

Disertační práce

Výzkum parametrů integrity povrchu u dynamicky namáhaných strojních součástí

Studijní program:

P2303 Strojírenská technologie

Studijní obor:

Strojírenská technologie

Autor práce:

Ing. Tomáš Kozlok

Školitel práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má disertační práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. června 2024

Ing. Tomáš Kozlok

Anotace

Výzkum parametrů integrity povrchu u dynamicky namáhaných strojních součástí

Disertační práce je zaměřena na problematiku vibrační koroze klíčových komponent (pracovní a duté vřeteno) CNC obráběcích strojů a její vhodnou eliminaci. Práce je členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor řešené problematiky. Hlavní pozornost byla věnována integritě povrchu, jakosti povrchové vrstvy a jejímu hodnocení, vzniku zbytkových napětí a jejich stanovení, vytváření funkčního povrchu součástí, stávajícímu způsobu výroby pracovního a dutého vřetena, vibrační korozi a vhodnému způsobu nanášení povlaků.

Experimentální část byla zaměřena na čtyři oblasti – úvodní studii k návrhu metod pro měření materiálových a mechanických vlastností u dutého vřetena, návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových a mechanických vlastností povlaků u dutého vřetena a také na návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných podmínek. Součástí disertační práce je diskuze výsledků a závěr k řešené problematice.

Klíčová slova: integrita povrchu, vibrační koroze, pracovní vřeteno, obráběcí stroj

Summary

Investigation of surface integrity parameters of dynamically stressed machine parts

The dissertation focuses on the issue of vibration corrosion of key components (working and hollow spindle) of CNC machine tools and its appropriate elimination. The thesis is divided into two main parts.

In the theoretical part the analysis of the problem was carried out. The main attention was paid to the surface integrity, surface layer quality and its evaluation, residual stress formation and its determination, formation of functional surface of the component, the existing method of production of working and hollow spindle, vibration corrosion and appropriate method of coating.

The experimental part focused on four areas - an initial study on the design of methods for measuring material and mechanical properties in hollow spindles, the design of a methodology and experimental verification of material and mechanical properties of coatings in hollow spindles, and also the design of a methodology and experimental verification of vibration corrosion under simulated conditions. The dissertation includes a discussion of the results and a conclusion on the problem addressed.

Keywords: integrity of surface, vibratory corrosion, working spindle, machine tool

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat školitelce doc. Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D., za cenné rady, vstřícnost a trpělivost při zpracování této disertační práce. Nesmírný dík patří též kolegům z firmy TOS VARNSDORF a.s., ČVUT v Praze a ZČU v Plzni za pomoc při realizaci experimentů.

Poděkování patří též mé manželce a synům za jejich toleranci a velkou podporu během mého studia.

S poděkováním Tomáš Kozlok

Obsah

1. Úvod	9
2. Současný stav problematiky	10
2.1 Integrita povrchu	10
2.2 Jakost povrchové vrstvy a její hodnocení	11
2.3 Vznik zbytkových napětí po obrábění a jejich vliv na funkční vlastnosti součástí	13
2.3.1 Klasifikace napětí v kovových polykrystalických materiálech	13
2.3.2 Technologické příčiny vzniku zbytkových napětí	14
2.4 Vytváření funkčního povrchu součástí	17
2.4.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti povrchové vrstvy	17
2.5 Zbytková napětí a jejich stanovení	18
2.5.1 Destruktivní metody	19
2.5.2 Nedestruktivní metody	21
2.6 Stávající způsob výroby klíčových komponent – pracovního a dutého vřetena	23
2.6.1 Současný způsob výroby vřetena	23
2.7 Vibrační koroze	25
2.8 Vhodné způsoby nanášení tenkých vrstev na funkční povrch zkoumaných součástí (obecná teorie)	27
2.8.1 Žárové nástřiky	28
2.8.2 Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF	29
2.8.3 Atmosférický plasmový nástřik – APS	30
2.8.4 Laserové práškové navařování – LMD	30
3. Cíle disertační práce	32
4. Experimentální část	33
4.1 Úvodní studie k návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena	33
4.1.1 Ověřování materiálových vlastností povrchové vrstvy vybraných vzorků	35
4.1.1.1 Obrobené nitridované vřeteno – analýzy povrchové vrstvy	37
4.1.1.2 Neobrobené nitridované vřeteno	43
4.1.1.3 Vstupní tyče	48
4.1.2 Ověřování mechanických vlastností povrchové vrstvy vybraných vzorků	52
4.1.2.1 Obrobené nitridované vřeteno – analýzy povrchové vrstvy	55
4.1.2.2 Neobrobené nitridované vřeteno	59
4.1.2.3 Vstupní tyče	61
4.1.3 Závěrečné zhodnocení k úvodní studii návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena.	62

4.1.4	Výroba pracovního a dutého vřetena.....	62
4.2	Návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků	66
4.2.1	Povlak NiCrBSi - Technologie HVOF.....	66
4.2.2	WC-Co-Cr – Technologie HVOF.....	77
4.2.3	Povlak Nistelle C276W - Technologie LMD	85
4.2.4	Povlak Stellite 6 – Technologie LMD	92
4.2.5	Povlak Ferro 55 – Technologie LMD (FeCrMo).....	99
4.3	Návrh metodiky a experimentální ověřování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků	106
4.3.1	Povlak NiCrBSi - Technologie HVOF.....	109
4.3.2	Povlak WC-Co-Cr – Technologie HVOF	110
4.3.3	Povlak Nistelle C276W - Technologie LMD	111
4.3.4	Povlak Stellite 6 – Technologie LMD	111
4.3.5	Povlak Ferro 55 – Technologie LMD.....	112
4.4	Návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.....	113
5.	Diskuze	118
5.1	Výsledky z metodiky testování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků	118
5.2	Výsledky z metodiky testování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků	120
5.3	Výsledky z metodiky testování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.....	122
5.4	Závěrečná diskuze nad dosaženými výsledky s ohledem na využití v TOS VARNSDORF a.s. .	122
6.	Splnění cílů práce	124
7.	Závěr.....	125

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Jednotka	Název, popis
A		Axiální směr měření
A	[μm^2]	Plocha zrna
a	[g peak]	amplituda budícího zrychlení
Al		Chemická značka hliníku
APS		Atmospheric Plasma Spray – atmosferický plasmový nástřik
AR	[-]	Aspect ratio, tvarový faktor
C		Chemická značka uhlíku
CBN		Kubický bor nitrid
CNC		Computer Numerical Control – číslicové řízení
Cr		Chemická značka chromu
ČSN		Česká státní norma
ČVUT		České vysoké učení technické v Praze
D	[μm]	Velikost zrna
d	[μm]	Vzdálenost krystalografických rovin
DIN		Deutsche Industrie-Norm
EBSDElektronů		Electron BackScatter Diffraction – Difrakce zpětně odražených elektronů
EDS		Energiově-disperní spektrum
F	[Hz]	Frenkvence
F	[mm/min]	Posuv
F	[N]	Síla
Fe		Chemická značka železa
FJFI		Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
FS		Fakulta strojní
FWHM linie	[$^{\circ}2\Theta$]	Full Width at Half Maximum – pološířka analyzované difrakční
h	[mm]	Hloubka, milimetr
HV 0,1		Tvrдость při zatížení 100 gramů
HV0,1		Tvrдость při zatížení 100 gramů
HVOF		High Velocity Oxygen Fuel – vysokorychlostní nástřik plamenem
LMD		Laser Metal Deposition – laserové práškové navařování
Mn		Chemická značka manganu
Mo		Chemická značka Molybdenu
n	[-]	Řád reflexe (násobná konstanta)
Ni		Chemická značka niklu
P		Chemická značka fosforu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu

RTG		Rentgenové záření
S		Chemická značka síry
SEM		Skenovací elektronová mikroskopie
Si		Chemická značka křemíku
T		Tangenciální směr měření
TUL		Technická univerzita v Liberci
v	[m/min, m/s]	Řezná rychlost
v_k	[m/s]	Obvodová řezná rychlost kotouče
VÚTS		Firma VÚTS, a.s.
VZÚ		Výzkumný zkušební ústav v Plzni
Wt%	[%]	Hmotnostní podíl zastoupení prvku
ZN		Zbytková napětí
Θ	[°]	Difrakční úhel
	[°C]	Teplota
λ	[m]	Vlnová délka záření
σ	[MPa]	Napětí
$\sigma_{\min, \max}$	[MPa]	Napětí minimální, maximální
σ_n	[MPa]	Napětí normálové
σ_{zbyt}	[MPa]	Napětí zbytkové
Ψ	[°]	Úhel mezi povrchem vzorku mřížkovou rovinou

1. Úvod

Téma disertační práce bylo definováno ve spolupráci s předním světovým výrobcem obráběcích strojů, českou firmou TOS VARNSDORF a.s. a reaguje na reálnou problematiku současného strojírenství, resp. oboru obráběcích strojů. Uživatelé obráběcích strojů soustředí své požadavky zejména na přesnost dosahovanou na vyráběných dílcích, jakost jejich povrchu, výrobní výkon a spolehlivost (funkční i procesní). Velká část průmyslu je v dnešní době nějakým způsobem navázána na obor automotive, kde je z pohledu automobilek kladen velký tlak na dodavatele komponent, a to nejen na dodávky v požadované kvalitě, ale také v požadovaný čas. Eliminují se skladovací plochy na úkor výrobních linek a termín dodání komponent je požadován tzv. „just in time“. Tento způsob výroby klade velké nároky na spolehlivost výrobních zařízení. Půjdeme-li ještě dále, současné trendy směřují k prvkům umělé inteligence, vzájemné komunikaci výrobních zařízení a prediktivní údržbě. Zvýšením kvality stěžejních součástí obráběcího stroje dojde k posílení zmíněných faktorů.

Z pohledu disertační práce je pozornost zaměřena na stěžejní součásti vřeteníku obráběcího stroje, jako je pracovní vřeteno, duté vřeteno, náhonové hřídele apod. Tyto součásti jsou vystaveny různorodým dynamickým účinkům, které mohou zapříčinit poškození dané součásti a mít tak negativní vliv na výslednou kvalitu obráběného dílce a zároveň také na celkovou spolehlivost obráběcího stroje. Četné výsledky experimentálního výzkumu v oboru pružnosti a pevnosti, pokrok v teoretickém rozpracování mechaniky lomu a v neposlední řadě i rozbor příčin poruch reálných strojních částí přesvědčivě ukázaly na významnou roli povrchové vrstvy a její vliv na vlastnosti a životnost součástí.

Jednou ze zásadních vad povrchové vrstvy, která se při různorodém dynamickém namáhání pracovního vřetena velmi často objevuje, je vibrační koroze. Tato práce se tedy zabývá tím, jak docílit zamezení vzniku vibrační koroze.

Hlavním cílem předkládané disertační práce je navrhnout vhodný materiál a složení povrchové vrstvy (povlaku), který by minimalizoval proces vzniku vibrační koroze u dutého a pracovního vřetene, které jsou důležitou součástí CNC obráběcího stroje.

K dosažení vytyčeného cíle je nutné nejprve provést rozbor vzniku vibrační koroze. Dále vytvořit kompletní metodiku pro testování mechanických a materiálových vlastností vhodně navržených a vytvořených povlaků. A v neposlední řadě navrhnout a vytvořit metodiku pro testování tvorby vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce.

2. Současný stav problematiky

2.1 Integrita povrchu

Četné výsledky experimentálního výzkumu v oboru pružnosti a pevnosti, pokrok v teoretickém rozpracování mechaniky lomu a v neposlední řadě i rozbor příčin poruch reálných strojních částí přesvědčivě ukázaly na významnou roli povrchové vrstvy a její vliv na vlastnosti a životnost součásti.

