvořené alitační vrstvy na hřbetu lopatky patrnou z Obr. 26 mezi 45 μm a 70 μm , splňuje tedy spodní limit tloušťky a vrstva je po celém obvodu lopatky. Na náběžné hraně, Obr. 25, se alitační vrstva odlupuje, je křehká a nerovnoměrná. Místy dochází k oddělení alitační vrstvy až na základní materiál lopatky. Vzorek splňuje limity tloušťky vrstvy, ale kvalitativně je nevyhovující.

Vzorky č. 16 a 24 mají vytvořenou alitační vrstvu na náběžné hraně křehkou a nerovnoměrnou (Obr. 25). Vrstva u obou vzorků se vylupuje a místy se alitační vrstva vůbec nevytvořila. Naměřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy z Obr. 26 na hřbetu lopatky vykazují větší hodnoty, a to v rozptylu mezi 55 μm – 85 μm , než u vzorku č. 24, kde byly naměřeny hodnoty mezi 25 μm – 60 μm . Ani jeden ze vzorků kvalitou vrstvy nevyhovuje.

Vzorek č. 20 má (viz Obr. 25) nerovnoměrnou, tenkou alitační vrstvu. Naměřené hodnoty tloušťky alitační vrstvy na hřbetu lopatky, patrné z Obr. 26, se pohybují mezi 20 μm – 40 μm . Na určitých místech lopatky se alitační vrstva nevytvořila. Vzorek je nevyhovující z hlediska kvality alitační vrstvy.

Shrnutí všech výsledků skupiny lopatek v kombinaci leptání a tepelného zpracování s předehevem je uvedeno v Tab. 11.

Tab. 11: Zhodnocení kombinace Leptání a tepelného zpracování s předehevem

Vzorek č.	Alitační prášek	Hodnocení	Poznámka
4	1	Nevyhovující	Nesplnění spodní limity tloušťky vrstvy
8	2	Nevyhovující	Místy bez alitace
12	Barva	Nevyhovující	Odlupující se, křehká vrstva
16	1	Nevyhovující	Křehká, nerovnoměrná, odlupující se vrstva, místy bez alitace
20	2	Nevyhovující	Křehká, nerovnoměrná, odlupující se vrstva, místy bez alitace
24	Barva	Nevyhovující	Nerovnoměrná vrstva, místy bez alitace

4 Shrnutí

Cílem této kapitoly je zjednodušenou formou sumarizovat způsoby alitace, které vykazují dle hodnotících kritérií akceptovatelné výsledky. Alitační vrstva byla hodnocena dle několika parametrů jako tloušťka alitované vrstvy, která by měla být v rozmezí 20 μm - 50 μm , její homogenita, rovnoměrnost a sklony k praskavosti.

Sada 1 pod sebe zahrnuje lopatky, které byly po demontáži z provozovaného leteckého motoru omílány, a to z důvodu jejich prvotního hrubého očištění. Ze sady 1 vykazují dle hodnotících kritérií kvalitní vrstvu alitace vzorky 2, 3 a 6. Pro sadu 2, představující lopatky, které byly čištěny po demontáži bez omílání, byla kvalitní vrstva hodnocena v případě vzorků č. 14 a č. 15.

Až na jednu výjimku u vzorku č. 6 je shodným znakem všech lopatek s vyhovující vrstvou alitace použití alitačního prášku číslo 1. Z kombinací předúprav a následného tepelného zpracování byly pozitivní výsledky získány pouze v případě kombinací:

- Klasické předúpravy a tepelného zpracování s předeheřevem
- Leptání a klasické tepelné zpracování

