

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění a nitridace inconelových regulačních komponent parních turbín

Autor: **Bc. Radek SÝKORA**
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**
Konzultant: **Ing. Tomáš GLUSA**

Akademický rok 2013/2014

Oficiální zadání

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne

podpis.....

Upozornění

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1995 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, firmy *Doosan Škoda Power a.s.* a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Tato diplomová práce vznikla za podpory GA ZČU při řešení projektu SGS-031-2013 s názvem „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění“. Poděkování dále patří vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D., za jeho podporu a spolupráci při vedení a vytvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Doosan Škoda Power a.s. se sídlem v Plzni, za poskytnutí svých prostředků, které napomohly k realizaci této práce, jmenovitě Ing. Tomáši Glusovi a Ondřeji Juklovi za spolupráci a množství cenných informací, které se v této práci odrážejí. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Radek Sýkora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Sýkora	Jméno Radek	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 “Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Obrábění a nitridace inconelových regulačních komponent parních turbín		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	95	TEXTOVÁ ČÁST	95	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce se zabývá problematikou výroby regulačních vřeten pro regulaci páry ve ventilech parních turbín používaných na USC elektrárnách. Zabývá se charakteristikou inconelových materiálů a popisuje postup obrábění a používané nástrojové vybavení pro výrobu vřeten z žárupevné slitiny Nimonic 901. V druhé části práce je popisována aplikace iontové nitridace na povrch vřetena z Nimonicu 901 a zkoumání vlastností nitridované vrstvy. Věrohodnost výsledků je podložena množstvím experimentů, které jsou uvedeny v příloze diplomové práce.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Nimonic 901, soustružení, řezné nástroje, iontová nitridace, pin-on-disk</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Sýkora	Name Radek		
FIELD OF STUDY	2303T004 “ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Machining and nitriding of Inconel regulatory components of steam turbines			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Manufacturing Processes	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	95	TEXT PART	95	GRAPHICAL PART	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis deals with the production of regular spindles used for controlling steam in a valve of steam turbines to USC power stations. Deals with characteristic of Inconel materials and describes the machining process and cutting tools for spindles production of high-temperature alloy Nimonic 901. The second part describes application ion nitriding on the surface the spindle from the Nimonic 901 and investigates the properties of nitride layer. The credibility of the results is supported by many experiments, which are indicated in Annex thesis.
KEY WORDS	Nimonic 901, turning, cutting tools, ion nitriding, pin-on-disc

Obsah a seznam příloh

Seznam zkratk a symbolů	10
1. Úvod.....	12
2. Rozbor současného stavu.....	13
2.1 Moderní elektrárenské bloky s ultra super kritickými parametry páry	13
2.2 Popis ventilu.....	13
2.3 Použitelnost dle parametrů turbíny	16
2.4 Důvody použití inconelových vřeten	16
3. Charakteristika inconelových materiálů	17
3.1 Rozdělení Inconelů.....	17
3.2 Specifikace slitiny Nimonic 901	18
3.3 Značení slitiny dle zahraničních norem	18
3.4 Chemické složení slitiny Nimonic 901	18
3.5 Vliv jednotlivých prvků na niklové slitiny.....	18
3.6 Tepelné zpracování slitiny Nimonic 901	19
3.7 Mechanické a fyzikální vlastnosti [11,15,20]	19
3.8 Využití slitiny Nimonic 901 v praxi.....	21
4. Obrobitelnost inconelových materiálů.....	22
4.1 Obrobitelnost niklových slitin.....	22
4.2 Volba stroje	23
4.3 Postup obrábění.....	23
4.4 Nástroje pro obrábění Nimonicu.....	25
4.5 Geometrie nástrojů	25
4.6 Teploty při řezném procesu.....	26
4.7 Opotřebení nástrojů.....	26
4.8 Procesní kapaliny při obrábění.....	27
4.9 Návrh a popis průběh obrábění (experimentu).....	28
4.9.1 Volba testovaného dílu	28
4.9.2 Výběr stroje.....	28
4.9.3 Upnutí obrobku ve stroji	29
4.9.4 Stanovení omezujících podmínek.....	29
4.9.5 Volba nástroje a břitové destičky [17].....	30
4.9.6 Průběh experimentu	33
4.9.7 Dosahované parametry	33
4.9.8 Opotřebení břitových destiček	34

4.9.9	Porovnání cen břitových destiček	37
4.9.10	Zhodnocení výsledků experimentu	38
4.10	Broušení	38
4.10.1	Přehled zkoušených brusných kotoučů	39
5.	Optimalizace výrobního procesu	40
5.1	Nájezdy a výjezdy nástroje	40
5.2	Obrábění kruhovou destičkou v rozích kolem stěny	40
5.3	Sražení hran čtvercovou destičkou	41
5.4	Obrábění profilů a kapes kruhovou destičkou	42
5.5	Optimalizace výrobní technologie s ohledem na konstrukční řešení	42
6.	Nitridace Inconelu	43
6.1	Princip iontové nitridace [7]	43
6.2	Podstata vedení elektřiny a využití doutnavého výboje	45
6.3	Bílá vrstva	46
6.4	Iontová nitridace vřeten	47
6.5	Výhody plasmové iontové nitridace	48
6.6	Tvrdost nitridované vrstvy	48
6.7	Výboj obloukem	50
7.	Návrh a realizace experimentů	51
7.1	Analýza nitridovaných vzorků [13]	51
7.1.1	Návrh experimentu	51
7.1.2	Výběr testovacích vzorků	51
7.1.3	Naměřené hodnoty	52
7.1.4	Zhodnocení výsledků experimentu	54
7.2	Experiment analýzy stop opotřebení po testu pin-on-disk	54
7.2.1	Návrh experimentu	54
7.2.2	Výběr testovacích vzorků	54
7.2.3	Použité měřicí zařízení	54
7.2.4	Naměřené hodnoty	55
7.2.5	Zhodnocení výsledků experimentu	61
7.2.6	Srovnání výsledků jednotlivých variant	62
8.	Zhodnocení výsledků a přínosů	64
9.	Závěr	65
10.	Seznam použité literatury	66
11.	Přílohy	68
	Seznam obrázků	69

Seznam grafů	72
Seznam tabulek	73

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky použité v textu

USC	- Ultra Super Critical (ultra super kritické)
CNC	- Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)
HRSA	- Heat Resistant Super Alloys (Tepelně odolné superslitiny)
SK	- slinutý karbid
ŘK	- řezná keramika
HSS	- High Speed Steel (rychlořezná ocel)
RO	- rychlořezná ocel
KNB (CBN)	- kubický nitrid boru
VBD	- vyměnitelná břitová destička
S-N-O	- stroj-nástroj-obrobek
WQ	- Water Quenching (kalení do vody)
AC	- Air Cooling (chlazené vzduchem)
MW	- megawatt (jednotka výkonu)
JE	- jaderná elektrárna
HP	- High Pressure (vysokotlaké)
IP	- Intermediate Pressure (střednětlaké)
LP	- Low Pressure (nízkotlaké)
RV	- Rozváděcí ventil
RZV	- Rychlozávěrný ventil
VT	- Vysoko-tlaké
HB	- Tvrdost dle Brinella
HRC	- Tvrdost dle Rockwella
HV	- Tvrdost dle Vickerse
γ	- druh monofázové bílé vrstvy nitridů
ε	- druh monofázové bílé vrstvy nitridů
HPC	- High Pressure Cooling (vysokotlaké chlazení)

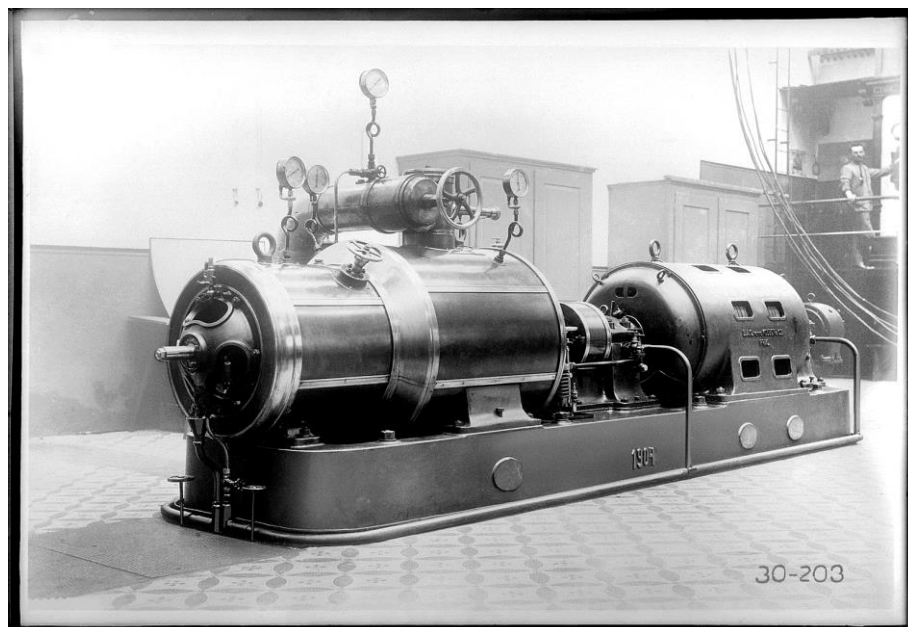
Symboly použité v textu

Symbol	Název	Jednotka
d	Průměr vřetena	[mm]
L, l	Délka (vřetena)	[mm]
p	Tlak	[MPa]
t	Teplota	[°C]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_{p0,2}	Mez kluzu při R _{p0,2}	[MPa]
A	Tažnost	[%]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
Ra	Drsnost povrchu	[μm]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
v_f	Posuvová rychlost	[m/min]
v_e	Rychlost řezného pohybu	[m/min]
f	Posuv	[mm/ot]
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
a_e	Radiální hloubka řezu	[mm]
h_{ex}	Tloušťka třísky	[mm]
n	Otáčky stroje	[ot/min]
i_C	Vepsaný průměr destičky	[mm]
F_f	Složka řezné síly ve směru posuvu	[N]
F_x	Složka řezné síly ve směru posuvu	[N]
T, t	Čas	[min]
VB_B	Opotřebení na hřbetě destičky	[mm]
KB_B	Opotřebení na čele bříty ve tvaru žlábků	[mm]
KT_B	Hloubka opotřebení na čele bříty	[mm]
KR	Průměr obrobku	[mm]

1. Úvod

Je tomu už přes sto let, kdy Emil Škoda odkoupil strojírenskou dílnu po hraběti Waldštejnovi. V roce 1904 byla v jeho dílně postavena první parní turbína systému Rateau o výkonu 412kW a byl položen základ pro budoucí výrobu parních turbín v Plzni. V roce 1932 následovala výstavba dvou parní turbíny o jednotkovém výkonu 23MW s přehříváním páry. Následným rychlým vývojem v druhé polovině 20. Století, s nímž související zdokonalování výrobního procesu, byly vyrobeny parní turbíny o výkonech 110 MW, 200 MW, 220 MW a pro jaderné elektrárny 500 MW. Významným mezníkem je rok 1991 kdy byla v Plzni vyrobena první parní turbína o výkonu 1000 MW, na vstupní sytou páru o tlaku 5,5 MPa při otáčkách 3000 ot/min, pro jadernou elektrárnu Temelín. V současné době jsou v JE Temelín v provozu dva reaktorové bloky o výkonu 2 x 1000 MW. Jedním s posledních mezníků této firmy byl prodej Škodovky korejské firmě Doosan. S cílem zvyšování výstupních parametrů má za následek zvyšování nároků na provozní teploty a tlaky. To vyžaduje využití nových progresivnějších materiálů pro výrobu komponentů parních turbín. Příkladem mohou být vysoce-legované oceli, žárovečné a korozivzdorné materiály a především využití stále rozšiřujících se niklových slitin.[14]

Náplní diplomové práce je průzkum a realizace výroby regulačního vřetena z niklové slitiny Nimonic 901. Regulační vřeteno je součástí ventilu a jeho hlavním úkolem je regulovat množství přiváděné páry do tělesa turbíny. Vřeteno má být obrobena z materiálu Nimonic 901, v požadované kvalitě a přesnosti. Použitá slitina patří do skupiny těžkoobrobitelných materiálů, které představují i v dnešní pokročilé době velkou výzvu z hlediska obrábění. Protože se jedná o rotační součást, odráží se při výrobě především metody obrábění soustružení a vrtání. Z důvodu požadovaných vyšších kluzných vlastností se na povrchu vřetena provádí operace broušení a následně iontová nitridace, která je v druhé části diplomové práce podrobně rozepsána. Závěr práce se zabývá zkoumáním a testováním nitridované vrstvy. Tyto testy potvrzují a dokladují správnost a realizovatelnost řešení naší zvolené varianty.



Obrázek 1.1: První parní turbína 550 HP system Rateau [13]

2. Rozbor současného stavu

2.1 Moderní elektrárenské bloky s ultra super kritickými parametry páry

Doposud se na území ČR provozovali v elektrizační soustavě především zařízení s podkritickými parametry páry. Vývoj technické doby vedl k využití zvýšení účinnosti Clausiova-Rankinova parního cyklu pro zvýšení efektivity nových turbín. Základní podmínky jsou:

- využití maximálních parametrů přehřáté a přihřáté páry
- dvojí přehřívání páry
- dosažení minimální teploty napájecí vody
- dosažení maximálního vakua v kondenzátoru
- využití pohonu napájecího čerpadla pomocí parní turbíny

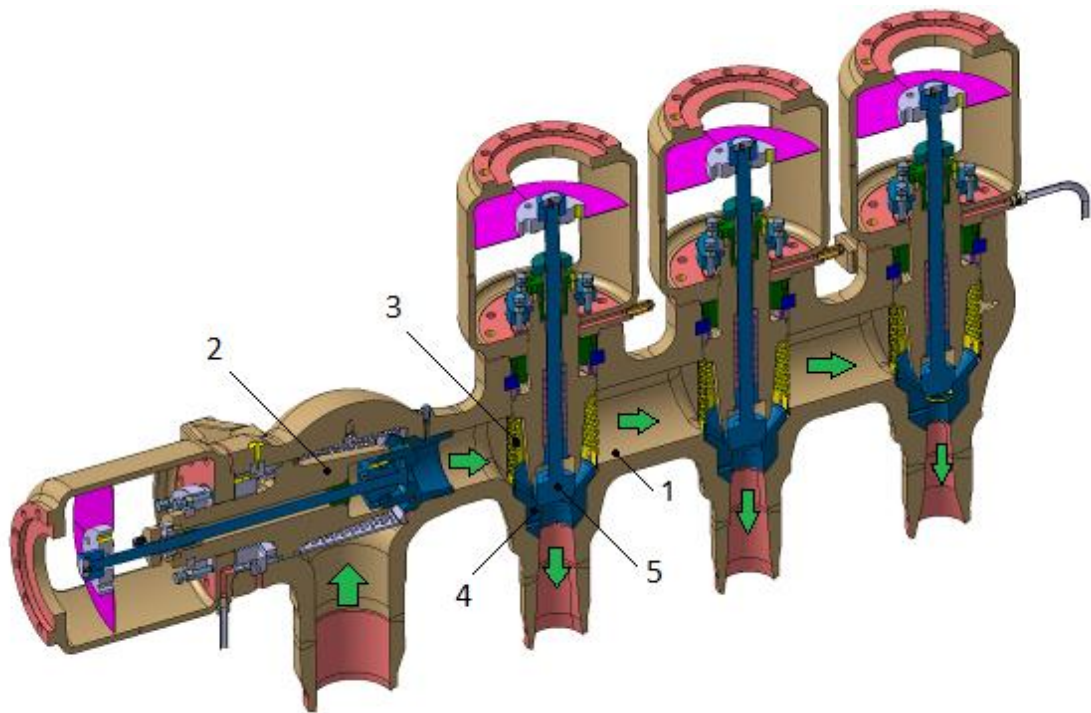
Energetické bloky o rozsahu výkonu až 1000MW řadíme mezi moderní bloky pracující na USC elektrárnách. Tyto elektrárny pracují s ultra super kritickými parametry přehřáté páry při teplotě nad 580°C a tlaku přehřáté páry 25 – 36,5 MPa. Z hlediska provozních parametrů dělíme energetické bloky na:

- Vysokotlaké (HP) – turbíny s vysokou teplotou a tlakem (530°C / 180 bar)
- Střednětlaké (IP) – turbíny s vysokou teplotou a středním tlakem (530°C / 30 bar)
- Nízkotlaké (LP) – turbíny s parametry (350°C / 10 bar)

Použitím kombinace HP-IP a IP-LP turbíny s menšími rozsahy výkonů jsou pro kombinované energetické okruhy elektráren efektivnějším řešením pro výrobu elektrické energie. Konstrukční řešení je dále specifické dle požadavků zákazníků, které ovlivňují i použité technologie výroby jednotlivých komponent pro stanovené provozní podmínky. [5]

2.2 Popis ventilu

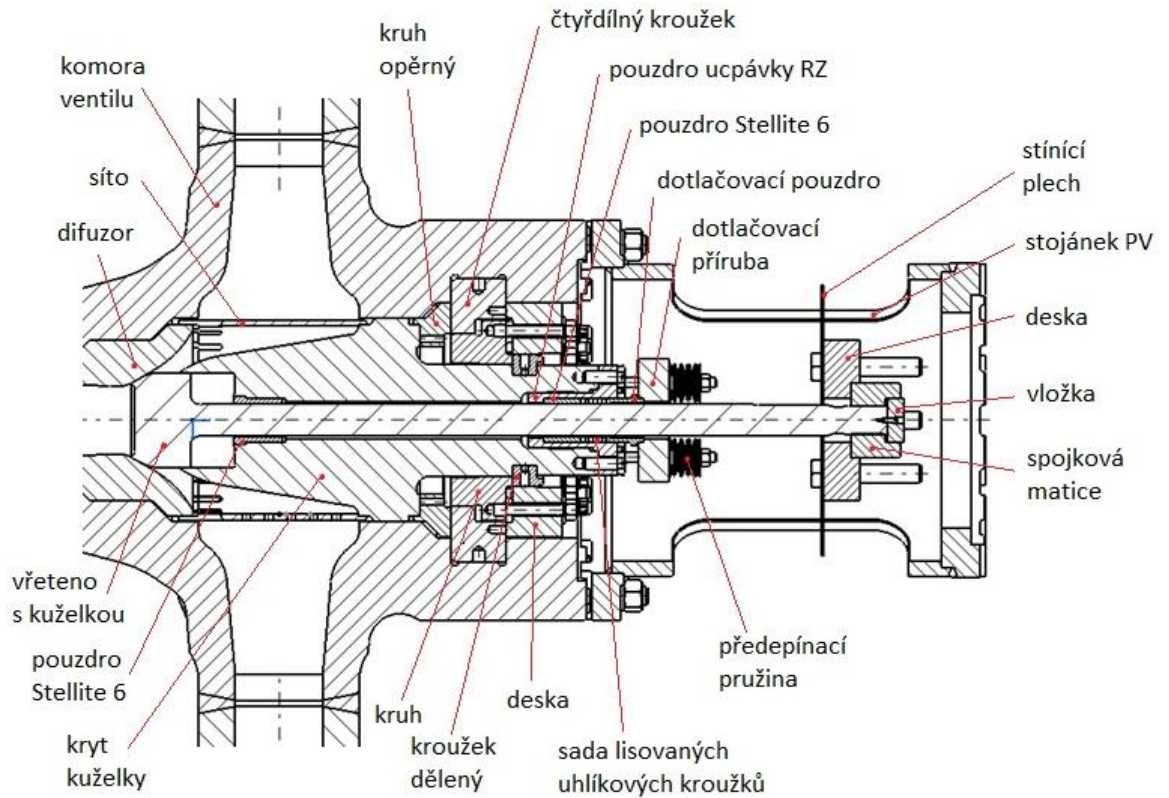
Ventil je regulační tlakové zařízení, umístěné mezi potrubím dodávajícím páru do vnitřního tělesa turbíny. Jeho funkcí je regulovat a propouštět požadované množství páry získané z primárního okruhu do sekundárního okruhu tj. do turbíny. Dle provozních parametrů je rozdělujeme stejně jako elektrárenské bloky, na HP, IP a LP ventily. Počet rozváděcích vřeten (RV) a celkové konstrukční provedení ventilu s rychlozávěrným vřetenem (RZ) je prováděno dle požadavků zákazníka s ohledem na efektivitu řešení. Pára je rozváděna potrubím do určených míst tak, aby s co největší účinností roztáčela rotor turbíny.



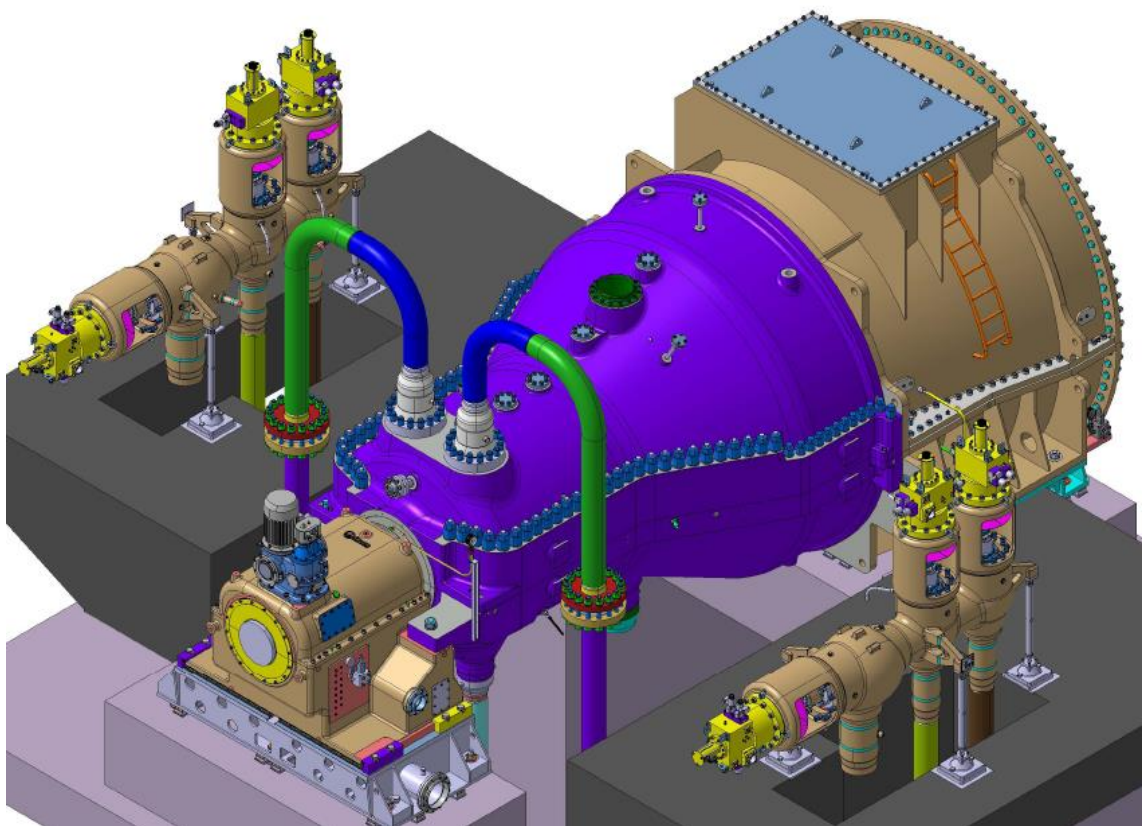
Obrázek 2.1: Řez ventilu VT 1RZ+3RV [13]

1 – svařované těleso komory ventilu, 2 – kryt kuželky, 3 – děrovaný válec, 4 – difuzor, 5 – vřeteno s kuželkou

Pára je parním potrubím nejprve přiváděna do RZ ventilu, kde prochází tělesem ventilu přes děrovaný válec (síto). Zde jsou zachyceny pevné částice a nečistoty aby nedošlo k poškození vnitřního mechanismu turbíny. Pára je dále rozváděna mezi kuželkou vřetena a difuzorem do RV ventilu. Průtok páry skrz ventil do turbíny je regulován změnou průřezu mezery mezi kuželkou vřetena a difuzorem, jejichž dosedací plochy jsou vzájemně tvarově zabroušeny. V místě vybroušené tvarové plochy difuzoru je navařena odolná vrstva Stellite 6 z důvodu odolnosti stykových ploch. Kontaktní styk je tedy realizována na materiálové bázi nitridovaného Nimonicu 901 a kobaltovou slitinou Stellite 6. Vřeteno s kuželkou koná posuvný pohyb ve stelliteových pouzdech. Soustava je zatěsněna nalisovanými uhlíkovými kroužky. Jeho pohyb reguluje průchod páry do turbíny, jak zobrazuje obrázek 2.1, kde zelenými šipkami je zobrazen průchod páry ventilem VT 1RZ+3RV. Cílem diplomové práce je zaměření na výrobu vřetena s kuželkou (pozice 5; obr 2.1) z materiálu Nimonic 901.



Obrázek 2.2: Popis jednotlivých částí ventilu v řezu [13]



Obrázek 2.3. Umístění VT 2(1RZ+2RV) ventilu na turbíně [13]

2.3 Použitelnost dle parametrů turbíny

Doposud byla výroba vřeten založena především na oceli. Ty byly následně povrchově zpracovávány a uvedeny do provozu v zařízeních s podkritickými parametry. Vřetena byla vyráběna z výkovků žárupevné oceli určené pro vyšší teploty, třídy 17. Jedná se například o Cr-Mo-V ocel – (ČSN 17 134). Tato ocel má strukturu s přípustným obsahem feritu delta do 20%. Vyznačuje se pevností v tahu od 680-880 MPa a tvrdostí 200 – 260 HB v zušlechtněném stavu. Je vhodná pro výkovky rotorů parních spalovacích a plynových turbín a na další kované součásti, pracující při teplotách 625°C, v prostředí vzduchu, spalin nebo vodní páry, na tlustostěnné parovodní trubky, popř. i na přehřívákové trubky. [3]

2.4 Důvody použití inconelových vřeten

Abychom dosáhli zvýšení efektivity parního cyklu, je několik variant řešení. Jednou z možností je zvýšení tlaku přehřáté páry. To má za následek z hlediska pevnostních podmínek nárůst hmotnosti turbíny. Jinou možností je zvýšení vstupní teploty do parního cyklu což má za následek snižování efektivity ocelových vřeten, především na USC elektrárnách pracujících právě s vyššími provozními podmínkami. Tato problematika vedla k zamyšlení na budoucí výrobu vřeten. Řešením je nasazení moderních progresivních materiálů, které umožní použitelnost do ultra super kritických parametrů. S ohledem pro případné možné budoucí zvyšování parametrů související s výkonem elektrárny byla volena niklová slitina.

Nasazením modernějších žárupevných materiálů pro výrobu vřeten je jednou z variant řešení problému zadírání a zapékání rychlozávěrných vřeten ve ventilech parních turbín. Skupiny Inconelů jsou osvědčené vysoce odolné materiály na bázi niklu, které odolávají kritickým provozním podmínkám přehřáté páry v komponentech parních turbín. Název Inconel je registrovanou obchodní značkou americké firmy Special Metals Corporation, která se zabývá vývojem skupin austenitických superslitin na bázi niklu a chromu.

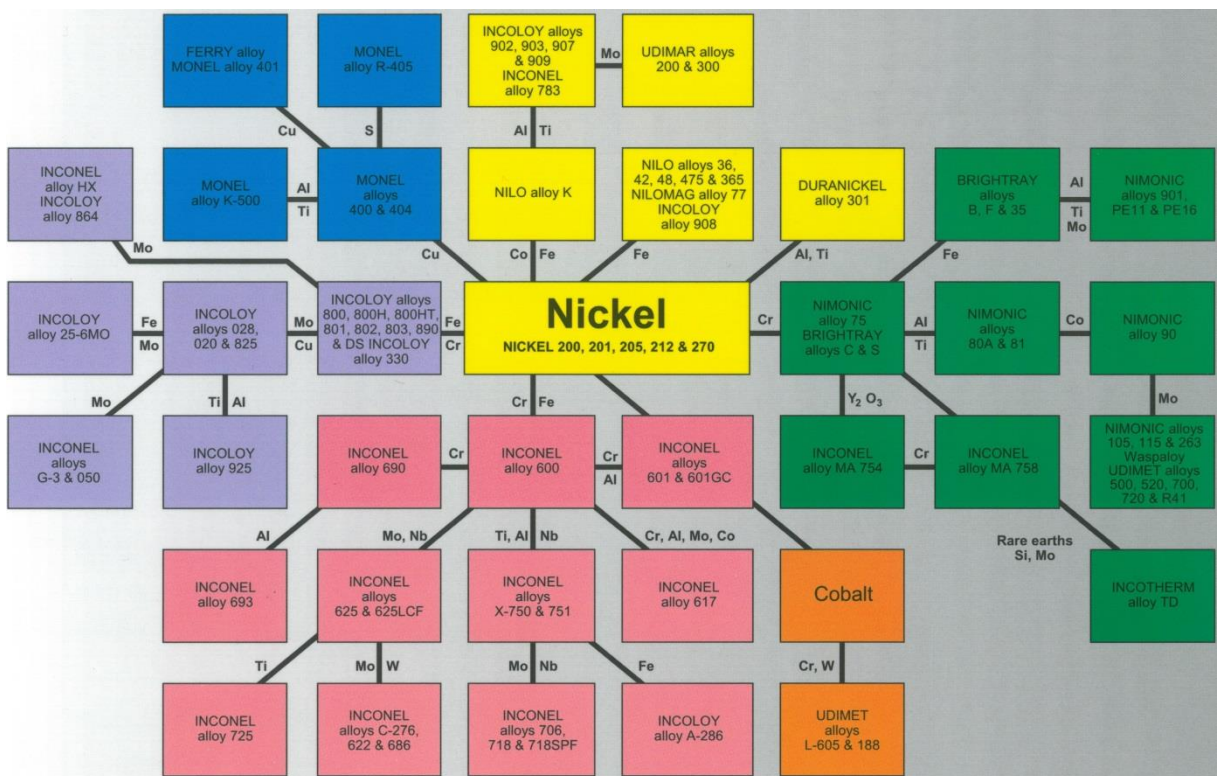
3. Charakteristika inconelových materiálů

3.1 Rozdělení Inconelů

Inconelové slitiny niklu a kobaltu jsou navrženy tak, aby poskytly vynikající odolnost proti teplu, korozní odolnost za vysokých teplot, houževnost a pevnost pro ty nejnáročnější aplikace s jakými se setkáváme v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu. Na druhou stranu jsou také daleko odolnější vůči běžnému způsobu obrábění. Nutností je snaha opracovávat tyto slitiny co nejeekonomičtěji a dostatečně efektivním způsobem. Slitiny se rozdělují především podle chemického složení a přidávaných legujících prvků. Informace o fyzikálních a mechanických vlastnostech těchto produktů je dáno komplexní řadou litých složek a výrobek je k dispozici od jednoho výrobce. Respektive rozdělení a pojmenování slitiny je dáno průmyslovými odvětvími a trhy, které kategorizují jednotlivé druhy slitin.

Základní rozdělení:

- Na bázi Fe – Ni
- Na bázi Ni
- Na bázi Co
- Na bázi Ir a Rh (nová generace progresivních materiálů)



Obrázek 3.1: Rozdělení slitin niklu podle registrované značky Special Metals [15]

Námi zvoleným konstrukčním materiálem je slitina Nimonic 901. Podle rozdělení americké firmy Special Metals se jedná o základní niklovou slitinu legovanou především prvky *Cr*, *Fe*, *Al*, *Ti* a *Mo*.

3.2 Specifikace slitiny Nimonic 901

Slitina Nimonic 901 se řadí mezi superslitiny na bázi niklu, které se vyznačují vysokou pevností a odolností proti oxidaci při vysokých teplotách a výbornými creepovými vlastnostmi. Jedná se o Ni-Fe-Cr superslitinu dodávanou v žíhaném nebo precipitačně vytvrzeném stavu. Slitina má významný přídavek legujících prvků, především molybdenu, titanu a hliníku, které podporují proces vytvrzování. Postup výroby těchto materiálů zahrnuje vakuové indukční tavení, vakuové obloukové přetavování a elektrostruskové přetavení v závislosti na konečném použití nebo specifikaci zákazníka. Superslitina má vysokou mez kluzu a odolnost proti tečení při teplotách 600°C. Obsah železa (Fe) umožňuje slitině kombinovat vysokou pevnost s dobrými vlastnostmi kování. Jedná se o typický materiál pro použití v komponentech parních turbín jako například: hřídele, kroužky, pouzdra, vřetena a těsnění s provozními teplotami kolem 600°C. [15]

3.3 Značení slitiny dle zahraničních norem

Protože v případě skupin Inconelů a Nimoniců se je pouze obchodní značení, Tabulka 1 popisuje značení slitiny Nimonic 901 podle zahraničních norem.

Tabulka 1: Značení dle zahraničních norem [15]

USA	USA	UK	France	Germany	Germany	Others
SAE	AMS	BS	ANFOR	Werkst. Nr	DIN 1706	
5660C	5661A	-	ZSNCDT42	2,4662	NiCr15MoTi	-

3.4 Chemické složení slitiny Nimonic 901

Parametrem zaručujícím jednotnost materiálu je chemické složení slitiny, které je zaručeno vždy v určitém rozsahu hodnot, popř. je uvedeno minimálním nebo maximálním procentuálním podílem prvku ve slitině. Tím je dáno "přibližné" jednotné složení slitiny pro všechny zákazníky a výrobce, kteří nuceni chemické složení dodržet nicméně mohou do jisté míry ovlivnit cenu. Pro slitinu Nimonic 901 je chemické složení uvedeno v tabulce 2. Hodnota železa (Fe) je uvedena, protože jeho množství převládá nad množstvím jiných přítomných legujících prvků, které jsou uvedeny v minimálním množství. Nicméně jeho hodnota množství není normou zaručena.