Otázka studia vlivu jakosti obrobené plochy na funkční vlastnosti je věnována stále větší pozornost a zdá se, že aplikace vlastností povrchové vrstvy na opotřebení má stejný význam jako např. mazání. Význam znalostí jakosti povrchové vrstvy je možné vidět v tom, že znalost podmínek vzájemného styku dvou ploch při jejich vzájemném relativním pohybu povede k předurčování a řízení jejich tvarové přesnosti, drsnosti povrchu, velikosti zpevnění, velikosti a směru zbytkových napětí apod. Je zřejmé, že pod pojmem jakost povrchu z hlediska technologie výroby je třeba chápat nejen přesnost rozměrů, drsnost povrchu, přesnost geometrického tvaru a polohy, ale je také nutné sledovat chemické a fyzikální změny vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobené součásti, vzniklých v důsledku vlastního procesu řezání. Všichni činitelé ovlivňující jakost povrchové vrstvy jsou totiž úzce svázány s technologickými výrobními procesy, které jsou používány při výrobě a dokončování součástí. Z tohoto hlediska se jeví jako nutné provádět komplexní rozbor technologických operací, které se podílejí na vytváření funkčních vlastností součástí [1].

Struktura povrchu obrobené plochy patří mezi základní kvalitativní požadavky strojních součástí, a proto je kladen velký důraz na specifikaci jednotlivých parametrů popisujících povrch součásti. Při posuzování nově vzniklého povrchu je nutné vycházet z toho, že obrábění je řezný proces, jehož podstatou je proces plastické deformace, která ovlivňuje jakost povrchové vrstvy. Vlastnosti realizované povrchové vrstvy určují životnost a spolehlivost součástí, zvláště těch, které pracují za extrémních podmínek zatěžování. Z těchto důvodů je nutné mít k dispozici informace o způsobu ovlivňování stavu povrchové vrstvy, která vzniká po technologických operacích obrábění a možnosti zabezpečení její konstantní vlastnosti [1].

Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součásti, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů a případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch. Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, lze shodně posuzovat jako změny jakosti [2]. Základními kvalitativními charakteristikami pro hodnocení kvality obrobené plochy jsou drsnost a přesnost. Je však i řada dalších charakteristik kvality povrchu, resp. povrchové vrstvy. Souhrn všech charakteristik, kterými je možno hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jejím funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti se označuje jako integrita povrchu. [2]

Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.

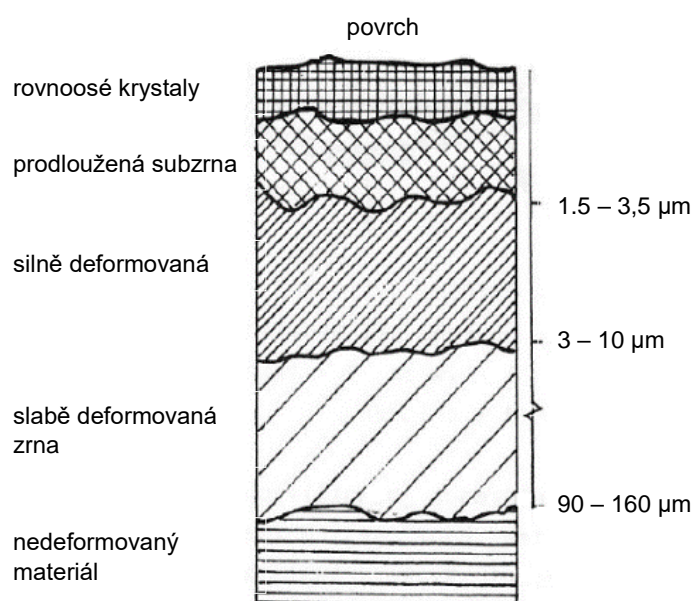
Při posuzování vlivu technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku při jeho výrobě je možné vycházet z druhu a intenzity energií, které se na jeho vniku podílejí. Jedná se o energii mechanickou, tepelnou a chemickou. Je nutné ale brát v úvahu i vlivy metalurgické, fyzikální a také vlastnosti materiálu. To všechno ovlivňuje vznik zbytkových napětí. [3]

Každá technologická operace dosahuje přestavby zbytkových napětí svým vlastním způsobem jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. Při obrábění je podstatou vzniku zbytkových napětí pružně-plastická deformace v oblasti tvoření třísky. Důležitým faktorem je doba působení podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů. To se výrazně projevuje např. při broušení, kdy ohřev je velmi rychlý a krátkodobý, rychlost ohřevu i doba chladnutí je extrémní [3].

2.2 Jakost povrchové vrstvy a její hodnocení

Jakost povrchové vrstvy, která byla dokončena některou technologickou operací, může být charakterizována řadou parametrů, jako jsou geometrický tvar, rozměr, struktura povrchu, fyzikálně mechanické vlastnosti, hloubka zpevnění, zbytková napětí a další. Významnou oblastí hodnocení jakosti povrchové vrstvy součástí je sledování změn v povrchové vrstvě. Tyto změny se stávají velmi významnými zvláště u součástí vystavených extrémním podmínkám zatěžování. Změny v povrchové vrstvě ovlivňují únavové vlastnosti obrobku, podmínky šíření lomu apod. Je pochopitelné, že znalost a ovlivňování vlastností povrchové vrstvy podle požadavků konstrukce znamená zhospodárnění vyráběných zařízení [3].

Povrchovou vrstvu součásti lze hodnotit ze dvou hledisek. Z hlediska jejího vzhledu tzn. její vnější hodnocení a z hlediska změn, které nastaly v materiálu směrem od povrchu funkční plochy. Oba tyto směry hodnocení vedou jednoznačně ke sledování a hodnocení poruch, které vznikly na funkční ploše součásti. Jedná se o poruchy, které vznikly jen v tenké povrchové vrstvě a poruchy, které vznikají v hloubce pod povrchem.



Obr. 1 Schéma změn v povrchové vrstvě, které nastávají při průchodu nástroje [4]

Na Obr. 1 je schematicky znázorněn povrch po obrobení společně s pásmy, které představují povrchovou ovlivněnou vrstvu. Hloubka jednotlivých vrstev (Obr. 1) se bude měnit a bude docházet i k jejich překrývání a to podle způsobu a metod jejich dokončování [4].

Poruchy podpovrchové zahrnují trhliny vzniklé při opracování a mohou jít i do větší hloubky než je uvažovaná šířka pásma ovlivněná účinky opracování. V těchto případech se bude jednat o poruchy vzniklé v důsledku koncentrace napětí u překážek bránících pohybu dislokací. Výsledná podpovrchová porucha vzniká sčítáním napětíových špiček od zatížení a zbytkových napětí vzniklých po technologické operaci [4].

Při hodnocení vlivů technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku je nutné vycházet z intenzity a druhů energií využívaných při přeměně polotovaru na hotovou součást. Na základě rozboru vzniklých stavů se objevuje nutnost hodnocení povrchové vrstvy součásti a to z hlediska jejich funkčních vlastností.

Metody pro hodnocení vlastností povrchové vrstvy je možné rozdělit do dvou skupin [3]:

- metody sledování a hodnocení jednotlivých parametrů povrchové vrstvy,
- metody komplexního hodnocení povrchové vrstvy.

Při hodnocení jednotlivých parametrů půjde o sledování následujících veličin:

- struktura nerovnosti povrchu,
- existence trhlín,
- vzhled povrchu (textura povrchu),
- změny mikrostruktury,
- změny mikrotvrdosti, počet poruch.

Komplexní hodnocení zahrnuje hodnocení jednotlivých parametrů, jak bylo uvedeno předtím a dále:

- velikost a rozložení zbytkových napětí,
- mez únavy při zatížení,
- odolnost proti opotřebení,
- sklon ke korozi pod napětím.

Textura a morfologie obrobeného povrchu se hodnotí pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu, kde lze velmi dobře posoudit jak mechanismus vzniku nového povrchu, tak i vady a poruchy, které se objevují na obrobené ploše. Jedná se o poruchy hrubé vzniklé v důsledku plastické deformace nebo o nalepené částice obráběného materiálu, stejně jako o stopy po obrábění a trhliny.

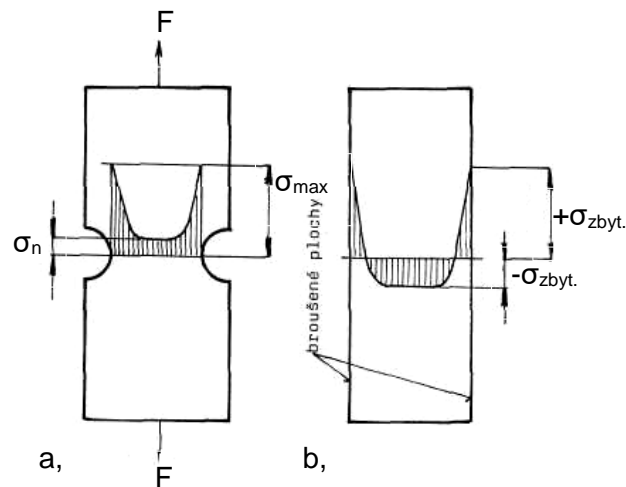
Jemné poruchy představují stopy po nástroji, malé izolované dutiny, mikrotrhliny a další poruchy vzniklé v důsledku nedokonalého tvaru břitu nástroje.

Ostatní hodnocené parametry jsou ovlivněny teplotním a silovým působením technologického procesu a také chemickými procesy, které se zúčastňují při vytváření nového povrchu. Jedním z významných parametrů jakosti povrchové vrstvy je rozložení zbytkových napětí.

2.3 Vznik zbytkových napětí po obrábění a jejich vliv na funkční vlastnosti součásti

Intenzivní plastické deformace a teplota, které jsou průvodním jevem při odebrání přídavku obráběním, jsou příčinou vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku.

Mechanismus jejich vzniku bude popsán dále. Jejich vliv na funkční vlastnosti součásti lze nejlépe demonstrovat porovnáním s působením konstrukčního vrubu [4].



Obr. 2 Porovnání průběhu napětí v kořeni vrubu a podpovrchové napětí po broušení [4]

Z Obr. 2 je patrné, že průběh napětí v kořeni vrubu je analogický napětí, vyvolanému určitou technologií výroby součástí. Proto se také někdy tento účinek technologického procesu výstižně označuje jako "technologický vrub". Technologický vrub je však o to nebezpečnější, že jej nelze běžnými kontrolními metodami určit a navíc, že nežádoucí zbytková napětí mohou vznikat např. při práci s otupeným nástrojem, při nedostatečném přívodu procesní kapaliny, nebo při jiné „drobné“ technologické nekázni, která se obvykle toleruje [4].

2.3.1 Klasifikace napětí v kovových polykrystalických materiálech

Napětí, která se mohou vyskytovat v uzavřených systémech lze roztřídit podle různých hledisek. Obvykle používaná klasifikace bere v úvahu příčinu, která toto napětí vyvolala; jiné hledisko vychází z hodnocení doby, po kterou napětí působí a konečně se druh napětí posuzuje podle relativní velikosti objemu, ve kterém dosahuje rovnováhy [4].

Působí-li na soustavu vnější síly nebo momenty, vznikají v ní napětí, která se označují jako "vložená", na rozdíl od "vnitřních" napětí, působících v systému, aniž byl těmito vnějšími silami nebo momenty zatěžován. Tato vnitřní napětí musí být v uzavřené soustavě v rovnováze.

Poruší-li se celistvost soustavy (vzorku), dojde obvykle k přestavbě vnitřních sil a momentů, což se projeví změnami rozměrů (deformací) soustavy.