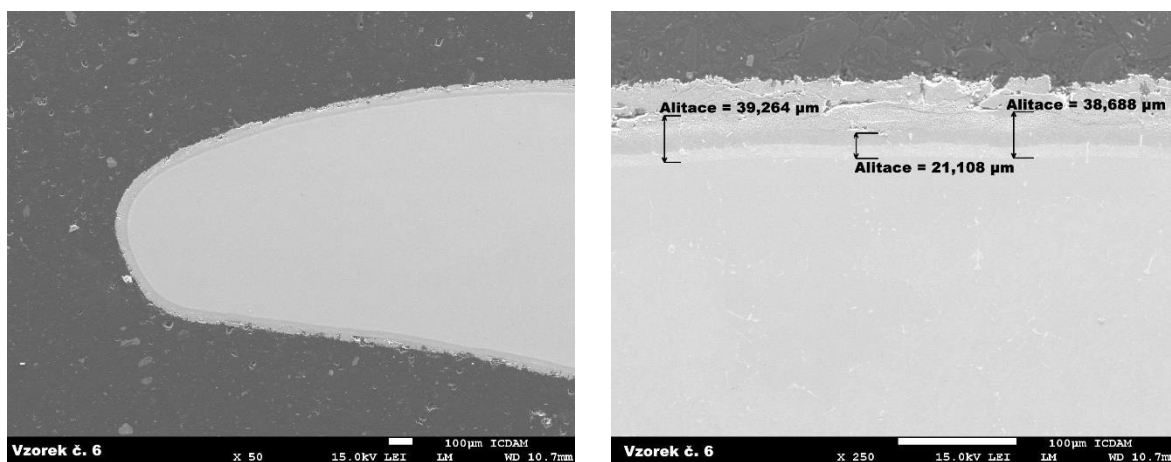
V Tab. 12 je uvedeno celkové shrnutí vzorků, u kterých bylo dosaženo akceptovatelné kvalitní vrstvy alitace. Pro každý vzorek je uvedeno, do které spadá sada z pohledu čištění po demontáži z motoru, jaký byl použit alitační prášek a dále je specifikovaný postup předúpravy povrchu před vlastní alitací a následného tepelného zpracování.

Tab. 12: Soupis vzorků splňujících podmínky akceptovatelné kvality alitace

Sada	Vzorek č.	Prášek	Kombinace
1	2	1	Klasická předúprava a tepelné zpracování s předeheřevem
	3	1	Leptání a klasické tepelné zpracování
	6	2	Klasická předúprava a tepelné zpracování s předeheřevem
2	14	1	Klasická předúprava a tepelné zpracování s předeheřevem
	15	1	Leptání a klasické tepelné zpracování

Vyhovující vzorky byly následně rozděleny do tří skupin, kde bude dále věnována hlavní pozornost tloušťce alitační vrstvy, a to z důvodu, že zbylé hodnotící parametry splňují všechny tři skupiny bez výjimky. První skupina obsahuje vzorky, které jsou vyhovující bez nutnosti dalších úprav. Vzorky v druhé skupině jsou lopatky s alitovanou vrstvou, u které bude nutné, pro možnost aplikace těchto lopatek snížit tloušťku alitační vrstvy do požadovaného rozmezí 20 μm – 50 μm . Do poslední, tedy třetí skupiny byly zařazeny lopatky s předúpravou povrchu leptáním. Třetí skupina byla osamostatněna na základě faktu, že při předúpravě leptáním vzniká velké riziko naleptání základního materiálu až na strukturu, což je nepřijatelné.

Do první skupiny patří pouze vzorek č. 6. Pro tento vzorek byl použit alitační prášek číslo 2 a kombinace klasické předúpravy a tepelného zpracování s předehřevem. Tloušťky alitační vrstvy po obvodu lopatky se pohybovaly mezi 20 μm – 40 μm . Příklad měření tloušťky alitační vrstvy na hřbetu lopatky je zobrazen na Obr. 27. Dále je zde také zobrazena náběžná hrana lopatky s příkladem nejlepšího dosaženého výsledku v rámci experimentálních prací.



Obr. 27: Vyhovující vzorek č. 6

Do druhé skupiny spadají vzorky č. 2 a č. 14. Jedná se o vzorky alitované práškem číslo 1 s kombinací klasické předúpravy a tepelného zpracování s předehřevem. Vzorek č. 2 dosahuje tloušťky vrstvy po obvodu lopatky 75 μm – 95 μm a tloušťka alitační vrstvy u vzorku č. 14 je mezi 50 μm – 80 μm . Pro splnění limitních podmínek tloušťky vrstvy (20 μm – 50 μm) je tedy nutné tuto vrstvu ztenčit.

Poslední, třetí skupina zahrnuje vzorky č. 3 a č. 15 u obou vzorků je vytvořená tloušťka alitované vrstvy nad povoleným rozsahem 20 μm – 50 μm , bude tak nutné

také zajistit snížení tloušťky alitační vrstvy před přímou aplikací těchto lopatek. Oba vzorky byly vytvořeny v kombinaci předúpravy leptání a klasického tepelného zpracování s alitačním práškem číslo 1. Vzorek č. 3 se s tloušťkou alitační vrstvy pohybuje mezi 50 μm – 85 μm a vzorek č. 15 mezi 55 μm – 65 μm . U obou těchto vzorků je tedy nutné snížit tloušťku alitační vrstvy.