Tabulka 2: Chemické složení slitiny Nimonic 901 [15]

Jmenovité složení přibližného obsahu v %													
Prvek	Ni	Cr	Mo	Ti	Co	Cu	Mn	Si	Al	C	S	Fe	další
Min. obsah [%]	42.5	12.5	5.75	2.9	-	-	-	-	-	-	-	balance	-
Max. obsah [%]					1	0.5	0.5	0.4	0.35	0.1	0.03		-

3.5 Vliv jednotlivých prvků na niklové slitiny

Mezi niklové slitiny lze zařadit materiály s převyšujícím obsahem niklu. Nikl je kov vyhovující odolností vůči korozi s dobrými mechanickými a technologickými vlastnostmi. Čistý nebo nízkolegovaný nikl se též používá pro plátování méně ušlechtilých kovů. Má relativně malou hodnotu zpevnění způsobenou tvářením za studena a patří mezi nejlépe technologicky

zpracovatelné kovy. Prvky obsažené ve slitině mají vliv nejen na korozní vlastnosti ale i na další vlastnosti. Samotný nikl ve slitině zajišťuje žárupevné a žáruvzdorné vlastnosti, fázovou stabilitu, odolnost k redukčním kyselinám, neutrálním solím a koroznímu praskání v prostředí chloridů. Chrom (v našem případě >12%) vnáší do austenitické struktury schopnost pasivace, odolnost k oxidaci při vysokých teplotách a odolnost k lokalizované korozi ve vodním prostředí. Molybden zvyšuje pevnost za vysokých teplot. Hliník ve slitině zvyšuje odolnost proti oxidaci za vysokých teplot, vede k precipitačnímu vytvrzování slitiny podobně jako je tomu u titanu, který navíc stabilizuje karbidy. Měď zvyšuje odolnost v redukčních kyselinách a roztocích solí a může se podílet i na precipitačním vytvrzování.[6]

3.6 Tepelné zpracování slitiny Nimonic 901

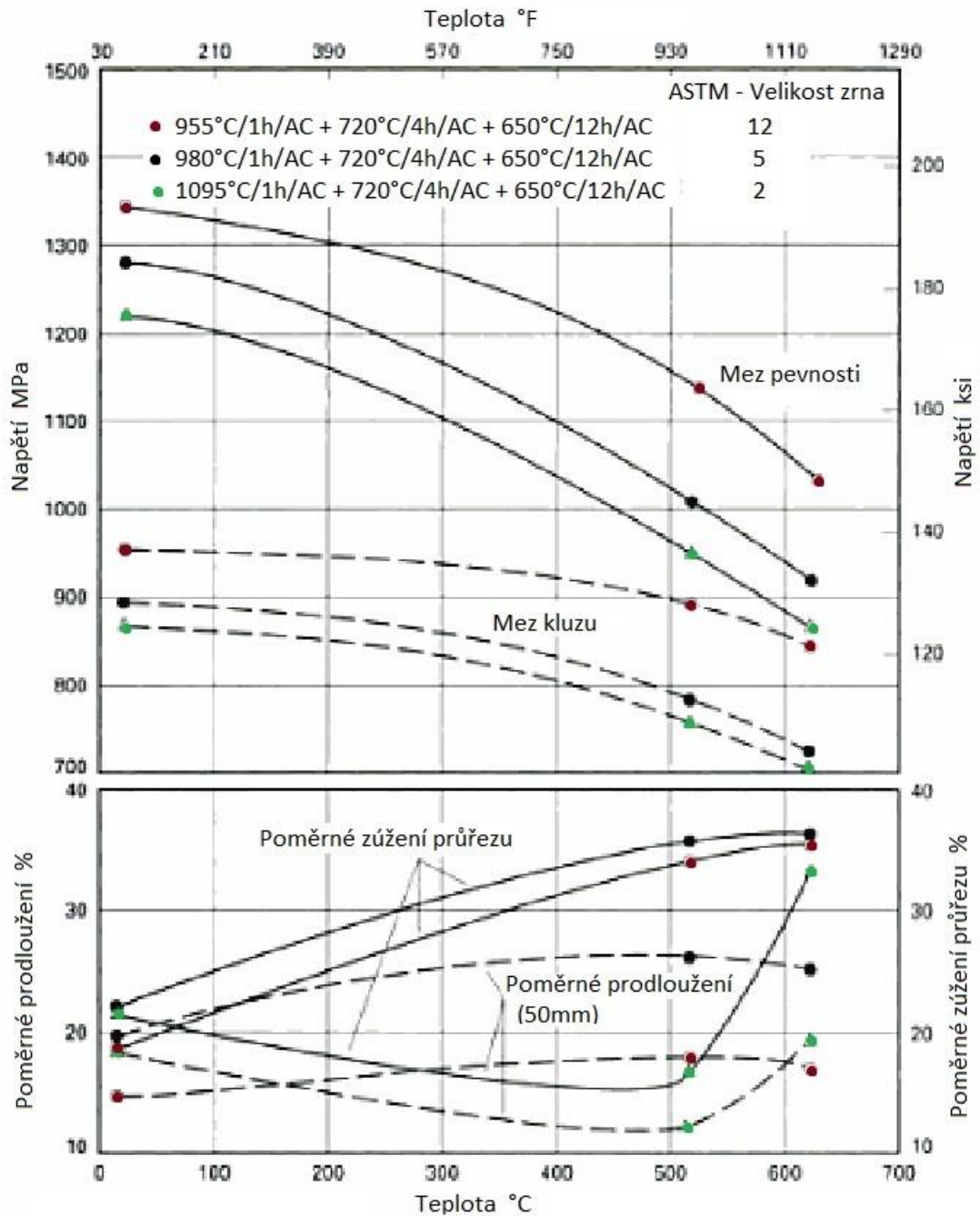
Tepelné zpracování výkovků ze slitin Nimonic 901 probíhá ve třech stádiích procesu. Proces zahrnuje rozpouštěcí žihání a dále následují dvě etapy precipitačního vytvrzování. Tepelným zpracováním zajistíme především zvýšení tvrdosti inconelových slitin. Obecně mají Inconely v žíhaném stavu pod 30 HRC. Rozpouštěcím žiháním dochází ke zvýšení tvrdosti na >30 HRC a po stárnutí může být tvrdost až do 48 HRC. Program tepelného zpracování může být upraven podle požadavku zákazníka. Jedním ze zásadních faktorů ovlivňující tepelné zpracování je velikost ASTM (velikost zrna), kde získáváme rozdílné hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností. To dokazuje níže uvedený diagram na obrázku 3.2. Program tepelného zpracování pro případ slitiny Nimonic 901 může být:

1080°C/2h/WQ + 788°C/4h/AC + 718°C/24h/AC.

3.7 Mechanické a fyzikální vlastnosti [11,15,20]

Hustota	8 140 Kg/m ³
Teplota tavení	1280 – 1345 °C
Specifické teplo	431 J.Kg ⁻¹ .°C ⁻¹
Mez pevnosti, R _m	1130 MPa
Mez kluzu při R _{p0,02}	810 Mpa
Tažnost	10 %
Tvrdość	302-388 HB
Tepelná vodivost	10 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Elektrická rezistivita	112 μΩ cm ⁻¹

Vlastnosti superslitin lze ovlivňovat složením přidávaných prvků, pomocí procesů (především tepelným zpracováním) a velikostí zrn ve struktuře. Diagram 3.2 ukazuje změnu mechanických vlastností při účinku teploty rozpouštěcího žihání 955 – 1095°C a velikosti zrn od 2 do 12 ASTM. Jsou zde uvedeny vlastnosti pro tři druhy tepelného zpracování a velikosti zrn. Účinek velikosti zrn na vlastnostech vysoko-cyklické únavové pevnosti Nimonicu 901 je uvedeno v tabulce 3. Hodnota únavové rychlosti je uvedena jako FS/UTS (únavová pevnost / mez pevnosti v tahu). [11]



Obrázek 3.2: Účinek teploty a velikost zrna na pevnostní vlastnosti výkovku ze slitiny Nimonic 901 po rozpouštěcím žíhání, vytvrzení a stárnutí. Chlazen na vzduchu [11]

Tabulka 3: Účinek velikosti zrn na vysoko-cyklické únavové vlastnosti slitiny Nimonic 901 při 455°C [11]

Nimonic 901 velikost zrn	455°C únavová pevnost (10 ⁷ cyklů)		Únavová rychlost (FS/UTS)
	MPa	ksi	
ASTM 2	315	46	0,32
ASTM 5	439	64	0,42
ASTM 12	624	91	0,55

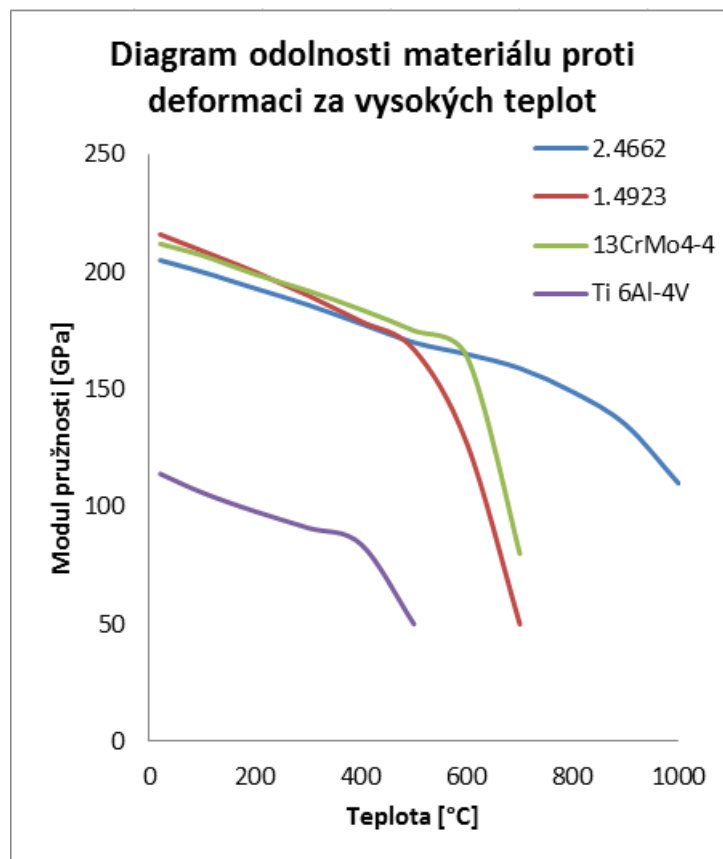
3.8 Využití slitiny Nimonic 901 v praxi

Nimonic 901 je typická slitina hojně využívaná pro výrobu součástí do průmyslových plynových a parních turbín. Pro svoje výborné vlastnosti, jako je například odolnost a stálost vůči vyšším teplotám, se hojně využívá v energetickém průmyslu, pro výrobu hřídelí, kroužků, disků a těsnění běžně pracujících okolo teplot 600°C. Dále je možno využít slitinu na teplotně zatížené součásti turbín letadel a na zadní teplotně zatížené části proudového motoru v letadlovém průmyslu.

4. Obrobitelnost inconelových materiálů

4.1 Obrobitelnost niklových slitin

Inconely se obecně řadí mezi špatně obrobitelné materiály tzv. HRSA materiály hned z několika důvodů. Protože se jedná o žárupevné materiály, mají Inconely nízký součinitel teplotní vodivosti (cca 5x menší než uhlíková ocel) a jsou tedy odolné vůči vysokým teplotám a odolné proti korozi za vysokých teplot (neoxidují). Z tohoto důvodu odchází většina tepla do nástroje a ve šponách (asi z 80%), čímž dochází k vysokému tepelnému zatížení břitu. To je zpravidla nežádoucí a je nutné řezné prostředí chladit. Vysokou pevnost za vysokých teplot v porovnání s jinými materiály používanými v energetickém průmyslu dokazuje Graf 1.



Graf 1: Porovnání pevnosti materiálů za vysokých teplot [13]

Další typickou vlastností niklových slitin je zpevňování za studena. To způsobuje při obrábění zpevňování povrchu za břitem a následné odebrání vrstvy se stává obtížnější, což vede k snížení životnosti nástrojů. Jednou z možností omezení zpevňování, je zpevnění materiálu již při nízkoteplotním zpracování. Druhou možností je použití nástroje s pozitivní geometrií a výrazně kladným úhlem nastavení hlavního ostří. Tím je dosažena plynulost tvorby třísky a omezení kolísání řezných sil. Z důvodu zpevňování za studena je nutné z hlediska obrobitelnosti nastavit takové řezné podmínky, aby k obrábění Inconelu docházelo v zahřátém stavu. Tím dochází k zvýšení tepelné vodivosti obrobku a lepšímu odebrání třísek.

Rozdíl v obrobitelnosti je také po tepelném zpracování Inconelu. Vystárlý Inconel se vyznačuje podle množství niklu větší tvrdostí. Při obrábění materiál špatně vede teplo a tvrdý materiál má tendenci pro vznik vrubu na břitu. Vyžiháný Inconel se vyznačuje nižší tvrdostí, ale

větší houževnatostí. Při obrábění rovněž špatně vede teplo, dochází k špatnému utváření třísky kvůli vyšší houževnatosti a dochází ke zvýšenému opotřebenému břítu.

4.2 Volba stroje

Obecně je pro obrábění HRSA materiálů nutno volit stroj s vysokou tuhostí a velkým výkonem. Tuhost stroje je obzvláště důležitá při obrábění keramikou, kde je nutností co nejlépe utlumit vibrace v soustavě S-N-O, z důvodu odštípnutí břítu. V našem případě obrábění dlouhých součástí o malém průměru je utlumení soustavy jednou z priorit. Pro experimenty obrábění zkušebního vřetene ze slitiny Nimonic 901 byl vybrán stroj Mori Seiky NL3000. Tento CNC univerzální horizontální soustruh je vybavený jedním vřetenem a rotační suportovou hlavou s možností rotačního frézování. Dále stroj disponuje systémem vysokotlakého chlazení o tlaku 70 bar. Stroj byl zvolen z důvodu velké délky rychlozávěrných vřeten. Z hlediska omezujících podmínek pro zaručitelnou obrobitelnost je požadována vysoká tuhost a přesnost stroje, vysoký výkon a točivý moment již od nízkých otáček stroje. Stejný stroj bude následně využíván k aktivní výrobě vřeten.

4.3 Postup obrábění

Důležitým faktorem k dosažení kvalitně obrobeného povrchu s požadovanou přesností je způsob postupu obrábění. S ohledem na produktivitu obrábění, by bylo nevhodnější použít pro obrábění nimonicu břity z keramiky. Vysoká tvrdost, odolnost proti teplu a možnost použití vyšších řezných rychlostí však nejsou rozhodujícím faktorem k dosažení požadované přesnosti a integrity povrchu.

Keramické nástroje nejsou v první řadě vhodné pro nárazové namáhání. Proto se doporučuje hrubý povrch výkovků nejprve odstranit houževnatějším slinutým karbidem. Stejně je tomu i při obrábění na čisto při odebrání posledních vrstev materiálu. Keramické břity obvykle mají nulový nebo negativní úhel čela. Do obráběného materiálu je poté při obrábění vnášeno velké množství povrchového napětí a deformací, které mohou mít za následek pozdější korozi, vznik povrchových vad a následné problémy při dalším procesu výroby součástí. Z hlediska vibrací je vhodné obrábět co nejlépe u sklíčidla nebo lunety kde se obrobek chová nejstabilněji.

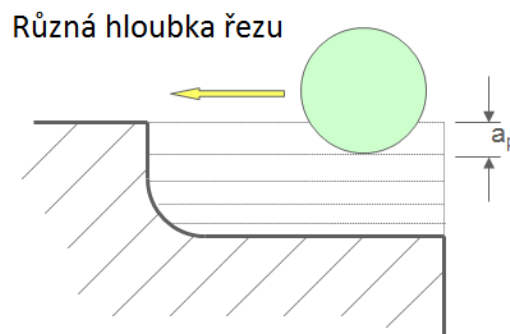
Postup při obrábění HRSA materiálů lze rozdělit na 3 hlavní fáze obrábění podle používaného nástroje, jeho trvanlivosti a přesnosti obrábění

1. fáze – Obrábění zpevněné tvrdé kůry výkovku

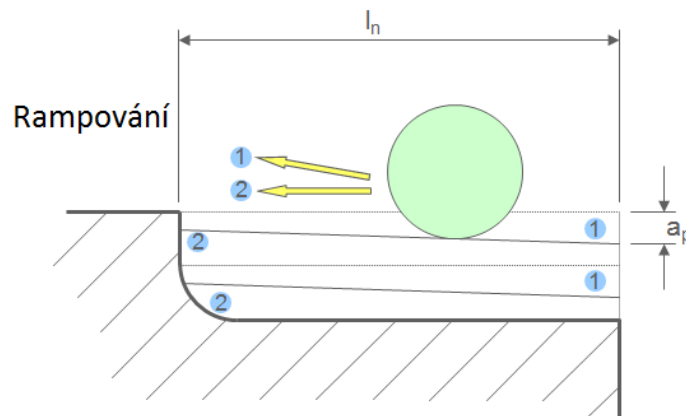
Po dodání výkovku do výroby je potřeba před započítím hrubování odstranit nepřesná tvrdá povrchová kůra. Z hlediska tvrdosti je vhodné použití kruhové keramické destičky. Nicméně nepřesný povrch způsobuje rázy při odebrání kůry což je pro keramiku devastující, a proto je vhodnější použít houževnatější destičky ze slinutého karbidu. Z praxe bylo vyzpozorováno pokud možno omezit počet vstupních řezů do tvrdé kůry. V místě nájezdu dochází k rázům do tvrdého povrchu a následného vzniku vrubu na břítu. Proto je vhodné volit nájezdy do již obrobených ploch v případě dalšího obrábění kůry.

2. fáze – Hrubování materiálu (odebírání největšího množství materiálu) [8]

V druhé části hrubování je zapotřebí odebrat co největší množství materiálu a připravit obráběnou součást co nejlépe finálnímu tvaru na obrábění na čisto. Protože v této části dochází k úběru velkého množství materiálu, je nutné k tomu přizpůsobit i nástroje. Z hlediska ekonomického a časového je nejefektivnějším řešením použití kruhové keramické destičky, u které je možné z důvodu její tvrdosti a teplotní odolnosti volit až 4x vyšší řeznou rychlost, což výrazně zkracuje dobu obrábění. Keramická kruhová destička má obvykle negativní geometrii, čímž je zvýšena její pevnost a kruhovitý tvar zajišťuje ekonomičnost z důvodu počtu řezných hran. Nevýhodou při obrábění Inconelu, je jeho zpevňování za řezným břitkem. Z tohoto důvodu je doporučováno keramickou destičkou hrubovat cestou minimálního vzniku vrubového opotřebení, tj. měnit během hrubování bod styku hrany materiálu a s břitovou destičkou. Změnu bodu vzniku vrubu lze zamezit hrubováním s různou hloubkou řezu nebo hrubováním pod kuzelem (rampováním).



Obrázek 4.1: Hrubování s proměnlivou hloubkou řezu [8]



Obrázek 4.2: Hrubování pod kuzelem – rampování [8]

Rozdílnost hloubek řezu, popř. rampy, by se měla pohybovat mezi 15 – 25 % průměru kruhové destičky neboli hloubku třísky držet v úhlu řezu 45 – 60°. Při těchto hodnotách dochází k neoptimálnějším podmínkám řezu.

Dalšího zvýšení trvanlivosti břitu docílíme eliminováním vstupů a výstupů z materiálu. Z předchozího obrábění vznikají na vnějších rozích a na koncích materiálu tvrdé otřepy, které způsobují značné opotřebení při kontaktu břitu s materiálem. Uvedený problém lze optimalizovat nájezdy po rádiusových drahách, kdy první styk břitu s materiálem je v jiném bodě než u podélného hrubování. V místě konečné dráhy obrábění narůstá průřez třísky a zároveň dochází

k náhlému vyjetí z řezu na nulovou hodnotu úběru. Zde dochází rovněž k velkému opotřebení, a proto z důvodu trvanlivosti se rovněž doporučují kruhové výjezdy.

3. fáze – Obrobení na čisto

Je poslední a zároveň nejnáročnější fází obrábění z hlediska technologického. Je zde docíleno požadované integrity povrchu a přesnosti vyráběného dílu. Na dokončovací operace se obvykle využívá břitu ze slinutého karbidu s pozitivní geometrií. Jsou mnohem spolehlivější z hlediska integrity povrchu. Ostrým břitem na konečný povrch obrobku nevnášíme takové množství povrchových napětí a převalků. Obrábění s SK břity je pomalejší, proto se významným způsobem podílí na celkovém času obrábění. Rychlejší, avšak cenově náročnější variantou dokončovacího obrábění je využití břitu z CBN. Řezná rychlost se volí až 7x vyšší než v případě SK, při malém posuvu. Dosahované parametry drsnosti jsou řádově až Ra 0,4 μm .

4.4 Nástroje pro obrábění Nimonicu

K obrábění niklových slitin se používá především břitů z řezné keramiky (ŘK) a slinutého karbidu (SK) třídy M a S. Z důvodu nízké tepelné vodivosti Inconelu, (přibližně 5x menší než u uhlíkové oceli) přechází více tepla do nástroje. Proto se při použití břitů ze slinutých karbidů používá pozitivní geometrie a menších řezných rychlostí (kolem 40 m/min). Z důvodu zvýšení teploty dochází k plastické a abrazivní degradaci břitu.

V případě řezné keramiky je velkou výhodou zachování tvrdosti ostří i za vyšších teplot, až 1200°C oproti slinutým karbidům, kde jeho tvrdost klesá od 700°C. Řezná keramika je tepelně i chemicky odolná, proto se doporučuje přibližně 4x vyšší řezná rychlost (kolem 180 m/min). Vlivem vyšších rychlostí břit zahřívá obráběný materiál, který je poté snadněji obráběn. Pro získání vyšší trvanlivosti keramického břitu se při soustružení chladí procesní kapalinou. Chlazení u operace frézování je kvůli rozstříku chladicí kapaliny nevhodné. V případě řezné keramiky z důvodu destrukce břitu vlivem teplotních šoků i nemožné.

Pro dokončovací operace obráběný je možné použití břitu z CBN. Malým úběrem (0,05 - 0,1 mm) při řezné rychlosti 200 – 300 m/min, lze docílit výborných výsledků drsnosti povrchu (až Ra 0,4 μm).

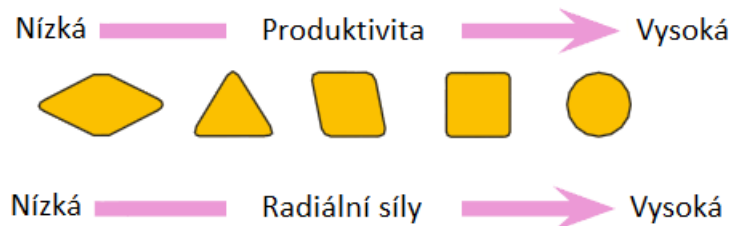
4.5 Geometrie nástrojů

V případě obrábění inconelových slitin je nutné zajistit, aby břit odebíral materiál odřezáváním. Při malém úhlu nastavení hlavního ostří dochází k odtlačování břitu a ke zvýšení tření, již při malém opotřebení nástroje. To může zapříčinit zpevňování materiálu za studena, tvorbu nárustku a následné zhoršení kvality obrobeného povrchu. Naopak příliš velký úhel nastavení hlavního ostří způsobuje enormní zvýšení řezných sil ve směru posuvu $F_y = F_f$.

Dalším důležitým faktorem je velikost zaoblení špičky nástroje, který při správné volbě napomáhá rozptylovat teplo na nástroji, popřípadě zlepšit kvalitu obrobené plochy. Malý rádius umožňuje snazší odřezávání materiálu. Příliš velký rádius naopak zvyšuje řezný odpor, což může způsobit vibrace nástroje a jeho zničení, popřípadě zpevňování povrchu obroku.

Vrubové opotřebení, které vzniká na styku břitu se zpevněným povrchem, má výrazný vliv na zničení keramické VBD. Z tohoto hlediska vhodné volit spíše odolnější kruhové destičky a vyhnout se tak opotřebení u destiček C, D neboli s úhlem nastavení hlavního ostří kolem 90°. U

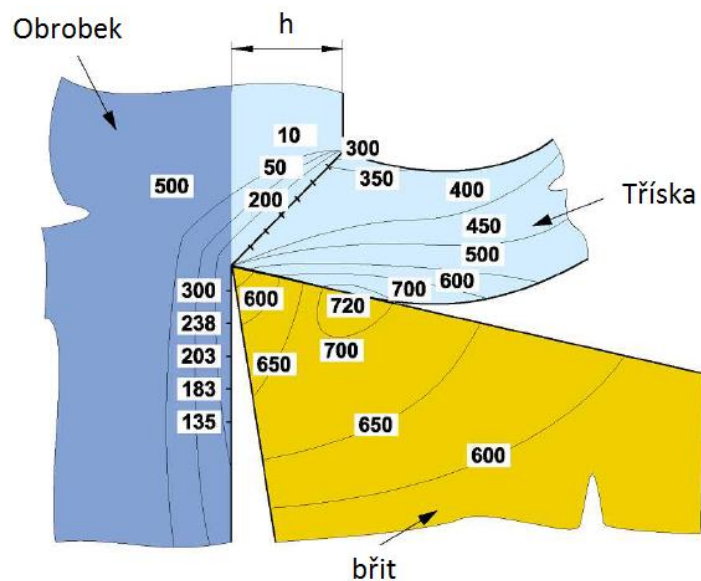
kruhové destičky je optimální volit hloubku řezu tak abychom dosáhly úhlu řezu 45 až 60° tj. volit hodnotu $a_p = 15 - 25 \% \times IC$ (kde IC průměr kruhové destičky). [8]



Obrázek 4.3: Vliv tvaru VBD na produktivitu obrábění [8]

4.6 Teploty při řezném procesu

Z důvodu malé tepelné vodivosti slitiny Nimonic 901 působí na řezný materiál při řezném procesu vysoké tepelné zatížení. Čelo břitu je namáháno teplotou až 700°C, které vzniká při procesu obrábění třením třísky o břit. Teploty v místě řezu jsou eliminovány chlazením a dále návrhem vhodných řezných podmínek. U HRSA materiálů je vhodné používání systému vysokotlakého chlazení (HPC), které efektivně pracují s přívodem řezné kapaliny tryskami s vysokou přesností do požadovaného místa, pod tlakem až 80 barů. Oblasti teplot v místě řezu při obrábění ISO-S slitin zobrazuje obrázek 4.4.



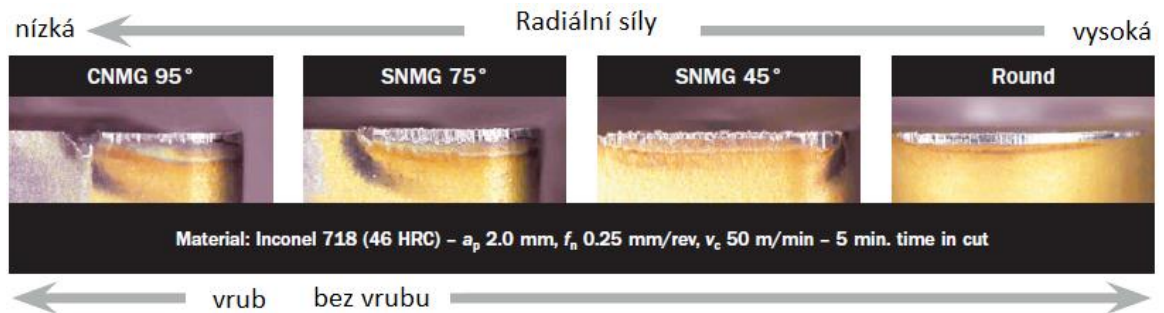
Obrázek 4.4: Teploty v místě řezu při obrábění ISO-S slitin [8]

4.7 Opotřebení nástrojů

Na opotřebení břitu má podstatně velký vliv řezná rychlost a posuv před hodnotou hloubky řezu. Řezná rychlost ovlivňuje kvalitu obrobeneho povrchu. K opotřebení dochází na hřbetě destičky VB_B a dále na čele břitu ve tvaru žlábků (krátery) KB_B v délce KT_B . Velikost opotřebení ve tvaru žlábků je ovlivněno množstvím tvrdých částí jako nitridů křemíku.

Nežádoucím, avšak častým případem opotřebení nástroje je opotřebení vrubem, který má u keramické destičky obvykle vliv na celkové zničení. Vrub obvykle vzniká narážáním na zpevněnou hranu Inconelu při obrábění, především pak při vstupu a výstupu z materiálu. Pokud je břit vyroben z měkkého karbidu, dochází k plastické deformaci tzv. zborcení karbidů. To může nastat vlivem řezné rychlosti v_c , nebo vlivem posuvu f . Řešením je volba tvrdšího karbidu.

Na vrubové opotřebení má zásadní vliv tvar břitové destičky, zejména pak vstupní úhel styku se zpevněným povrchem obrobku.



Obrázek 4.5: Vliv vstupního úhlu břitu na mechanismus opotřebení [8]

4.8 Procesní kapaliny při obrábění

Chlazení u obrábění inconelových materiálů provádíme především z důvodu životnosti nástroje, rozbíjení špon a dále k odstranění tepla v okolí místa řezu. Velmi častou procesní kapalinou jsou sirné minerální oleje. Síra při obrábění způsobuje křehnutí obrobku, zlepšuje kluzné vlastnosti a podílí se na lepším utváření třísky. Sirné minerální oleje se nemohou používat při obrábění nástrojem z SK. Pokud dojde k zahřátí obrobku na vysokou teplotu, může dojít ke vzniku hnědých skvrn na obrobené ploše. Tyto skvrny lze poté odstranit pomocí speciálních čistících přípravků.

Pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi se používají kapaliny s lepším chladícím efektem než sirné minerální oleje. Používají se chladicí kapaliny na bázi vody. Oproti tomu při obrábění nižšími řeznými rychlostmi jsou vhodná maziva s vyšší viskozitou nebo sprejové mlhy.

Chlazení se používá u obrábění slinutými karbidy. U keramiky není chlazení nutné, avšak je doporučováno pro operace soustružení, kde dochází ke konstantnímu řezu a procesní kapalina je přiváděna v dostatečném množství do místa řezu. Je vyzkoumáno, že chlazením keramického nástroje u soustružení se zvyšuje životnost nástroje. U frézování je chlazení nemožné z důvodu rozstříknutí procesní kapaliny a tím namáhání břitu na tepelné šoky. Pevnost keramické destičky se poté výrazně sníží a dochází k rozštípaní destiček na nástroji. To je kritické nejen pro výsledný obrobek ale i pro bezpečnost obsluhy a celého prostoru stroje.

V případě těžkoobrobitelných materiálů, kam můžeme zařadit i Inconely jsou současným trendem systémy vysokotlakého chlazení (HPC), pracující pod tlakem až 80 barů. Úlohou HPC je odvádět teplo z nástroje a místa řezu pomocí řezné kapaliny. Účinné chlazení v místě řezu snižuje opotřebení nástroje, tedy prodlužuje jeho trvanlivost, umožňuje zvýšení řezné rychlosti a kontrolu utváření třísek. Příkladem mohou být řezné nástroje v kombinaci s modulárním upínacím systémem Capto, který je navržen pro práci s chlazením pod vysokým tlakem.

4.9 Návrh a popis průběh obrábění (experimentu)

Cílem experimentu bylo vyrobit vřeteno ze slitiny Nimonic 901 v požadované kvalitě a přesnosti. Vřeteno bylo následně z důvodu vyšších kluzných vlastností iontově nitrídováno v oblasti vedení vřetena. Vzhledem k časovým možnostem nebylo důležité nutně dosáhnout optimálních řezných podmínek pro obrábění regulačního vřetene, nicméně nalézt fungující a spolehlivou variantu řezných podmínek, tak aby byl naplněn technicko–ekonomický přínos.

4.9.1 Volba testovaného dílu

Jak již bylo uvedeno v úvodu, cílem experimentu je zhotovení regulačního vřetena z materiálu Nimonic 901. Do firmy byl dodán tepelně vyžíhaný a předhrubovaný výkovek dle předem daných kritérií. Na konci výkovku je vyrobeno záchytné oko pro manipulaci a zavěšení v peci při tepelném zpracování. Takto upravené výkovky jsou rovněž běžně nakupovány pro aktivní výrobu.



Obrázek 4.6: Testovaný díl

4.9.2 Výběr stroje

Pro experiment byl vybrán CNC univerzální horizontální soustruh Mori Seiky NL3000. Stroj byl volen dle možností strojového parku podniku z důvodu velké délky rychlozávěrných vřeten. Požadavky na stroj pro obrábění houževnatého Nimonicu jsou tuhost, přesnost stroje a možnost využití požadovaného výkonu a točivého momentu již od nízkých otáček. Stroj splňuje požadavky k obrábění keramikou při řezné rychlosti $v_c = 200$ m/min. Na stejném stroji bude v budoucnu probíhat další aktivní výroba nimonicových vřeten.



Obrázek 4.7: Použitý obráběcí stroj Mori Seiky NL3000

4.9.3 Upnutí obrodku ve stroji

Upnutí obráběného dílu ve stroji je realizováno do sklíčidla a druhý konec je podepřen podpěrnou lunetou a otočným hrotem. U vřeten větších délek je využíváno lunety. Nutností je zajistit utlumení soustavy při obrábění.

Abychom zajistili nejdokonalější upnutí a přesnost házení pro obrábění na čisto, jsou před každým obráběním zhotovovány nové středící důlky, které jsou rotačně navrtávány proti rotujícím nástrojem. Tím je zajištěno navrtání téměř dokonalého středu a součást po upnutí nehází.


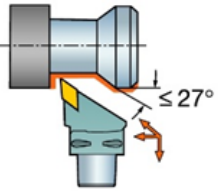
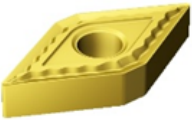
4.9.4 Stanovení omezujících podmínek

Stanovení omezujících podmínek je poměrně problematická záležitost. Nicméně vychází z požadavků na provoz a použití součásti. Omezující podmínky neboli požadovaná kritéria jsou víceméně předepsána výrobním výkresem, technickými požadavky a podmínkami na realizaci provozu. Protože se jedná o výrobu součásti do elektráren, podléhá zvýšené kontrole na kvalitu materiálu a přesnost výroby. Kromě požadované rozměrové přesnosti je důležitým faktorem v první řadě drsnost některých částí vřetena a radiální házení. Požadovaná drsnost v místě pohybu pouzder je $R_a 0,4 \mu\text{m}$. Hodnota drsnosti je víceméně dosahována broušením po obrábění, tedy nečiní takový problém. Jiným důležitým parametrem je radiální házení. To je měřeno po každém procesu obrábění i tepelném zpracování z důvodu optimalizace přídaveků. Požadované radiální házení dle výkresové dokumentace je $0,02/1000 \text{ mm}$. To je značně problematické, neboť obrábíme špatně obrobitelné součásti o malém průměru ($KR50 - 80 \text{ mm}$) o velké délce (až 1800 mm). U vřetena delších než 1200 mm se provádí 2x operace hrubování včetně tepelného zpracování žihání ke snížení pnutí. Dlouhé výkovky jsou opatřeny větším přídávkem na obrábění právě z důvodu zajištění radiálního házení a rozměrové přesnosti součásti. Pro zajištění optimálního upnutí s eliminováním radiálního házení jsou před každou fází obrábění zhotoveny nové středící důlky.