Podle doby trvání rozlišujeme vnitřní napětí [4]:

a) okamžitá (časová) - zanikají po odstranění příčin, které je vyvolaly (pokud vzniklá napětí nepřesáhla mez kluzu). Jsou to např. napětí způsobená rozdílem teplot v různých místech součásti a zanikající při vyrovnání tepla, napětí vznikající při upnutí součásti apod.

b) zbytková (trvalá) - zůstávají i po odstranění příčin, které je způsobily. Podmínkou jejich vzniku je, že vložená nebo jinak vyvolaná napětí přesáhnou mez kluzu.

Přesto, že okamžitá vnitřní napětí po skončení technologické operace vymizí, mohou být zdrojem nepřipustných tvarových nepřesností. Jako typický příklad lze uvést situaci při rovinném broušení součásti magneticky upnuté.

Pro kvalitu součásti jsou nebezpečnější trvalá (zbytková) napětí, která se běžnými metodami kontroly neprokáží.

Podle objemu, ve kterém dosahují tato vnitřní napětí rovnováhy, rozlišujeme [4]:

Zbytkové napětí **I. druhu**, které dosahuje rovnováhy v makroobjemu součásti, t.j. jeho velikost se nemění (podstatně) v makroskopických oblastech. Za makroskopickou oblast materiálu se mohou považovat i nekonečně tenké, ale plošně rozsáhlé oblasti, ve kterých však může dosáhnout napětí ve směru kolmém k ploše vysokých gradientů.

Důležité je, že porušením silové a momentové rovnováhy (např. rozříznutím vzorku) u zbytkových napětí I. druhu dojde vždy ke změně makroskopických rozměrů tělesa.

Zbytkové napětí **II. druhu** se vyrovnává v oblasti několika zrn, tj. jeho velikost se mění od jednoho krystalového zrna nebo mosaikového bloku k druhému; tato napětí jsou podmíněna anizotropií zrna a jsou tedy (přibližně) homogenní jen v malých oblastech u polykrystalických kovů v objemech jednotlivých zrn.

Porušení rovnováhy (rozříznutím vzorku) nemusí vyvolat změny makroskopických rozměrů tělesa.

Zbytkové napětí **III. druhu** se projevuje v objemu několika atomových vzdálenosti a je nehomogenní i v nejmenších oblastech materiálu. Tato napětí dosahují rovnováhy teprve v dostatečně velké části zrna. Porušením této rovnováhy nedojde nikdy ke změnám v makroskopických rozměrech tělesa.

Zbytková napětí všech tří druhů se vyskytují zpravidla současně.

2.3.2 Technologické příčiny vzniku zbytkových napětí

Tato napětí vznikají podle charakteru technologické operace působením některé z dříve uvedených příčin, nejčastěji ovšem jejich kombinací.

Vznik napětí při obrábění se přisuzuje těmto příčinám [4]:

I. Při oddělování třísky dochází v oblasti zóny řezání k intenzivní celkové deformaci. Tato pružně-plastická deformace zasahuje i pod obrobený povrch; navíc zde působí pýchování povrchové vrstvy způsobené tím, že břit není ideálně ostrý a část nastavené hloubky záběru se

neodřízne. Z fyzikálního hlediska lze vysvětlit vznik zbytkových napětí např. tím, že při plastické deformaci kovu klesá jeho hustota a roste měrný objem. Je zřejmé, že při zvýšení měrného objemu v povrchové vrstvě vznikne pnutí tlakové.

II. Při obrábění materiálů, $R_m / R_p 0,2 < 1,25$ kde se tvoří elementární (drobivá) tříška. Při tvoření jednotlivých elementů se narušuje spojení mezi třískou a obráběným materiálem, takže doplňující účinek napětového pole třísky se do obrobeného povrchu nepřenáší. Třecí síly na hřbetu se snaží prodloužit zrna v povrchové vrstvě a zvětšit tak povrch, čemuž brání níže ležící neovlivněné vrstvy. V povrchové vrstvě vznikne tedy zbytkové napětí tlakové.

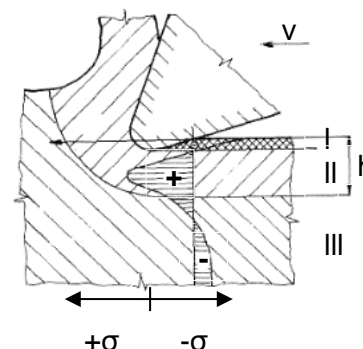
III. Při obrábění houževnatých a plastických kovů a slitin, kdy tříška a spojení mezi třískou a obráběným materiálem se nenarušuje. Dochází k deformaci zrn základního materiálu v důsledku jejich vazby s materiálem třísky; zrna (u obrobeného povrchu) se deformují přibližně ve směru odchodu třísky. Může dojít k přeorientaci zrn povrchových vrstev (protažení ve směru kolmém na obrobený povrch a stlačení ve směru rovnoběžném s povrchem). Povrchová vrstva se v důsledku toho snaží zaujmout menší povrch, a protože spodní vrstvy zůstávají beze změny, vzniká zbytkové pnutí tahové.

IV. Podle modelu sestaveného pro vysvětlení deformačních jevů při kontaktních tlacích válce a elasticko-plastické roviny se předpokládá, že při obrábění plastických materiálů vzniká při velkém zatížení břitu zbytkové napětí tahové, při menším zatížení slabších vrstev napětí tlakové, analogicky s operací protlačování.

V. Při vzniku vyšších teplot v povrchové vrstvě vznikne napětí tahové, tj. při teplotní deformaci přesahující mez kluzu dojde k plastickému zkrácení povrchové vrstvy, čemuž brání spodní nedeformované vrstvy.

Příklad vzniku zbytkového napětí při obrábění plastického materiálu je na Obr. 3.

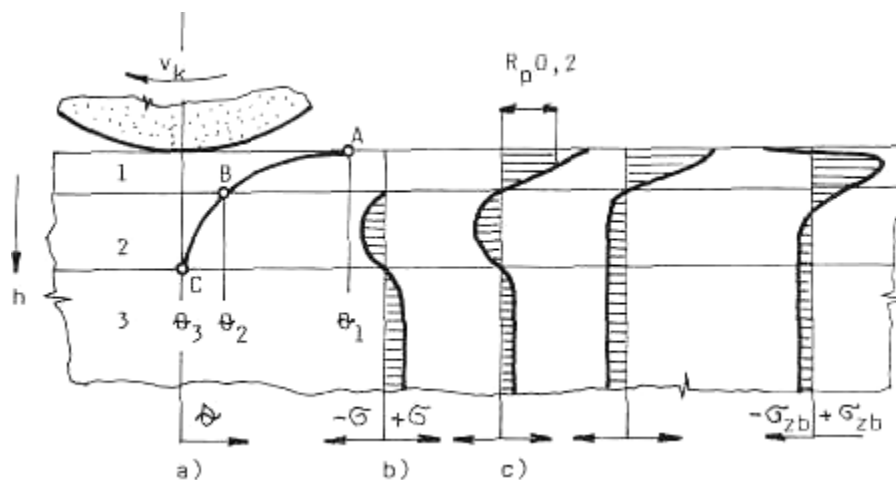
- I - oblast tlakových zbytkových napětí vyvolaných třením hřbetu o obrobenou plochu,
- II - oblast tahových napětí vznikajících plastickým stlačením materiálu,
- III - neovlivněná oblast.



Obr. 3 Schéma vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě při obrábění plastických kovů [4]

Z hlediska potřeb praxe má největší význam sledování kvality povrchové vrstvy po broušení a dokončování. Tyto metody se téměř vždy zařazují do výrobního postupu obrobku vzhledem k požadavkům na přesnost rozměrů a geometrického tvaru a na drsnost povrchu součástí. Broušení se předepisuje také prakticky u všech součástí, na které jsou kladeny vysoké

funkční požadavky [4]. Dobře vystihuje mechanismus vzniku zbytkových napětí po broušení model, uvedený na Obr. 4.



Obr. 4 Schéma vzniku zbytkových napětí při broušení [4]

Podle tohoto modelu vznikají zbytková napětí takto [4]:

Specifická práce, potřebná k oddělování třísek, se téměř celá přemění v teplo, které v místě styku kotouče s obrobkem z velké části přechází do povrchové vrstvy.

Předpokládáme, že v povrchové vrstvě je teplota rozložena podle Obr. 4a. Při teplotě větší než Θ_2 nechť je vrstva 1 v dokonale plastickém stavu. Její odpor proti deformaci je tedy malý, takže nepůsobí na vrstvu 2. Vrstva 2 má teplotu Θ_2 až Θ_3 a v důsledku teplotních rozměrových změn se deformuje pouze pružně. Vrstva 3 se broušením již neohřeje.

Průběh okamžitých napětí při tomto rozložení teplot je na Obr. 4b. Dokonale plastická vrstva 1 je bez napětí, vrstva 2 se snaží roztáhnout (tlakové pnutí), čemuž brání vrstva 3 (vyrovnávací tahové pnutí).

Po přejetí kotouče nastává chladnutí; v určitém okamžiku bude teplota ve vrstvě 1 nižší než Θ_2 , takže tato vrstva má snahu se zkrátit, čemuž klade odpor vrstva 2 a 3. Protože vrstva 1 již při teplotě Θ_2 přešla z dokonale plastického v pružně-plastický stav, vzniknou v ni okamžitá pnutí tahová (podmínkou vzniku zbytkových napětí je, jak bylo dříve uvedeno, že tato napětí musí být větší, než je mez kluzu při teplotě Θ_2), ve vrstvě 2 a 3 vyrovnávací okamžitá pnutí tlaková. Na Obr. 4c je naznačen konečný průběh zbytkových napětí po broušení.

Z těchto poznatků vyplývá, že vznik zbytkových napětí po broušení je velmi složitým procesem, jehož mechanismus není ještě teoreticky dostatečně objasněn a ani experimentálně zcela prozkoumán. Pro jeho poznání bude nutné blíže objasnit některé otázky pružně-plastických stavů a zákonitosti jejich šíření, jakož i problémy vzniku a rozdělení tepla a teplotního pole v zóně řezání [4].

2.4 Vytváření funkčního povrchu součásti

Mají-li být zabezpečeny funkční vlastnosti výrobků, je nutné volit při jejich výrobě takové technologické metody, které dávají předpoklady, že bude zajištěn jejich potřebný tvar, rozměr a fyzikálně mechanické vlastnosti, které odpovídají požadavkům provozních podmínek. Tyto vlastnosti jsou závislé na vlastnostech použitého materiálu a na interakci tohoto materiálu s materiálem nástroje, která ovlivňuje především vlastnosti povrchové vrstvy.

Nejvýznamnější vliv na vlastnosti povrchové vrstvy při řezání má deformační rychlost, která výrazně ovlivňuje mechanismus zatěžování materiálu a jeho oddělení ve tvaru třísky. Smyková napětí určená z řezných podmínek ukazují, že při stejné hodnotě deformace jsou vyšší než napětí na mezi kluzu daného materiálu. To je způsobeno mechanismem zpevňování, který ale ovlivňuje průběhy smykových napětí jen do určité hranice. Po jejím překročení začne působit v důsledku růstu řezné rychlosti mechanismus odpevňování a hodnoty smykových napětí se mění.

Úvahy o oddělení třísky jako procesu lomu vycházejí z toho, jaké změny nastávají v zrnech v blízkosti břitu nástroje. Druh a charakter lomu závisí na obráběném materiálu a na podmínkách deformace, které jsou při řezání určovány především řeznými podmínkami.