5 Závěr

Cílem práce bylo zhodnocení alitačních vrstev vytvořených z různých prášků za rozdílných podmínek předúprav alitační vrstvy a průběhu difuzního žíhání. Důvodem pro tuto práci bylo ověření toho, zda je možné změnou postupu alitace v rozsahu přípustném v používaných pracovních a technologických postupech zlepšit ochrannou vrstvu. Tento cíl byl splněn a na základě provedených experimentálních prací byl v specifikován postup, který dal nejlepší výsledky a potvrdil tak možnost zlepšení.

Z výsledků experimentální části je patrné, že dosažení akceptovatelné vrstvy alitace je úzce svázáno se stavem lopatek před čištěním, použité předúpravě, s použitým alitačním práškem i následným tepelným zpracováním. Tyto jednotlivé faktory od sebe nelze separovat, což potvrzuje fakt, že akceptovatelných výsledků bylo dosaženo například kombinací klasické předúpravy s tepelným zpracováním s předehřevem anebo leptáním a klasickým tepelným zpracováním.

Výsledným nejvhodnějším práškem pro více kombinací vyšel alitační prášek číslo 1, u kterého vzorky splňují podmínky jak při kombinaci klasické předúpravy a tepelného zpracování s předehřevem, tak v kombinaci leptání s klasickým tepelným zpracováním. Jako zcela nevhodné pro jakýkoliv zkoušený prášek je kombinace klasické předúpravy a klasického tepelného zpracování a leptání s tepelným zpracováním s předehřevem.

Z experimentu je tedy patrné že vhodnějším obecným postupem by byla kombinace klasické předúpravy a tepelného zpracování s předehřevem a vyřazení použití alitační barvy. Všechny ostatní vzorky, potažmo kombinace jsou nevyhovující z pohledu minimálně jednoho hodnotícího kritéria a nelze s těmito kombinacemi dále počítat pro praktické využití. Nevyhovující mohou být na základě již provedeného špatného očištění před alitací, tak například nečistotami vnesenými do samotného procesu.

Alitační postup který obsahuje leptání vzorků jako předúpravu je méně vhodný, a to z důvodu, že při nedodržení předepsaného postupu leptání může snadno dojít k přeleptání lopatky a tím k její nepřipustné degradaci.

Obecným závěrem práce tak je, že na základě provedených experimentů je nejvhodnější použití kombinace klasické předúpravy, alitačního prášku číslo 1 a tepelného zpracování s předeheřevem. Výsledná alitační vrstva získaná tímto postupem vykazuje lepší kvalitu než doposud aplikovaný postup obnovy alitační vrstvy používaný aktuálně v praxi.

Obecně lze konstatovat, že lepší výsledky alitace byly dosaženy u vzorků, které byly tepelně zpracovány v prostředí dokonalejší ochranné atmosféry a byla tak snížena možnost přístupu okolní atmosféry včetně nechtěných nečistot. Na základě tohoto poznatku je možné doporučit změnu technologického vybavení tak, aby bylo možné provádět difuzní žíhání ve vakuové retortě za použití ochranného plynu argonu. Vzhledem k velikosti investice do vybavení bude třeba provést kontrolní experimenty, které potvrdí její oprávněnost. Z provedených experimentů vyplynulo i doporučení na zavedení NDT kontrol tloušťky alitované vrstvy na jednotlivých lopatkách.

6 Seznam obrázků

Obr. 1: Trent 900 Rolls-Royce [10]	12
Obr. 2: Airbus A380 [11].....	12
Obr. 3: Turbohřídelový motor TV3-117 [15].....	13
Obr. 4: Schéma principu turbohřídelového motoru [15].....	14
Obr. 5: Schéma motoru TV3-117[15].....	15
Obr. 6: Řez motorem TV3-117 [17].....	16
Obr. 7: Nárůst spalovacích teplot leteckých motorů a použité materiály [20]	18
Obr. 8: Omílaná sada lopatek – Sada 1.....	26
Obr. 9: Sada lopatek po demontáži – Sada 2.....	26
Obr.10: Směr odebrání vzorku	28
Obr. 11: Struers Secotom–50	29
Obr. 12: Struers LaboPress–3.....	29
Obr. 13: Struers TegraPol–21	29
Obr. 14: Olympus PMG–3 [29].....	29
Obr. 15:Zrnitost Prášku číslo 1	30
Obr. 16: Zrnitost Prášku číslo 2.....	30
Obr. 17: Graf průběhu teplot při klasickém tepelném zpracování.....	33
Obr. 18: Graf průběhu teplot při tepelném zpracování s předehřevem.....	34
Obr. 19: Porovnání vzorků 1, 5, 9, 13, 17, 21 (náběžná hrana lopatky).....	36
Obr. 20: Porovnání vzorků 1, 5, 9, 13, 17, 21 (hřbet lopatky).....	37
Obr. 21: Porovnání vzorků 2, 6, 10, 14, 18, 22 (náběžná hrana lopatky)	39
Obr. 22: Porovnání vzorků 2, 6, 10, 14, 18, 22 (hřbet lopatky).....	40
Obr. 23: Porovnání vzorků 3, 7, 11, 15, 19, 23 (náběžná hrana lopatky)	43
Obr. 24: Porovnání vzorků 3, 7, 11, 15, 19, 23 (hřbet lopatky).....	44
Obr. 25: Porovnání vzorků 4, 8, 12, 16, 20, 24 (náběžná hrana lopatky)	46
Obr. 26: Porovnání vzorků 4, 8, 12, 16, 20, 24 (hřbet lopatky).....	47
Obr. 27: Vyhovující vzorek č. 6.....	50