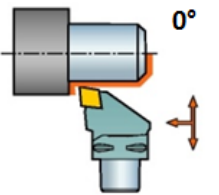
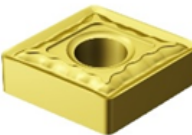
4.9.5 Volba nástroje a břitové destičky [17]

Po konzultaci s výrobcí nástrojů a břitových destiček byly na základě předchozích zkušeností s obráběním inconelových materiálů voleny následující nástroje. Břitové destičky byly dodány švédskou firmou Sandvik Coromant. Řezné podmínky byly navrženy dle katalogu a následně upraveny podle vlastních zkušeností a chování nástroje při řezu.

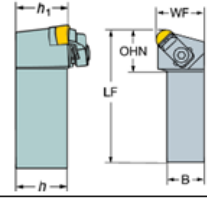
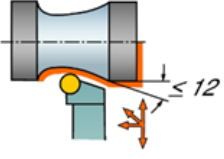
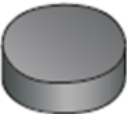
Tabulka 4: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17]

Nástroj	Nástroj (objednávací kod)	Úhel břitu nástroje	Úhel hlavního břitu nástroje	Tlak řezné kapaliny	Max. úhel zahlubování	
	C5-DDJNR-35060-1504	93 deg	-3 deg	10 bar		
Poznámky	Nástroj Coromant Capto s vnitřním chlazením, tlak řezné kapaliny 10 bar,					
Břitová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	DNMG 150612-QM S05F	55 deg	0 deg	MTCVD	S	QM
Karbid	S05F, deponovaná vrstva MTCVD					
Použití	VBD s negativním základním tvarem, vhodná pro operace podélné, čelní, tvarové soustružení, lehké hrubování a polodokončování, všeobecné smíšené obrábění korozivzdorných a HRSA ocelí s HB 350.					

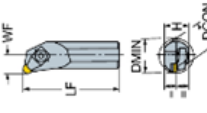
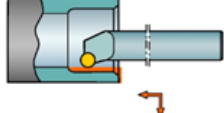
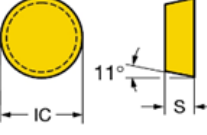
Tabulka 5: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17]

Nástroj	Nástroj (objednávací kod)	Úhel břitu nástroje	Úhel hlavního břitu nástroje	Tlak řezné kapaliny	Max. úhel zahlubování	
	C5-DCLNR-35060-12	95 deg	-5 deg	10 bar		
Poznámky	Nástroj Coromant Capto s vnitřním chlazením, tlak řezné kapaliny 10 bar,					
Břitová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	CNMG 120412-QM S05F	80 deg	0 deg	MTCVD	S	QM
Karbid	S05F, deponovaná vrstva MTCVD					
Použití	Karbidová třída s CVD povlakem. Vhodná pro dokončovací obrábění HRSA při vysokých řezných rychlostech, nebo pro dlouhotrvající spojité řezy při nižších rychlostech. Pro aplikace, kde tvorba vrubů nečiní vážné problémy, tj. oblé břitové destičky, velký úhel nastavení a měkčí materiály, lze tuto třídu použít i pro hrubování.					

Tabulka 6: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17]

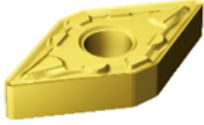
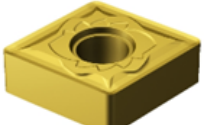
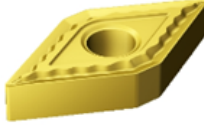
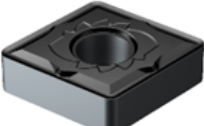
Nástroj	Nástroj (objednávací kod)	Úhel čela	Úhel sklonu ostří	Tlak řezné kapaliny	Max. úhel zahlubování	
	CRSNR 2525M 12-ID	-6 deg	-6 deg	externí chlazení		
Poznámky	Stopkový nástroj T-Max pro soustružení					
Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Průměr vepsané kr.	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	Úhel čela hřbetu
	RNGN 120700T01020 6060	12,7 mm	0 deg	bez depozice	S	20 deg
Třída	6060, bez depozice					
Použití	Keramika na bázi SiAlON pro optimalizaci obrábění již předobrobených HRSA materiálů za stabilních podmínek. Díky vysoké odolnosti proti opotřebení ve tvaru vrubu poskytuje vysokou spolehlivost bříty a předvídatelnost opotřebení.					

Tabulka 7: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17]

Nástroj	Nástroj (objednávací kod)	Ortogonální úhel čela	Úhel sklonu ostří	Tlak řezné kapaliny	Max. úhel zahlubování	
	S25T-CRSPL 09-ID	0 deg	-2 deg	externí chlazení		
Poznámky	Vývrtávací tyč T-Max pro soustružení					
Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Průměr vepsané kr.	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	Úhel čela bříty
	RPGN 090300E 6060	9,525 mm	11 deg	bez depozice	S	0 deg
Třída	6060, bez depozice					
Použití	Keramika na bázi SiAlON pro optimalizaci obrábění již předobrobených HRSA materiálů za stabilních podmínek. Díky vysoké odolnosti proti opotřebení ve tvaru vrubu poskytuje vysokou spolehlivost bříty a předvídatelnost opotřebení.					

Dále bylo odzkoušeno několik destiček, které se lišily pouze velikostí poloměru zaoblení špičky, druhem karbidu či druhem ochranného povlaku. Tyto destičky jsou zde uvedeny pouze pro informaci a nejsou zde uvedeny výsledky jejich testování.

Tabulka 8: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17]

Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	DNMG 150608-MM 2035	55 deg	0 deg	PVD	M	MM
Karbid	2035, deponováno PVD					
Použití	Slinutý karbid s PVD povlakem. Jeho použití je doporučeno pro polodokončování až hrubování austenitických a duplexních korozivzdorných ocelí při malých až středních řezných rychlostech. Díky vysoké odolnosti vůči tepelným rázům je tato třída ideální pro aplikace s rychle přerušovaným řezem.					
Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	CNMG 120416-SMR S05F	80 deg	0 deg	MTCVD	S	SMR
Karbid	S05F, deponováno MTCVD					
Použití	Karbidová třída s CVD povlakem. Vhodná pro dokončovací obrábění HRSA při vysokých řezných rychlostech, nebo pro dlouhotrvající spojité řezy při nižších rychlostech. Pro aplikace, kde tvorba vrubů nečiní vážné problémy, tj. oblé břítové destičky, velký úhel nastavení a měkčí materiály, lze tuto třídu použít i pro hrubování.					
Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	DNMG 150608-QM S05F	55 deg	0 deg	MTCVD	S	QM
Karbid	S05F, deponovaná vrstva MTCVD					
Použití	VBD s negativním základním tvarem, vhodná pro operace podélné, čelní, tvarové soustružení, lehké hrubování a polodokončování, všeobecné smíšené obrábění korozivzdorných a HRSA ocelí s HB 350.					
Břítová destička	Destička (objednávací kod)	Sevřený úhel destičky	Úhel hřbetu	Deponovaná vrstva	Aplikační oblast	lámač třísek
	CNMG 120412-SM 1105	80 deg	0 deg	PVD	S	SM
Karbid	1105, deponováno PVD					
Použití	Substrát složený z tvrdého jemnozrnného WC se 6% Co disponuje extrémní tvrdostí za zvýšených teplot a značnou odolností proti plastické deformaci. Nový tenký PVD povlak z TiAlN se skvělou adhezí k základnímu materiálu, dokonce i na velmi ostrých břitech, zaručuje vysokou houževnatost, rovnoměrné opotřebení hřbetu a mimořádnou výkonnost při obrábění žárovzdorných slitin.					

Při programování drah nástroje je vhodné zohlednit výsledovanou trvanlivost použité destičky. Úběry je tedy účelné rozdělit do stejně velikých časových intervalů, tak aby bylo využito maximální trvanlivosti jednotlivých břitů. Nutné je rovněž předejít prasknutí destičky,

jenž má za následek vytvoření vrypu do obrobku. To je z důvodu vysoké ceny obrobku zcela nepřístupné a je potřeba nehody nástroje co nejvíce eliminovat.

4.9.6 Průběh experimentu

Po navrtání středících důlků, bylo vřetenou ustaveno v pracovním prostoru upnutím jednoho konce ve tříčelistovém sklíčidle a podepřené otočným hrotem a lunetou. Výroba vřeten probíhala na 3 až 4 etapy obrábění podle délky vřeten. U delších součástí byly pro dosažení vyšší přesnosti navrženy 2 operace hrubování s následným žíháním ke snížení vnitřního pnutí. Uvolněním pnutí z materiálu docílíme zpřesněním další výroby a snížení radiálního házení na hotovém výrobku.

Po odebrání tvrdé kůry výkovku karbidovým nástrojem jsme opracovali kuželku vřeten. Následovala operace hrubování vedení kde docházelo dlouhodobému nepřerušovanému řezu. U této operace byla zkoumána trvanlivost karbidových destiček v závislosti na čase působení v řezu. Trvanlivost karbidového břitu se obvykle pohybovala kolem 23 minut nepřetržitého konstantního řezu, což odpovídá jednomu přejezdu celé délky kratšího vřeten (Vřeten D42), při řezných podmínkách ($v_c = 40$ m/min, $f = 0,2$ mm/ot a $a_p = 2$ mm). Nasazení keramických kruhových destiček slibovalo zvýšení produktivity obrábění a stabilizaci řezu. Nicméně po několika pokusech, byla tato operace zamítnuta z důvodu praskání keramických břitů. Použití jak negativní, tak pozitivní kruhové keramické destičky nebylo z důvodu rozechvění soustavy S-N-O vhodnou variantou. Negativní destička RNGN se zvyšujícím se řezným odporem, začala drnčet a došlo k ulomení břitu. Pozitivní destička RPGN, která se dle katalogu běžně používá spíše pro frézování díry, neměla pro změnu dostatečnou pevnost. Povrch po soustružení kruhovou keramickou destičkou byl horší, nicméně to bylo způsobeno chvěním a destrukcí břitu. Pro více utlumenou soustavu S-N-O představuje obrábění keramikou značnou výhodu, především z hlediska produktivity a odolnosti břitu. Z důvodu vyšší řezné rychlosti také dochází podstatnému zkrácení doby řezu.

4.9.7 Dosahované parametry

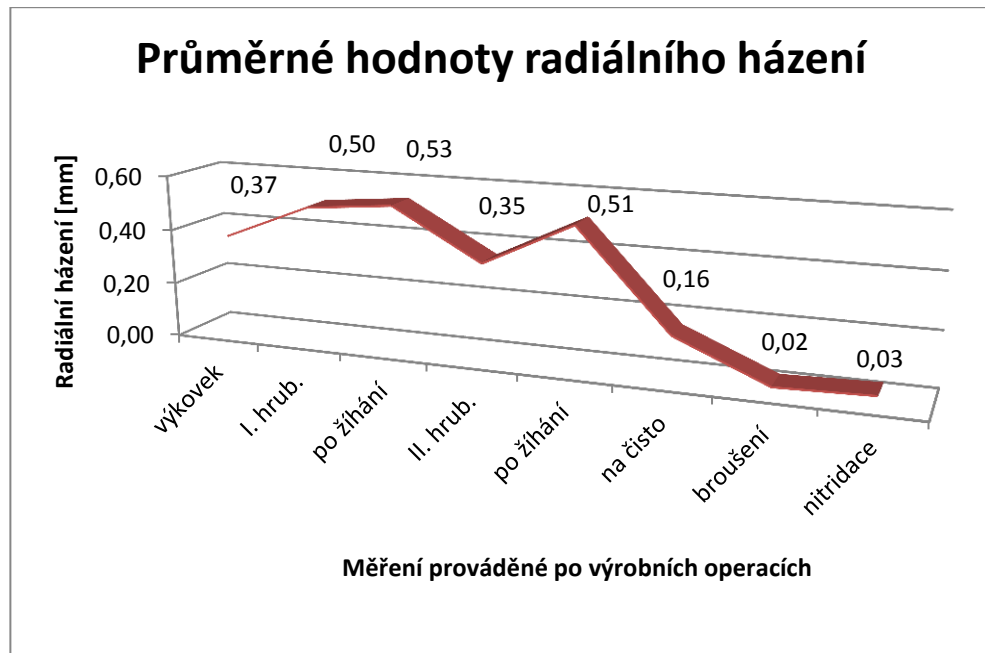
Již v průběhu výrobního procesu, jehož postup je uveden v příloze 1, bylo vřetenou po každé fázi obrábění proměřováno. Sledovanými parametry byly drsnost povrchu, rozměrová geometrická přesnost, především pak radiální házení, popřípadě tvrdost a kontrola vad materiálu.

Drsnost povrchu, vzhledem k následnému broušení činných ploch, nezpůsobovala sebemenší problém. Rozměrová přesnost splňovala požadavky výkresové dokumentace. Tvrdost dle Brinella naměřená po jednotlivých operacích se pohybovala pod horní hranici předepisované hodnoty ($302 \div 388$ HB). Z toho vyplývá, že ke zpevnování povrchu za studena dochází v povolené míře. Kontrola materiálu na povrchové a vnitřní vady byla provedena kapilární zkouškou a ultrazvukem. Magnetická zkouška nebyla prováděna, neboť se jedná o nemagnetickou austenitickou slitinu.

Nejkomplikovanějším faktorem u obrábění bylo radiální házení. To bylo zaznamenáváno po jednotlivých fázích výroby do tabulky. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty radiálního házení výroby prvních sérií nimonických vřeten po jednotlivých fázích výroby.

Tabulka 9: Tabulka hodnot radiálního házení

Radiální házení [mm]							
výkovek	I. hrub.	po žíhání	II. hrub.	po žíhání	na čisto	broušení	nitridace
0,37	0,50	0,53	0,35	0,51	0,15	0,02	0,03



Graf 2: Radiálního házení po jednotlivých operacích

4.9.8 Opotřebení břitových destiček

Při obrábění vřetena byly zohledněny výsledované hodnoty trvanlivosti použitých destiček. Úběry materiálu byly naprogramovány tak aby bylo využito maximální trvanlivosti břitových destiček respektive, aby břit vydržel celou délku přejezdu na vedení vřetena. Jejich opotřebení včetně času v řezu je zobrazeno na následujících snímkách (X - pohled na čelo břitu, X1 - pohled na hřbet břitu). Nežádoucí vrubové opotřebení, které vzniká na styku se zpevněným povrchem materiálu, je patrné především u břitů použitých v hrubovacích operacích.

DNMG 150612 – QM S05F

Hrubování vedení vřetena:

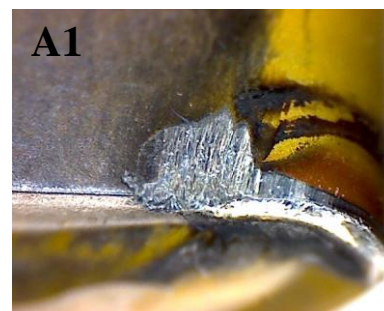
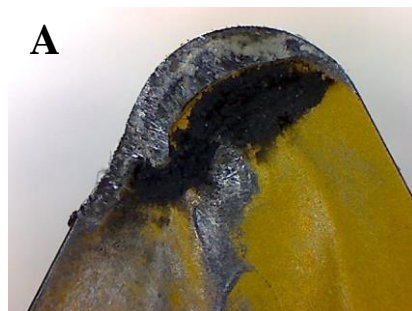
Stanovené řezné podmínky:

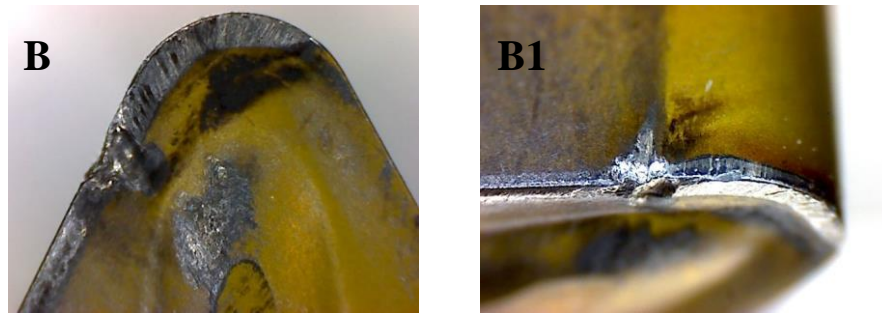
$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,2 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 2 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 23 \text{ min } 40 \text{ sek}$$





Obrázek 4.8: Opotřebení břitu DNMG při hrubování slitiny Nimonic 901

Vedení vřetena na čisto:

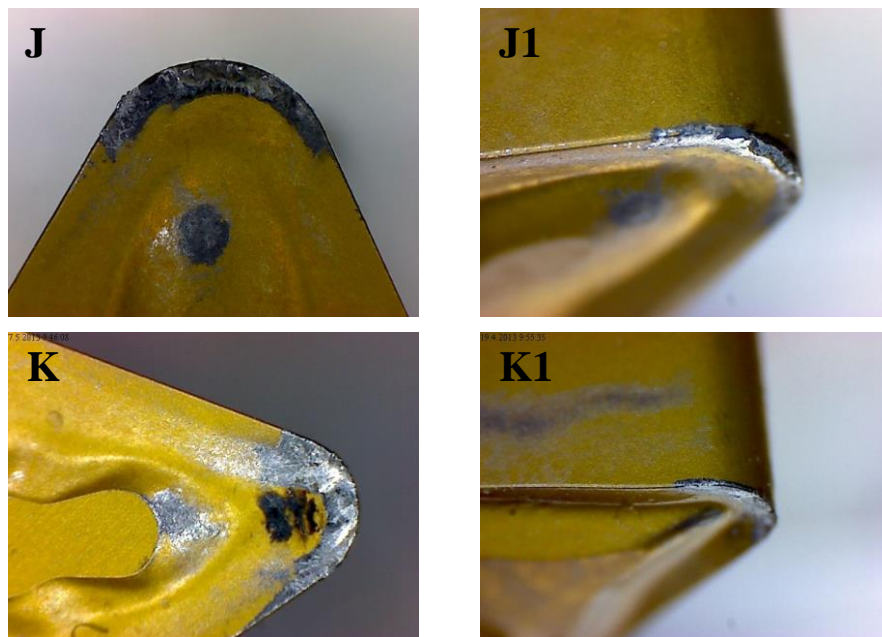
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,15 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 23 \text{ min } 40 \text{ sek}$$



Obrázek 4.9: Opotřebení břitu DNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto

CNMG 120412-QM S05F

Hrubování kuželky - Vřeteno s kuželkou D110/60st:

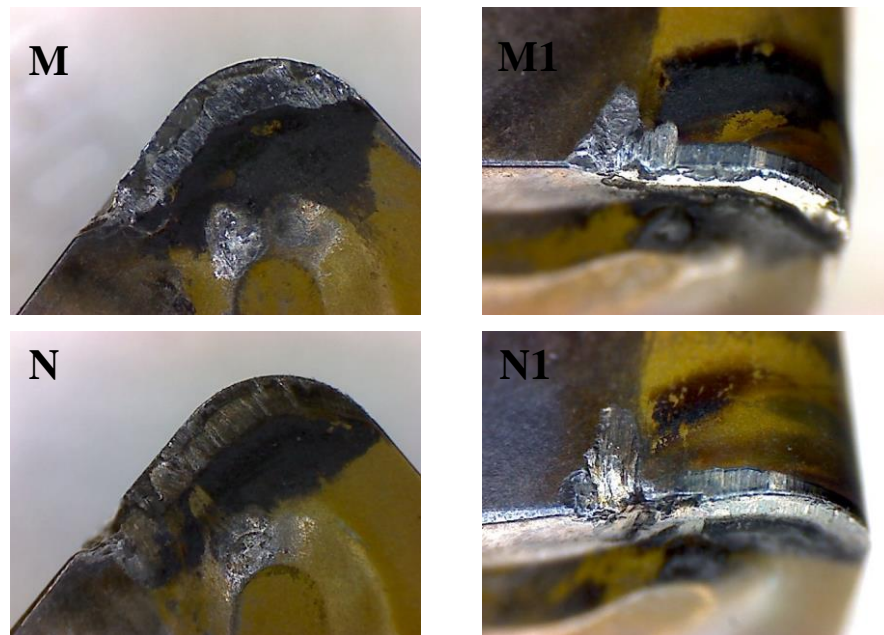
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,2 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 15 \text{ min } 32 \text{ sek}$$



Obrázek 4.10: Opotřebení břitu CNMG při hrubování slitiny Nimonic 901

Hrubování kuželky - Vřeteno ZV:

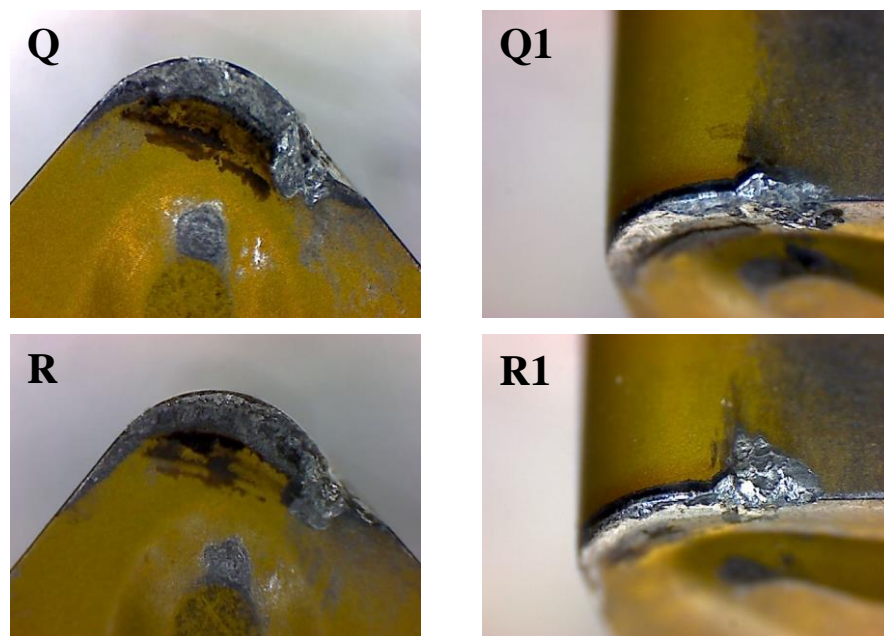
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,15 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 10 \text{ min } 15 \text{ sek}$$



Obrázek 4.11: Opotřebení břitu CNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto

Snímky břitů z keramiky RNGN 1200700T01020 6060 a RPGN 090300E 6060 nejsou z důvodu destrukce břitů uvedeny.

Ostatní snímky z experimentu jsou k nahlédnutí v příloze 2.

Při obrábění vznikaly z počátku třísky vinuté a stužkové třísky ve formě drátu, které nejsou svým tvarem žádané z důvodu ohrožení osob, nástrojů, obrobku či obráběcího stroje). Při hrubování a obrábění na čisto vznikaly obvykle kuželové šroubovitě třísky a dělené obloučkovité třísky, které jsou svým tvarem žádané. Tvar třísek ovšem není při obrábění těžkoobrobitelných materiálů stálý. Důležitější je vůbec takovýto materiál ekonomicky obrobit v dostatečné přesnosti a kvalitě povrchu.



Obrázek 4.12: Tvarem méně žádané třísky - stužková, vinutá dlouhá a spirálová plochá tříska



Obrázek 4.13: Žádaný tvar třísek - kuželovitá šroubovitá a dělená tříska

4.9.9 Porovnání cen břitových destiček

Tabulka 10 zobrazuje smluvní cenu za jednotlivé břitové destičky, které byly k experimentu obrábění vřetena použity.

Tabulka 10: Smluvní cena použitých VBD

Označení břitové destičky	Druh řezného materiálu	Cena [Kč/kus]
DNMG 150612-QM S05F	Slinutý karbid	292
CNMG 120412-QM S05F	Slinutý karbid	212
RNGN 120700 T01020 6060	Řezná keramika	398
RPGN 090300E 6060	Řezná keramika	334

4.9.10 Zhodnocení výsledků experimentu

Po obrobení prvních sérií nimonicových vřeten byla ověřena správnost postupu výroby vřeten a je tedy možno zajistit výrobu v požadované kvalitě. Rozměrová a geometrická přesnost dle výkresové dokumentace byla dodržena. Vada materiálu nebyla zaznamenána. Požadované hodnoty radiálního házení byly v normě.

Z experimentu obrábění byla vyzorována překvapivě solidní trvanlivost břitů ze slinutých karbidů, kdy při hrubování bylo dosaženo hodnoty trvanlivosti až 23 minut řezu. Keramická destička při hrubování z důvodu neutlumení vibrací na dlouhém vřetenu o malém průměru praskla. Keramická destička, ač je běžně několikanásobně produktivnější, než destička z SK, v našem případě není prozatím vhodná. Karbidová destička v současné době zaručuje stabilní a efektivní způsob obrábění a její použití bylo dostatečné. Ze snímků opotřebovaných břitů je zřejmé vrubové opotřebení především u hrubovacích operací. To je specifické pro obrábění inconelových materiálů, kdy k vrubu dochází při styku řezné hrany se zpevněným povrchem. Tento způsob opotřebení nastává i u břitů keramických. Cenové zhodnocení udává porovnání cen jednotlivých destiček v Tabulce 10, jak je výše uvedeno. Dosažené výsledky je možno použít pro další výzkum a optimalizaci obrábění.



Obrázek 4.14: Hotové výrobky

4.10 Broušení

Z důvodu lineárního posuvného pohybu vedení regulačního vřetena v lisovaných uhlíkových a stelitových pouzdech je zapotřebí dosáhnout výborných kluzných vlastností. Proto se ke snížení drsnosti provádí operace broušení. V případě ocelových vřeten se provádělo broušení pro zlepšení povrchu až po nitridaci. Nicméně v případě nimonicových vřeten, z důvodu nižšího obsahu železa (Fe) ve slitině, proniká nitridovaná vrstva pouze do několika setin milimetru. Nitridovaná vrstva je proto velmi malá a případným broušením po nitridaci by hrozilo odstranění právě této vrstvy. V současné době se zajišťuje dostatečná kvalita drsnosti povrchu již před iontovou nitridací a následně dochází pouze k začištění plstěným kotoučem.



Broušená součást je opatřena většími přídávky pro zaručení opravitelnosti. Broušení vřeten se provádí na brusce na kulato nejprve zapichovacím způsobem, pro odstranění přebytečného

přídavku materiálu, a následuje přerovnáni podélným broušením pro zajištění přesného rozměru po celé délce vřetena.

Broušení bylo prováděno na horizontálních hrotových bruskách B40 U/1500 a B40 U/2000 od firmy Schaudt, průměr brusného kotouče 315 – 500 mm. Maximální otáčky stroje dle servisní příručky jsou 1470 ot/min. To odpovídá na točném průměru 500 mm řezné rychlosti 38 m/s.

4.10.1 Přehled zkoušených brusných kotoučů

Tabulka 11: Přehled zkušebních brusných kotoučů

	Označení kotouče	Doporučená řezná rychlost	Cena	Poznámka
	Keramické zrno, T1- 500 x 60 x 203,2 54A 80 - H8V904W	45 m/s	12 950 ,-	Kotouč A
	Označení kotouče	Doporučená řezná rychlost	Cena	Poznámka
	Bílý korund, KB 500 x 60 x 203 89 A 80J V217	45 m/s	5536 ,-	Kotouč B
	Označení kotouče	Doporučená řezná rychlost	Cena	Poznámka
	Keramické zrno, T1- 500 x 60 x 203,2 54A 80 - H15VPH904W	40 m/s	12 950 ,-	Kotouč C
	Označení kotouče	Doporučená řezná rychlost	Cena	Poznámka
	Keramické zrno, KB 500 x 60 x 203 45A 80J V3	50 m/s	11115 ,-	Kotouč D

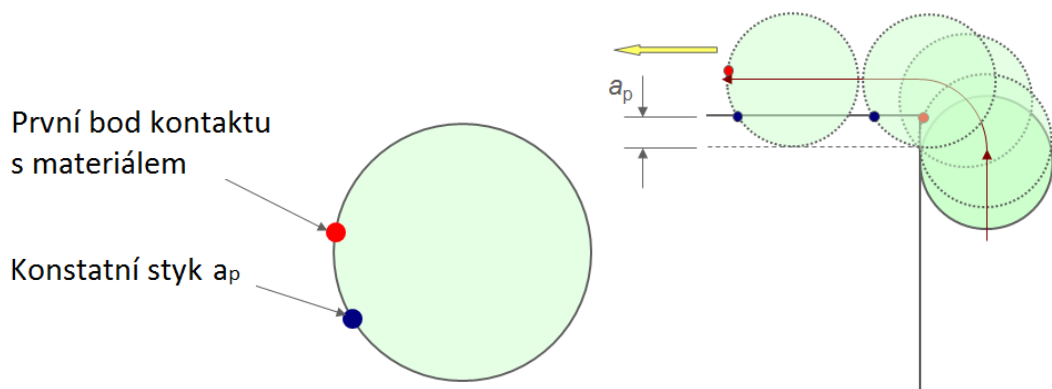
Broušení nimonických slitin je poměrně obtížné. Dochází k rychlému opotřebování brusných zrn a zanášení pórů kotouče. To způsobuje zvýšení řezného odporu a teploty v místě broušení. V současné době se využívá pro broušení Inconelu CBN brusných kotoučů. Protože firma nedisponuje ve strojovém parku dostatečně výkonnou bruskou, nemohly být tyto CBN brusné kotouče otestovány. Kotouče výrobci označují jako nejvhodnější a nejvýkonnější pro broušení inconelových materiálů. Nicméně cena kotouče je cca 8-12x vyšší, než cena standardních kotoučů, které jsou pro broušení ve firmě běžně využívány. Otázkou zůstává, zdali CBN kotouč bude dostatečně výkonný, aby zvládl 10 násobek produkce. To výrobce nemůže 100% zaručit a nezbyvá než zapojit se do otestování kotouče a kotouč zaplatit. Protože řezná rychlost CBN kotoučů se běžně pohybuje kolem 90 m/s, je potřeba právě výkonnějších strojů a není možné využití naší brusky.

5. Optimalizace výrobního procesu

Jak již bylo v úvodu uvedeno obrábění Nimonicu 901 je poměrně technologicky i ekonomicky obtížné. Důležitým faktorem pro maximální zvýšení trvanlivosti břitových destiček je upravit výrobní technologii. Především úpravou drah nástroje je možno docílit výrazné úspory nákladů na nástrojové vybavení.