Při hodnocení tvorby nového povrchu je možné vyjít ze skutečnosti, jaké energetické zdroje se na tom podílejí. Kdy a jak která energie bude působit, závisí na pracovních podmínkách. Jako hlavní zdroje je možné uvažovat energii mechanickou a tepelnou. Vzhledem k tomu, že řezání probíhá v určitém prostředí, přistupuje a uvažuje se i energie chemická, případně valenční charakterizovaná fyzikálně mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu. U některých metod opracování je třeba uvažovat i některé jiné přídavné energie (ultrazvuk, elektrickou energii apod.). Vnější energie dodaná do materiálu v něm zůstává při hodnocení působení vnějších sil, protože podmiňuje velikost smykového napětí při plastické deformaci [3].

Řezání, které je plastickou deformací odřezávané vrstvy materiálu a vyvolávající plastickou a elastickou deformaci podpovrchové vrstvy, musí využívat energetických zákonitostí působících na materiál, aby bylo možné vysvětlit vlastnosti nově vzniklého povrchu.

2.4.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti povrchové vrstvy

Při hodnocení funkčních vlastností součásti se často vychází z předpokladu, že povrchová vrstva součásti má stejné vlastnosti jako celý základní materiál. Po dokončovacích operacích použitých při výrobě se ale vlastnosti povrchové vrstvy značně liší od základního materiálu.

Pro hodnocení fyzikálně mechanických vlastností povrchové vrstvy je možné využít tato kritéria [3] [4]:

- velikost deformace povrchové vrstvy,
- změna tvrdosti povrchové vrstvy,
- změna mikrostruktury,
- velikost a charakter zbytkových napětí,
- struktura profilu nerovnosti,
- změna morfologie obrobeneho povrchu,
- difuze v povrchové vrstvě.

Při řezání dochází v povrchové vrstvě také ke strukturálním změnám. Hloubka těchto změn se mění podle charakteru pracovní metody a pracovních podmínek, které ovlivňují množství vzniklého tepla. Toto teplo může způsobit fázové přeměny především v povrchové vrstvě součástí. Tyto vrstvy jsou velmi tenké, snadno se poruší a bývají často příčinou snížení odolnosti proti opotřebení nebo únavové pevnosti. Strukturální nejednotnost povrchové vrstvy vyvolává zbytková napětí, která mohou být příčinou vzniku trhlin a poruch součástí.

Plastická deformace jako základní mechanismus vytváření nových ploch součástí řezáním způsobuje vznik zbytkových napětí proto, že povrchová vrstva, která je plasticky deformována, mění svůj měrný objem, je také nerovnoměrně deformována, což způsobuje protahování horních vláken a růst tlakových zbytkových napětí orientovaných ve směru řezání. Místní ohřátí způsobuje vznik tahových napětí, stejně jako fázové přeměny [5].

2.5 Zbytková napětí a jejich stanovení

Pro měření zbytkových napětí není vytvořena jednoduchá obecně užívaná metodika přesto, že znalost orientace a velikosti zbytkových napětí je, jak bylo uvedeno, velice důležitá.

Všechny metody zjišťování zbytkových napětí je možné rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Metody zjišťování zbytkových napětí je možné také rozdělit podle způsobu určování napětí na analytické, výpočtové a experimentální.

Destruktivní metody jsou založeny na měření deformace při odstraňování vrstvy materiálu se zbytkovým napětím. Nedestruktivní metody neovlivňují součást při jejím měření.

Podle principu je možné metody měření zbytkových napětí rozdělit na:

- mechanické (měření deformace)
- fyzikální (měření změn vlastností)
- chemické (změny vyvolané chemickými procesy)

Podle charakteru měřené veličiny se jedná o metody:

- přímé,
- nepřímé - zbytková napětí se určí podle změny jiných veličin.

Zjišťování zbytkových napětí se provádí buď v těsné blízkosti povrchu, nebo v celém průřezu součástí. Podle napjatosti je možné měřením stanovit napjatost prostou, rovinnou nebo prostorovou. Přehled metod pro zjišťování zbytkových napětí je uveden v Tab. 1.

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
podélné pásy z kroužků			
obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě	
	křehké laky	vznik trhlin	
	křehké modely	vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
	vnitřní tlumení		
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Tab. 1 Metody zjišťování zbytkových napětí [3]

2.5.1 Destruktivní metody

Mechanické metody (destruktivní metody) stanovení zbytkových napětí jsou založeny na měření deformace vyvolané porušením rovnováhy vnitřních napětí při odstranění částí objemu (vrstvy) součásti tj. porušením její celistvosti. Ze změřené deformace se stanovuje průměrná hodnota napětí.

Nevýhodou těchto metod je poškození součástí a určení pouze průměrných hodnot *napětí l. druhu*. Některé metody oddělování vrstev nebo částí vzorku mohou vyvolat přídavná napětí, která potom zkreslují výsledek měření. Jednotlivé metody se od sebe liší tvarem zkušebních vzorků, metodou výpočtu a možnostmi stanovení jednoosé nebo více osé napjatosti.

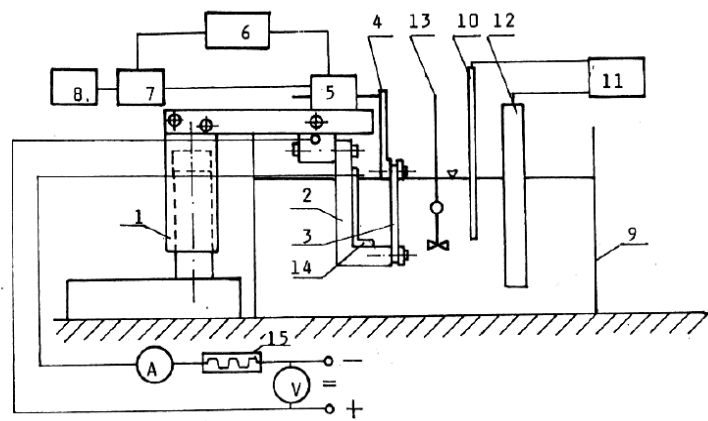
Složky napětí pro stanovení stavu napjatosti a přetvoření měřené součásti se nedají měřit přímo, ale z jejich projevů.

Destruktivní metody:

I. Odleptávání povrchu

Při této metodě dochází k plynulému chemickému nebo elektrolytickému rozpouštění povrchové vrstvy vzorku, u něhož je napětí zjišťováno. Vzniklá deformace uvolněné vrstvy se registruje. Podle tvaru vzorku a modulu pružnosti se určí velikost napětí v určité hloubce pod povrchem. Přesnost této metody je dána přesností určení odleptané vrstvy a přesností stanovení velikosti deformace [6].

- 1- stojan
- 2- upínací třmen
- 3- zkušební vzorek
- 4- měřící třmen
- 5- indukční snímač
- 6- napájecí obvody
- 7- obvod pro el, nastavení polohy snímače
- 8- registrační přístroj
- 9- nádoba s elektrolytem
- 10- kontaktní teploměr
- 11- autom. spínací relé
- 12- topné tělísko
- 13- míchadlo
- 14- katoda
- 15- variátor

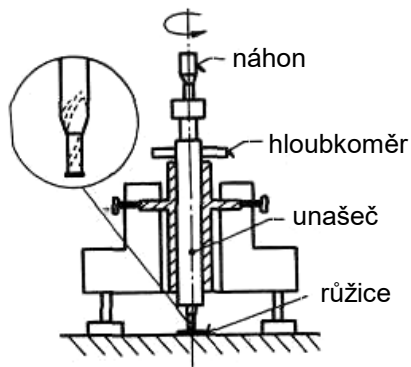


Obr. 5 Zařízení pro stanovení zbytkových napětí odleptávací metodou [4]

II. Vrtání povrchové vrstvy

Tato metoda umožňuje provádět analýzu rovinné napjatosti na povrchu součásti a při postupném odvrtávání a také stanovení gradientu napětí v hloubce materiálu. Podstatou této metody je uvolnění zbytkových napětí vyvrtáváním díry o průměru 1 až 4mm do hloubky 1 až 1,5 násobku průměru vrtané díry. Narušením vnitřní rovnováhy napětí dojde k deformaci materiálu v okolí vrtané díry. Uvedenou metodou lze měřit pouze *napětí I. druhu*. Po uvolnění zbytkového napětí je třeba určit velikost vzniklé deformace v okolí vyvrtané díry. Největší deformace je na jejím okraji a se zvětšováním vzdálenosti od jejího okraje klesá. Pro měření velikosti deformace se používá ve většině případů tenzometry [3].

Po nalepení růžice je v průřezu jednotlivých měřících tensometrů vrtána díra pro uvolnění napětí. Podle uspořádání je zřejmé, že není možné měřit deformaci na okraji vyvrtané díry, ale až v určité vzdálenosti od jejího okraje. To ukazuje na menší citlivost této metody, protože v závislosti na průměru díry, vzdálenosti a rozměru měřící mřížky je měřeno pouze 25-40% uvolněné deformace [3].



Obr. 6 Zařízení pro stanovení podpovrchových zbytkových napětí metodou odvrtávání ovlivněných vrstev [4]

III. Rozpouštění povrchu

Po odleptání povrchové vrstvy se projeví trhlinkami na povrchu pouze tahová napětí, velikost napětí se hodnotí vizuálně.

2.5.2 Nedestruktivní metody

Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí mají tu výhodu, že při jejich použití nedochází k poškození součásti, ale jsou náročnější na přístrojové vybavení. Z těchto metod je nejrozšířenější metoda rentgenové difrakce.

I. Rentgenová difrakce

Měření zbytkových napětí touto metodou se podstatně liší od ostatních metod měření. Difrakce může měřit změny mřížkové vzdálenosti jen do hloubky několika mikronů, tj. jen ve velmi malé povrchové vrstvě materiálu. Metoda umožňuje zjišťovat napětí ze změn vzdáleností atomových rovin krystalů, které nastávají v důsledku plastické deformace. Změny vzdáleností atomových rovin jsou ovlivňovány všemi druhy napjatosti, takže rentgenografickou metodou se zjišťuje celkové napětí, včetně *napětí II. a III. druhu*, zatímco mechanické metody určují pouze *napětí I. druhu*.

Základní podmínkou pro difrakci je, aby pro náhodně orientované krystaly splňovaly jejich krystalické roviny Braggovu rovnici [3]:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta,$$

kde: λ ... je vlnová délka záření,
 n ... je řád reflexe (násobná konstanta),
 d ... vzdálenost krystalografických rovin,
 θ ... úhel difrakce.

Z materiálu po dopadu RTG záření jsou paprsky difraktovány ve svazku, který tvoří kuželové plochy. Změna mřížkové vzdálenosti vyvolaná působením vnějších sil nebo jiným mechanickým stavem nutně vyvolá změnu difrakčního úhlu. Toto záření je zachycováno pomocí detektoru a převedeno na signál, který se dále zpracovává digitálními metodami [3].

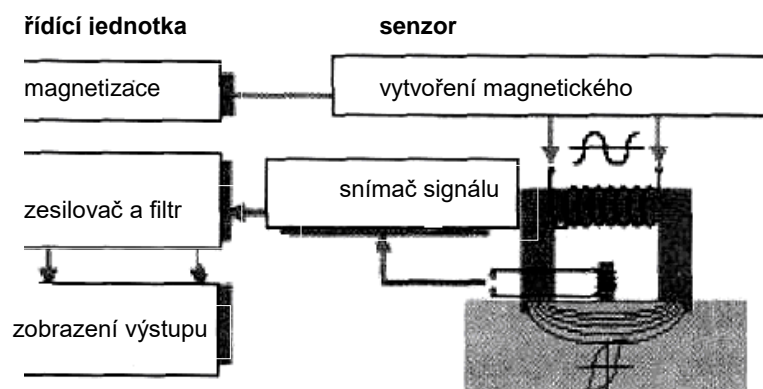
Spolehlivé výsledky měření je možné získat za následujících předpokladů:

- provádět větší počet měření,
- jemnozrnná struktura materiálu,
- vhodně upravit povrch součásti v místě měření.