7 Citovaná literatura

- [1] POSPÍŠILOVÁ, S., Vliv povrchových vrstev na strukturní stabilitu a užité vlastnosti slitin na bázi niklu, 2005. Diplomová práce VUT FSI Brno 2004.
- [2] POSPÍŠILOVÁ, S., PODRÁBSKÝ, T., KREJČÍ, J., JULIŠ, M., CELKO, L., Vliv alitosilitované vrstvy na strukturní stabilitu slitin na bázi niklu, 2005. Konference Víceúrovňový design pokrokových materiálů, Brno 2005. ISBN 80-239-6145-4.
- [3] ŠKORPÍK, JIŘÍ, Lopatkový stroj. Transformační technologie. [Online] 29. 01 2017. <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html>. ISSN 1804-8293.
- [4] BIROŠČÁKOVÁ, Lopatkové stroje. [online] Ostrava: Střední průmyslová škola Ostrava, Vítkovice, 22. 11 2013.
- [5] ŠRITR, JAN, Lopatkové stroje. [Prezentace] Nové Město nad Metují: Střední průmyslová škola Nové Město nad Metují, 21. 06 2011.
- [6] ŠKORPÍK, JIŘÍ, Tepelné turbíny a turbokompresory. Transformační technologie [Online] 02 2014. <http://www.transformacni-technologie.cz/23.html>. ISSN: 1804 - 8293.
- [7] KLÍMA, PETR, Parní turbíny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [8] ŠRITR, JAN, Parní a plynové lopatky. [Prezentace] Nové Město nad Metují: Střední průmyslová škola Nové Město nad Metují, 06. 21 2011.
- [9] Typy leteckých motorů. Letecké motory. [Online] 24. 4 2012. <http://www.leteckemotory.cz/teorie/typy-leteckych-motoru/>.
- [10] Rolls - Royce. Rolls - Royce. [Online] [Citace: 26. 06 2017.] <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/airlines/trent-900.aspx#/>.
- [11] UP Network. [Online] [Citace: 30. 06 2017.] <https://up.network/skonci-vyroba-letounu-a380/>.
- [12] Klimov TV3-117 – Wikipedia. Dostupné z <https://en.wikipedia.org/wiki/Klimov_TV3-117>.
- [13] Klima.ru (2015): Helicopter engines [online]. [cit.2015-11-3]. Dostupné z <<http://www.klimov.ru/en/production/helicopter/TV3-117/>>.
- [14] Letajicihrosi.cz (2015): Pohonná jednotka – motory TV3-117. [online]. Dostupné z <<http://www.letajicihrosi.cz/vrtulnik-mi-17/pohonna-jednotka-motorytv3-117/>>.