5.1 Nájezdy a výjezdy nástroje

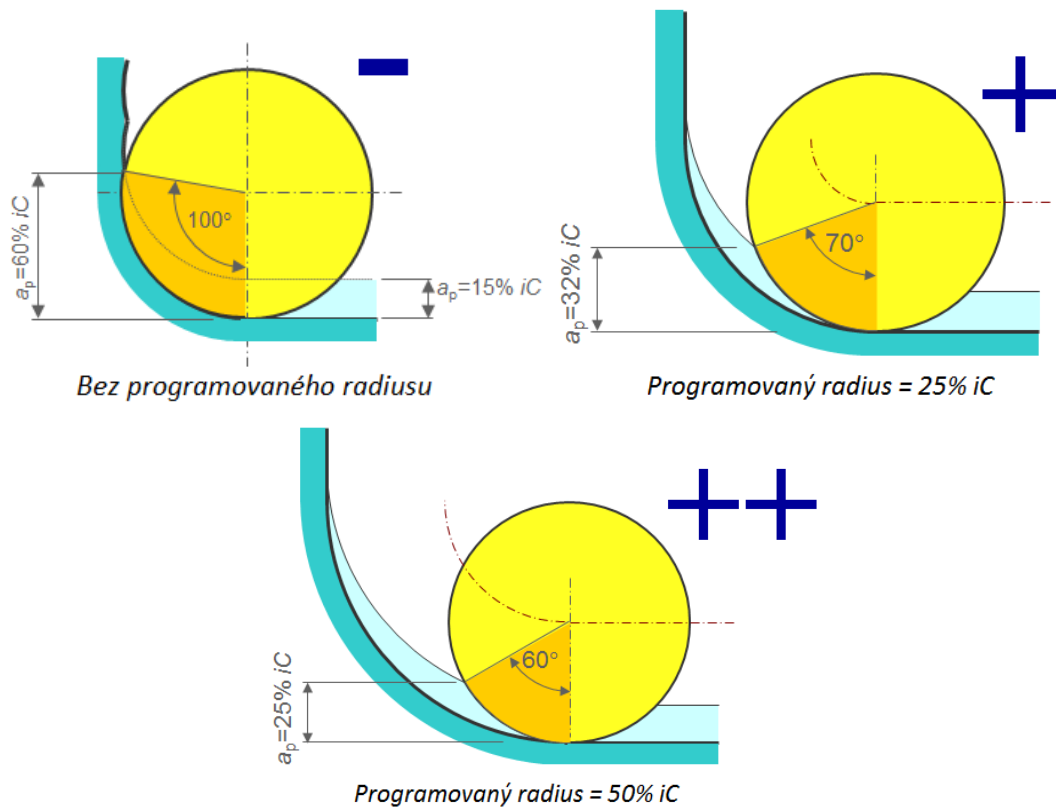
Ke zvýšení trvanlivosti keramických kruhových destiček je zapotřebí snížení možnosti vzniku vrbového opotřebení. To umožní vhodné programování kruhových nájezdů a výjezdů. Při vstupu nástroje do materiálu dochází k značnému zvýšení napětí v místě styku se zpevněným materiálem, což je v případě Nimonicu 901 normální. Programováním kruhových nájezdů dochází ke změně styčného bodu mezi nástrojem a materiálem při nájezdu. Bod styku se postupně posouvá do místa konstantní hloubky řezu a_p . To zobrazuje obrázek 5.1. Při výjezdu nástroje z materiálu dochází k náhlému snížení napětí na nástroji, což není pro nástroj optimální a navíc může dojít k vytažení materiálu přes hranu. Z tohoto důvodu je vhodnějším řešením volit výjezd po kruhové dráze a docílit tím postupné snížení napětí se změnou styčného bodu břitu s materiálem. [8]



Obrázek 5.1: Stykové body při nájezdu nástroje do materiálu [8]

5.2 Obrábění kruhovou destičkou v rozích kolem stěny

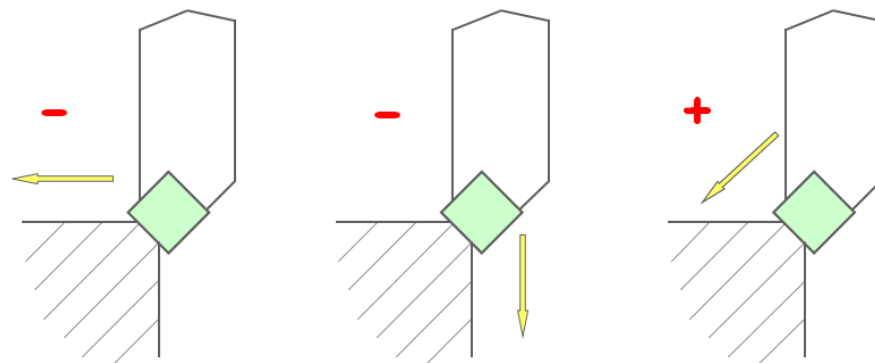
Při obrábění materiálu v rozích součástí je vhodné programovat nástroje po kruhových drahách. Zpravidla se používá průměr kruhové destičky o velikosti 75% poloměru rohového zaoblení. Programovaná kruhová dráha by měla být minimálně 25% průměru destičky. Při nájezdu břitu do rohu dochází vyššímu úběru materiálu (většímu úhlu záběru destičky), což může způsobit vibrace a zničení VBD. Z tohoto důvodu se doporučuje v rozích snižovat posuv nástroje. [8]



Obrázek 5.2: Obrábění rádiusu kruhovou destičkou [8]

5.3 Sražení hran čtvercovou destičkou

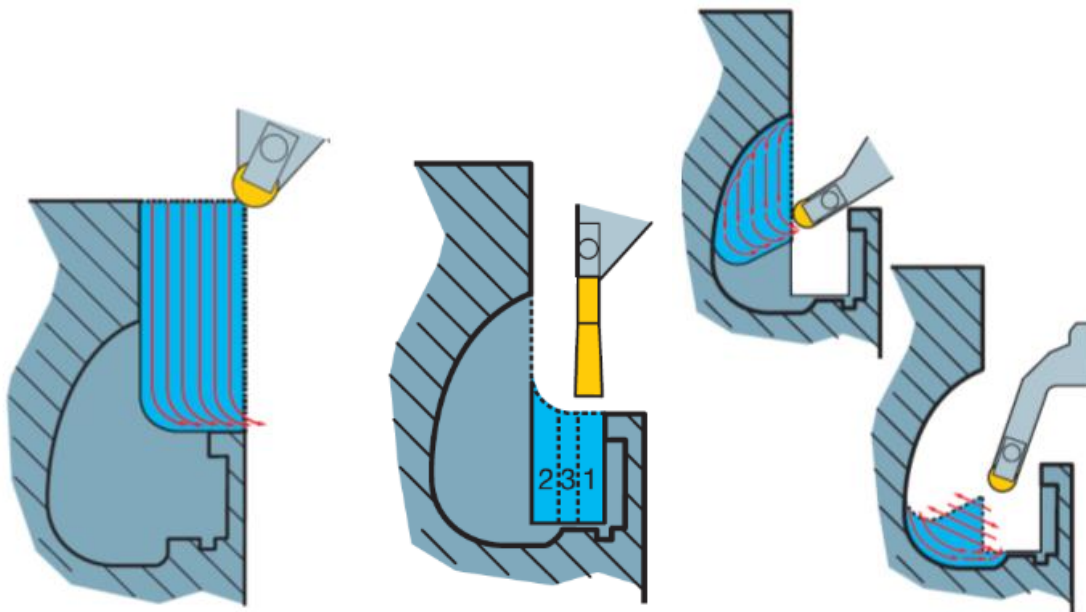
Dalším způsobem jak omezovat vznik vrubu na čtvercové břitové destičce je směr posuvu nástroje. Příkladem je sražení hrany obrobku. Pokud směr posuvu nástroje je rovnoběžný nebo kolmý s osou obrobku, dochází k zatěžování nástroje v jednom bodě a zvyšuje se riziko vzniku vrubového opotřebení. Působením břitu pod úhlem 45° na ostrou hranu dochází k rozdělení napětí do větší části břitu a proměnlivého bodu styku s materiálem. [8]



Obrázek 5.3: Sražení hran čtvercovou destičkou [8]

5.4 Obrábění profilů a kapes kruhovou destičkou

Pokud je zapotřebí obrobit složitější tvarové profily, kapsy, popřípadě uvolnění místa pro upínač následujícího nástroje je vhodné použít operaci zapichování. Zvýšíme tím trvanlivost kruhové destičky, která by zbytečně dlouho a pomalu obráběla tento přebytný materiál. Pro vyšší trvanlivost břitů musíme mít stále na paměti rovnoměrné zatížení nástroje, proměnlivou stykovou hranu břitu se zpevněným materiálem, vhodné rezné podmínky a redukovat posuv dle aktuální polohy nástroje a prováděné operace. [8]



Obrázek 5.4: Postup obrábění profilů a kapes kruhovou destičkou [8]

5.5 Optimalizace výrobní technologie s ohledem na konstrukční řešení

Z daleka největším problémem při výrobě vřeten bylo udržet radiální házení v celé délce vřetena na hodnotě 0,02mm/1000mm a zároveň mít ideálně nabroušenou plochu vedení. Především u vřetena RZV délky více než 1600mm, bylo nutné přesné broušení, neboť soustružením, z hlediska trvanlivosti břitu, nebylo možno obrobit celou délku vedení na jeden přejezd.

Výrazným zjednodušením výroby ale i zkrácení doby broušení bylo dosaženo optimalizací konstrukce vřetena. Konstrukční uvolnění spočívá ve vybrání mezi aktivními plochami pro pouzdra, kde zbytek neaktivního vedení je obrobeno na průměru o 0,2mm menší než činné části. To zajistí vysoké snížení brusné plochy, kde v nečinné části není požadována přísná tolerance radiálního házení 0,02mm/1000mm. Konstrukční uvolnění se dále nebrousí a finální povrch je zajištěn soustružením. Další výhodou je možnost rovnání vřetena, neboť případné praskliny nitridované vrstvy není v aktivní části vřetena. Možnost rovnání vřeten umožňuje dosažení vyšší finální přesnosti.

6. Nitridace Inconelu

Životnost součástí bezprostředně souvisí s otěrem na povrchu, s korozními účinky a výskytem únavových trhlin. Všechny tyto vlivy jsou uplatňovány především od povrchu součástí. Proto je značně důležité ovlivnit mechanické a další vlastnosti právě v této oblasti. To vede k rozvoji progresivních technologií a zaměření k zefektivňování využití surovin a materiálů.

Jedná se o difúzní pochody, spočívající v tom, že povrchové vrstvy oceli či jiných materiálů jsou nasycovány dalšími látkami. Následkem je kromě změny chemického složení v povrchové vrstvě i změna struktury a mechanických vlastností. Výhodou difúzních pochodů je mimo jiné homogenita vzniklých vrstev a jejich dobrá soudržnost se základním materiálem. Ve strojírenství se stále více uplatňují metody vytváření tvrdých vrstev vhodných pro komplexní namáhání součástí. Vrstvy mají vysokou pevnost ale i dobrou houževnatost a plasticitu [7].

Cíle povrchové úpravy:

- Vyšší tvrdost
- lepší odolnost proti opotřebení
- nižší koeficient tření
- lepší ochrana proti korozi
- dekorativní funkce

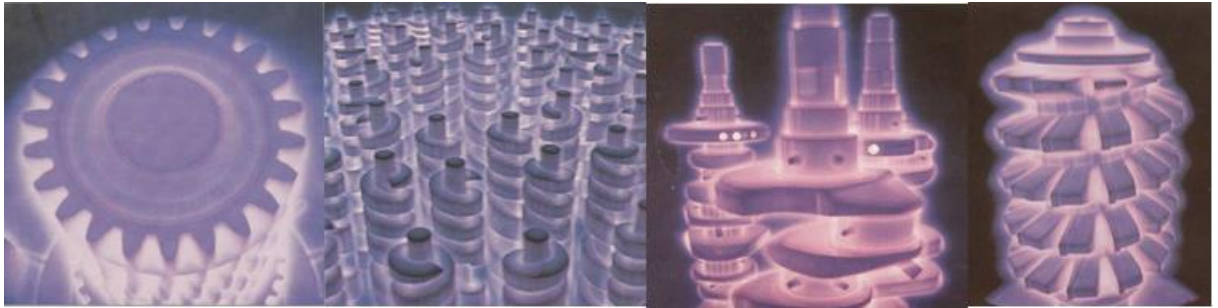
6.1 Princip iontové nitridace [7]

Nitridace v doutnavém výboji nebo též plazmová či iontová nitridace je stejně jako jiné postupy nitridování podmíněna přítomností atomárního dusíku na povrchu kovu. Atomární dusík je schopný pronikat za zvýšených teplot do mřížky základního kovu přes absorpční vrstvičku nitridů a dále difundovat do materiálu.

Nitridované součásti jsou izolovaně uloženy ve vakuové nádobě (recipientu) a zapojeny jako katoda. Samotný recipient je zapojen jako anoda a je v něm udržován snížený tlak zředěné směsi plynů. Tato směs plynů, nejčastěji směs dusíku a vodíku ($N_2 + H_2$), je potřebná pro proces nitridace.

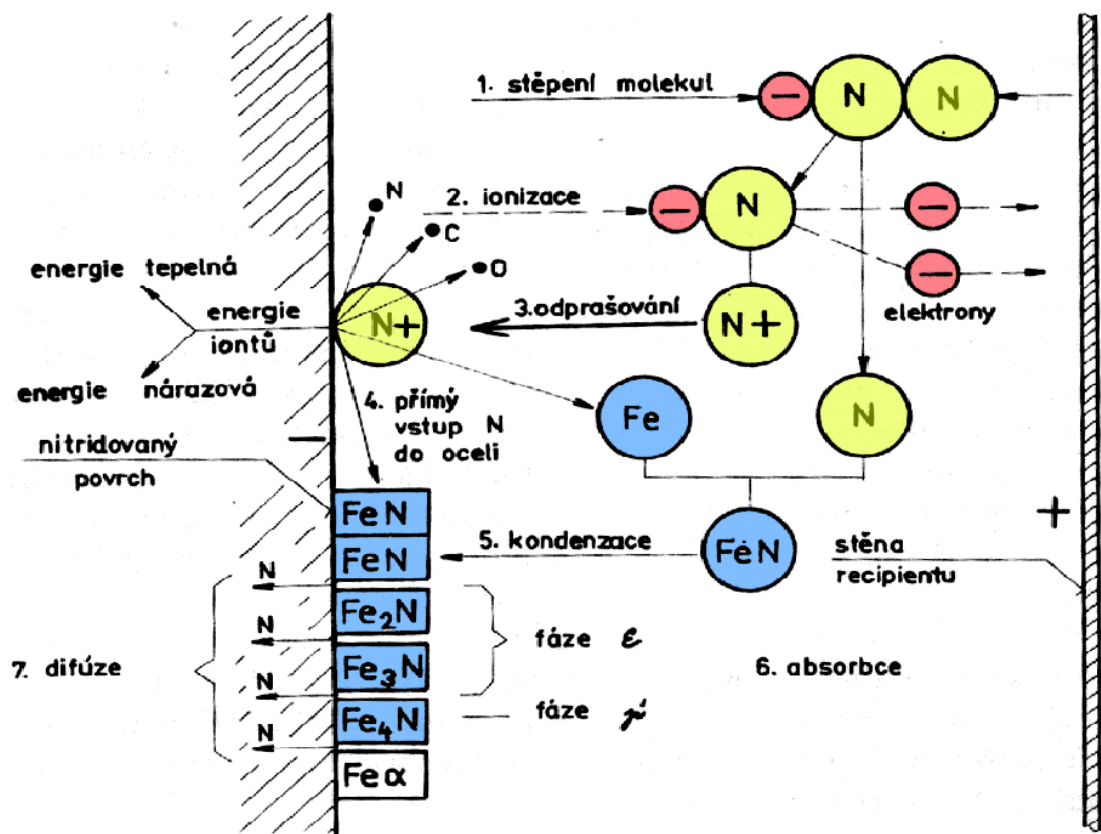


Obrázek 6.1: Pec pro iontovou nitridaci



Obrázek 6.2. Příklady vsázek nitridovaných součástí [16]

Připojením stejnosměrného proudu o napětí 400 až 1000 V vzniká mezi stěny recipientu (anodou) a povrchem součástí (katodou) elektrické pole. Hodnoty napětí, proudu a tlaku musí být nastaveny tak, aby odpovídaly oblasti anomálního výboje. Působením proudu dochází k doutnavému výboji modro-fialové barvy s vysokou ionizací (plazma), která rovnoměrně pokryje nitridovaný povrch součástí. Na povrchu bombardovaném ionty se uvolňuje atomární dusík, který je nutný pro difúzi do povrchu součástí vsázky. V elektrickém poli dochází k silné migraci molekul zředěného plynu a v důsledku nárazů ke štěpení a ionizaci, kdy kladné ionty jsou urychlovány směrem ke katodě, tj. na povrch nitridovaných součástí. Při pohybu iontů ke katodě není kinetická energie lineární. K prudkému nárůstu rychlosti dochází teprve v bezprostřední blízkosti povrchu součástí v oblasti katodového úbytku napětí. To má za následek, že největší intenzita dějů anomálního doutnavého výboje se odehrává v úzkém plošném pásmu okolo povrchu součástí bez ohledu na tvar nebo vzdálenost od stěny recipientu – anody. Především v tomto pásmu dochází ke štěpení molekul a k ionizaci atomů a proto má anomální výboj plošný charakter a svítící korona kopíruje povrch součástí.



Obrázek 6.3: Schéma dějů při iontové nitridaci [16]

Probíhající děje na povrchu součásti dle obr. 6.3 lze vysvětlit následovně. Kladné ionty neustále bombardují povrch součásti. Kinetická energie se při dopadu z části přemění v teplo a součásti se zahřívají. Dopadající ionty při nárazu vyrážejí z povrchu atomy železa a dalších prvků, především dusíku uhlíku a kyslíku. Tento jev je nazýván katodové odprašování. Při dopadu iontů dusíku na povrch dochází k reakci s odprašenými atomy. To vede ke vzniku dusíkem bohatých nitridů železa. Jejich kondenzací se vytváří absorpční vrstvička s vysokou koncentrací dusíku.

Z pravidla mohou nastat dva základní procesy ve výboji.

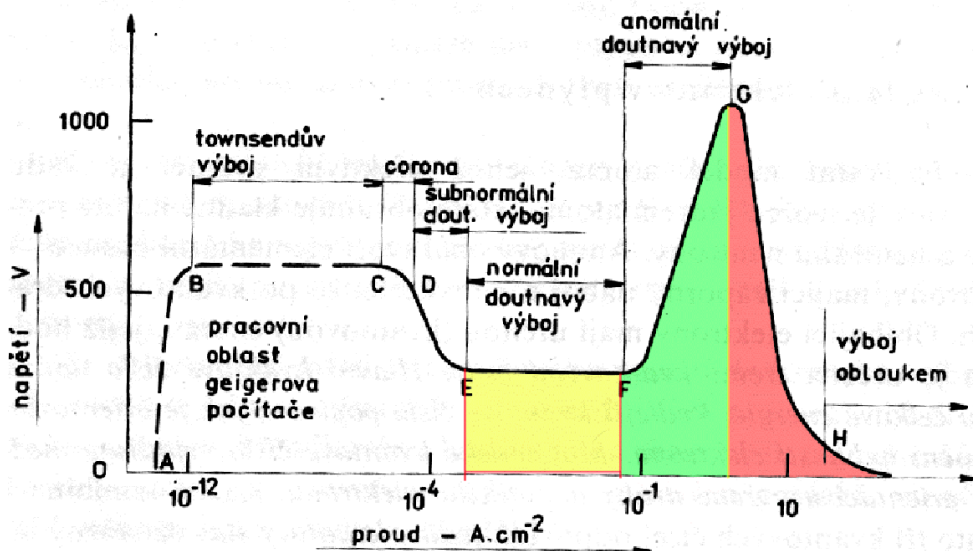
Odprašování - dopadající kladné ionty vyrážejí z katody částice. To způsobuje úbytek hmoty na katodě a dochází k zmenšování rozměrů. Odprašování je silnější se snižujícím se tlakem. [16]

Naprašování - dopadající kladné ionty ulpívají na katodě a postupně do povrchu difundují. Tím dochází k růstu hmoty a zvětšování rozměru. Difúzní děj je silnější se vzrůstající teplotou katody a přírůstek je parabolicky závislý na čase. [16]

V další části je proces iontové nitridace srovnatelný s klasickou nitridací v plynu. Povrchová vrstvička bohatých nitridů se rozpadá na nižší složky. Část uvolněného dusíku proniká (difunduje) do povrchu součásti a vytváří vazbou na nitridované prvky difúzní podpovrchovou nitridační vrstvu.

6.2 Podstata vedení elektřiny a využití doutnavého výboje

Vedení elektřiny v plynech při iontové nitridaci je způsobeno štěpením a ionizací atomů plynu. Ionizací se rozumí odtržení (vyražení) jednoho nebo více elektronů z obalu atomu, proto se částice plynu rozdělí na kladné ionty a volné záporné elektrony. V důsledku nárazů migrujících molekul a pohybu nosičů nábojů v elektrickém poli se tento děj stále opakuje a dochází k nárazové ionizaci. Kladné ionty jsou urychlovány ke katodě a elektrony se pohybují směrem k anodě, plyn se stává vodivým a obvodem začíná proudit proud. Tento průchod proudu plynem se nazývá výboj.

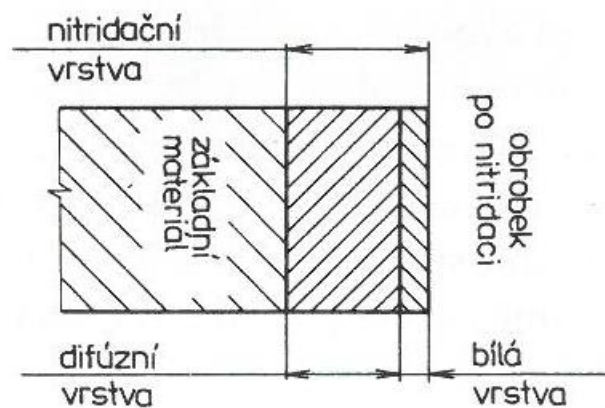


Obrázek 6.4: Závislost změny doutnavého výboje ve zředěném neonu na napětí a plošné hustotě proudu [16]

Na obrázku je zobrazeno schéma změny povahy výboje ve zředěném neónu v závislosti na přivedeném napětí a proudové hustotě. Iontová nitridace vyžaduje vysokou proudovou hustotu a napětí v rozmezí 250 až 1000 V. Proto je uskutečnitelná pouze v podmínkách anomální oblasti. Bez dalších opatření je v této oblasti plošný doutnavý výboj nestabilní a přechází do lokálního světelného výboje. To je u iontové nitridace nepřijatelné.

6.3 Bílá vrstva

Nitridační vrstva na povrchu základního materiálu se skládá ze dvou vrstev. Na samotném povrchu je vytvořena tzv. bílá vrstva. Je tvořena intermetalickou sloučeninou železa a dusíku a sahá do hloubky pouze několika mikrometrů. Pod touto vrstvou je vrstva difúzní, která sahá do hloubky několika desetin milimetru. Poněvadž se vrstva na metalografickém výbrusu jeví bílá, byl jí přiřazen tento název.



Obrázek 6.5: Složení nitridační vrstvy [7]

Bílá vrstva je tvořena disperzním nitridem železa. Její strukturu je možno ovlivňovat složením nitridační atmosféry v recipientu, čímž můžou nastat 3 možnosti.

- použitím plynu bez obsahu uhlíku se vytvoří rengenograficky zjistitelná monofázová bílá vrstvička nitridu γ' o tloušťce max. 8 mikrometrů. Jedná se o intermetalickou sloučeninu nitridu železa Fe_4N s krychlovou plošně středěnou mřížkou. Růst vrstvičky se zastavuje po 6 hodinách. Fáze γ' zajišťuje výbornou odolnost proti opotřebení, vysokou tvrdost a dobré antikorozi vlastnosti [7].
- přidáním cca 0,5% uhlíku do nitridační atmosféry vzniká monofázová bílá vrstva ϵ . Tvoří jí intermetalická sloučenina nitridu železa $Fe_{2,3}N$ s šesterečnou mřížkou. Hloubka vrstvičky se i po 50 hodinách nitridace zvětšuje a pohybuje se kolem 30 mikrometrů dle podmínek nitridace. Vrstvička je bez pórů a zajišťuje výbornou odolnost proti zadírání a antikorozi vlastnosti [7].
- třetí možností je dosažení čistě difúzní vrstvy s absolutním potlačením bílé vrstvičky. To je využíváno u součástí s potřebou zvýšení meze únavy.

Odolnost nelze obecně jednoznačně přiřadit určité struktuře. Povrchová vrstva získá po iontové nitridaci řadu cenných vlastností:

- odolnost vůči opotřebení z důvodu vysoké tvrdosti
- odolnost proti teplu, významné zvláště u součástí pracujících a namáhaných třením za vysokých teplot, např.: šoupátek, ventilů. Tvrdost nitridované vrstvy neklesá ani po ohřevu na 500 – 600 °C.

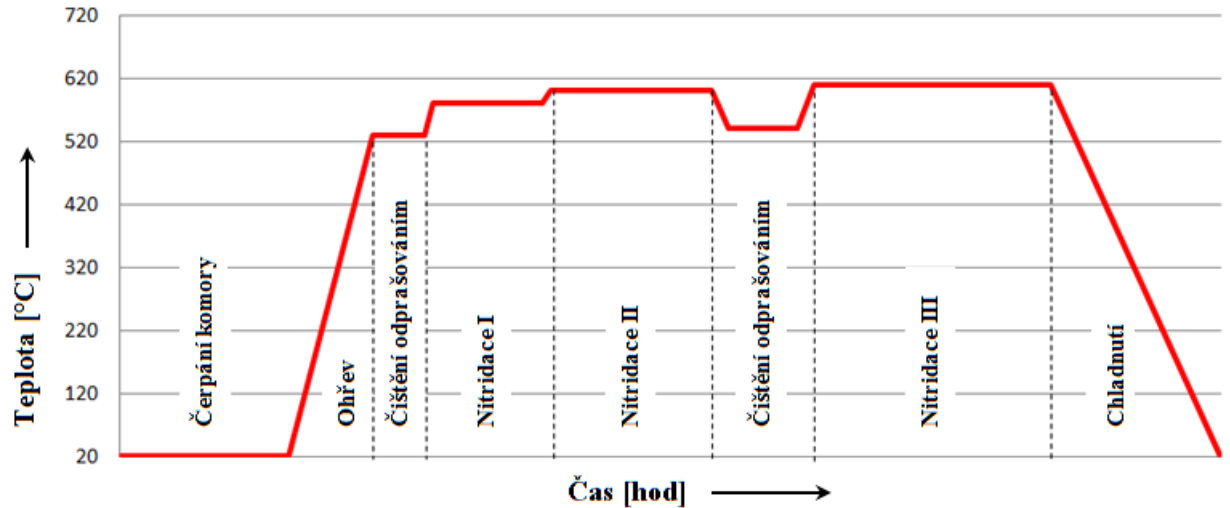
- větší odolnost proti korozi v mořské vodě, při vyšších tlacích a v přehřáté páře.
- vyšší mez únavy výrobku
- lepší odolnost součástí proti zadírání

Podle charakteru provozního namáhání součástí můžeme nitridování dělit podle účelu použití pro zvýšení tvrdosti, za účelem zvýšení meze únavy a nitridování jako ochrana proti korozi.

6.4 Iontová nitridace vřeten

Vřetena pracují jako pohyblivé součásti k regulaci průtoku páry či jako rychlozávěrná vřetena ve ventilech. Iontová nitridace se na vřetenech z Nimonicu 901, provádí především k získání vyšších kluzných vlastností při pohybu vedení vřetena ve stelitových pouzdrech, a tím se zabránilo zadírání a zapékání vřeten při statické poloze ve ventilu.

Proces iontové nitridace následuje až po kompletní výrobě vřetena na čisto, včetně tepelného zpracování a broušení. Vřetena jsou umístěna do recipientu ve svislé (zavěšené) poloze z důvodu deformace od vlastní tíhy při zvýšených teplotách. Plochy, které mají být chráněny před nitridací, jsou zakryty kovovými mechanickými ochranami. Poté nastává vlastní proces chemicko-tepelného sycení povrchu nimonicového vřetena, kde nitridotvorné prvky jako jsou Cr, Ni, V, Mo a Al tvoří s dusíkem tvrdé nitridy. Nitridace probíhá za předem stanovených parametrů teplot, tlaku, napětí a proudu ve třech stádiích sycením plyny N_2 , H_2 a CH_4 . Před samotnou nitridací a po druhé fázi iontové nitridace nastává čištění odpařováním za pomoci vodíku a argonu. Parametry teplot a jednotlivé body postupu nitridace probíhají dle předem navrženého plánu. Postup iontové nitridace zkušební vřetena zobrazuje obrázek 6.6.



Obrázek 6.6: Diagram iontové nitridace na zkušební vřetenu [12]

Sycení povrchu atomárním dusíkem probíhá při teplotách 500 – 610 °C po dobu až 120 hodin. Protože je iontová nitridace velmi zdoluhavá, při velké energetické spotřebě, jedná se o poměrně drahý proces. Nicméně po nitridaci není potřeba dalšího tepelného zpracování, jako například kalení, které by bylo zdrojem potíží vznikem deformací. Hloubka nitridace u Nimonicu 901 z důvodu absence většího množství železa (Fe), proniká pouze do několika setin milimetru. Obvykle se tvrdá vrstva nitridů tvoří 0,01 mm za 20 hodin iontové nitridace.

Kluzné vlastnosti jsou zajištěny tvrdými nitridy, kdy požadována je intermetalická bílá vrstva ϵ nitridu železa $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$. Při analýze nimonicových vřeten nebyla tato bílá vrstva ϵ zaznamenána. V nitridované vrstvě po EDX analýze bylo detekováno s rostoucí hloubkou proměnné množství dusíku. Z podobných výzkumných zpráv z materiálu s podobným chemickým složením je zřejmá vícefázová vrstva γ' a ϵ , s větší tmavou vrstvou na povrchu nitridované součásti. Tato vícefázová vrstva rovněž zajišťuje zvýšené kluzné vlastnosti.

Z důvodu minimálního nárůstu hloubky nitridované vrstvy a rovnoměrnému nasycení plazmou nedochází téměř k žádné rozměrové deformaci, a proto můžeme odstranit z výrobního procesu broušení po nitridaci. Nitridovaný povrch je pouze přešetřen od nečistot a opalu.

6.5 Výhody plasmové iontové nitridace

Iontová nitridace byla oproti jiným variantám nitridace zvolena z důvodu dostupnosti, ekologičnosti a pro svoje uspokojivé výsledky, kdy proces probíhá bez problému dle předem navrženého programu. Tloušťka nitridované vrstvy je v případě Nimonicu nižší, nicméně celistvá, s malou porezitou a nízkou drsností. To má za následek odstranění následné operace broušení a leštění. Přednost plazmové nitridace spočívá:

- jedná se o vakuovou technologii - jednoduchá integrace do výrobních linek
- přijatelnost pro životní prostředí - téměř žádný odpad, plyn
- flexibilní tepelné zpracování - možnost použití různých metod v jednom zařízení např. naprašování, čištění, nitridace, oxidující, povlak
- vynikající reprodukovatelnost

6.6 Tvrdost nitridované vrstvy

Tvrdost výkovku se během výroby pohybovala kolem 302 - 388 HB. Po nitridaci dochází vlivem intersticiálně vloženými atomy dusíku k deformaci krystalové mřížky austenitu a zvýšení tvrdosti.

Dle normy DIN 50 190 se za účinnou nitridační vrstvou považuje, pokud je dosaženo tvrdosti o 50 jednotek mikrotvrdosti vyšší, než je skutečná tvrdost základního materiálu. Tvrdost je obvykle měřena dle Vickerse s velmi malým zatížením až HV0,05 (max. HV1), měřeno kolmo na povrch v ose vtisku. Způsob měření hloubky a tvrdosti nitridované vrstvy je dáno normou ČSN EN ISO 6507-1.

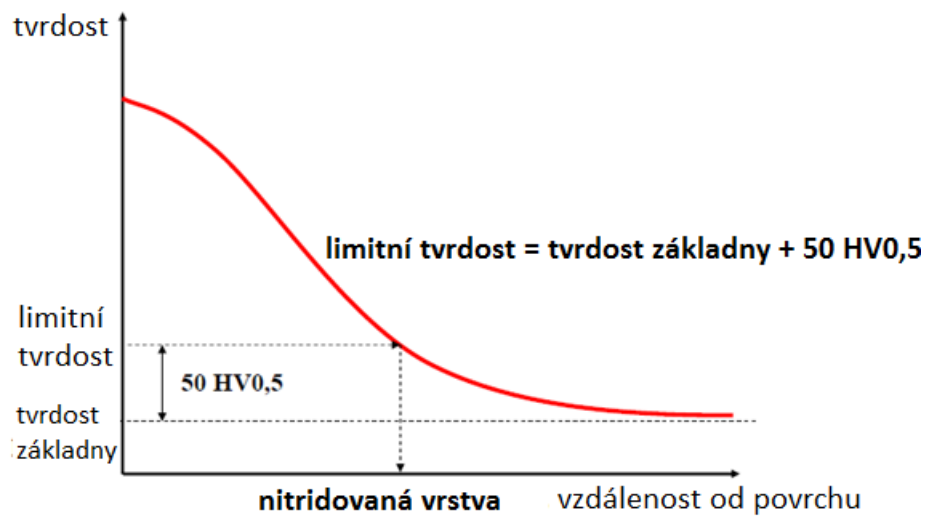
Velmi malého zatížení se používá z důvodu promáčknutí zkušební tělíska až na základní materiál a tím může být způsobeno zkreslení výsledků měření. Naměřená tvrdost povrchu závisí na použitém zkušebním zatížení. Testovací sílu je nutné vždy uvádět, např.: tvrdost povrchu = 650HV1 -> testovací zatížení přibližně 1kg.

Nejčastěji používané zkoušky tvrdosti povrchu nitridované vrstvy:

- Tvrdost podle Vickerse [HV]
- Knoop tvrdost [HK]
- Tvrdost podle Rockwella [HRC]



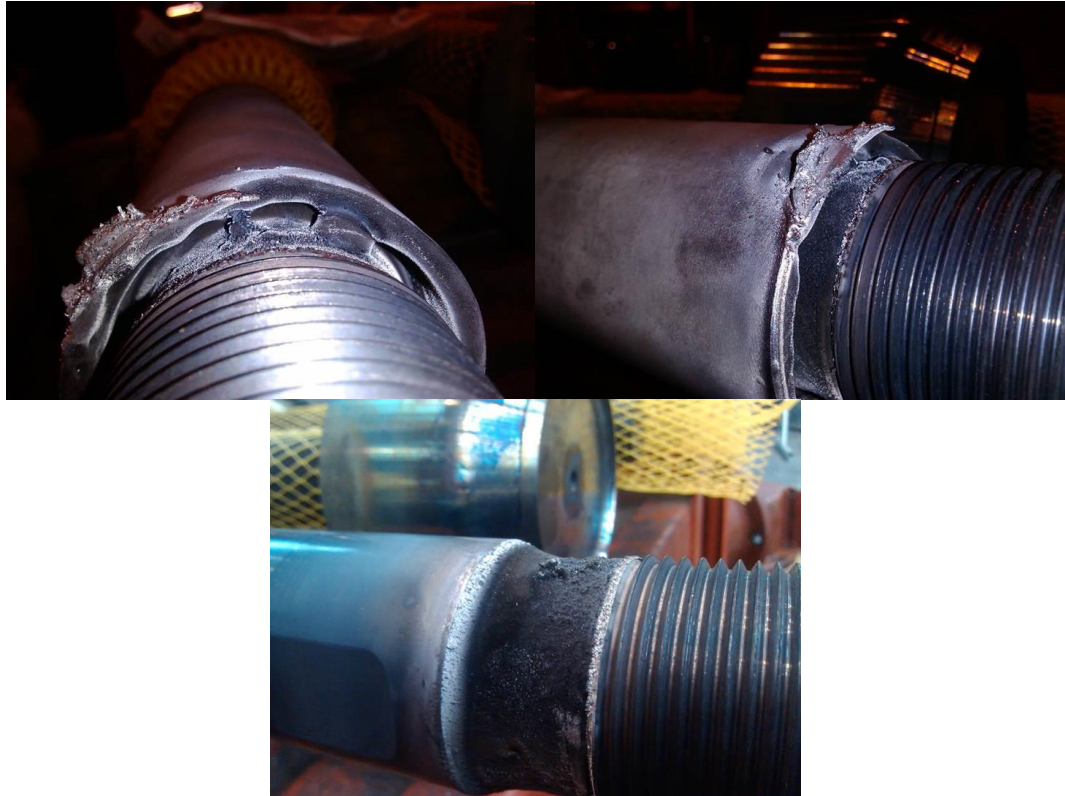
Obrázek 6.7. Zatížení při zkoušce tvrdosti [12]



Obrázek 6.8: Nitridovaná hloubka dle DIN 50 190 [12]

6.7 Výboj obloukem

Iontová nitridace je uskutečnitelná pouze v podmínkách anomálního výboje. Vyžaduje vysokou proudovou hustotu a napětí. Pokud nejsou provedena další opatření je plošný doutnavý výboj nestabilní a má tendenci přecházet do nepřístupného stavu výboje obloukem. To způsobuje výrazné snížení napětí při vysoké proudové hustotě, čímž rapidně vzrůstá teplota až na likvidační teploty 1200°C. To může způsobit roztavení materiálu. Tento extrémní případ důsledku výboje obloukem na ocelové mechanické ochraně zobrazuje obrázek 6.9. Ocelová mechanická ochrana má v našem případě funkci zabránit nitridaci závitu a předejít tak křehkosti závitu.



Obrázek 6.9: Rztavení ocelové mechanické ochrany v důsledku výboje obloukem

7. Návrh a realizace experimentů

7.1 Analýza nitridovaných vzorků [13]

Zbytkový upíchnutý materiál z vřetena z Nimonicu 901 bylo možno použít pro plánované experimenty. Zbytkový materiál byl nařezán na zkušební kotoučky, které byly následně v zavěšeném stavu přidány k vsázce vřeten do iontové pece. Vzorky byly nitridovány stejným režimem jako vřetena a tudíž lze u nich předpokládat stejné parametry nitridované vrstvy.