II. Analýza Barkhausenovým šumem

Metoda zjišťování zbytkových napětí metodou Barkhausenova šumu se ukazuje jako další významná metodika pro hodnocení zbytkových napětí na součástech dokončených různými technologickými operacemi.

U feromagnetických materiálů je Barkhausenův signál vyvolán změnami v magnetizaci, které jsou způsobeny pohybem stěn magnetických domén. Tyto pohyby stěn domén jsou vyvolány přivedením časově proměnlivého magnetického pole do materiálu součásti, které nutí stěny domén hledat nové rovnovážné polohy. Potom příznivě orientované domény rostou na úkor domén druhých. Během růstu mohou pohybující se stěny domén zastavit na hranicích zrn, u vměstků, a nebo se soustředit i dislokací. To vede k nepravidelnému pohybu, kterým vzniká signál označovaný jako Barkhausenův šum [7].



Obr. 7 Schéma uspořádání měřícího zařízení [7]

Amplituda Barkhausenova šumu závisí na napětí a na mikrostruktuře. U oceli s kladnou magnetickou konstantou existuje oblast, kde pružná tahová napětí ve směru magnetizace zvyšují amplitudu Barkhausenova šumu, zatím co tlaková napětí jej snižují. Tahová napětí mohou zvyšovat počet pohybujících se stěn domény, dezorientovat, nebo modifikovat bránící překážky. Tlaková napětí na druhé straně podporují pohyb tvoření konců domén snížením počtu doménových stěn. Měření touto metodou je po provedení kalibrace velice rychlé a je vhodné zejména pro zjišťování odchylek od standardního stavu napjatosti [7].

Zbytkové napětí zjištěné rentgenograficky reprezentuje hodnotu z povrchu do hloubky jednotek mikronů, metoda Barkhausenova šumu poskytuje údaje o stavu povrchu do hloubky cca 20 mikrometrů [8].

2.6 Stávající způsob výroby klíčových komponent – pracovního a dutého vřetena

Mezi klíčové komponenty, které jsou vystavené dynamickému namáhání, jsou v případě strojů firmy TOS VARNSDORF a.s. pracovní a duté vřeteno. Stávající způsob výroby těchto dílců sice umožňuje dosažení požadovaných mechanických vlastností, nicméně během provozu obráběcího stroje se u těchto komponent objevuje vibrační koroze. Bohužel výskyt vibrační koroze není pravidelně se objevující jev, nýbrž její výskyt je nepravidelný a nedá se tedy svázat s konkrétními provozními podmínkami, na které by bylo možné se zaměřit.

Je tedy na místě popsat dostupné informace o daných klíčových komponentech, jako je materiál, ze kterého jsou součásti vyrobené, způsob výroby apod.

2.6.1 Současný způsob výroby vřetena

Pracovní vřeteno

Materiál používaný k výrobě pracovního vřetena je legovaná konstrukční ocel s označením dle normy DIN 34CrAlNi7, což odpovídá dříve uváděnému označení dle ČSN třídy 16347. Chemické složení oceli je následující: C 0,3-0,37%, Mn 0,4-0,6%, Si < 0,4%, P < 0,025%, S < 0,035%, Cr 1,5-1,8%, Mo 0,15-0,25%, Ni 0,85-1,15%, Al 0,8-1,2%. [9] Chemické složení oceli se ukázalo jako velmi důležité. Rozpětí legujících prvků se ukazuje jako klíčové ve vztahu k výsledným vlastnostem součásti, neboť nedodržení daného poměru legujících prvků se již ve fázi výroby (např. při obrábění) projevuje zhoršenou obrábělností apod. Aby bylo dosaženo požadovaných výsledných vlastností pracovního vřetena, je do výrobního postupu, kromě třískového obrábění, několikrát zařazen proces chemicko-tepelného zpracování. Poprvé je tomu hned v samém úvodu, kdy je pracovní vřeteno zušlechťeno na 900 + 50 MPa. Jedná se v podstatě o kalení, kdy je pracovní vřeteno ohřáto na teplotu okolo 900°C s následným ohlazením do olejové lázně o teplotě 25°C a následné popuštění při teplotě 640°C (několik hodin) a opět pozvolným ochlazením na teplotu okolí, čímž se dosáhne téměř požadované tvrdosti. Následně probíhá třískové obrábění, kdy je do materiálu zaneseno výrazné vnitřní pnutí, které je nutné eliminovat, což je realizováno žíháním v ochranné atmosféře pro odstranění vnitřního pnutí při teplotě 580°C po dobu několika hodin, s postupným náběhem na tuto teplotu a následně také pozvolným doběhem na teplotu okolí. Jako ochranná atmosféra je používán dusík. Výhodou žíhání v ochranné atmosféře je skutečnost, že dílce neobsahují okuje a takto vyžíhané dílce mohou být rovnou broušeny. Následně jsou realizovány další třískové operace. Posledním typem chemicko-tepelného zpracování, kterým pracovní vřeteno prochází, je nitridace. Jak již sám název procesu napovídá, dochází k finálnímu sycení povrchu pracovního vřetena dusíkem, kdy pracovní vřeteno získá finální požadovanou tvrdost zhruba 800 HV. Místa, která budou po nitridaci ještě obráběna (vyjma hlavního průměru vřetena), je potřeba před nitridací ošetřit speciální pastou, která zabraňuje přestupu dusíku z atmosféry do dílce. Finální povrch se následně ještě brousí a výsledně přesnosti se následně dosahuje technologickou operací superfinišování.

Přesný výrobní postup, teploty a časy jednotlivých operací chemicko-tepelného zpracování jsou předmětem know-how firmy TOS VARNSDORF a.s., nicméně autorovi práce jsou známy.



Obr. 8 Pracovní vřeteno obráběcího stroje TOS VARNSDORF a.s.

Duté vřeteno

Materiál používaný k výrobě dutého vřetena je výkovek z legované konstrukční oceli s označením dle normy DIN 34CrAl6, což odpovídá dříve uváděnému označení dle ČSN třídy 14340. Chemické složení oceli je následující: C 0,34%, Mn 0,75%, Si 0,25%, Cr 1,5%, Al 1% [10].

Aby bylo dosaženo požadovaných výsledných vlastností pracovního vřetena, je do výrobního postupu, kromě třískového obrábění, taktéž několikrát zařazen proces chemicko-tepelného zpracování. Postup výroby je však trochu rozdílný oproti pracovnímu vřetenu. V tomto případě je nejprve duté vřeteno vyhrubováno a je vytvořen průchozí otvor. Teprve následně je duté vřeteno zušlechtěno na $900 + 50$ MPa. Následně probíhá třískové obrábění, kdy je do materiálu zaneseno výrazné vnitřní pnutí, které je nutné eliminovat, což je realizováno žiháním v ochranné atmosféře pro odstranění vnitřního pnutí. Následně jsou realizovány další třískové operace. Posledním typem chemicko-tepelného zpracování, kterým pracovní vřeteno prochází, je nitridace, kdy duté vřeteno získá finální požadovanou tvrdost zhruba 800 HV. Místa, která budou po nitridaci ještě obráběna (vyjma hlavního průměru vřetena), je potřeba před nitridací ošetřit speciální pastou, která zabraňuje přestupu dusíku z atmosféry do dílce. Finální povrch se následně ještě brousí.

Přesný výrobní postup, teploty a časy jednotlivých operací chemicko-tepelného zpracování jsou předmětem know-how firmy TOS VARNSDORF a.s., nicméně autorovi práce jsou známy.



Obr. 9 Duté vřeteno obráběcího stroje TOS VARNSDORF a.s.

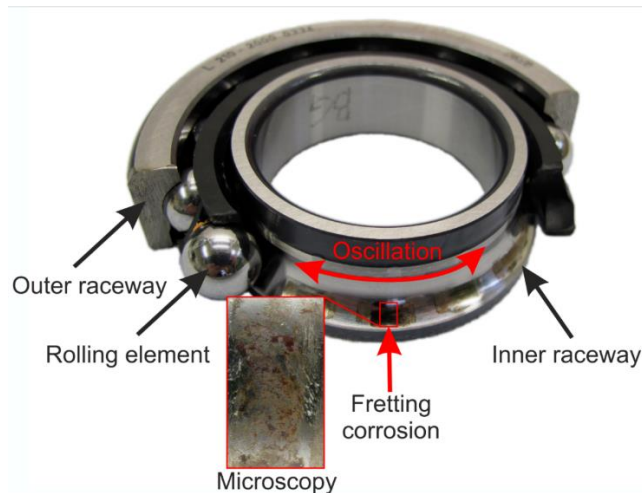
2.7 Vibrační koroze

Koroze je obecně definována jako samovolné, postupné rozrušení kovů či nekovových organických i anorganických materiálů (např. hornin či plastů) vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. Může probíhat v plynech, v kapalinách, ale i v zeminách či různých chemických látkách, které jsou s materiálem ve styku. Toto rozrušování se může projevat rozdílně; od změny vzhledu, až po úplný rozpad celistvosti [11].

Koroze kovů je fyzikálně-chemická interakce kovového materiálu a prostředí, která vede ke změnám vlastností kovu a může vyvolávat významné zhoršení funkce kovu, prostředí nebo technického systému, jehož složkami jsou kov a prostředí [12].

Vibrační koroze je proces zahrnující společné působení koroze a vibračního skluzu mezi dvěma styčnými povrchy. Toto korozní napadení může vznikat např. na mechanických spojích vibrujících konstrukcí [12].

Ke vzniku koroze vlivem vibrací dochází v místech styku kovových součástí, které se po sobě vzájemně periodicky pohybují. Při pohybu s velmi malou amplitudou dochází k odstraňování tenké vrstvy oxidů, což vede k opakované reakci čistého povrchu s kyslíkem a následným úbytkům materiálu, který je přeměněn na korozní produkty. Částice oxidů působí abrazivně a zapříčiňují opětovné porušení i velmi tvrdých pasivačních vrstev [13] [14]. Z toho vyplývá, že z hlediska materiálů jsou k vibrační korozi nejvíce náchylné materiály, u kterých vzniká pasivační vrstva tvořená tvrdými oxidy. K těmto materiálům patří slitiny hliníku, titanu a zirkonu, a také nerezové oceli [15] [16] [17].



Obr. 10 Vibrační koroze ložiska [18]

Vibrační koroze tedy nastává, pokud je kontakt mezi povrchy vystaven určitému zatížení a cyklickému posunu o malé amplitudě. Působením napětí mezi dotykovými plochami se objevují malé mezery, ve kterých dochází ke ztrátě materiálu nebo iniciaci trhlin. Mezi hlavní faktory, které ovlivňují vibrační korozi, proto patří kontaktní zatížení, amplituda a frekvence pohybu a dále také teplota a korozivita prostředí.

Vibrační korozi se zabývá řada výzkumů zejména v medicínských aplikacích [19], při vývoji kloubních a dentálních implantátů, kdy je sledován především vliv korozního prostředí a kvality povrchu. Dále probíhá studium průběhu vibrační koroze namáhaných strojních komponent elektráren [20] [21], kde se pozornost soustřeďuje na vliv frekvence a velikosti namáhání při současném působení korozního prostředí, často za zvýšené teploty. Vibrační koroze je zohledňována i při studiu materiálů ocelových lan [22] [23] nebo elektrických kontaktů [24] [25]. Dalším předmětem zájmu jsou valivá ložiska, u kterých se vibrační koroze vyskytuje mezi valivými elementy a vnitřním či vnějším kroužkem ložiska, a kde zbytky oxidační vrstvy ve formě jemného prášku zůstávají uvězněny v prstenci mezi valivými elementy, což vede ke ztrátě funkčnosti ložiska [18].