- [15] PAVLÍK, LUKÁŠ, Výkonné charakteristiky turbo - hřídelového motoru. Fakulta dopravní, České vysoké učení technické v Praze. Praha: autor neznámý, 2015. str. 69, Bakalářská práce.
- [16] Turbohřídelový motor TV3 - 117. Internetový skanzen bojové techniky. [Online] 2005. [Citace: 20. 6 2017.] http://www.brigadyr.net/letecka__technika/letecke_opravny_malesice_05/tv3_117/tv3_117.htm.
- [17] Motory TV3-117 – 221. TIGER SQUADRON. Dostupné z <https://221sgn.cz/motory-tv3-117/>.
- [18] HOŘEJŠÍ, JAKUB, Hodnocení struktury turbínových lopatek motoru AI - 25TL. Praha: LOM Praha s.p., 2003.
- [19] MATTHEW J. DONACHIE STEPHEN J. DONACHIE, SUPERALLOYS A Technical Guide. Second Edition ASM International, 2002. 439 p. ISBN 0-87170-749-7.
- [20] VYSOKOPEVNÉ A VYSOKOLEGOVANÉ OCELI, SUPERSLITINY, dostupné na http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01__pm__vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf
- [21] JANOVEC, JIŘÍ, CEJP, JIŘÍ A STEIDL, JOSEF, Perspektivní materiály. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. 978-80-01-04167-3.
- [22] PTÁČEK, LUDĚK, Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 80 - 7204283 - 1.
- [23] ALI DAD CHANDIO, Processing, Characterisation and Oxidation Study of the Nickel Aluminides (β NiAl) for Thermal Barrier Coating Applications. A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Science 2015. Dostupné na <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:277305&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>
- [24] ABDULLAH CAHIT KARAOGLANLI, AHMET TURK, ISMAIL OZDEMIR, Isothermal Oxidation Behavior and Kinetics of Thermal Barrier Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spray Technique, Surface and Coatings Technology, Accepted manuscript 12.2016, dostupné na <https://www.google.cz/search?q=BONADEI%2C+A.%2C+MARROCCO%2C+T.%3A+Cold+sprayed+MCrAlY+%2B+X+coating+for+gas+turbine+blades+and+vanes.+Surface+and+Coatings+Technology.+2014%2C+242%2C+200-206.&oq=BONADEI%2C+A.%2C+MARROCCO%2C+T.%3A+Cold+sprayed+MCrAlY+%2B+X+coating+for+gas+t>

- [urbine+blades+and+vanes.+Surface+and+Coatings+Technology.+2014%2C+242%2C+200-206.&aqs=chrome..69i57.1589j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](#)
- [25] MARTA KIANICOVÁ, SIMONA POSPÍŠILOVÁ, TOMÁŠ PODRÁBSKÝ, KAREL STRÁNSKÝ, STUDIUM OCHRANNÝCH VRSTEV NA NIKLOVÝCH SUPERSLITINÁCH. METAL 2008, 13.-15.5.2008, Hradec nad Moravicí
- [26] M. ZAGULA-YAVORSKA, K. KUBIAK, J. SIENIAWSKI, Oxidation behaviour of palladium modified aluminide coatings deposited by CVD method on nickel-based superalloys under air atmosphere. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Volume 55, Issue 2, December 2012, pp. 848-853
- [27] Oddělení povrchového inženýrství. Oddělení povrchového inženýrství. [Online] [Citace: 15. 07 2016.] <http://www.ateam.zcu.cz/>.
- [28] ZUBČENKO, POD RED. A. S. Alfred. Maročnik stalej i splavov. 2. izd. pererabot i dop. Moskva: Mašinostroenie, 2003. ISBN 52-170-3177-8.
- [29] Optotek. Optotek. [Online] [Citace: 20. 11 2016.] http://www.optotek.net/Microscope_Inventory/Compound_Microscopes/Olympus_Microscopes/OlympusPMG-3/olympuspmg-3.html

8 Seznam příloh

1. vzorek – před tepelným zpracováním	- 1 -
1. vzorek – po tepelném zpracování	- 2 -
2. vzorek – před tepelným zpracováním	- 3 -
2. vzorek – po tepelném zpracování	- 4 -
3. vzorek – před tepelným zpracováním	- 5 -
3. vzorek – po tepelném zpracování	- 6 -
4. vzorek – před tepelným zpracováním	- 7 -
4. vzorek – po tepelném zpracování	- 8 -
5. vzorek – před tepelným zpracováním	- 9 -
5. vzorek – po tepelném zpracování	- 10 -
6. vzorek – před tepelným zpracováním	- 11 -
6. vzorek – po tepelném zpracování	- 12 -
7. vzorek – před tepelným zpracováním	- 13 -
7. vzorek – po tepelném zpracování	- 14 -
8. vzorek – před tepelným zpracováním	- 15 -
8. vzorek – po tepelném zpracování	- 16 -
9. vzorek – před tepelným zpracováním	- 17 -
9. vzorek – po tepelném zpracování	- 18 -
10. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 19 -
10. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 20 -
11. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 21 -
11. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 22 -
12. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 23 -
12. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 24 -
13. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 25 -
13. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 26 -

14. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 27 -
14. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 28 -
15. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 29 -
15. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 30 -
16. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 31 -
16. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 32 -
17. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 33 -
17. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 34 -
18. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 35 -
18. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 36 -
19. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 37 -
19. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 38 -
20. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 39 -
20. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 40 -
21. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 41 -
21. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 42 -
22. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 43 -
22. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 44 -
23. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 45 -
23. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 46 -
24. vzorek – před tepelným zpracováním.....	- 47 -
24. vzorek – po tepelném zpracování.....	- 48 -