7.1.1 Návrh experimentu

Cílem experimentu bylo vzorky nitridovaného Nimonicu 901 podrobit následujícím měřením:

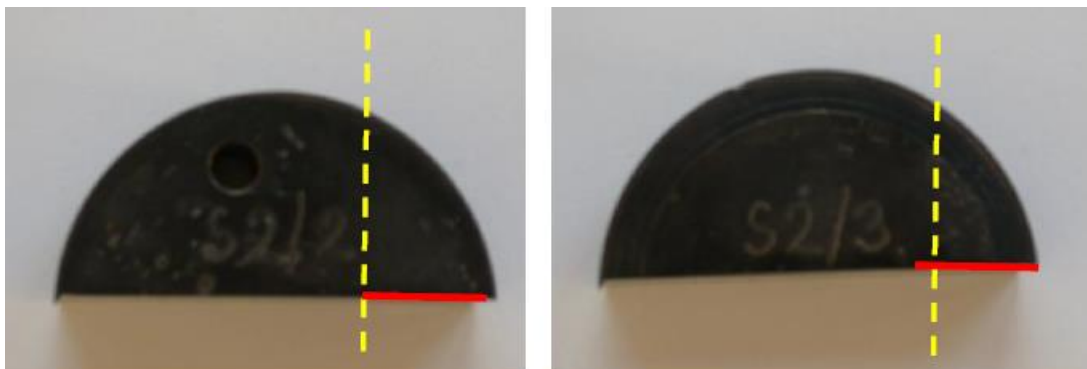
- Změření optické hloubky nitridace na řezu (pro vybrané dva vzorky)
- Změření hloubkového profilu mikrotvrdosti na řezu od povrchu do základního materiálu (pro vybrané dva vzorky)
- Změření povrchové mikro tvrdosti HV_{0,3} pro oba vybrané vzorky (3 vpichy na vzorek)



Obrázek 7.1: Nitridované vzorky z Nimonicu 901

7.1.2 Výběr testovacích vzorků

Nitridované vzorky byly následně rozřezány a podrobeny analýze. Ze 4 vzorků byly náhodně vybrány dva (vzorek S2/2 a vzorek S2/3), na kterých byly provedeny požadované expertízy. Z obou vzorků byl odebrán vzorek pro měření tloušťky nitridované vrstvy. Řez byl veden dle obrázku (žlutá přerušovaná čára). Následné metalografické broušení a leštění bylo provedeno na červeně značené ploše. Na zbylém vzorku bylo následně provedeno měření povrchové tvrdosti.

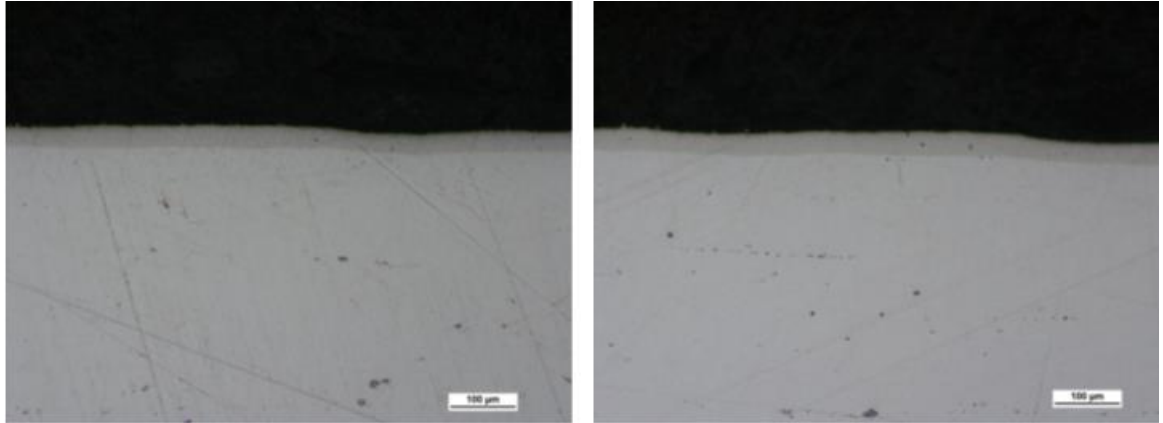


Obrázek 7.2: Znázornění řezu na vybraných vzorcích

7.1.3 Naměřené hodnoty

Mikroskopické měření tloušťky nitridované vrstvy

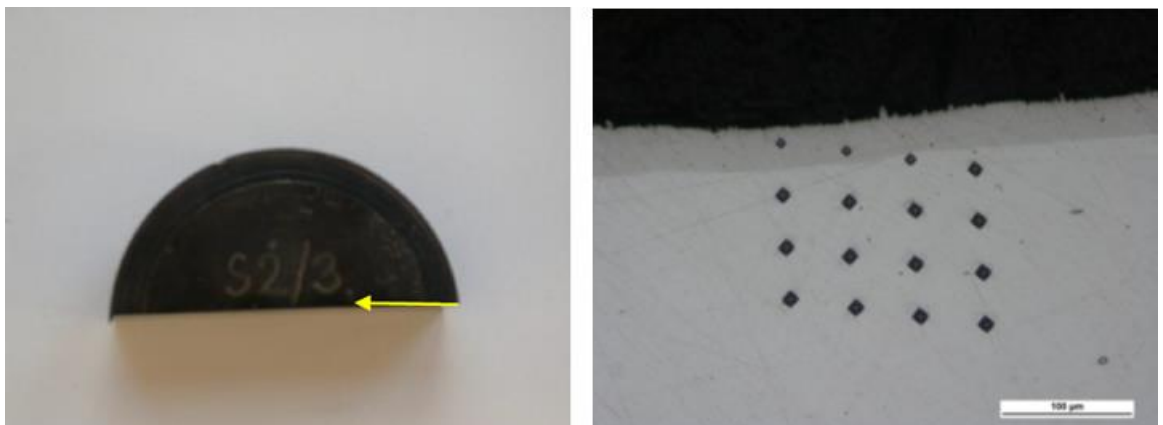
Dle normy ČSN EN 3887 byly na mikroskopu naměřeny tloušťky vrstev z leštěných metalografických výbrusů.



Obrázek 7.3: Vzorky S2/2 a S2/3, ukázka nitrídané vrstvy, 100x, leštěno

Průběh mikrotvrlosti nitrídané vrstvy

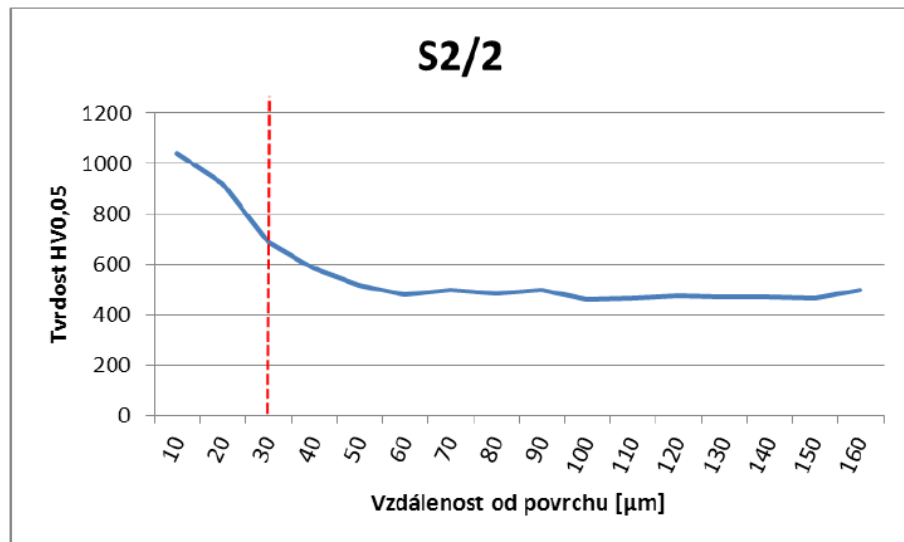
Na vzorcích S2/2 a S2/3 byly naměřeny průběhy mikrotvrlosti od nitrídaného povrchu do základního materiálu ve směru žluté šipky (viz Obr.: 7.4). Z praktických zkušeností předchozích zakázek s daným materiálem bylo voleno zatížení HV0,05. Měření bylo prováděno v prostředku hrany do celkové hloubky 160 μm. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 10 μm.



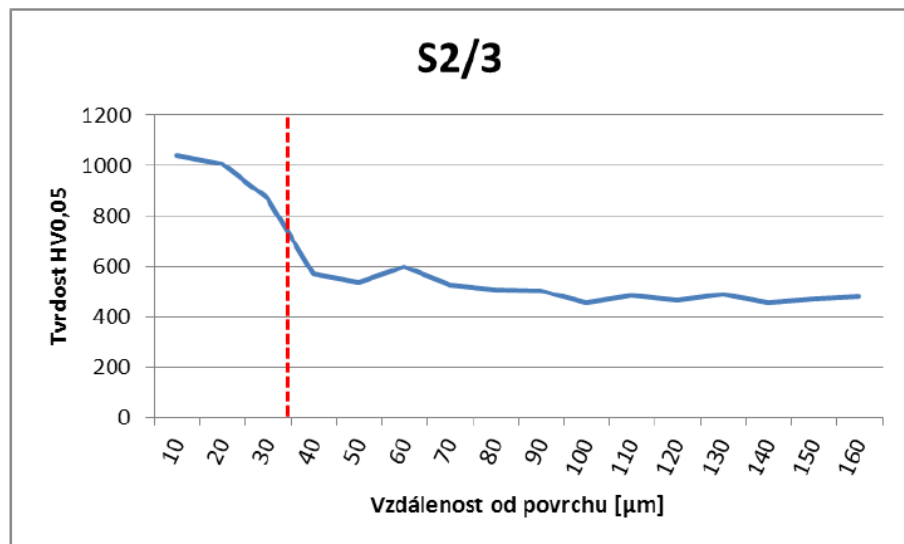
Obrázek 7.4: Směr měření mikrotvrlosti na vzorku S2/3 a průběh mikrotvrlosti, 500x

Tabulka 12: Naměřené hodnoty průběhu mikrotvrlosti nitrídanou vrstvou u jednotlivých vzorků

Hloubka [μm]		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
HV 0.05	S2/2	1042	924	688	583	516	481	496	486	496	460	466	474	472	470	466	500
	S2/3	1042	1007	868	571	537	600	528	508	504	453	484	463	490	453	470	481



Graf 3: Průběh mikrotvrlosti HV0,05 na vzorku S2/2



Graf 4: Průběh mikrotvrlosti HV0,05 na vzorku S2/3

Červeně vyznačena je tloušťka nitrídané vrstvy.

Měření povrchové tvrdosti

Poslední částí analýzy bylo měření povrchové tvrdosti. Měření probíhalo při zatížení HV0,3 po třech vtiscích na každém vzorku. Povrch vzorků byl upraven metalografickým broušením (brusný papír 800, 1200) a následně leštěn.

Tabulka 13: Hodnoty tvrdosti jednotlivých vtisků

Vzorek	HV0,3			Průměr
	1. vtisk	2. vtisk	3. vtisk	
S2/2	1155	1096	1099	1117
S2/3	1066	1107	1101	1091

7.1.4 Zhodnocení výsledků experimentu

Experimentálním měřením bylo potvrzeno, že nitridovaná vrstva je v celém pozorovaném průřezu celistvá a její nejnižší tloušťka nebyla nižší než 18 μm . Ze dvou náhodně vybraných nitridovaných vzorků byla mikroskopickým měřením stanovena tloušťka vrstvy 26,9 μm u vzorku S2/2 a 35,1 μm u vzorku S2/3. Naměřené průběhy tvrdosti nitridované vrstvy potvrzují mikroskopicky stanovenou tloušťku. Povrchová vrstva u obou vzorků dosahovala při zatížení HV0,3 hodnot kolem 1100HV.

7.2 Experiment analýzy stop opotřebení po testu pin-on-disk

Stejně jako u předchozího experimentu byl použit zbytkový upíchnutý materiál z Nimonicu 901 a další vzorky s různými materiálovými úpravami povrchů.

7.2.1 Návrh experimentu

Ve zkušební laboratoři byl proveden test pin-on-disk na sérii vzorků s různými úpravami povrchů. Po tomto testu byly analyzovány stopy po opotřebení pomocí optického mikroskopu a skenovacího elektronového mikroskopu. Vybrané vzorky byly dále podrobeny analýze měření průběhu mikrotvrdosti a analýze lokálního chemického složení EDX.

7.2.2 Výběr testovacích vzorků

Výběr vzorků byl koncipován tak aby imitoval zatížení materiálu vřetena v pouzdrech. Zkoušeny byly různé materiálové varianty povrchu. Uvedené varianty představují materiál disku (vřetena) a materiál protihrotu (pouzdra).

Materiálové varianty povrchu

Nitridovaný Nimonic 901	vs.	Stellite 6
Základní Nimonic 901	vs.	Stellite 6
Materiál A	vs.	Materiál B
Materiál C	vs.	Materiál B
Materiál A	vs.	Materiál D
Materiál C	vs.	Materiál D

7.2.3 Použité měřící zařízení

Stopy po opotřebení byly zdokumentovány pomocí optického mikroskopu NIKON EPIPHOT 200. Detailní snímky povrchu byly pořízeny na řádkovacím elektronovém mikroskopu Jeol 6380. Snímky jsou zobrazeny v režimu sekundárních elektronů (SEI) a zpětně odražených elektronů (BES). Lokální chemické složení bylo měřeno pomocí EDX analyzátoru INCAx-sight. Pro měření tvrdosti byl použit tvrdoměr STRUERS DuraScan 50.

7.2.4 Naměřené hodnoty

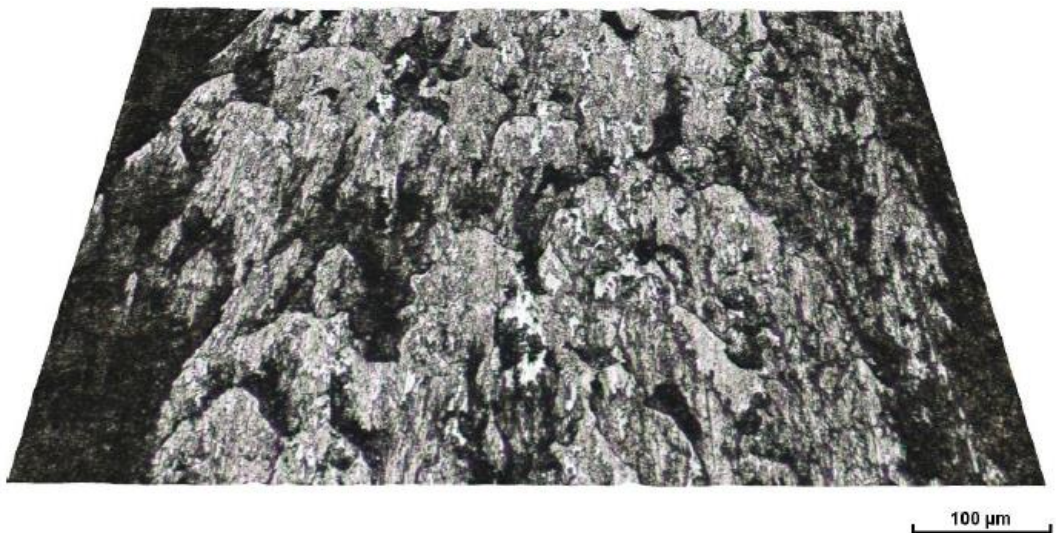
Nitridovaný Nimonic 901 vs. protihrot ze Stellite 6

Jedná se o náš případ vřetena z *nitridovaného Nimonicu 901*, který se pohybuje ve styku s pouzdry ze *Stellite 6*. Na zkoumaném vzorku označeném číslicí 6 ze zkoušky pin-on-disk byly snímány stopy o průměru 10 a 14 mm.

Snímky z optického mikroskopu



Obrázek 7.5: Vzorek 6, stopa 10 mm, 50x



Obrázek 7.6: Vzorek 6, stopa 10 mm, 100x

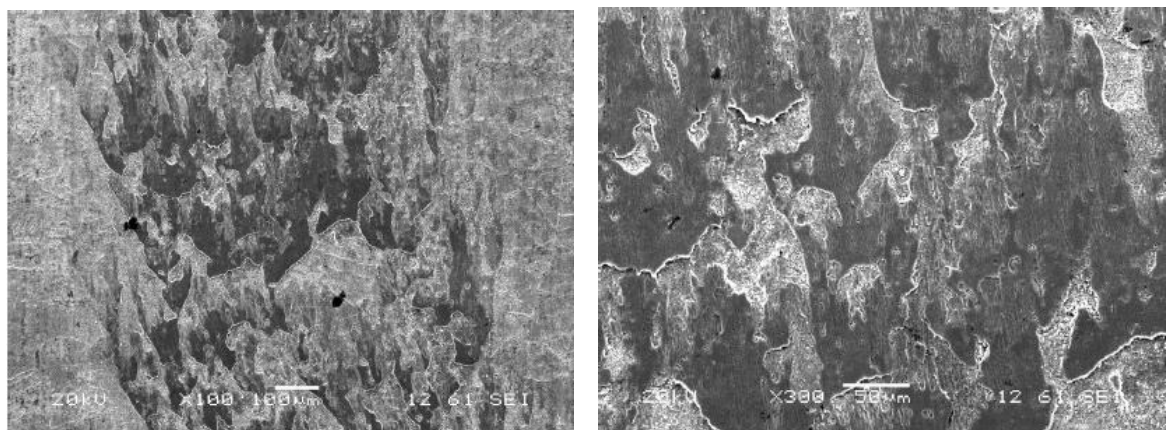


Obrázek 7.7: Vzorek 6, stopa 14 mm, 50x

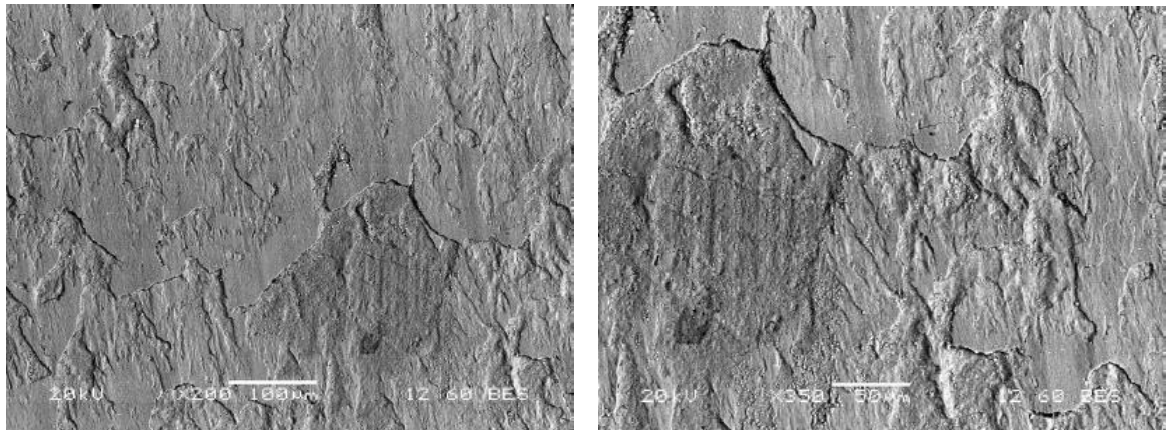


Obrázek 7.8: Vzorek 6, stopa 14 mm, 100x

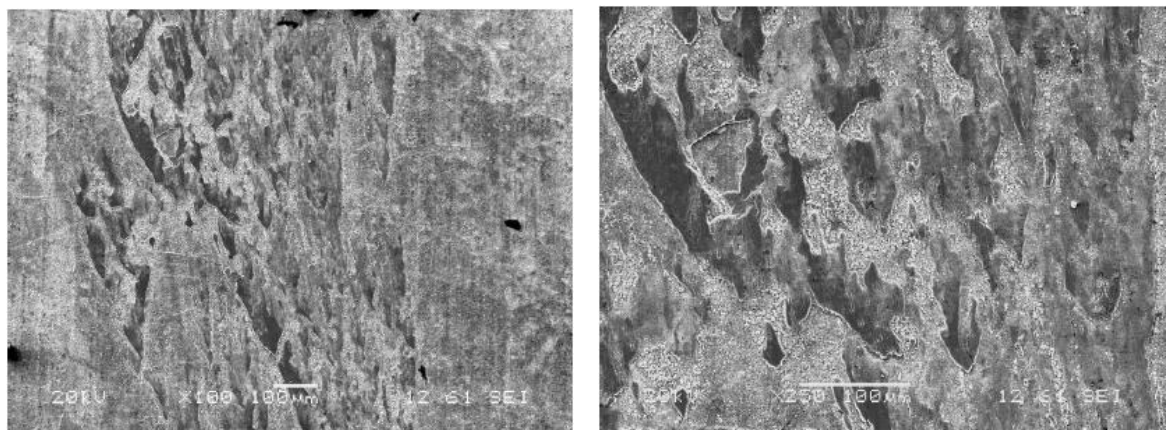
Skenovací elektronový mikroskop



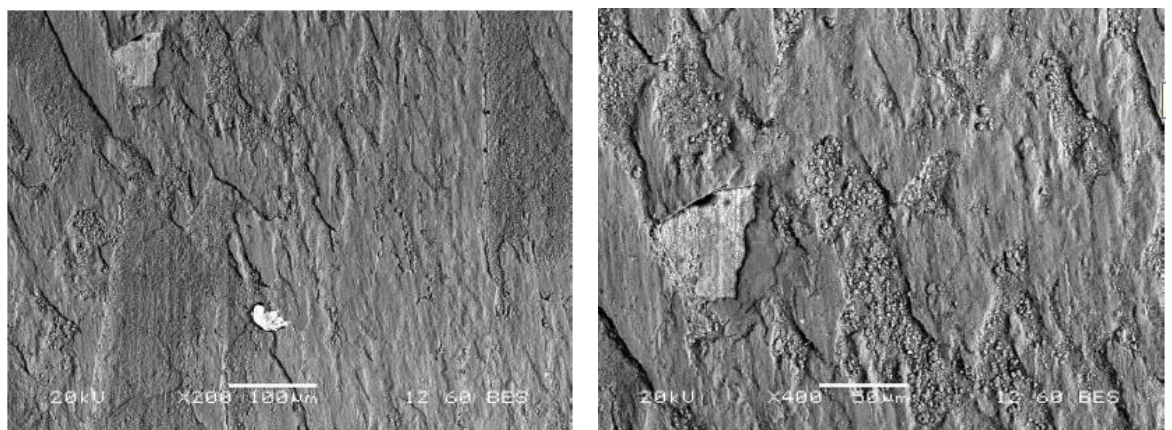
Obrázek 7.9: Vzorek 6, stopa 10 mm, 100x a 300x SEM v režimu SEI



Obrázek 7.10: Vzorek 6, stopa 10 mm, 200x a 350x SEM v režimu BES



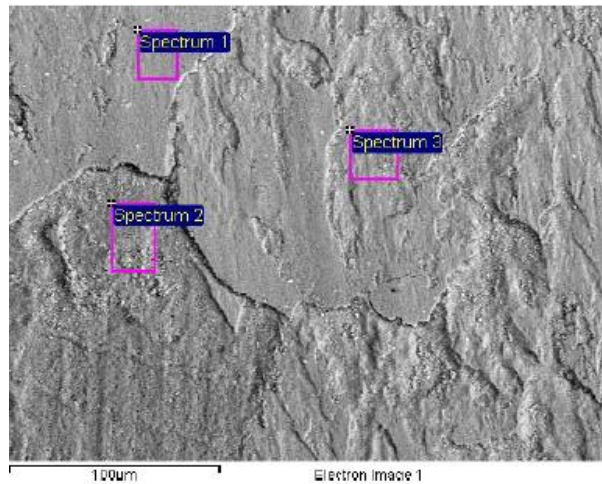
Obrázek 7.11: Vzorek 6, stopa 14 mm, 100x a 250x SEM v režimu SEI



Obrázek 7.12: Vzorek 6, stopa 14 mm, 200x a 400x SEM v režimu BES

EDX analýza

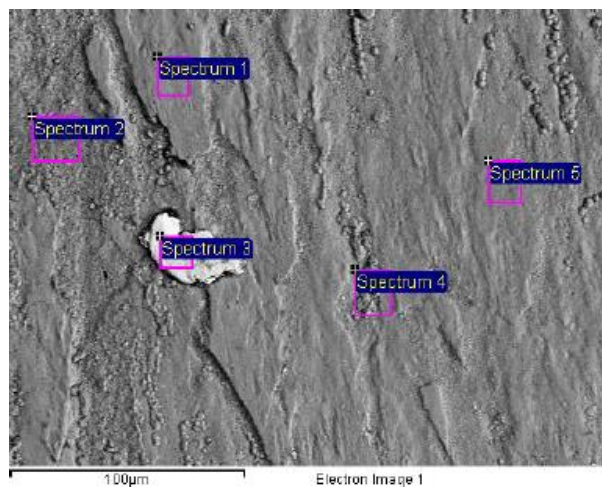
Na vzorku 6 bylo pro stopu opotřebení 10 mm i 14 mm změřeno lokální chemické složení.



Obrázek 7.13: Vzorek 6, stopa 10 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 14: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.13

Spectrum	O	Si	Cr	Fe	Co	Ni	W
Spectrum 1	31.94	0.58	20.36	1.92	40.88		4.33
Spectrum 2	32.45		8.76	37.61	17.23	1.77	2.18
Spectrum 3	32.21	0.87	17.39	2.28	43.92		3.33



Obrázek 7.14: Vzorek 6, stopa 14 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

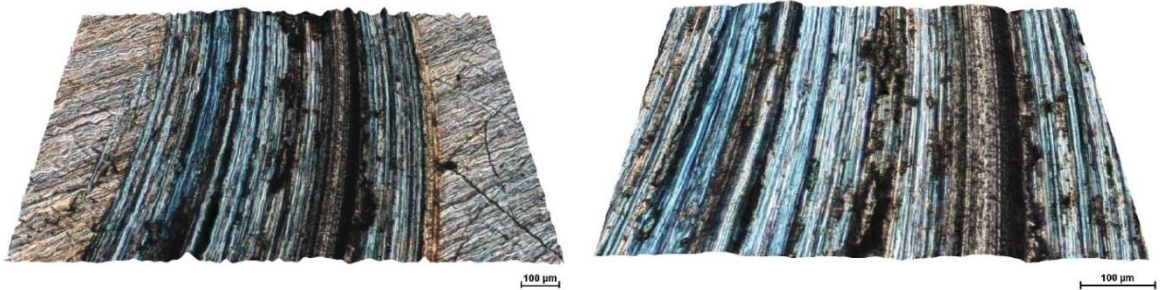
Tabulka 15: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.14

Spectrum	O	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	33.07		18.46	1.95	41.90			4.62
Spectrum 2	34.02	0.54	7.01	43.15	9.17	6.11		
Spectrum 3	3.46	3.02	12.46	36.48		39.04	5.54	
Spectrum 4	30.97		9.86	26.27	30.64			2.27
Spectrum 5	30.98		7.81	1.62	59.59			

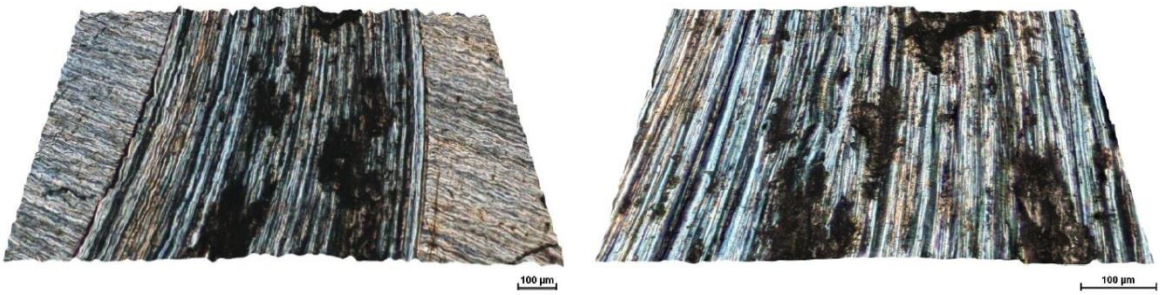
Základní Nimonic 901 vs. protihrot ze Stellite 6

Na zkoumaném vzorku označeném číslicí 1 byl proveden test pin-on-disk a snímány stopy opotřebení o průměru 10 a 14 mm.

Snímky z optického mikroskopu

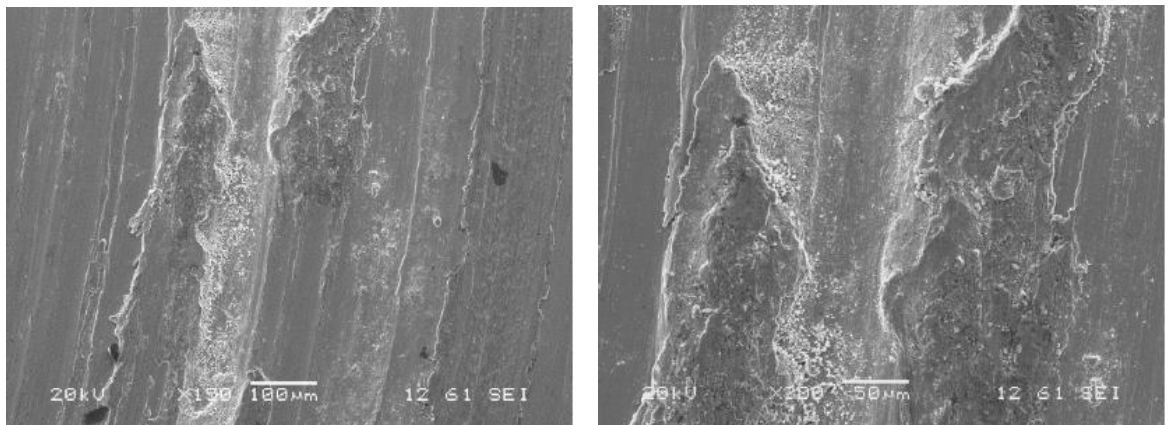


Obrázek 7.15: Vzorek 1, stopa 10 mm, 50x a 100x

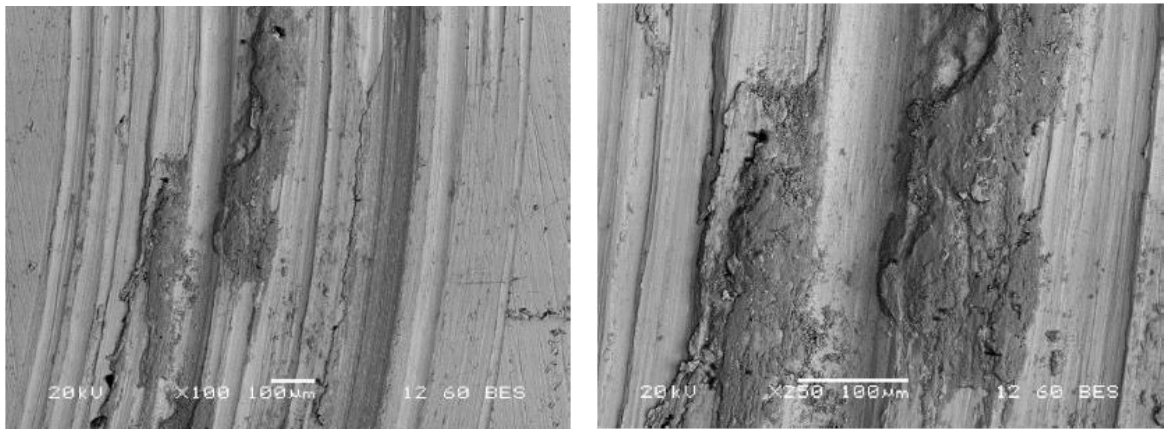


Obrázek 7.16: Vzorek 1, stopa 14 mm, 50x a 100x

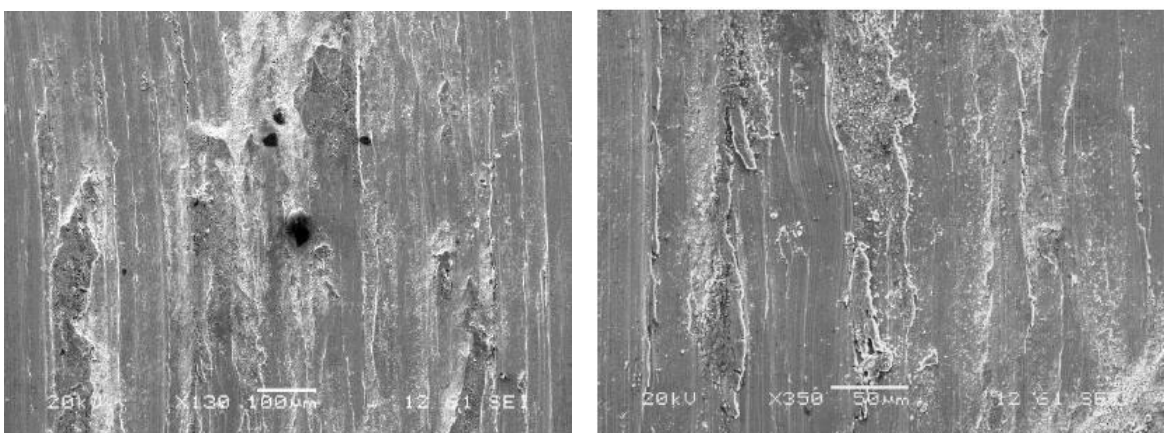
Skenovací elektronový mikroskop



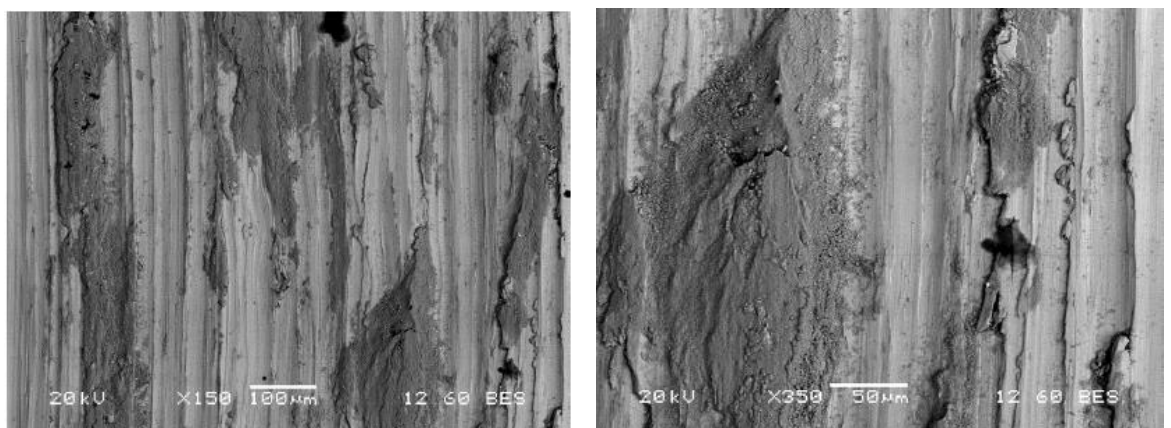
Obrázek 7.17: Vzorek 1, stopa 10 mm, 150x a 300x SEM v režimu SEI



Obrázek 7.18. Vzorek 1, stopa 10 mm, 100x a 250x SEM v režimu BES



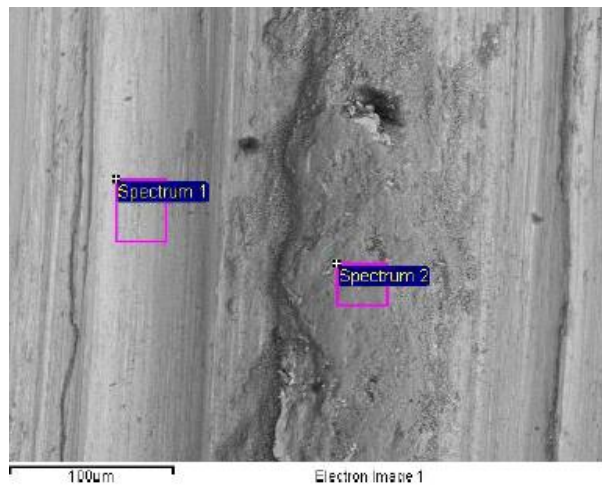
Obrázek 7.19: Vzorek 1, stopa 14 mm, 130x a 350x SEM v režimu SEI



Obrázek 7.20: Vzorek 1, stopa 14 mm, 150x a 350x SEM v režimu BES

EDX analýza

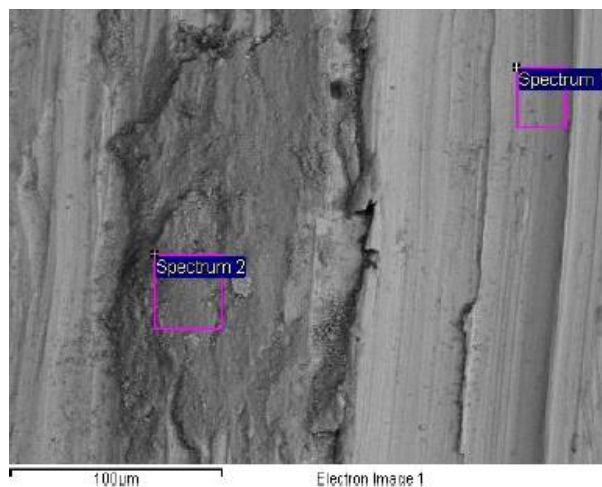
Na vzorku 6 bylo pro stopu opotřebení 10 mm i 14 mm změřeno lokální chemické složení.