Yusheng Zhang se ve své práci [20] zabývá vlivem frekvence na vibrační korozi v podmínkách sekundárního okruhu jaderné elektrárny. Zjistil, že s rostoucí frekvencí namáhání se objem opotřebení zpočátku zvyšuje a poté se snižuje. Zvýšení frekvence tření nejen zvyšuje rychlost pohybu opotřebovaných nečistot, ale také zrychluje mechanické drcení, což podporuje odstraňování zbytků opotřebení a vede ke snížení ochranného účinku nečistot z opotřebení. Všiml si rovněž, že hloubka iniciace trhliny klesá s vyšší frekvencí, což lze potvrdit morfologií poškození. To se shoduje i se závěry A. M. Kirka [26] a Y. W. Parka [24].

Hussain Hady sleduje vliv velikosti zatížení a drsnosti povrchu na vibrační korozi v případě austenitických ocelí používaných pro medicínské aplikace [19]. Řadou experimentů zjistil, že při malém zatížení je i při větší drsnosti možná rychlá obnova pasivační vrstvy a tím materiál vykazuje větší odolnost vůči koroznímu prostředí.

Vliv normálové síly zkoumá práce Jie Li, která se věnuje studiu chování materiálu používanému pro energetické aplikace [21]. Zjistil, že s nárůstem normálové síly se mění

charakter porušování materiálu. Zatímco v případě nižšího zatížení se jedná více o oxidaci povrchu spojenou se zvrásněním, v případě vyšší normálové síly odpovídá charakter porušování materiálu spíše abrazivnímu opotřebení.

Young Woo Park studuje vliv různých faktorů na vibrační korozi vznikající u materiálů elektrických kontaktů v konektorech [24] [25]. Při svých výzkumech došel k závěru, že rychlost opotřebení materiálu je vyšší při vyšších frekvencích, zatímco rychlost oxidace je vyšší při nižších frekvencích. Dále zjistil, že rozsah oxidace je při vyšších amplitudách velmi vysoký, zatímco akumulace úlomků v kontaktní zóně je vyšší při nižších amplitudách. Z experimentů také vyplynulo, že rychlost opotřebení materiálu je při vyšší vlhkosti menší, protože kondenzovaná vodní pára působí jako mazivo. Jako prevenci proti vibrační korozi doporučuje u elektrických kontaktů použití vhodného maziva [25].

Použití maziv doporučuje i F. Swack, který se zabývá výskytem vibrační koroze ve valivých ložiscích [18]. Při svém výzkumu používá jak numerické modely, které simulují kontaktní kinematiku kuličkového ložiska, tak praktické testování ložisek při různých parametrech. Při praktických zkouškách zjistil, že ačkoli vzhledem k charakteru provozu ložisek, kde dochází k malým oscilačním amplitudám nelze vibrační korozi zabránit, lze ji zásadně ovlivnit například příznivější geometrií ložisek.

Problematiku vibrační koroze ocelových lan řeší ve svých výzkumech Xiang-dong Chang a Linmin Xu, kteří ve svých experimentech sledují zejména vliv vnějšího prostředí na celkovou míru poškození [22] [23]. Xiang-dong Chang studoval účinky různých typů korozního prostředí (sladká voda, mořská voda a zředěná kyselina sírová) při současném namáhání třecí silou. Zjistil, že vibrační koroze zásadně mění třecí a pevnostní vlastnosti ocelového lana a poukázal na souvislost mezi agresivitou korozního prostředí, charakterem opotřebení a koeficientem tření. Toto je v souladu s výsledky výzkumu, který publikoval Linmin Xu. Ten při sledování chování ocelových drátů v kyselém prostředí pozoroval, že kyselé médium zvyšuje relativní skluz mezi ocelovými dráty lana a snižuje se koeficient tření. Vlivem interakce mezi korozi a opotřebením byl povrch v kyselém prostředí hladší a ztráty opotřebením byly větší než v prostředí suchého tření. Porušení drátu při suchém tření je ovlivněno mechanismy opotřebení a oxidace, ale v kyselém se uplatnil hlavně vliv abraze a koroze.

Z výše uvedeného je patrné, že problematika vibrační koroze je vzhledem ke všem vlivům, které mohou vést ke zhoršení materiálových vlastností, velmi široká. Výzkumy v této oblasti se proto zaměřují na konkrétní aplikace, kde dochází ke kombinaci jemných vibrací a korozního prostředí.

2.8 Vhodné způsoby nanášení tenkých vrstev na funkční povrch zkoumaných součástí (obecná teorie)

Logickým krokem, který by zamezil vzniku vibrační koroze, je možnost použití antikorozního materiálu. V případě pracovního a dutého vřetena se však jedná o velmi specifické dílce, které jsou velmi namáhány dynamickým zatížením. Mechanické vlastnosti jsou proto klíčové. Pracovní vřeteno je v dutém vřetenu uloženo s minimální vůlí několika mikrometrů, aby bylo umožněno vysunutí pracovního vřetena z dutého. V pracovním prostoru

obráběcího stroje je pracovní vřetenem vystaveno působení okolních vlivů, jako je chladicí procesní kapalina, odletující třísky z řezného procesu apod. Velmi často se stává, že nečistoty z pracovního prostoru ulpí na pracovním vřeteně a při zasunutí pracovního vřeteně do dutého dojde i přes veškeré pomocné stírací kroužky k zanesení nečistot do mezery mezi dutým a pracovním vřetenem, kde může dojít k zadření. Je tedy nutné, aby povrchová vrstva obou vřeten byla dostatečně tvrdá a odolná proti opotřebení.

Dalším způsobem, jak zamezit možnosti vzniku vibrační koroze je nanášení antikorozního povlaku na povrch jednoho z vřeten, buď dutého, nebo pracovního. Výhodou nanášení povlaků je skutečnost, že základní materiál disponuje požadovanými mechanickými vlastnostmi a daný povlak materiálu dodá povrchové vrstvě daného materiálu další požadované vlastnosti.

Povlaky mohou dosahovat tlouštěk řádově od mikrometrů až po několik desetin až jednotek milimetrů. Podle požadované tloušťky povlaku se může lišit i technologie nanášení povlaku na základní materiál. Vždy je potřeba pečlivě zvážit jakou funkci má daný povlak plnit.

Výrobní postup obou vřeten byl popsán v kapitole 2.6.1. Postup mimo jiné zahrnuje několikrát chemicko-tepelné zpracování, které je však velmi časově náročné. Nabízí se tedy také možnost, nahradit operaci chemicko-tepelného zpracování zaměřeného na finální jakost povrchové vrstvy, konkrétně nitridování, nějakým funkčním povlakem, který by plnil stejnou funkci, ale jeho výroba byla časově a třeba i finančně výhodnější. Zároveň by takovýto povlak umožňoval případnou následnou opravitelnost daného dílce v případě poškození. Z těchto důvodů by bylo vhodnější, kdyby daný povlak byl o tloušťce spíše desetin milimetrů než setin. Na základě výše uvedených úvah se jako vhodnější jeví povlaky vytvořené žárovými nástřiky.

2.8.1 Žárové nástřiky

Principem žárového nástřiku je pokrývání základního materiálu roztaveným materiálem povlaku. Tento materiál může být keramický, nebo na kovové bázi, nejčastěji ve formě prášků, ev. drátů nebo tyčí. Ve zmíněné formě je materiál přiváděn do aplikačního zařízení, kde bývá vystaven vysokým teplotám a urychlen, takže částice materiálu opouští aplikační zařízení natavené, nebo dokonce roztavené se značnou kinetickou energií. Při dopadu částic na ošetřovaný povrch dojde k přeměně jejich kinetické energie na deformační a částečně i na tepelnou. Dopadovou energií se částice zdeformují, čímž vznikají splaty. Vrstvením splatů následně vzniká pro žárové nástřiky typická lamelární struktura, která obsahuje také nenatavené částice, nečistoty (v podobě vměstků a oxidů) a také póry [27] (viz Obr. 11).



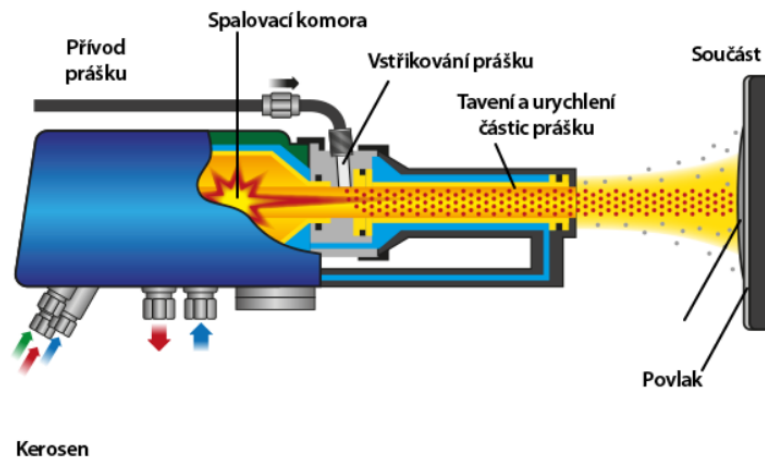
Schéma řezu žárově nastříkané vrstvy

Obr. 11 Struktura žárového nástřiku [28]

Po konzultaci s odborníky v oblasti žárových nástřiků ve VZÚ Plzeň, kde byla diskutována také aplikovatelnost dané metody nástřiku v průmyslové praxi, byly pro další kroky vytipovány nástřiky metodou HVOF, plasmový nástřik a dále také laserové navařování s možností aplikace různých druhů materiálů nástřiků.

2.8.2 Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF

High velocity oxygen fuel (HVOF) neboli vysokorychlostní nástřik plamenem je v současnosti jednou z rozšířených metod nanášení nástřiků, která se využívá převážně pro nástřik kovových materiálů a cermetů. Ovšem lze se setkat i s nanášením keramických prášků. Metodu charakterizují vysoká rychlost letících částic, díky speciálnímu tvaru trysky a nižší rozsah teplot oproti konkurenčnímu plazmovému nástřiku. Kvůli nízké porositě povlaku a vysokým vazebním silám mezi jednotlivými částicemi nachází tato metoda upotřebení při vytváření nástřiků odolných proti otěru a korozi. Další výhodou této metody je schopnost nanášet povlaky větších tloušťek se zbytkovým tlakovým napětím. [29] Využívá jako zdroj tepla hoření palivové směsi tvořené buďto plyným, nebo kapalným palivem ve spojení s kyslíkem. Mezi plyná paliva patří například propan, propylen, acetylen, nebo vodík. Mezi nejčastěji využívaná kapalná paliva spadá kerosin. Hoření palivové směsi způsobuje uvolnění velkého množství tepla a současnou expanzi plynů. Plamen vzniklý touto reakcí je nasměrován do Lavalovy dýzy, která díky svému sbíhavému a následně rozbíhavému tvaru zvýší jeho rychlost na nadzvukovou úroveň. [27] Na vstupu do Lavalovy dýzy je do plamene také přiváděn přídatný materiál – nejčastěji prášek. [30] [31] Grafické schéma zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem je zobrazeno na obrázku.

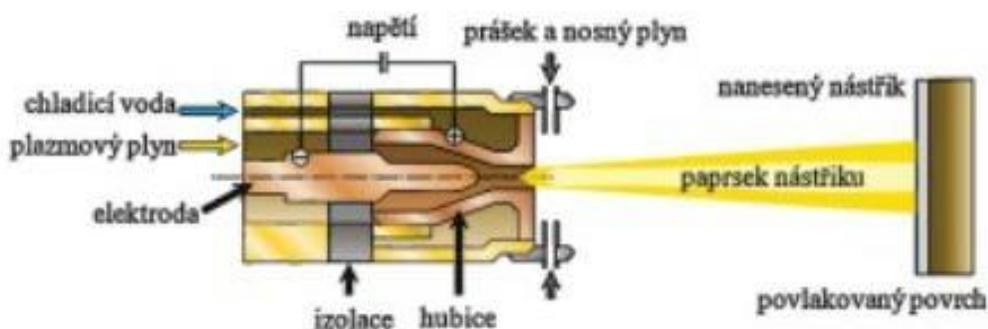


Obr. 12 Schéma zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem [28]

2.8.3 Atmosférický plazmový nástřik – APS

Tryska hořáku sestává z wolframové katody a měděné anody. Mezi katodou a anodou hoří elektrický oblouk, ve kterém je ionizován plyn a vzniká tak plazmatické prostředí, do kterého je radiálně nebo axiálně dodáván přídatný materiál ve formě prášku. Tento je roztaven a urychlen směrem k povrchu základního materiálu. [32]

Univerzalita plazmového nástřiku pramení ze schopnosti vyvinout dostatek energie k natavení téměř jakéhokoliv povlakového materiálu ve formě prášku. Použitý plyn v kombinaci s velikostí elektrického proudu procházející elektrodou řídí množství generované energie (teplota až 20000 °C). Během procesu lze řídit úroveň porozity od 1 do 20% a ovládat výslednou drsnost. Výhodou je, že povlakovaná součást není tepelně ovlivněna, technologie nezpůsobuje přídatná vnitřní pnutí a lze kombinovat více povlaků (druhů materiálů) na sebe [33].



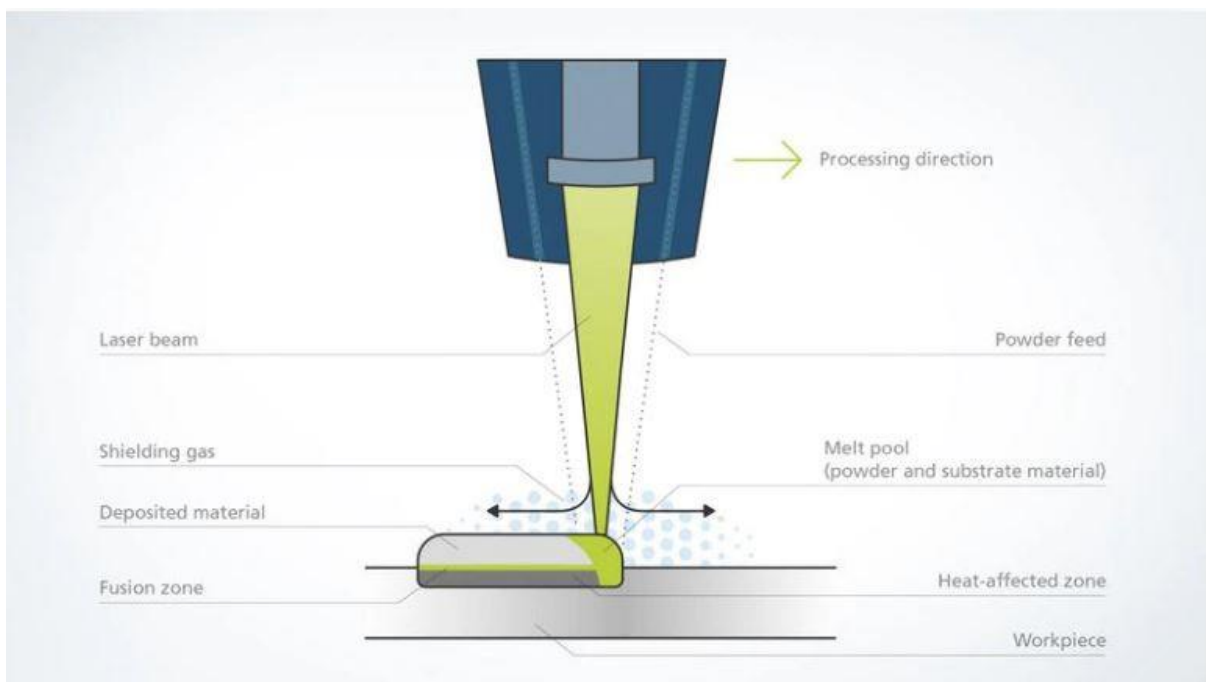
Obr. 13 Schéma atmosférického plazmového nástřiku APS

2.8.4 Laserové práškové navařování – LMD

Při konvenčním laserovém práškovém navařování laserový paprsek lokálně zahřeje obrobek a vytvoří na něm tavnou lázeň. Z trysky v pracovní optice potom tryská přímo do tavné lázně jemný kovový prášek. Ten se tam roztaví a spojí se základním materiálem. Vznikne tak

vrstva o síle cca 0,2 až 1 milimetr. Tímto způsobem vzniknou vzájemně spojené svarové housenky, které vytváří struktury na stávajících základních tělesech, nebo tak lze vyrobit celé díly. V případě potřeby lze vytvořit mnoho vrstev nad sebou. Pomocí laserového práškového navařování je možné vytvořit rozsáhlé struktury nebo objemy na 3D plochách o několika cm^3/min , při rychlostech posuvu od 500 mm/min až po několik metrů/minutu. Při nanášení čar, ploch a tvarů se pracovní, automaticky řízená optika pohybuje nad obrobkem. Inteligentní sensorika přitom zajišťuje, že síla vrstvy zůstává stále rovnoměrná.

Nově je možno využívat také vysokorychlostní laserové práškové navařování, kdy jsou částice prášku přes povrch substrátu již zahřáty téměř na teplotu tavení. Díky tomu je potřeba méně času pro roztavení částic prášku, což podstatně zvyšuje procesní rychlost. Z důvodu nižšího přívodu tepla umožňuje vysokorychlostní laserové práškové navařování také povlakování materiálů velmi citlivých na teplotu jako jsou slitiny hliníku nebo litiny. Pomocí postupu vysokorychlostního laserového práškového navařování mohou vznikat vysoké plošné rychlosti na rotačně symetrických plochách až 1500 cm^2/min . Při tom je dosahováno rychlostí posuvu několik set metrů/minutu [34].



Obr. 14 Schéma laserového práškového navařování LMD

3. Cíle disertační práce

Hlavním cílem předkládané práce je navrhnout vhodný materiál a složení povrchové vrstvy, který by minimalizoval proces vzniku vibrační koroze u dutého vřetene pro CNC stroje.

K dosažení vytyčeného cíle je nutné nejprve provést rozbor vzniku vibrační koroze. Dále vytvořit kompletní metodiku pro testování tvorby vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek a metodiku pro testování mechanických a materiálových vlastností vhodně navržených a vytvořených povlaků.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části této práce.

Dílčí cíle disertační práce:

- 1) Úvodní studie k návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena.
- 2) Návrh metodiky a experimentální ověření materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.
- 3) Návrh metodiky a experimentální ověření mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.
- 4) Návrh metodiky a experimentální ověření vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

4. Experimentální část

4.1 Úvodní studie k návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena.

Vibrační koroze vzniká mezi pracovním a dutým vřetenem během provozu obráběcího stroje. Pracovní vřeteno je poměrně rozměrově veliký dílec a realizovat povrchové úpravy tohoto dílce by bylo mnohem náročnější, než realizace úprav dutého vřetene. Důvody jsou blíže popsány v kapitole 4.1.4. Nicméně z důvodu znalostí současného stavu a možné analýzy vzniku vibrační koroze je potřeba mít zanalyzované také pracovní vřeteno, aby bylo možné nad problémem uvažovat v širších souvislostech.

K analýzám bylo dodáno nitridované vřeteno s obrobeným povrchem (

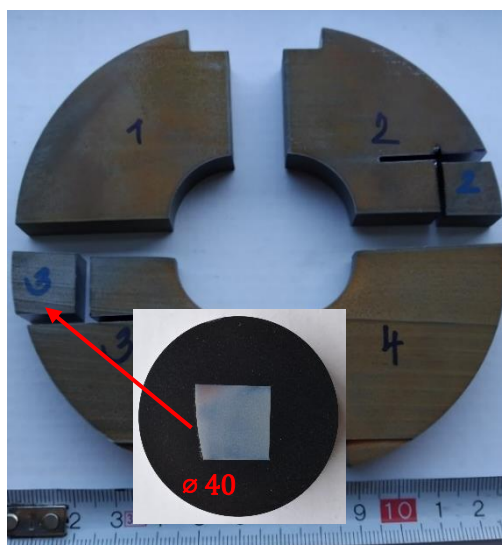
Obr. 15), nitridované vřeteno bez obrobení (Obr. 16) a tyčové polotovary pro nitridaci ve vstupním (ne-nitridovaném) stavu (Obr. 17). Z obou nitridovaných vřeten byly metalografickou pilou odebrány segmenty z povrchových oblastí pro analýzu nitridované vrstvy a základního materiálu (části b) na

Obr. 15, Obr. 16. Podobně byly odebrány vzorky z povrchových oblastí tyčových polotovarů před nitridací (Obr. 17), ze kterých byly zároveň metalografickou pilou odděleny povrchové vzorky pro RTG analýzy. Rozřezané vzorky prošly standardní metalografickou přípravou. Plocha označená křížkem nebo šipkou byla vždy zalita metalografickým lisem tak, aby jí bylo vidět (tj. mikrostruktury se pozorovaly v oblastech označených křížkem). Lisování probíhalo za tepla (180 °C) s následným ochlazením v automatickém procesu. Vzorek vyjmutý z lisovacího stroje byl řádně označen a podroben metalografické přípravě. Ta se skládá z hrubého broušení (zde vynecháno), jemného broušení a leštění na diamantových leštících suspenzích.

a)

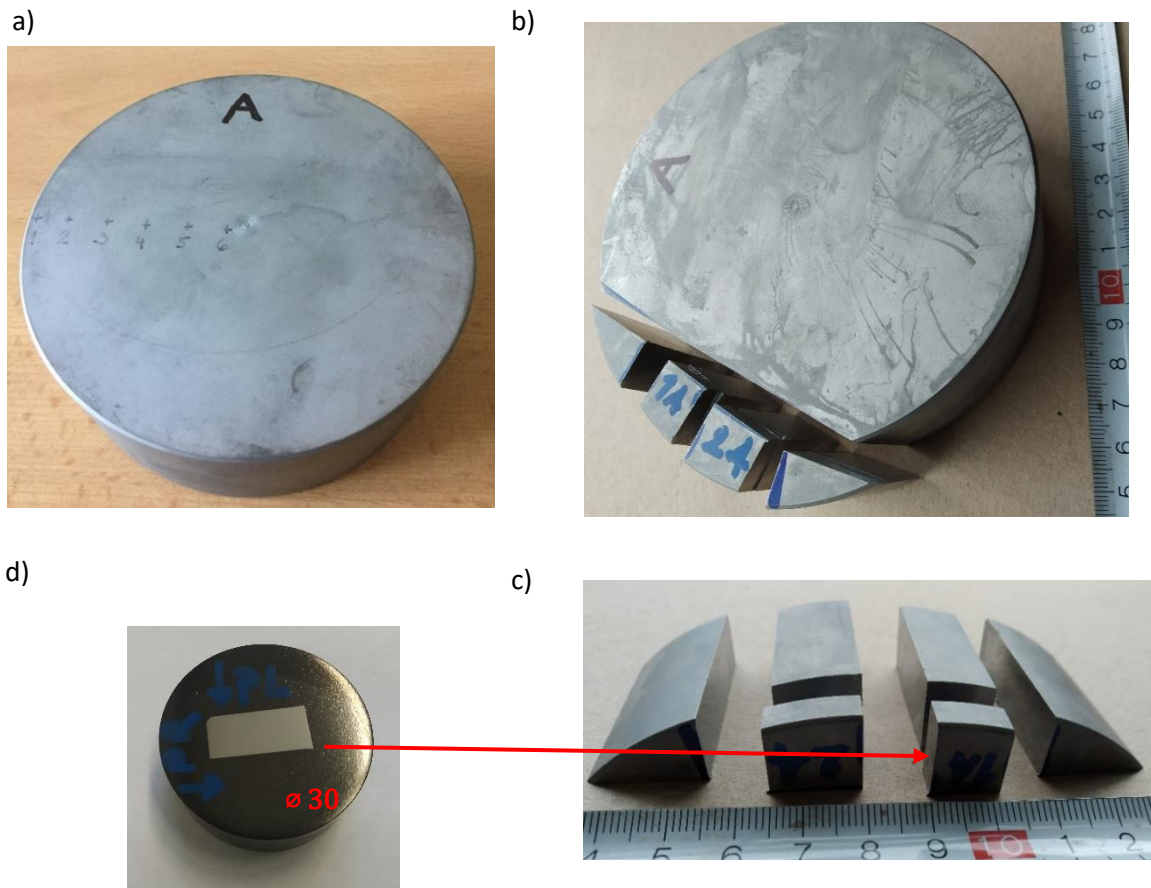


b)