Obrázek 7.21: Vzorek 1, stopa 10 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 16: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.21

Spectrum	O	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	11.05	2.73	11.44	33.48		35.65	5.63	
Spectrum 2	30.37		9.95	12.57	41.11	4.06		1.93



Obrázek 7.22: Vzorek 1, stopa 14 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

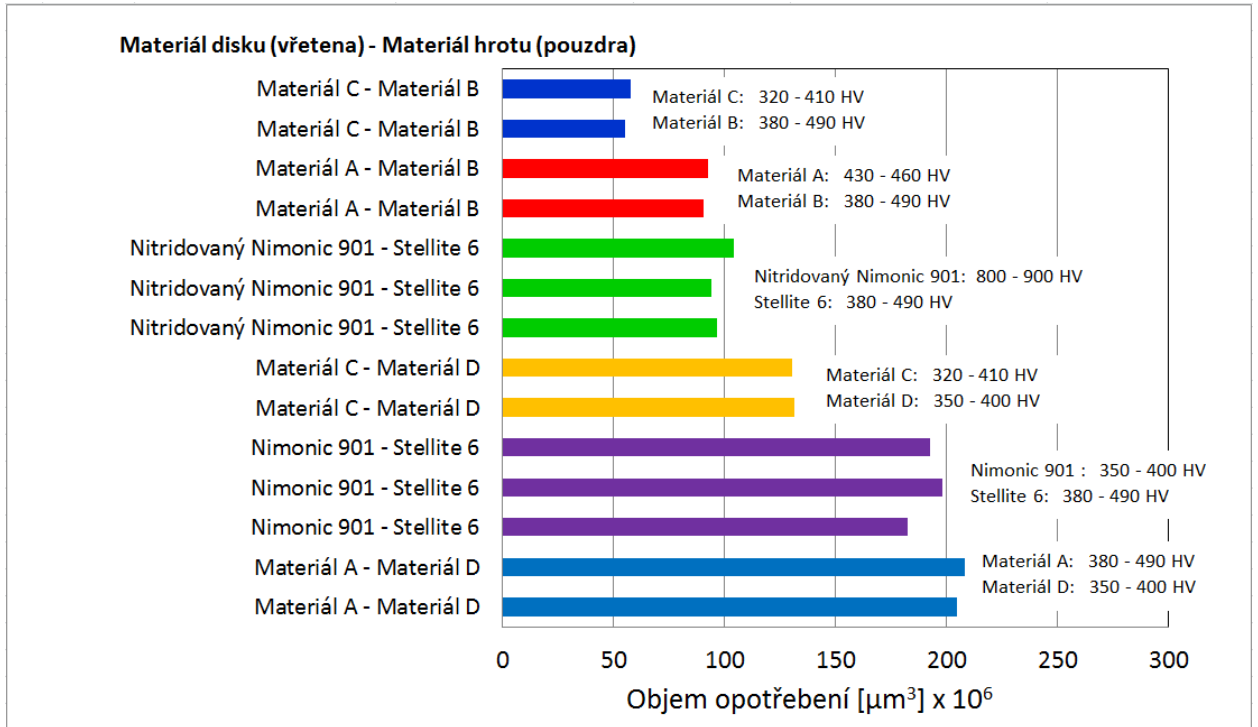
Tabulka 17: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.22

Spectrum	O	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	10.20	2.84	11.73	34.04		36.40	4.79	
Spectrum 2	28.66		11.76	16.35	33.25	6.24	1.16	2.58

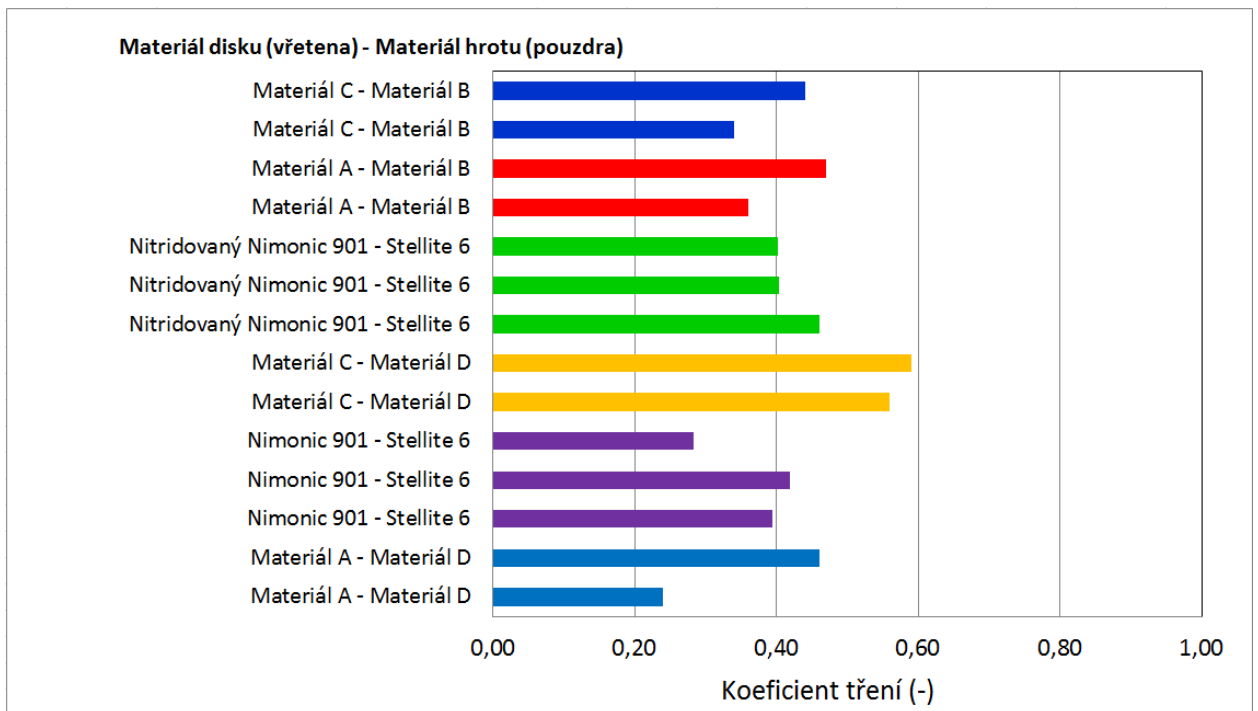
7.2.5 Zhodnocení výsledků experimentu

U kombinace materiálů *nitridovaný Nimonic* a *základní Nimonic* x hrot ze *Stellitu 6* došlo k významnému otěru a přenosu materiálu hrotu na základní materiál. Na základním materiálu bylo detekováno významné množství kobaltu, což dokazuje EDX analýza lokálního chemického složení v měřených místech. Snímky z ostatních variant úprav jsou uvedeny v příloze této práce.

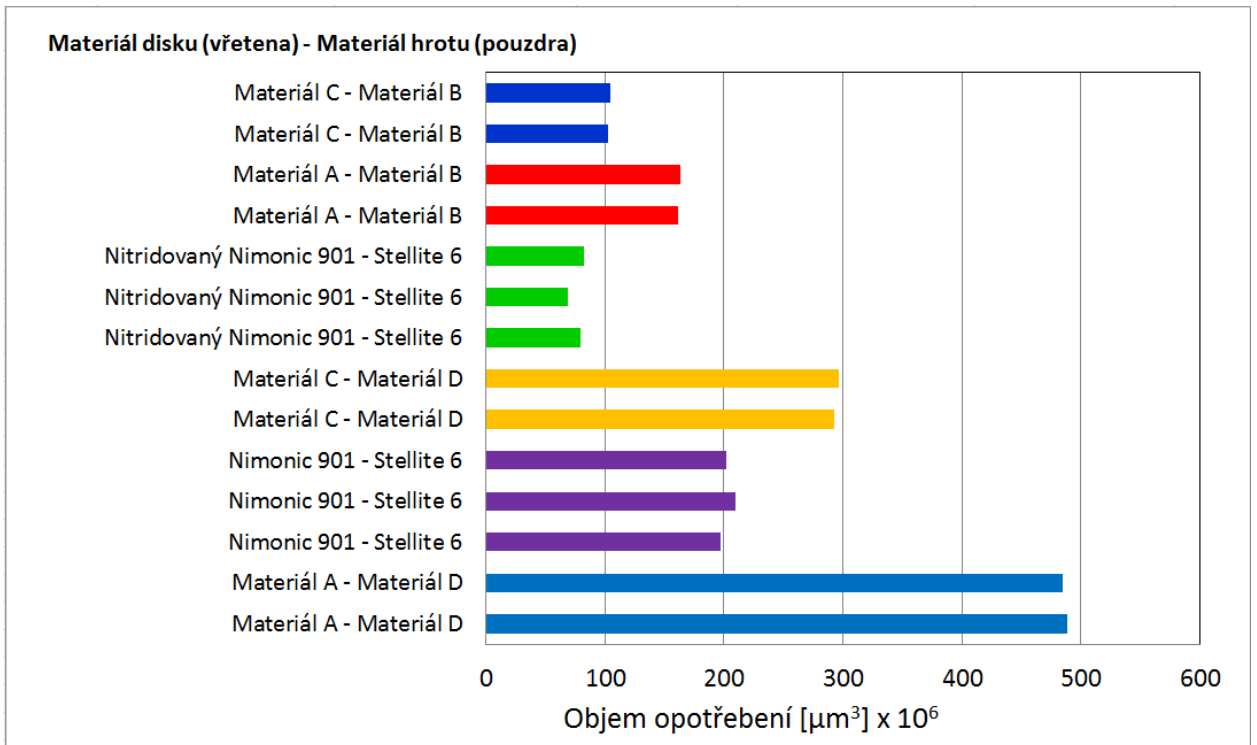
7.2.6 Srovnání výsledků jednotlivých variant



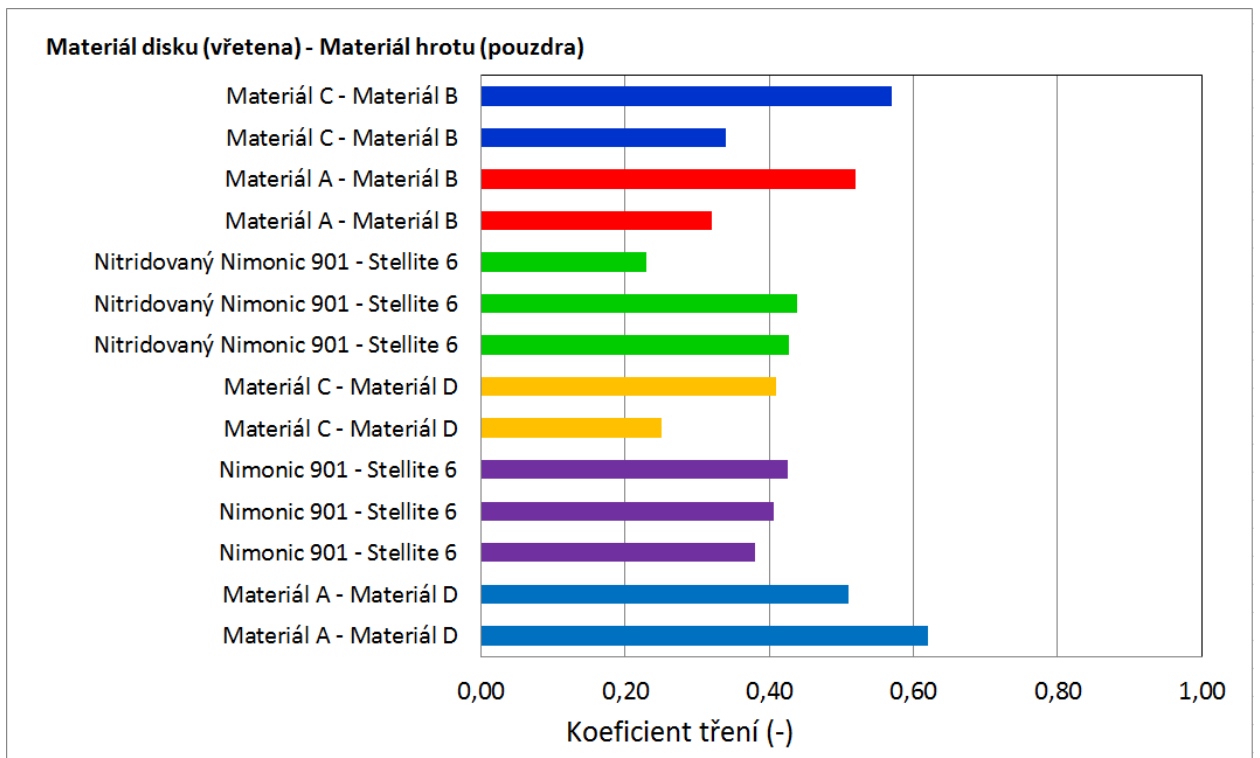
Graf 5: Srovnání výsledků objemu opotřebení při zatížení 3N [13]



Graf 6: Srovnání výsledků koeficientu tření při zatížení 3N [13]



Graf 7: Srovnání výsledků objemu opotřebení při zatížení 5N [13]



Graf 8: Srovnání výsledků koeficientu tření při zatížení 5N [13]

8. Zhodnocení výsledků a přínosů

Z výsledků obrábění prvních sérií nimonicových vřeten je patrné, že je možno zajistit stabilní výrobu těchto vřeten. Požadované hodnoty rozměrové a geometrické přesnosti dle výkresové dokumentace byly dodrženy. Při kapilární a ultrazvukové zkoušce nebyly detekovány žádné trhliny a vady materiálu. Hodnoty obávaného radiálního házení byly dosaženy v požadovaných mezích.

Z experimentu obrábění byla vysledována překvapivě vysoká trvanlivost břitů ze slinutých karbidů (až 23 minut řezu při hrubování). U keramické destičky z důvodu nedostatečného utlumení vibrací, při obrábění dlouhých vřeten o malém průměru došlo k destrukci. Karbidová VBD tedy v současné době zaručuje stabilní proces obrábění a její použití je upřednostňováno před kruhovou keramickou destičkou. Z pořízených snímků opotřebovaných břitů je zřejmé vrubové opotřebení, které je specifické pro obrábění Inconelu. Cenové zhodnocení udává porovnání cen jednotlivých destiček.

Po výrobě zkušebního nimonicového vřetena byly na vzorcích provedeny 2 rozsáhlé experimenty. Použity byly vzorky odříznuté ze stejného materiálu a byla u nich provedena stejná tepelná zpracování, včetně iontové nitridace. Nitridace vzorků probíhala v peci společně s aktivními vřeteny. Z toho vyplývá, že podléhají totožnému teplotnímu programu nitridace. To zcela zpřesňuje naše experimenty, kdy k analýze jsou podrobeny prakticky aktivní vřetena.

Při prvním experimentu byla provedena analýza nitridovaných vzorků s cílem vyšetření hloubky nitridované vrstvy a její tvrdosti. Hloubka nitridační vrstvy byla měřena nejprve opticky z leštěného řezu vzorku na optickém mikroskopu. Dále následovalo měření tloušťky vrstvy mikrotvrdostí se zatížením HV0,05. Výsledné hodnoty se pohybovaly kolem 25 až 35 μm . Hodnoty jsou sice nízké, nicméně z důvodu absence vysokého podílu železa ve slitině proniká nitridovaná vrstva pouze řádově do 0,05 mm. Protože po nitridaci nedochází k žádnému dalšímu opracování nebo broušení, je i takto tenká vrstva postačující a velmi důležitá pro zvýšení kluzných vlastností. Posledním bodem analýzy bylo změření tvrdosti nitridované vrstvy. Z důvodu velmi tenké vrstvy hrozí promáčknutí vrstvy zatěžujícím tělískem až do základního materiálu a zkreslení výsledků. Proto byla mikrotvrdost měřena se zatížením HV0,03. Hodnota mikrotvrdosti nitridované vrstvy byla z průměru 3 vpichů 1117 a 1091.

Druhým, rozsáhlejším experimentem bylo provedení testu pin on disk u několika materiálových variant. Na těchto vzorcích byly analyzovány stopy po opotřebení na optickém mikroskopu NIKON EPIPHOT 200. Detailní snímky povrchu byly dále pořízeny na řádkovacím elektronovém mikroskopu Jeol 6380. Vybrané vzorky byly dále podrobeny analýze průběhu mikrotvrdosti a zjištění tloušťky nitridované vrstvy. Jelikož při testu docházelo k přenášení jednoho materiálu na druhý, byla u vybraných vzorků provedena analýza lokálního chemického složení EDX. Získání množství jednotlivých prvků v lokálních místech stopy opotřebení je součástí tohoto experimentu. V závěru práce jsou uvedeny grafy srovnání výsledků jednotlivých variant. Hodnoty výsledků testu dokazují správnost použití naší zvolené varianty. Efektivitu a funkčnost řešení v praxi ukáže až nasazení nimonicových vřeten v aktivním provozu.

9. Závěr

Práce pojednává o výrobě a iontové nitridaci rychlozávěrných a regulačních vřeten do ventilu parní turbíny vyráběné ve firmě Doosan Škoda Power. Cílem práce je otestovat a zoptimalizovat navrženou technologii výroby vřetena, pro zhotovení vřetena z niklové slitiny Nimonic 901. Tyto vřetena jsou určena pro použití v náročných podmínkách v elektrárnách s ultra super kritickými parametry páry. V úvodu práce je popsána funkce ventilu na turbíně včetně popisu jednotlivých komponent. Podrobně je rozvedena charakteristika použitého materiálu včetně mechanických a fyzikálních vlastností. Po rozboru obráběného materiálu se dále práce zabývá dvěma hlavními body.

Prvním bodem diplomové práce je popis technologie obrábění předhrubovaného výkovku z Nimonicu 901. Z důvodu požadované vysoké přesnosti je po hrubování materiál teplotně žhán ke snížení pnutí. Obrábění celého vřetena bylo prováděno VBD ze slinutého karbidu z důvodu vzniku vibrací při obrábění. Úkolem bylo obrobřit zkušební vřeteno, na kterém bylo otestováno několik nástrojů z různých rezných materiálů. Text pojednává o problematice obrábění Inconelů (třída obrábění ISO – S), popisuje používané nástrojové vybavení a doporučuje postup obrábění při výrobě. Výstupními hodnotami je obrobené zkušební vřeteno, které bylo následně použito na velké množství experimentů. Součástí experimentu obrábění je analýza opotřebení břitových destiček. Nimonicové vřeteno bylo úspěšně obrobno v požadovaných kvalitách pomocí SK destiček. Radiální házení bylo dodrženo v hodnotách 0,02 mm / 1000 mm. Z analýzy opotřebovaných břitů je zřejmé vrubové opotřebení, které je pro obrábění Nimonicu obvyklé.

Druhým cílem práce bylo zvýšení kluzných vlastností vedení vřetena v pouzdrech. K tomu bylo využito iontové nitridace na povrchu vedení nimonicového vřetena. Životnost a stabilita odolné nitridační vrstvy byla předmětem analýzy nitridovaného povrchu. Zvýšení kluzných vlastností vedení vřetena pomocí nitridace se provádí za účelem odstranění problému se zadíráním a zapékáním rychlozávěrných vřeten v pouzdrech. To je způsobeno vysokými vstupními teplotami nad 580°C. Text popisuje princip a postup iontové nitridace. Výstupní hodnotou je nitridované vřeteno vyrobené v požadované kvalitě. Součástí druhé části práce jsou dva rozsáhlé experimenty týkající se analýzy nitridované vrstvy a analýzy stop opotřebení po testu pin-on-disk. Věrohodnost výsledků zajišťuje srovnání výsledků testu pin on disk pro různé alternativy materiálové varianty.

Výroba zkušebního vřetena z Nimonicu 901 byla úspěšně dohotovena. V současné době je výrobní technologie předlohou pro aktivní výrobu nimonicových vřeten a současně probíhá optimalizace výrobního procesu. Předpokládané zvýšení kluzných vlastností na povrchu vedení vřetena bylo podloženo výsledky, nicméně efektivita a životnost vřetena ukáže až reálný provoz. Výrobní proces je ve společnosti Doosan Škoda Power nadále sledován a optimalizován. Dosavadní výsledky mohou posloužit jako předloha k budoucímu zlepšování výrobního procesu výroby komponent s ohledem na využití moderních progresivních materiálů.

10. Seznam použité literatury

Knižní publikace

- [1] DAVIM, J. Paulo. Machining of Hard Materials. Berlin, Germany, 2011. Springer. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [2] GEDDES Blaine, LEON Hugo, HUANG Xiao. Superalloys: Alloying and Performance. Ohio, USA, 2010. ASM International. ISBN 978-1-61503-040-8.
- [3] Závody V.I.Lenina/Škoda Plzeň. Pracovní svazky technických norem a předpisů – Materiál základní sada 3. Svazek. Praha, 1989. Vydavatelství norem Praha 10 – Hostivař.
- [4] NÁROVEC, Josef. Vliv geometrie nástroje na silové zatížení při obrábění slitiny Nimonic A80. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [5] GLUSA, Tomáš. Studium vlastností a mikrostruktury ocelí pro ultrasuper kritické parametry páry. Plzeň 2012. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálů a materiálového inženýrství.
- [6] TREPKA, Václav. Racionalizace soustružení rotačních dílů z těžkoobrobitelných materiálů. Plzeň, 2010. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [7] ALOIS HOMELÁŘ, VOJTĚCH HRUBÝ. Iontová nitridace v praxi. Praha, 1989. Vydavatelství SNTL. ISBN 80-03-00001-7.
- [8] AB Sandvik Coromant. Application Guide HRSA, Sandviken, 2010, Sweden. Printed in Sweden at Sandvikens Tryckeri.
- [9] SOVA, F. Technologie obrábění a montáže. Plzeň, 1989. VŠSE.
- [10] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje, Praha, 2008. MM publishing, s.r.o. ISBN 978-80-254-2250-2
- [11] DAVIS, J. R. Heat-resistant Materials, ASM Specialty Handbook, 1997, USA, ASM International, ISBN 0-87170-596-6
- [12] Interní dokumenty firmy Rübíg
- [13] Interní dokumenty firmy Doosan Škoda Power

Publikace na internetu

- [14] Doosan Škoda Power. Historické mezníky [Online]. [Citace: 20. 10 2013]. Dostupné z www.skodapower.com
- [15] Special Metals Corporation. Machining [Online]. [Citace: 3. 12 2013]. Dostupné z <http://www.specialmetals.com/documents/machining.pdf>
- [16] KAREL DAŇOUREK, Vybrané technologie povrchových úprav - Prezentace Anomální doutnavý výboj, [Online] 2006 [Citace: 5.12.2013]. Dostupné z http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/10doutvyb.pdf
- [17] Sandvik Coromant. Produkty [Online]. [Citace: 17. 1 2014]. Dostupné z <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/default.aspx>
- [18] Sandvik Coromant. Katalog CoroKey [Online]. [Citace: 20. 1 2014]. Dostupné z <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/Pages/search.aspx?q=corokey>

- [19] Key to Metals AG. Materiálové vlastnosti [Online] 2014. [Citace: 5.2.2014]. Dostupné z www.keytometals.com
- [20] Key to Metals AG. Vlastnosti materiálu Nimonic 901 [Online] 2014. [Citace: 18.1.2014]. Dostupné z <http://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1042164&keyNum=2260&type=3&hs=0>
- [21] Google books. Nickel, Cobalt, and Their Alloys – Joseph R. Davis. [Online] 2014. [Citace: 10.12.2013]. Dostupné z <http://books.google.cz/books?id=IePhmnbmRWkC&pg=PA71&dq=inconel+263&hl=cs&sa=X&ei=wOTcUfGFI4PetAbV2oGoBA&ved=0CDoQ6AEwAA#v=onepage&q=inconel%20263&f=false>

11. Přílohy

- PŘÍLOHA č. 1: Pracovní postup výroby zkušebního vřetena
- PŘÍLOHA č. 2: Snímky opotřebení čela a hřbetu VBD z experimentu obrábění nimonicového vřetena
- PŘÍLOHA č. 3: Ostatní výsledky experimentu analýzy stop opotřebení po testu pin-on-disk

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: První parní turbína 550 HP system Rateau [13].....	12
Obrázek 2.1: Řez ventilu VT 1RZ+3RV [13].....	14
Obrázek 2.2: Popis jednotlivých částí ventilu v řezu [13].....	15
Obrázek 2.3. Umístění VT 2(1RZ+2RV) ventilu na turbíně [13]	15
Obrázek 3.1: Rozdělení slitin niklu podle registrované značky Special Metals [15]	17
Obrázek 3.2: Účinek teploty a velikost zrna na pevnostní vlastnosti výkovku ze slitiny Nimonic 901 po rozpouštěcím žíhání, vytvrzení a stárnutí. Chlazení na vzduchu [11]	20
Obrázek 4.1: Hrubování s proměnlivou hloubkou řezu [8]	24
Obrázek 4.2: Hrubování pod kuzelem – rampování [8]	24
Obrázek 4.3: Vliv tvaru VBD na produktivitu obrábění [8].....	26
Obrázek 4.4: Teploty v místě řezu při obrábění ISO-S slitin [8].....	26
Obrázek 4.5: Vliv vstupního úhlu bříty na mechanismus opotřebení [8].....	27
Obrázek 4.6: Testovaný díl	28
Obrázek 4.7: Použitý obráběcí stroj Mori Seiky NL3000	29
Obrázek 4.8: Opotřebení bříty DNMG při hrubování slitiny Nimonic 901	35
Obrázek 4.9: Opotřebení bříty DNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto	35
Obrázek 4.10: Opotřebení bříty CNMG při hrubování slitiny Nimonic 901.....	36
Obrázek 4.11: Opotřebení bříty CNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto	36
Obrázek 4.12: Tvarem méně žádané třísky - stužková, vinutá dlouhá a spirálová plochá tříška .	37
Obrázek 4.13: Žádaný tvar třísek - kuželovitá šroubovitá a dělená tříška.....	37
Obrázek 4.14: Hotové výrobky.....	38
Obrázek 5.1: Stykové body při nájezdu nástroje do materiálu [8]	40
Obrázek 5.2: Obrábění rádiusu kruhovou destičkou [8].....	41
Obrázek 5.3: Sražení hran čtvercovou destičkou [8].....	41
Obrázek 5.4: Postup obrábění profilů a kapes kruhovou destičkou [8].....	42
Obrázek 6.1: Pec pro iontovou nitridaci	43
Obrázek 6.2. Příklady vsázek nitridovaných součástí [16].....	44
Obrázek 6.3: Schéma dějů při iontové nitridaci [16].....	44
Obrázek 6.4: Závislost změny doutnavého výboje ve zředěném neonu na napětí a plošné hustotě proudu [16]	45
Obrázek 6.5: Složení nitridační vrstvy [7].....	46
Obrázek 6.6: Diagram iontové nitridace na zkušebním vřetenu [12]	47
Obrázek 6.7. Zatížení při zkoušce tvrdosti [12].....	49
Obrázek 6.8: Nitridovaná hloubka dle DIN 50 190 [12]	49
Obrázek 6.9: Roztavení ocelové mechanické ochrany v důsledku výboje obloukem.....	50

Obrázek 7.1: Nitridované vzorky z Nimonicu 901	51
Obrázek 7.2: Znázornění řezu na vybraných vzorcích	51
Obrázek 7.3: Vzorky S2/2 a S2/3, ukázka nitridované vrstvy, 100x, leštěno	52
Obrázek 7.4: Směr měření mikrotvrdosti na vzorku S2/3 a průběh mikrotvrdosti, 500x.....	52
Obrázek 7.5: Vzorek 6, stopa 10 mm, 50x	55
Obrázek 7.6: Vzorek 6, stopa 10 mm, 100x	55
Obrázek 7.7: Vzorek 6, stopa 14 mm, 50x	56
Obrázek 7.8. Vzorek 6, stopa 14 mm, 100x	56
Obrázek 7.9. Vzorek 6, stopa 10 mm, 100x a 300x SEM v režimu SEI	56
Obrázek 7.10. Vzorek 6, stopa 10 mm, 200x a 350x SEM v režimu BES.....	57
Obrázek 7.11: Vzorek 6, stopa 14 mm, 100x a 250x SEM v režimu SEI	57
Obrázek 7.12: Vzorek 6, stopa 14 mm, 200x a 400x SEM v režimu BES.....	57
Obrázek 7.13: Vzorek 6, stopa 10 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	58
Obrázek 7.14: Vzorek 6, stopa 14 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	58
Obrázek 7.15: Vzorek 1, stopa 10 mm, 50x a 100x.....	59
Obrázek 7.16: Vzorek 1, stopa 14 mm, 50x a 100x.....	59
Obrázek 7.17: Vzorek 1, stopa 10 mm, 150x a 300x SEM v režimu SEI	59
Obrázek 7.18. Vzorek 1, stopa 10 mm, 100x a 250x SEM v režimu BES.....	60
Obrázek 7.19: Vzorek 1, stopa 14 mm, 130x a 350x SEM v režimu SEI	60
Obrázek 7.20: Vzorek 1, stopa 14 mm, 150x a 350x SEM v režimu BES.....	60
Obrázek 7.21: Vzorek 1, stopa 10 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	61
Obrázek 7.22: Vzorek 1, stopa 14 mm s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	61
Obrázek 0.1: Opotřebení bříty DNMG při hrubování slitiny Nimonic 901	79
Obrázek 0.2: Opotřebení bříty DNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto	80
Obrázek 0.3: Opotřebení bříty CNMG při hrubování slitiny Nimonic 901.....	81
Obrázek 0.4: Opotřebení bříty CNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto	81
Obrázek 0.5: Vzorek 3, stopa 3N, 50x a 100x.....	83
Obrázek 0.6: Vzorek 3, stopa 5N, 50x a 100x.....	83
Obrázek 0.7: Vzorek 3, stopa 3N, 180x a 500x SEM v režimu SEI.....	83
Obrázek 0.8: Vzorek 3, stopa 3N, 200x a 500x SEM v režimu BES	84
Obrázek 0.9: Vzorek 3, stopa 5N, 170x a 500x SEM v režimu SEI.....	84
Obrázek 0.10: Vzorek 3, stopa 5N, 200x a 500x SEM v režimu BES	84
Obrázek 0.11: Vzorek 1, stopa 3N, 50x a 100x.....	85
Obrázek 0.12: Vzorek 1, stopa 5N, 50x a 100x.....	85
Obrázek 0.13: Vzorek 1, stopa 3N, 140x a 500x SEM v režimu SEI.....	86
Obrázek 0.14: Vzorek 1, stopa 3N, 250x a 500x SEM v režimu BES	86

Obrázek 0.15: Vzorek 1, stopa 5N, 140x a 500x SEM v režimu SEI.....	86
Obrázek 0.16: Vzorek 1, stopa 5N, 250x a 500x SEM v režimu BES	87
Obrázek 0.17: Vzorek 1, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	87
Obrázek 0.18: Vzorek 1, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	88
Obrázek 0.19: Průběh vtisků vzorku Materiálu A.....	89
Obrázek 0.20: Průběh vtisků vzorku Materiálu C.....	89
Obrázek 0.21: Vzorek 2, stopa 3N, 50x a 100x.....	90
Obrázek 0.22: Vzorek 2, stopa 5N, 50x a 100x.....	90
Obrázek 0.23: Vzorek 2, stopa 3N, 130x SEM v režimu SEI	90
Obrázek 0.24: Vzorek 2, stopa 3N, 130x a 250x SEM v režimu BES	91
Obrázek 0.25: Vzorek 2, stopa 5N, 110x SEM v režimu SEI.....	91
Obrázek 0.26: Vzorek 2, stopa 5N 300x SEM v režimu BES.....	91
Obrázek 0.27: Vzorek 2, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	91
Obrázek 0.28: Vzorek 2, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	92
Obrázek 0.29: Vzorek 4, stopa 3N, 50x a 100x.....	92
Obrázek 0.30: Vzorek 4, stopa 5N, 50x a 100x.....	93
Obrázek 0.31: Vzorek 4, stopa 3N, 160x SEM v režimu SEI	93
Obrázek 0.32: Vzorek 4, stopa 3N, 160x a 500x SEM v režimu BES	93
Obrázek 0.33: Vzorek 4, stopa 5N, 120x SEM v režimu SEI	94
Obrázek 0.34: Vzorek 4, stopa 5N, 150x a 500x SEM v režimu BES	94
Obrázek 0.35: Vzorek 4, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	94
Obrázek 0.36: Vzorek 4, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy	95

Seznam grafů

Graf 1: Porovnání pevnosti materiálů za vysokých teplot [13]	22
Graf 2: Radiálního házení po jednotlivých operacích	34
Graf 3: Průběh mikrotvrlosti HV0,05 na vzorku S2/2	53
Graf 4: Průběh mikrotvrlosti HV0,05 na vzorku S2/3	53
Graf 5: Srovnání výsledků objemu opotřebení při zatížení 3N [13].....	62
Graf 6: Srovnání výsledků koeficientu tření při zatížení 3N [13]	62
Graf 7: Srovnání výsledků objemu opotřebení při zatížení 5N [13].....	63
Graf 8: Srovnání výsledků koeficientu tření při zatížení 5N [13]	63
Graf 9: Průběh tvrdosti vzorku Materiálu A	85
Graf 10: Průběh tvrdosti vzorku Materiálu C	88
Graf 11: Porovnání průběhu tvrdosti Materiálu A a Materiálu C	89

Seznam tabulek

Tabulka 1: Značení dle zahraničních norem [15]	18
Tabulka 2: Chemické složení slitiny Nimonic 901 [15]	18
Tabulka 3: Účinek velikosti zrn na vysoko-cyklické únavové vlastnosti slitiny Nimonic 901 při 455°C [11].....	20
Tabulka 4: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17].....	30
Tabulka 5: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17].....	30
Tabulka 6: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17].....	31
Tabulka 7: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17].....	31
Tabulka 8: Použité nástrojové vybavení od dodavatele Sandvik Coromant [17].....	32
Tabulka 9: Tabulka hodnot radiálního házení	33
Tabulka 10: Smluvní cena použitých VBD	37
Tabulka 11: Přehled zkušebních brusných kotoučů	39
Tabulka 12: Naměřené hodnoty průběhu mikrotvrdomi nitridovanou vrstvou u jednotlivých vzorků	52
Tabulka 13: Hodnoty tvrdosti jednotlivých vtisků	53
Tabulka 14: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.13.....	58
Tabulka 15: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.14.....	58
Tabulka 16: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.21.....	61
Tabulka 17: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 7.22.....	61
Tabulka 18: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.17.....	87
Tabulka 19: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.18.....	88
Tabulka 20: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.27.....	92
Tabulka 21: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.28.....	92
Tabulka 22: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.35.....	95
Tabulka 23: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.36.....	95

PŘÍLOHA č. 1

Pracovní postup výroby zkušebního vřetena

Pracovní postup výroby zkušebního vřetena																
Poř. Tool	Kód nástroje	Poloha na výk.	Popis pracovního úkonu	Vc (m/min)	d (mm)	n (ot/min)	hex(mm/z)	fz(mm/z)	z Vf(mm/min)	ap	ae	délka L	pruch.	poc.komp.	t (min)	
																Škoda-Power
1	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B11	Soustružení vodícího pásku pro lunetu	40	61										
			B14	Podepřít lunetou za pásek prm.61											3,00	
			B12	Navrtat a podepřít hrotem											3,00	
2	T2	C5-DCLNR-35060-12 CNMG 120412-QM S05F	B12	Hrubovat prm 92 na prm.88	40	88									2,14	
			B14	Hrubovat prm 41,7 na prm.48	40	60									0,12	
					40	56									0,13	
					40	53									0,21	
					40	48									1,87	
			B12	Hrubovat čelo	40	64									0,50	
			E7 Řez A-A	sražení 45°	40	84									0,43	
3	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B3	Soustružit uvolnění pro nástroj	40	58									1,25	
					40	54									1,17	
				Otočit dílec											15,00	
			B9	Soustružit prm.51,7 na 58	40	58									28,57	
			B11	Soustružit čelo	40	73									0,57	
4	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B9	Soustružit prm.51,7 na 54	40	54									26,60	
			B11	Soustružit čelo	40	71									0,56	
				Otočit dílec											15,00	
			B14	Soustružit prm.41,7e8 na prm.45	40	45									1,75	
				Soustružit čelo + radius	40	66,5									0,78	
			E7 Řez A-A	sražení 45°	40	84									0,43	
				Soustružit prm.82 na prm.85	40	85									1,50	
				Nitridace												
				Upnutí dílce za pomocný prm. 62 stranou prm.41e8 ke koniku											3,00	
				Opřít lunetou za prm.55												
6	T3	C5-RF123G10-35060B N123G2-0300-0002-CM 1125	B14	Upřichnout s přídávkem 1mm na čelo	30	23									0,92	
7	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B14	Soustružit čelo hotově	40	23									0,28	
			B12,13	Soustružit čelo + R10 s přídávkem 0,05	40	64									0,67	
				Soustružit tvar zápichu R2 R10 na prm.41	40	41									0,43	
			B14-11	Soustružit vnější tvar. 41,7e8 na 42 prm.41 s rad. R2 a R10	40	62									4,61	

Pracovní postup výroby zkušební vřetena										
Poř. Tool	Kód nástroje	Poloha na výk.	Škoda-Power	Popis pracovního úkonu	Vc (m/min)	d (mm)	n(ot/min)	hex(mm/z)	fz(mm/z)	ap ae délka L pruch. poc.komp. t (min)
8	T4	R846-0680-50-A1A 1220	Řez D-D	Vrtat otvor prm.6,8	40	7,2	7,2			6,5 1 1 0,09
	T5	CXS-06T098-20-6215 1025		Soustružit vnitřní tvar	40	7,6				6,5 1 1 0,10
					40	8				6,5 1 1 0,10
					40	8,4				6,5 1 1 0,11
				sražení 60°	40	8,4				1,5 1 1 0,02
					40	8,4				3 1 1 0,05
					40	8,4				3 1 1 0,05
					40	8,4				4 1 1 0,07
					40	8,4				5 1 1 0,08
					40	8,4				5 1 1 0,08
					40	8,4				5 1 1 0,08
					40	8,4				6 1 1 0,10
				sražení 120°	40	12				3 1 1 0,07
					40	12				3 1 1 0,07
					40	12				4 1 1 0,09
9	T6	CXS-06TH125VM-6215R		Soustružit závit M8	30	8				17 22 1 0,25
	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B2	Soustružit vodící pásek pro lunetu 2x	40	53				100 2 1 5,55
10	T3	C5-RF123G10-35060B N123G2-0300-0002-CM 1125		Přepnout a opřít lunetu za pásek Upíchnout přidávek pro zavěšení	30	31				33 1 1 1,78
	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F		Zarovnat čelo načisto	40	27,5				28,5 1 1 0,41
11	T7	R846-0520-30-A1A 1220	Řez B-B	Vrtat prm 5,2	20	5,2				21 1 1 0,29
	T8	CXS-05TH100VM-4815R 1025		Soustružit tvar délku	40	7,2				6,5 15 1 1,38
	T9	CXS-05TH100VM-4815R 1025		Soustružit závit M6	30	6				17 22 1 0,19
				Opřít lunetu za prm.55						5,00
12	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B3-7	Soustružit vnější tvar. 48,43+R50 2x prm.50 a R50	40	53				230 2 1 12,76
13	T1	C5-DDJNR-35060-1504 DNMG 150612-QM S05F	B7-11	Odepnout lunetu a opřít hrotem Soustružit prm.52	40	52				1075 1 1 29,25
14	T10	DVPNR 2525M16	Řez A-A	soustružení zápichu	40	52				10 2 1 0,54
		VNMG160408SM-S05F								
15	T11	C5-266RFG-35060-16 266RG-16MM01A300M	B3,4	Řezat závit M48x3 6g	15	48				66 15 1 3,32
										Čas celkem 184,22

Výkres součásti

PŘÍLOHA č. 2

Snímky opotřebení čela a hřbetu VBD z experimentu obrábění vřetena z Nimonic 901

DNMG 150612 – QM S05F

Hrubování vedení vřetena:

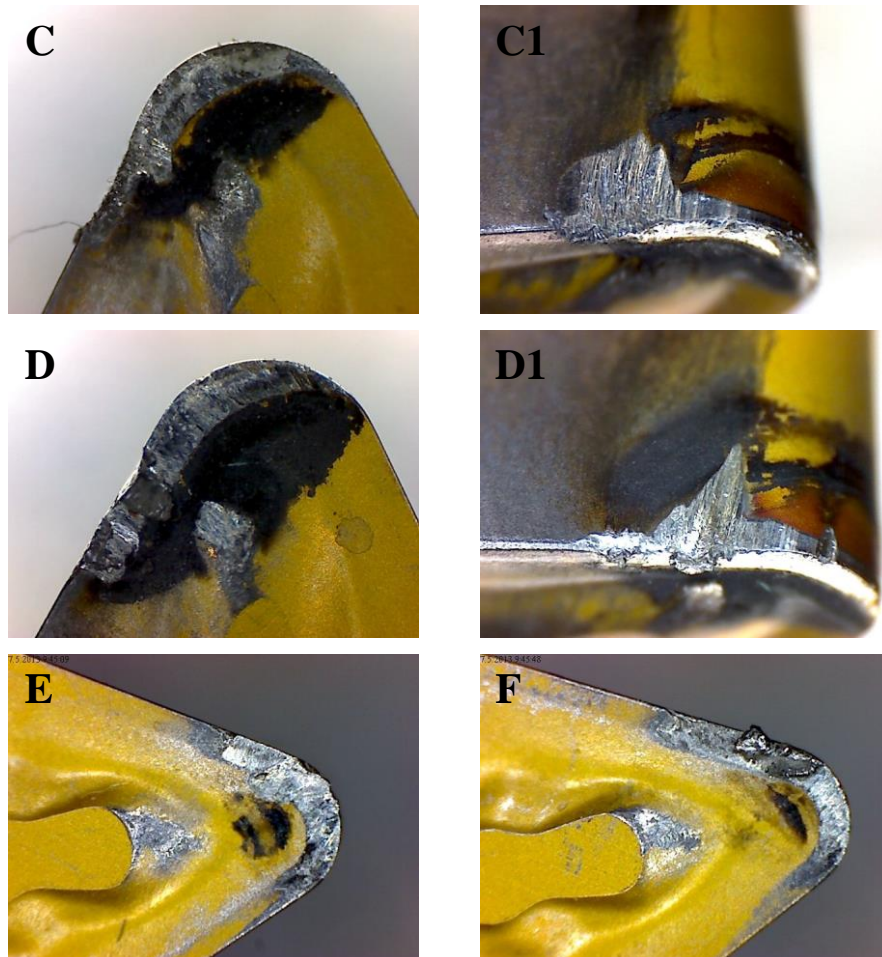
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,2 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 2 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 23 \text{ min } 40 \text{ sek}$$



Obrázek 0.1: Opatřebení břitu DNMG při hrubování slitiny Nimonic 901

Vedení vřetena na čisto:

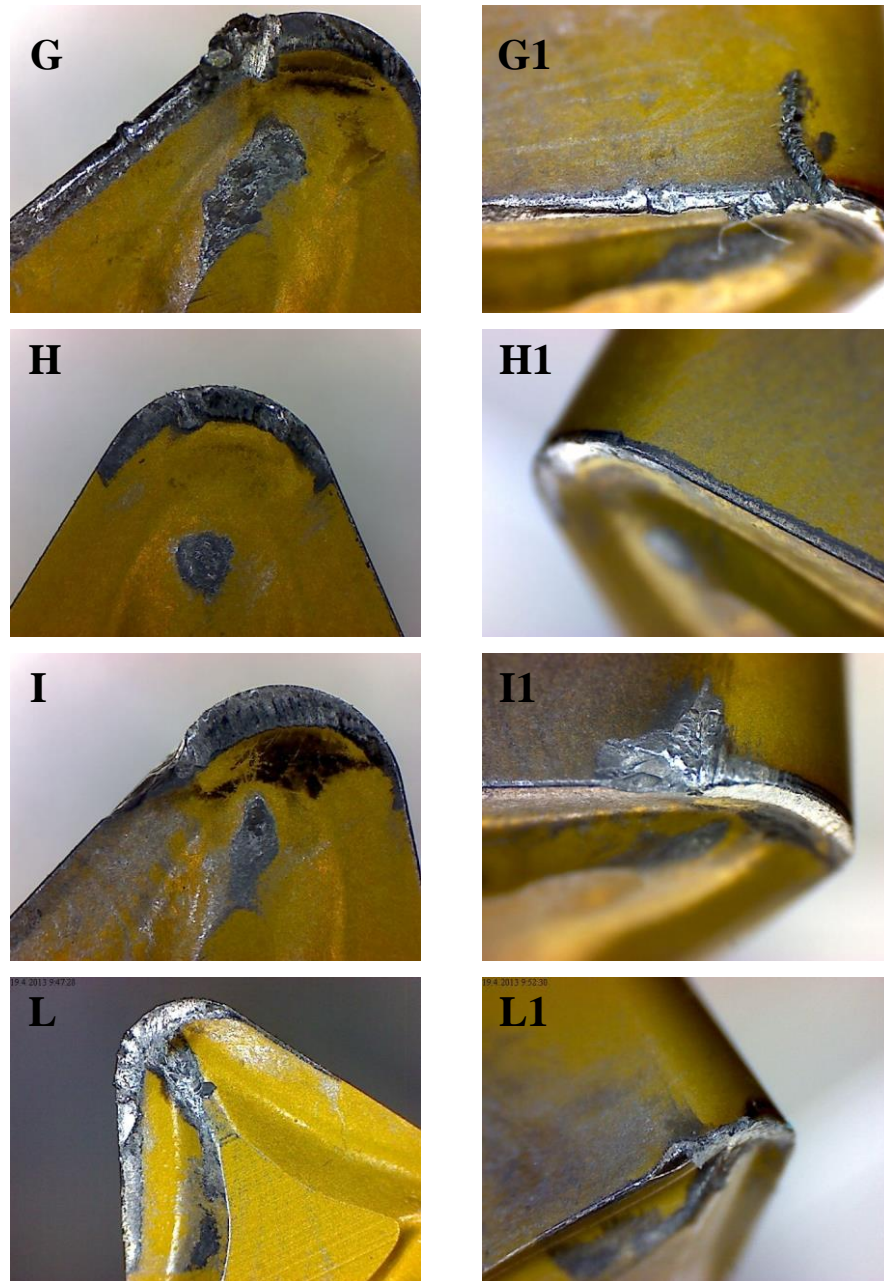
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,15 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 23 \text{ min } 40 \text{ sek}$$



Obrázek 0.2: Opatření břitu DNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto

CNMG 120412-QM S05F

Hrubování kuželky - Vřeteno s kuželkou D110/60st:

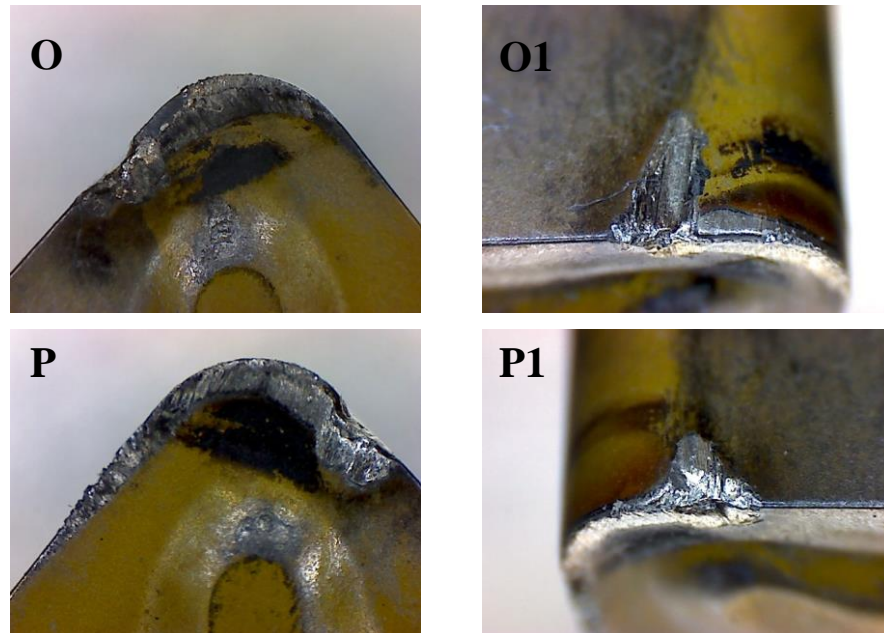
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,2 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 15 \text{ min } 32 \text{ sek}$$



Obrázek 0.3: Opotřebení břitu CNMG při hrubování slitiny Nimonic 901

Hrubování kuželky - Vřeteno ZV:

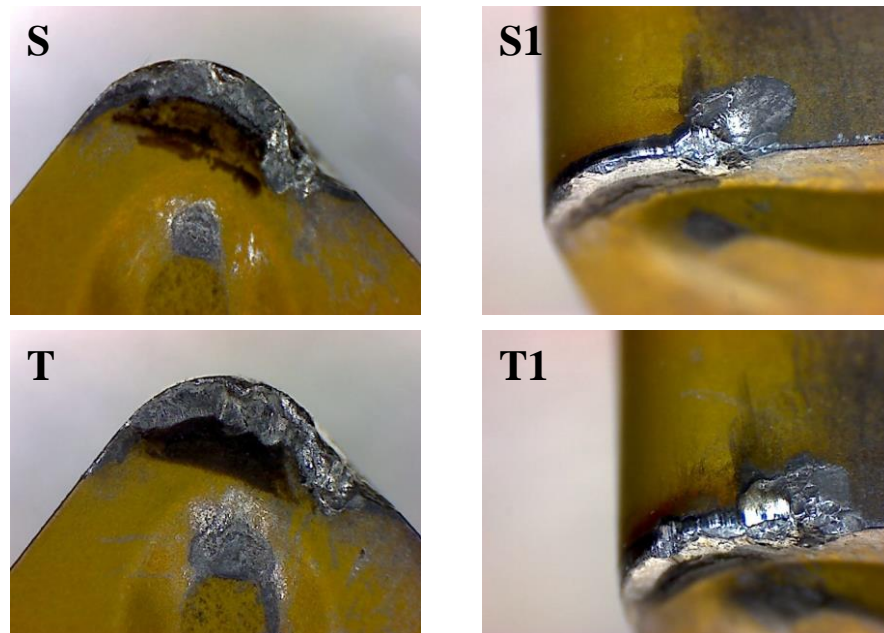
Stanovené řezné podmínky:

$$v_c = 40 \text{ m/min}$$

$$f = 0,15 \text{ mm/ot}$$

$$a_p = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{čas řezu: } t = 10 \text{ min } 15 \text{ sek}$$



Obrázek 0.4: Opotřebení břitu CNMG při obrábění slitiny Nimonic 901 na čisto

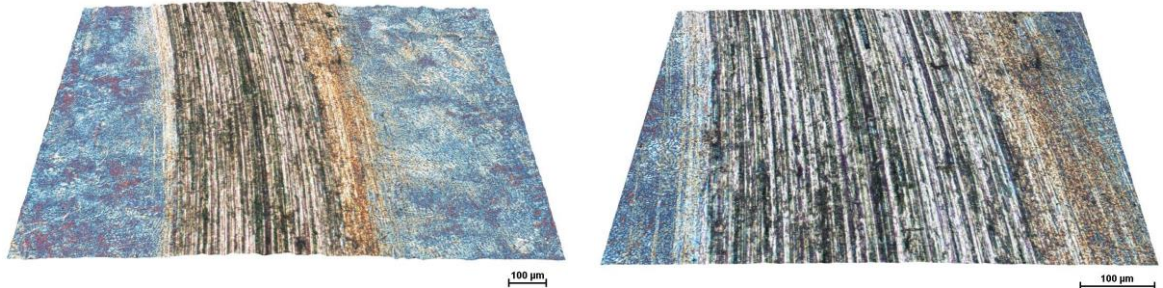
PŘÍLOHA č. 3

Ostatní výsledky experimentu analýzy stop opotřebení po testu pin-on-disk [13]

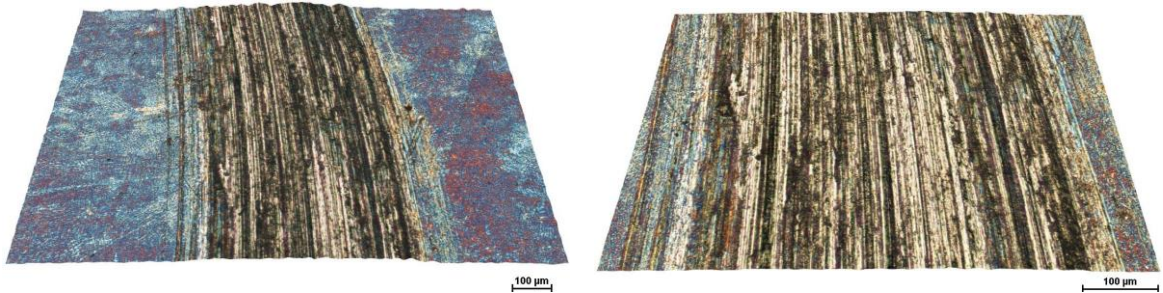
Materiál A vs. Materiál B

Snímaná stopa ze zkoušky pin-on-disk se zatížením 3N a 5N. Vzorek byl označen číslicí 3.

Snímky z optického mikroskopu

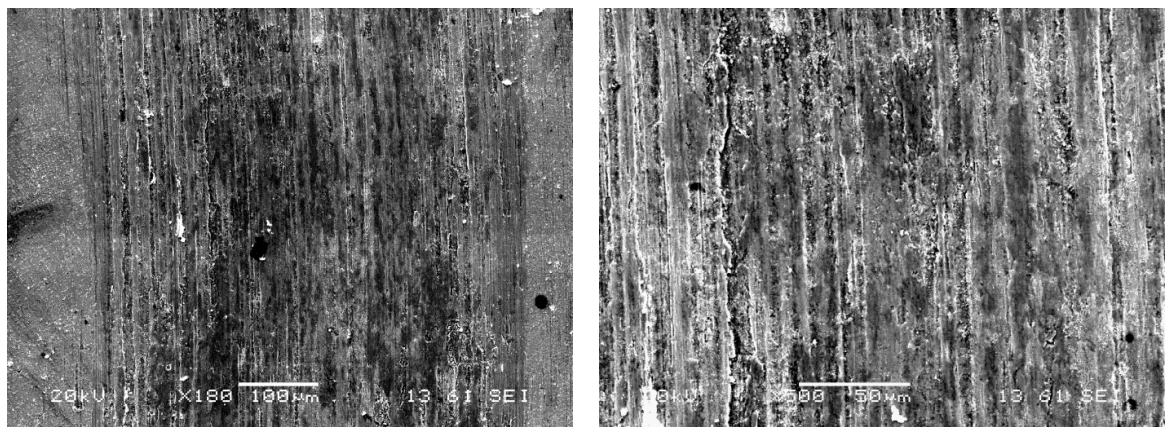


Obrázek 0.5: Vzorek 3, stopa 3N, 50x a 100x

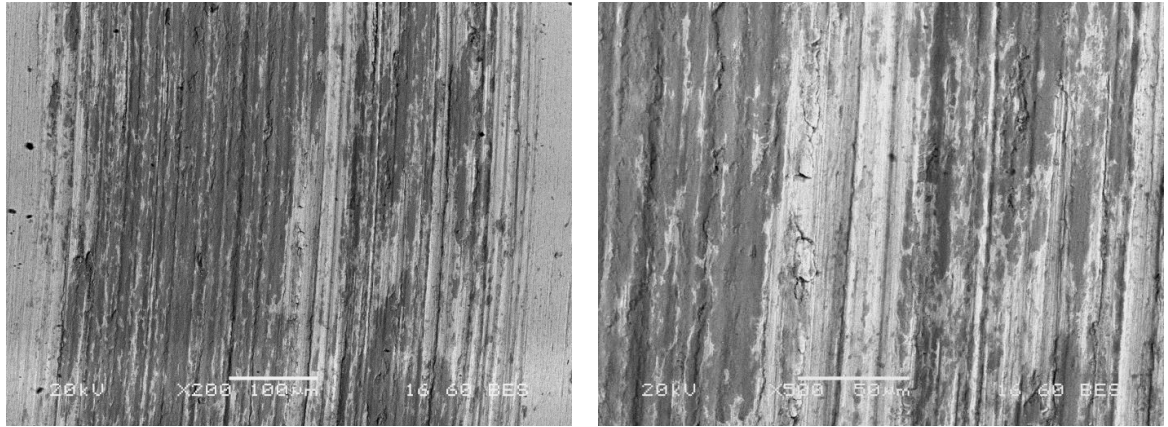


Obrázek 0.6: Vzorek 3, stopa 5N, 50x a 100x

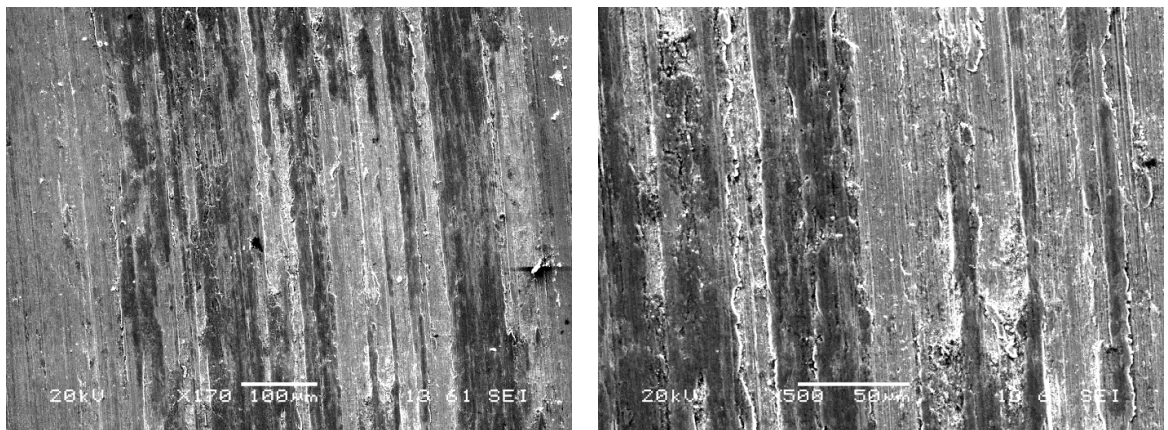
Snímky z elektronového mikroskopu



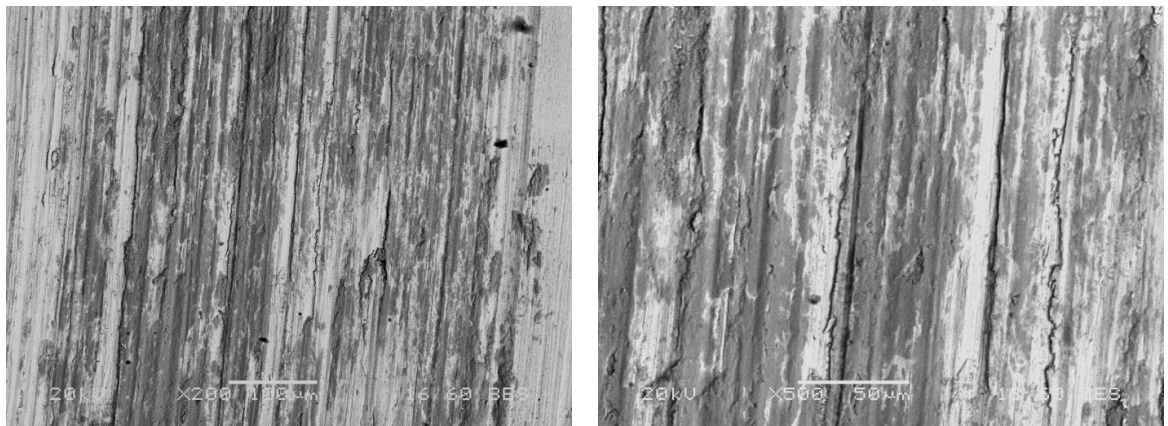
Obrázek 0.7: Vzorek 3, stopa 3N, 180x a 500x SEM v režimu SEI



Obrázek 0.8: Vzorek 3, stopa 3N, 200x a 500x SEM v režimu BES



Obrázek 0.9: Vzorek 3, stopa 5N, 170x a 500x SEM v režimu SEI



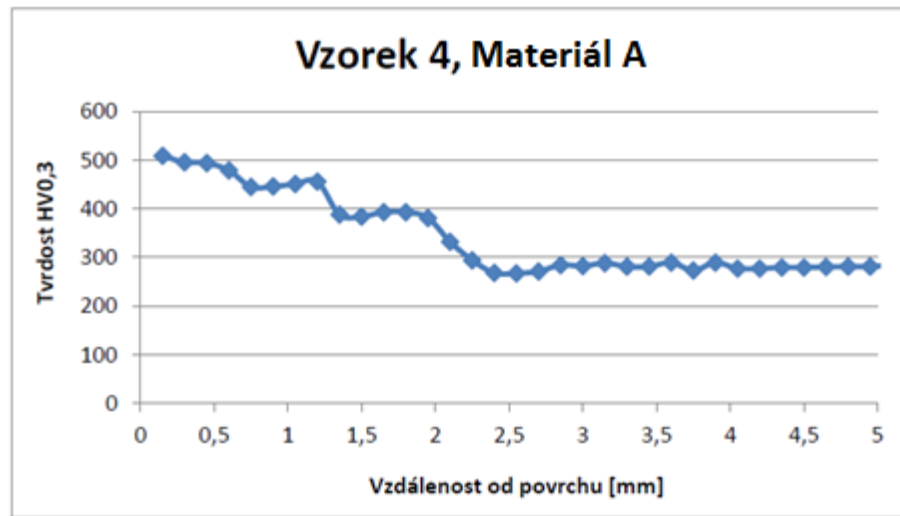
Obrázek 0.10: Vzorek 3, stopa 5N, 200x a 500x SEM v režimu BES

EDX analýza

EDX analýza nebyla provedena, neboť návar *Materiálu A* i hrot *Materiálu B* byly ze stejného materiálu. Ze snímků tedy není jednoznačně patrné, zdali došlo k ořezu hrotu a k přenosu materiálu.

Měření průběhu tvrdosti

Na zkušební vzorku číslo 4 ze zkoušky pin-on-disk byl měřen průběh tvrdosti *Materiálu A*. Zatížené tvrdoměrem HV0,3.

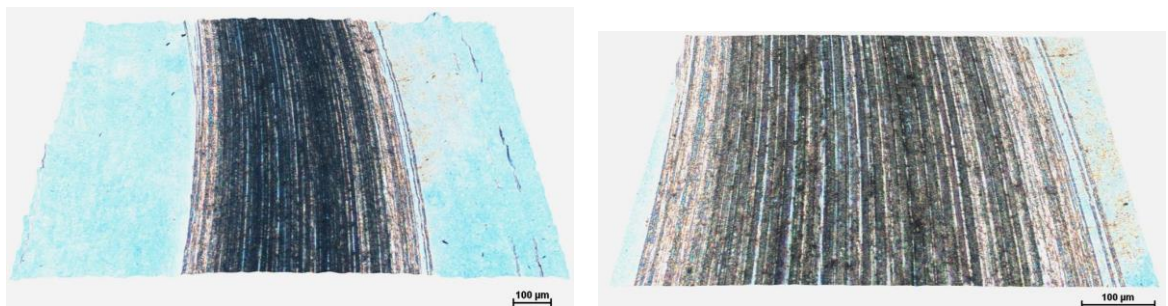


Graf 9: Průběh tvrdosti vzorku Materiálu A

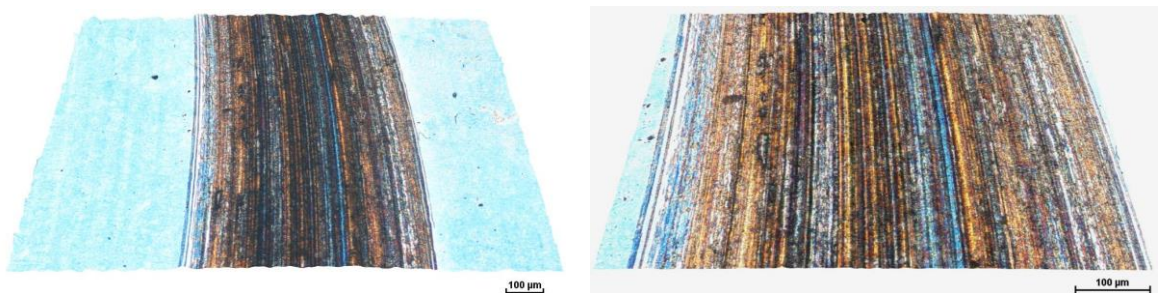
Materiál C vs. Materiál B

Na vzorku označeném číslicí 1 ze zkoušky pin-on-disk byly snímány stopy po opotřebení se zatížením 3N a 5N.

Snímky z optického mikroskopu

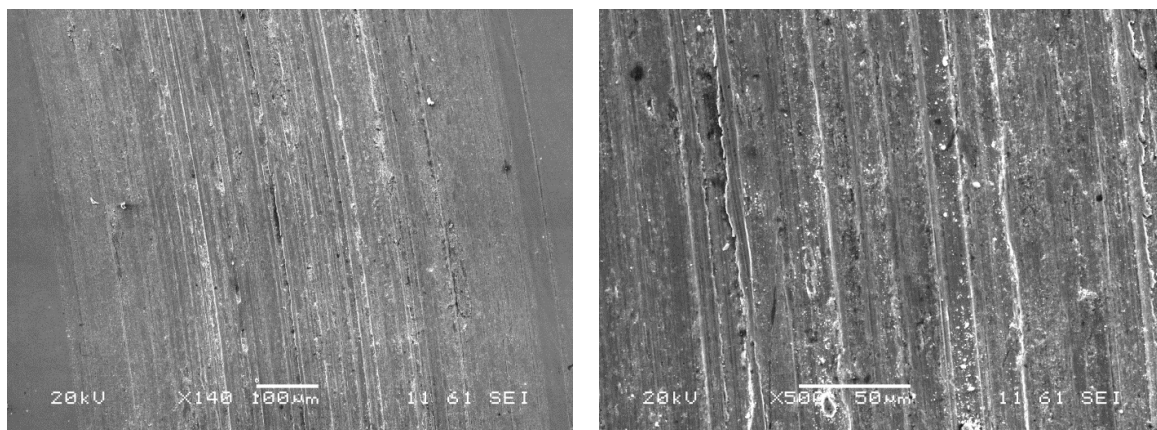


Obrázek 0.11: Vzorek 1, stopa 3N, 50x a 100x

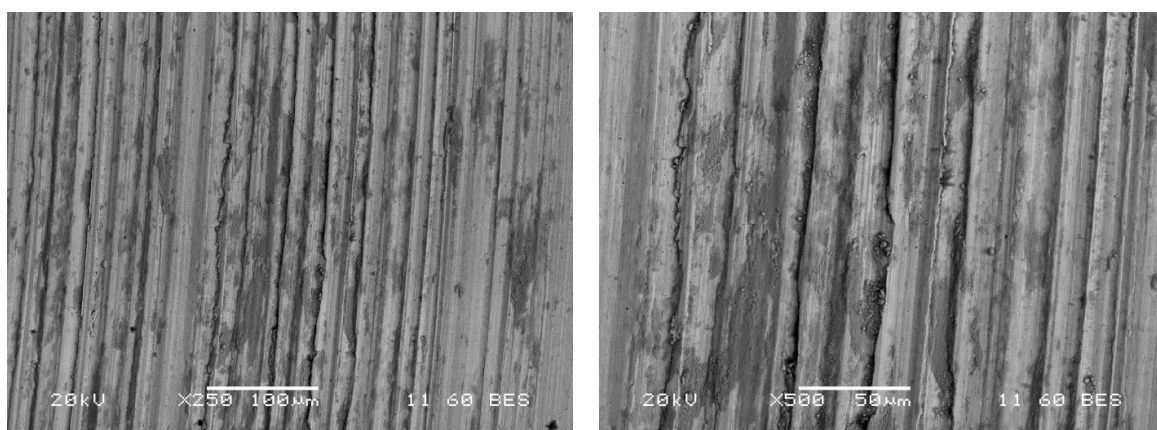


Obrázek 0.12: Vzorek 1, stopa 5N, 50x a 100x

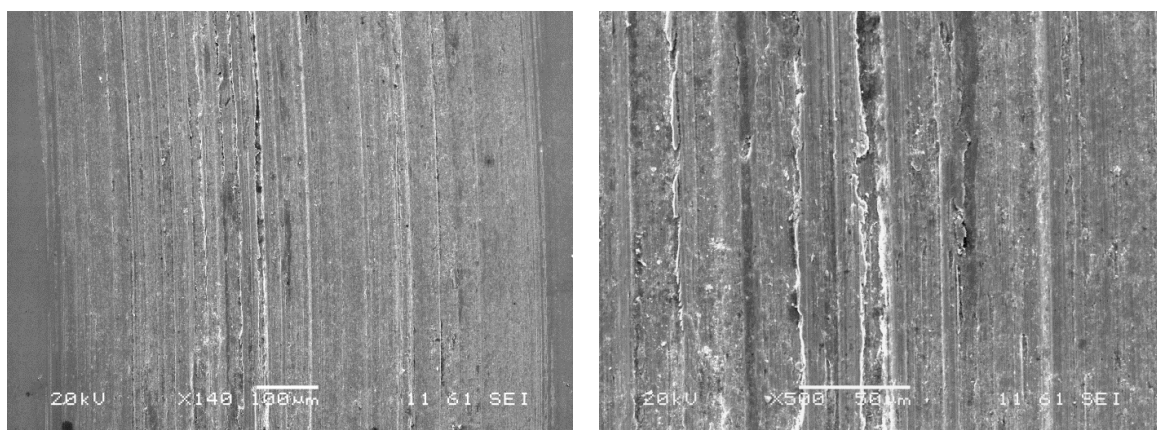
Snímky z elektronového mikroskopu



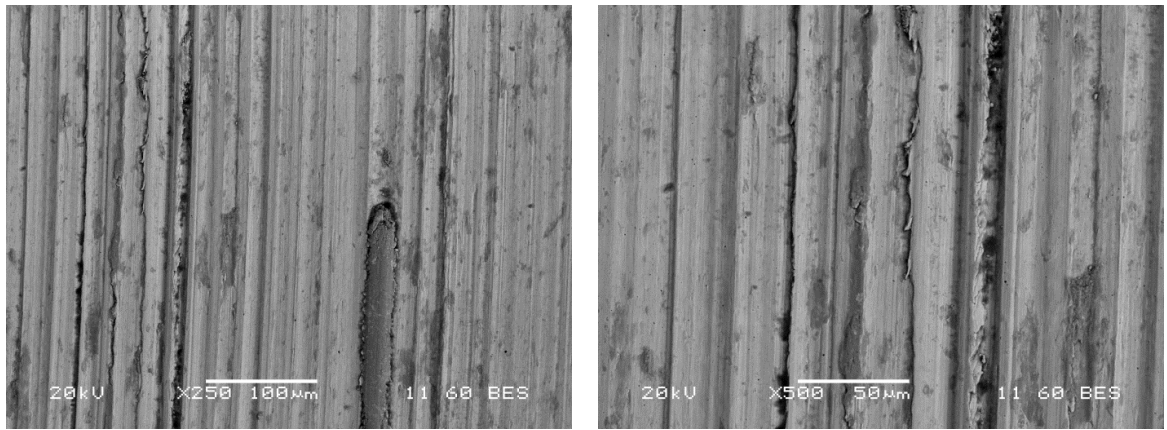
Obrázek 0.13: Vzorek 1, stopa 3N, 140x a 500x SEM v režimu SEI



Obrázek 0.14: Vzorek 1, stopa 3N, 250x a 500x SEM v režimu BES



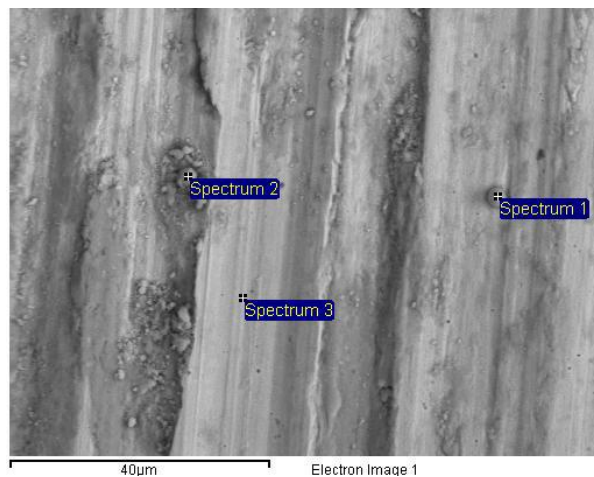
Obrázek 0.15: Vzorek 1, stopa 5N, 140x a 500x SEM v režimu SEI



Obrázek 0.16: Vzorek 1, stopa 5N, 250x a 500x SEM v režimu BES

EDX analýza

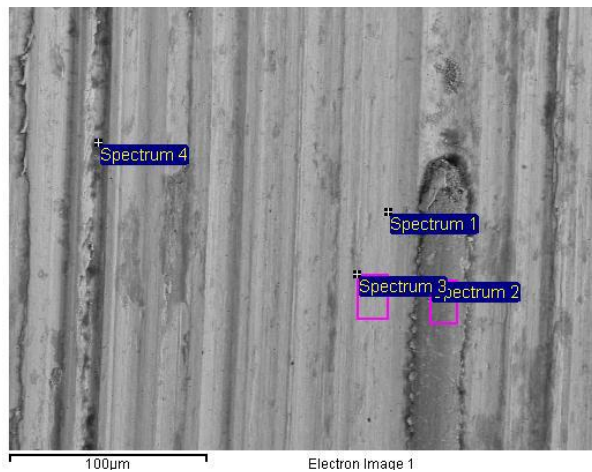
Lokální chemické složení vzorku 1, stopa opotřebení při zatížení 3N. *Materiál B* obsahuje na rozdíl od *Materiálu C* wolfram. Jelikož wolfram na stopách po opotřebení po testu pink-on-disk nebyl detekován, nedošlo pravděpodobně k přenosu hmoty z hrotu na návar.



Obrázek 0.17: Vzorek 1, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 18: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.17

Spectrum	O	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	Mo
Spectrum 1	39.62		3.59	1.32	53.66		1.81	
Spectrum 2	35.24	0.63	22.43		1.73	35.79		4.18
Spectrum 3	8.33	0.95	27.96		1.24	53.40		8.11



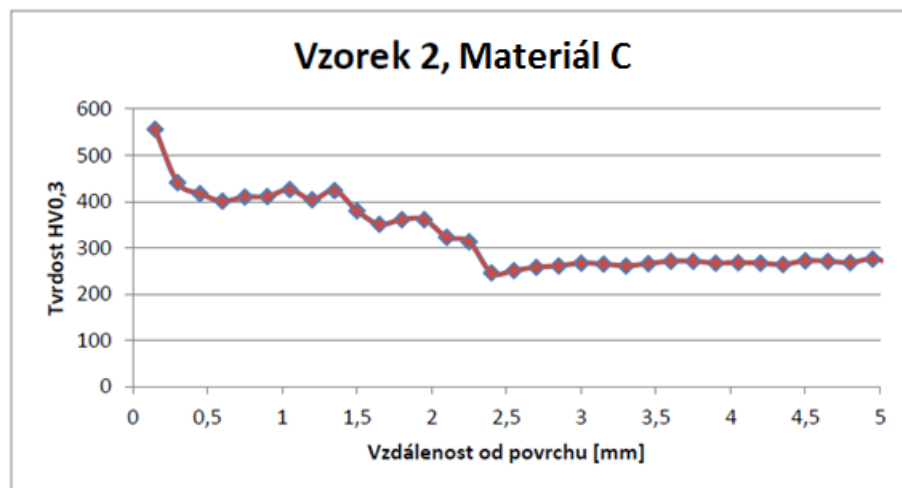
Obrázek 0.18: Vzorek 1, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 19: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.18

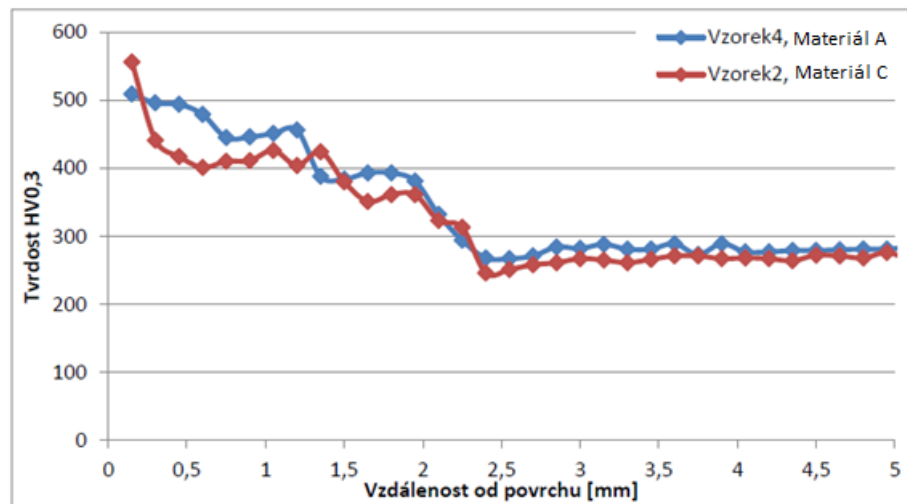
Spectrum	O	Al	Si	K	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Spectrum 1	5.11		0.78			26.27	0.63	2.2	57.73	2.80	4.65
Spectrum 2	30.39		0.59			19.54	0.68	1.18	41.83	1.91	3.88
Spectrum 3	5.48		0.95			26.52	0.99	1.98	55.79	2.72	5.58
Spectrum 4	26.18	4.91	5.73	1.26	3.52	16.97	0.66	7.70	30.72		2.36

Měření průběhu tvrdosti

Na vzorku číslo 2 ze zkoušky pin-on-disk byl měřen průběh tvrdosti *Materiálu C*. Zatížení tvrdoměru HV0,3. Hodnoty tvrdosti byly porovnány s průběhem tvrdosti vzorku číslo 4 *Materiálu A*.



Graf 10: Průběh tvrdosti vzorku Materiálu C



Graf 11: Porovnání průběhu tvrdosti Materiálu A a Materiálu C



Obrázek 0.19: Průběh vtisků vzorku Materiálu A

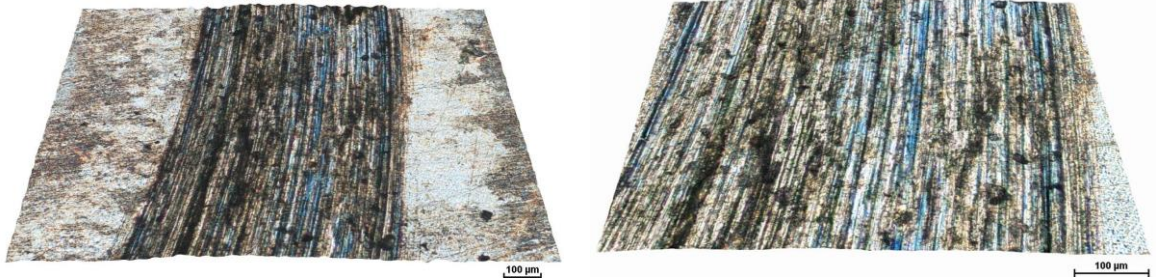


Obrázek 0.20: Průběh vtisků vzorku Materiálu C

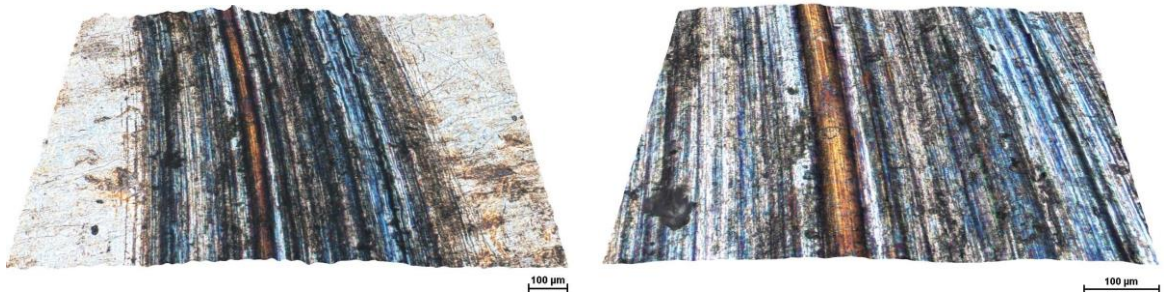
Materiál A vs. Materiál D

Snímaná stopa ze zkoušky pin-on-disk se zatížením 3N a 5N. Vzorek byl označen číslicí 2.

Snímky z optického mikroskopu

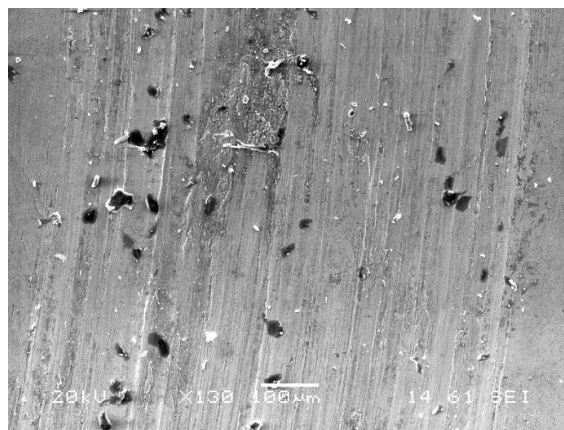


Obrázek 0.21: Vzorek 2, stopa 3N, 50x a 100x

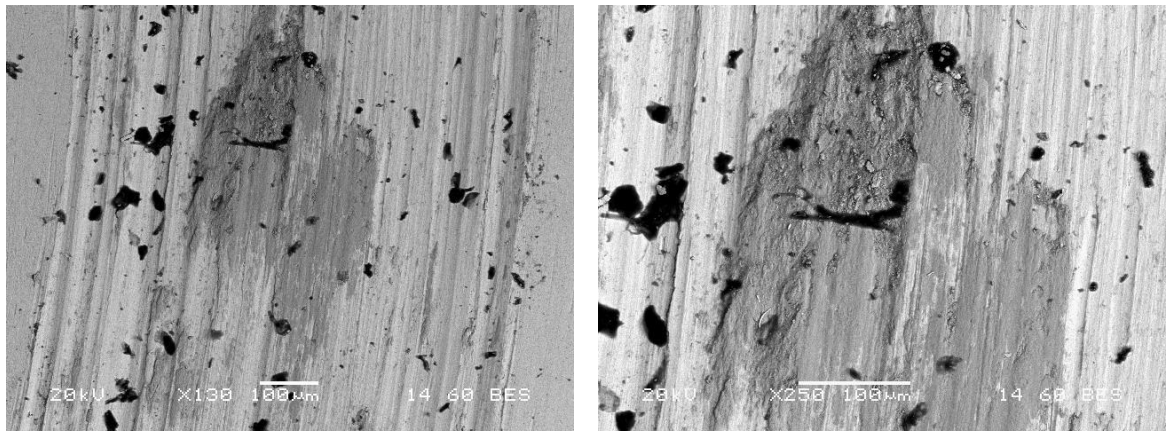


Obrázek 0.22: Vzorek 2, stopa 5N, 50x a 100x

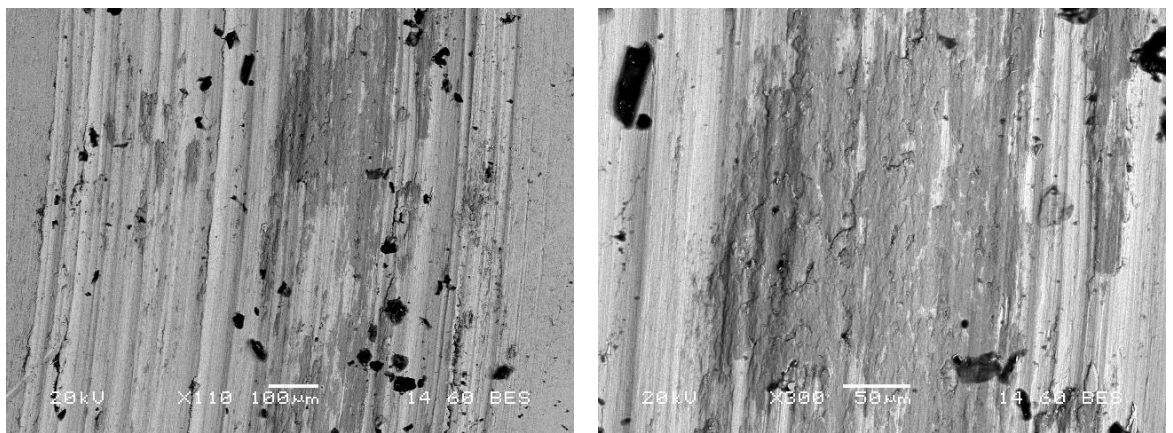
Snímky z elektronového mikroskopu



Obrázek 0.23: Vzorek 2, stopa 3N, 130x SEM v režimu SEI



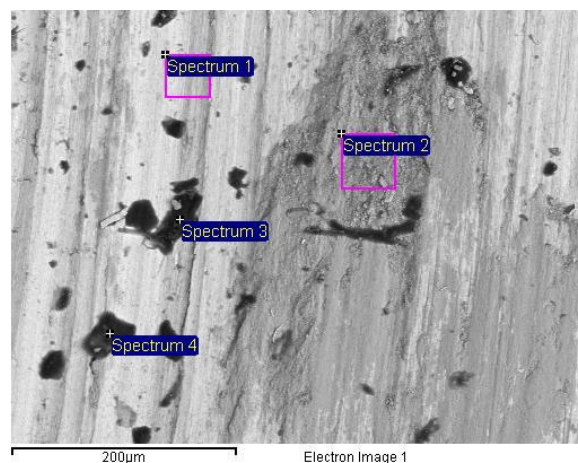
Obrázek 0.24: Vzorek 2, stopa 3N, 130x a 250x SEM v režimu BES



Obrázek 0.25: Vzorek 2, stopa 5N, 110x SEM v režimu SEI Obrázek 0.26: Vzorek 2, stopa 5N 300x SEM v režimu BES

EDX analýza

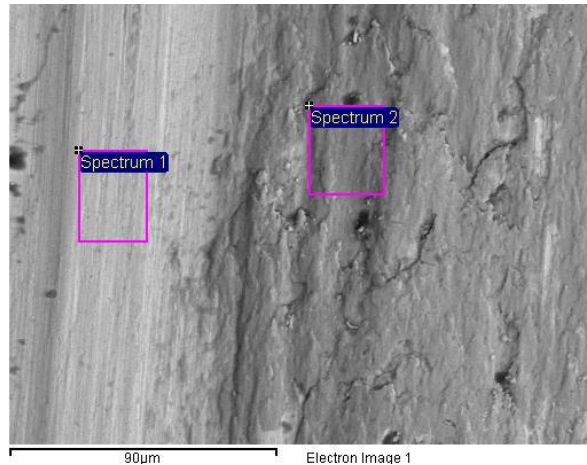
Lokální chemické složení vzorku 2, stopa opotřebení při zatížení 3N a 5N.



Obrázek 0.27: Vzorek 2, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 20. Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.27

Spectrum	C	O	Na	Si	K	Cr	Fe	Co	W
Spectrum 1		8.90		0.71		23.31	18.91	43.27	4.91
Spectrum 2		27.60		1.8		17.50	16.29	34.44	3.8
Spectrum 3	61.94	21.99	1.42	0.41	0.57	3.92	3.18	5.95	0.63
Spectrum 4	51.65	17.21	0.87	0.44	0.38	7.44	6.54	14.5	1.43



Obrázek 0.28. Vzorek 2, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

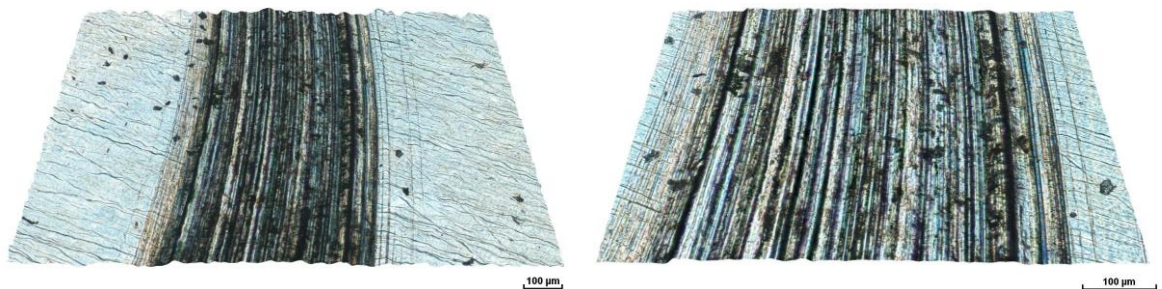
Tabulka 21: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.28

Spectrum	O	Si	Cr	Fe	Co	W
Spectrum 1	7.02	0.77	22.87	16.89	47.14	5.32
Spectrum 2	26.71	0.75	18.04	14.54	37.02	2.93

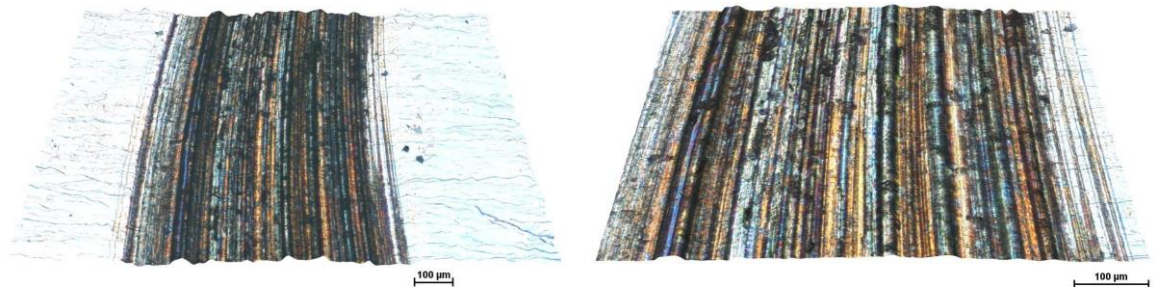
Materiál C vs. Materiál D

Na vzorku označeném číslicí 4 ze zkoušky pin-on-disk byly snímány stopy po opotřebení se zatížením 3N a 5N.

Snímky z optického mikroskopu

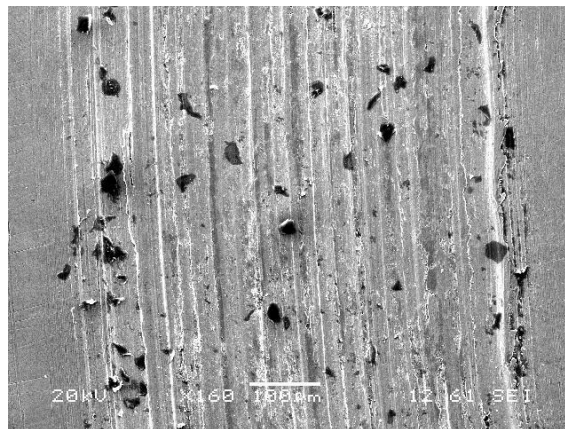


Obrázek 0.29. Vzorek 4, stopa 3N, 50x a 100x

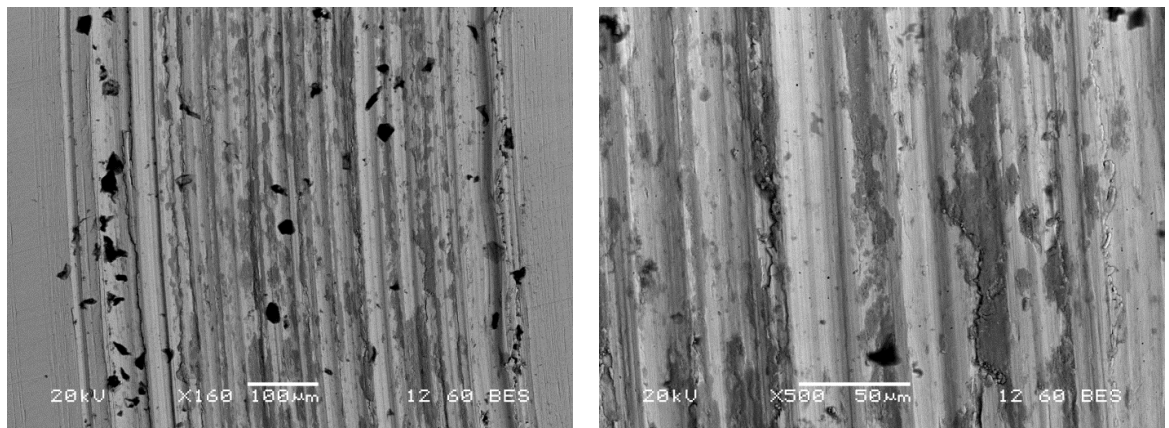


Obrázek 0.30. Vzorek 4, stopa 5N, 50x a 100x

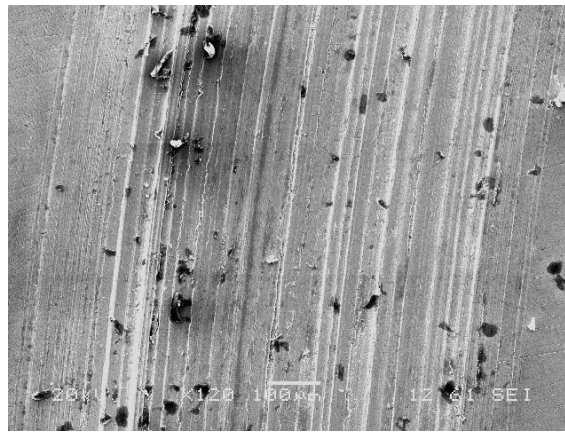
Snímky z elektronového mikroskopu



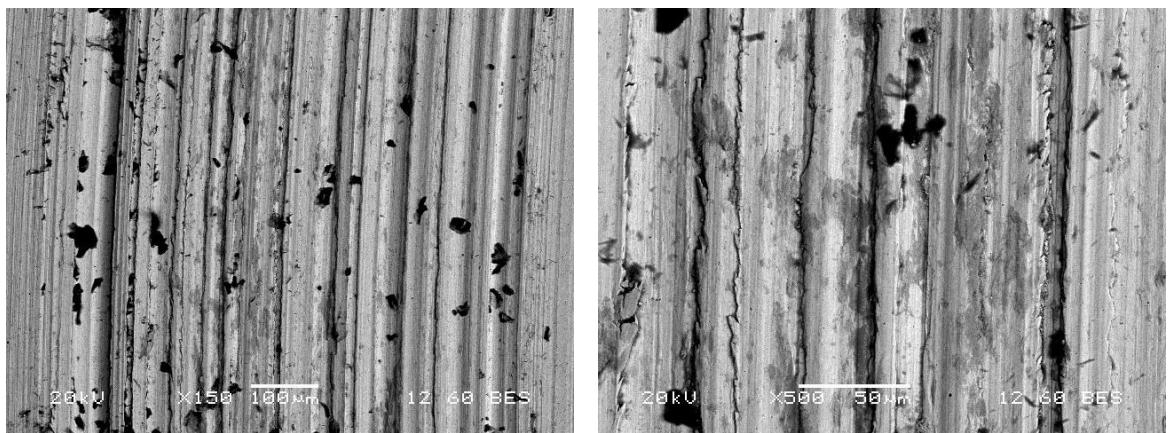
Obrázek 0.31: Vzorek 4, stopa 3N, 160x SEM v režimu SEI



Obrázek 0.32: Vzorek 4, stopa 3N, 160x a 500x SEM v režimu BES



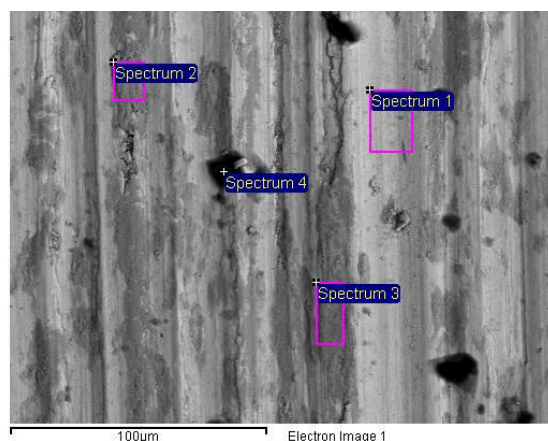
Obrázek 0.33: Vzorek 4, stopa 5N, 120x SEM v režimu SEI



Obrázek 0.34: Vzorek 4, stopa 5N, 150x a 500x SEM v režimu BES

EDX analýza

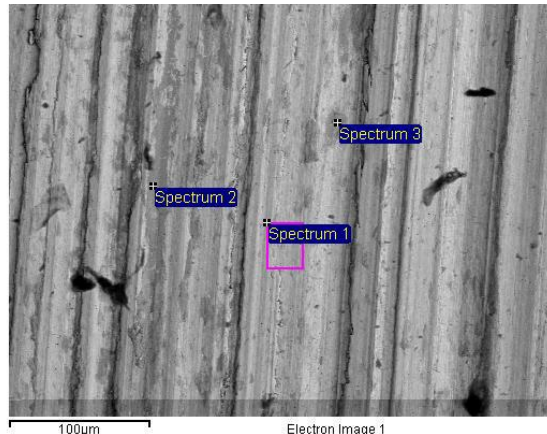
Lokální chemické složení vzorku 2, stopa opotřebení při zatížení 3N a 5N.



Obrázek 0.35: Vzorek 4, stopa 3N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 22: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.35

Spectrum	C	O	Si	Cr	Fe	Co	Mo
Spectrum 1		9.74	0.80	26.79	0.95	56.08	5.65
Spectrum 2		31.66	0.58	20.61	0.82	42.17	4.16
Spectrum 3		25.30	0.56	22.72	1.30	46.17	3.94
Spectrum 4	64.38	15.34	0.65	5.79	0.92	10.59	2.33



Obrázek 0.36: Vzorek 4, stopa 5N s vyznačenými oblastmi EDX analýzy

Tabulka 23: Lokální chemické složení z oblastí vyznačených na obr. 11.36

Spectrum	O	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Spectrum 1	7.74	0.92	27.55	0.86	2.59	54.63		5.72
Spectrum 2	35.28	0.61	19.63		1.48	37.33	1.82	3.85
Spectrum 3	31.61	0.60	19.45	0.71	1.10	40.62	1.70	4.22

Zhodnocení výsledků

Analýza sérií vzorků s různými úpravami povrchů, na kterých byl proveden test pin-on-disk ukázala následující výsledky.

U kombinace materiálu *Materiál A* x hrot z *Materiálu B* nebylo možné jednoznačně určit, jestli došlo k otěru hrotu a k přenosu materiálu. To bylo způsobeno stejným materiálem hrotu a disku.

U kombinace materiálu *Materiál C* x hrot z *Materiálu B* vycházíme ze skutečnosti, že *Materiál B* obsahuje na rozdíl od *Materiálu C* wolfram. Jelikož wolfram na stopách po opotřebení po testu pin-on-disk nebyl detekován, nedošlo pravděpodobně k přenosu hmoty z hrotu na návar.

U kombinace materiálů *Materiálu A* a *Materiálu C* x hrot z *Materiálu D* došlo pravděpodobně k otěru hrotu a přenosu materiálu, protože bylo na povrchu návarů detekováno železo. Hlavně u *Materiálu A* bylo detekováno významné množství železa. Nicméně nikl na návarech detekován nebyl.

U kombinace materiálů *nitridovaný Nimonic* a *základní Nimonic* x hrot ze *Stellitu 6* došlo k významnému otěru a přenosu materiálu hrotu na základní materiál. Analýza EDX detekovala na základním materiálu významné množství kobaltu.