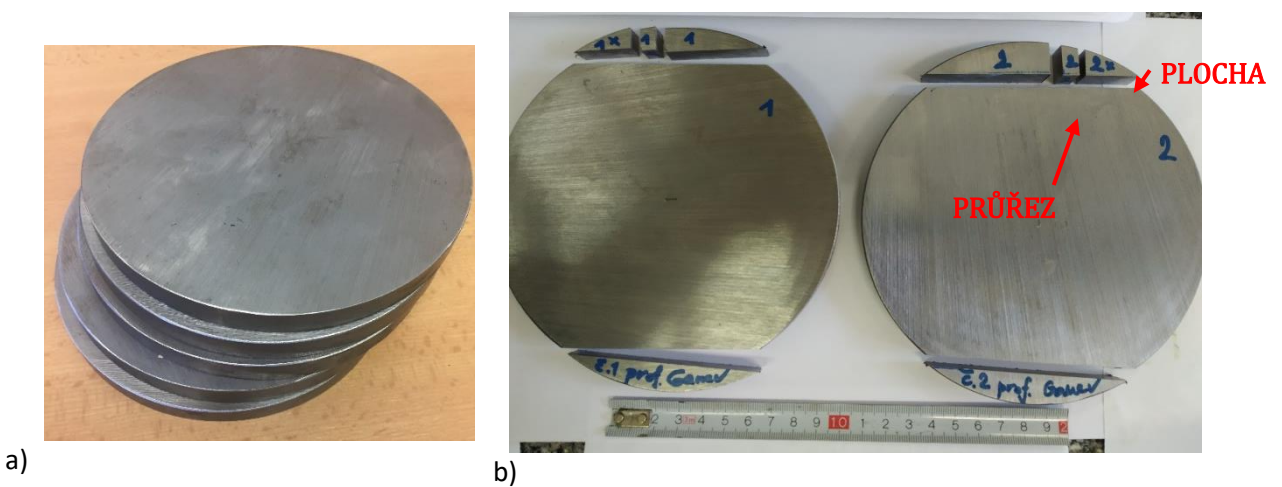


Obr. 15 Polotovar nitridovaného vřetena s obrobením a) celé neporušené vřeteno b) rozřez nitridovaného vřetena s metalografickým výbrusem

Analýzy byly realizovány na dvou, resp. třech nezávislých výzkumných pracovištích, a sice v laboratořích ZČU v Plzni Fakulty strojní, dále v laboratořích ČVUT v Praze Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské a v neposlední řadě laboratořích TU v Liberci Fakulty strojní.



Obr. 16 Polotovar nitridovaného vřetena bez obrobení a) celé neporušené vřeteno, b) rozřez vřetena, c) detail rozřezaných částí s označením místem metalografického výbrusu, d) metalografický výbrus vzorku 1A



Obr. 17 Polotovary vstupních tyčí a) dodané neporušené kusy, b) rozřezané na vzorky, připravené k analýzám

4.1.1 Ověřování materiálových vlastností povrchové vrstvy vybraných vzorků

Pro přípravu vzorků bylo využito standardní vybavení metalografické laboratoře: ruční pila Struers Discotom-10, automatická přesná pila Struers Secotom-50, metalografický lis Struers CitoPress-10, automatická bruska a leštička Struers Tegramin-30.



Obr. 18 Ruční pila Struers Discotom [35]



Obr. 19 Metalografický lis Struers [35]



Obr. 20 Automatická bruska a leštička Struers [35]

Vlastní materiálové analýzy byly provedeny s využitím světelných mikroskopů Olympus BX61a GX51, optického jiskrového spektrometru Q4 TASMAN, řádkovacích elektronových mikroskopů Zeiss EVO MA25 s katodou LaB6 a Crossbeam Auriga s FEG katodou a automatického mikrotvrdoměru LECO AMH55. Oba řádkovací elektronové mikroskopy

(SEM) jsou vybaveny analyzátory energiově dispersní spektrometrie (EDS) a difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) od firmy Oxford Instrumets.



Obr. 21 Světelný mikroskop Olympus BX61



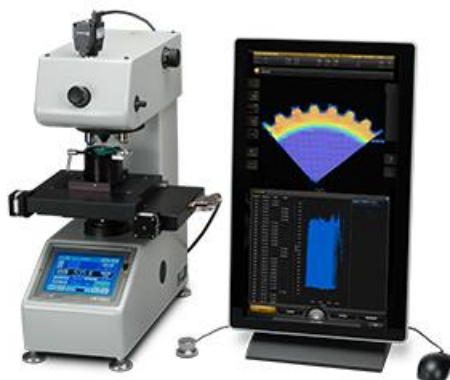
Obr. 22 Optický jiskrový spektrometr Q4 TASMAR



Obr. 23 Řádkovací elektronový mikroskop Zeiss EVO MA25



Obr. 24 Řádkovací elektronový mikroskop Crossbeam Auriga



Obr. 25 Automatick mikrotvrdoměr LECO AMH55

Jako první analýza, tzv. přehledová, slouží především světelná mikroskopie. Je založena na principu odrazu dopadajícího světla z bodového zdroje na vzorek. Analýzy mikročistoty oceli byly provedeny na vyleštěných (neleptaných) výbrusech s využitím světelné mikroskopie a následné obrazové analýzy pořízených snímků pro stanovení plošného podílu nečistot. Pro zviditelnění mikrostruktury bylo použito standardní leptání 3 % Nitalem (3 % roztok kyseliny dusičné v etanolu) po dobu několika sekund.

Řádkovací elektronová mikroskopie umožňuje díky podstatně kratší vlnové délce dopadajících elektronů dosahovat mnohonásobně větších zvětšení než mikroskopie světelná. Velkou výhodou SEM je rovněž možnost současného využití analyzátorů chemického složení velmi malých oblastí a objektů v mikrostruktuře. EDS analýzy lze použít k určení chemického složení ať už bodově, v linii nebo v plošné souhrnné mapě. EBSD analýzy umožňují nejen přesnou identifikaci fází v pozorované oblasti, ale také poskytují informace o krystalografické orientaci jednotlivých zrn. Pro určení průměrného chemického složení objemových materiálů však EDS analýzy nejsou zcela vhodné, protože z principu vyhodnocují informace získané pouze z velmi malého objemu materiálu. Pro analýzu ocelí je jejich dalším zásadním problémem stanovení obsahu uhlíku, které je zkresleno kontaminací povrchu vzorků při jejich přípravě. Proto byla pro ověření chemického složení ocelí použita vhodnější, částečně destruktivní, metoda opto-emisní spektrometrie, která velmi přesně detekuje obsah všech prvků v materiálu.

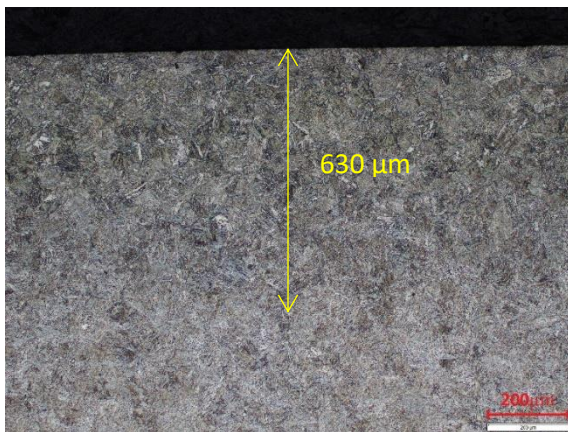
4.1.1.1 Obrobené nitridované vřeteno – analýzy povrchové vrstvy

Celkem byly připraveny dva výbrusy s označením – 2, 3 (

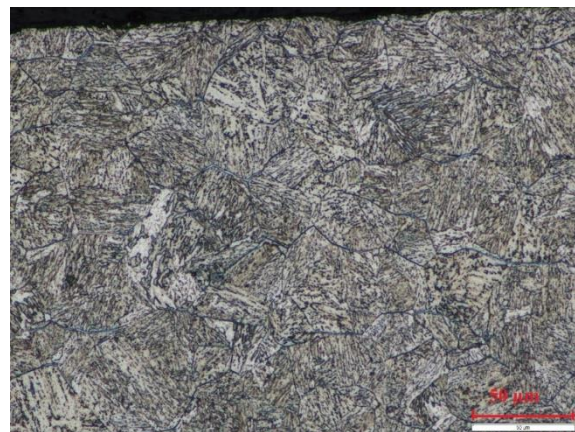
Obr. 15). Na obou výbrusech byly prováděny stejné analýzy. Vzhledem k tomu, že mezi mikrostrukturou obou vzorků nebyly pozorovány žádné rozdíly, jsou v dalším textu prezentovány typické výsledky mikrostrukturních analýz bez rozlišení vzorků, ze kterých pochází.

Světelná mikroskopie

Z připraveného metalografického výbrusu byla pomocí leptadla Nital 3 % (3 % roztok kyseliny dusičné v etanolu) zvýrazněna mikrostruktura zkoumaného vzorku. Na Obr. 26 ze světelné mikroskopie je vidět přechod nitridační vrstvy do základního materiálu až do vzdálenosti cca 0,6 mm pod povrchem, kde má většinový podíl mikrostruktura jádra. Stanovení tloušťky nitridační vrstvy čistě opticky z průběhu mikrostruktury je však potřeba brát jako velmi orientační a nejméně spolehlivou metodu. Na Obr. 27 je zobrazen detail nitridační vrstvy těsně pod povrchem materiálu. Lze vidět zvýraznění hranic původních austenitických zrn, které v základním materiálu nebylo patrné. Může to být způsobeno segregací nebo precipitací na hranicích zrn, kde mohou vznikat v tomto případě přednostně nitridy, nebo dusíkem obohacené oblasti matrice.



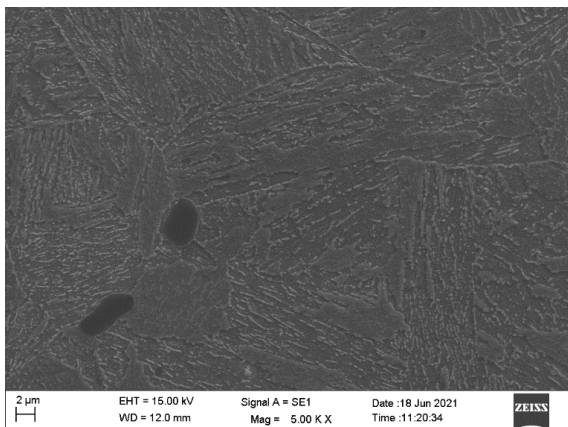
Obr. 26 Nitridovaná vrstva (zv. 100x)



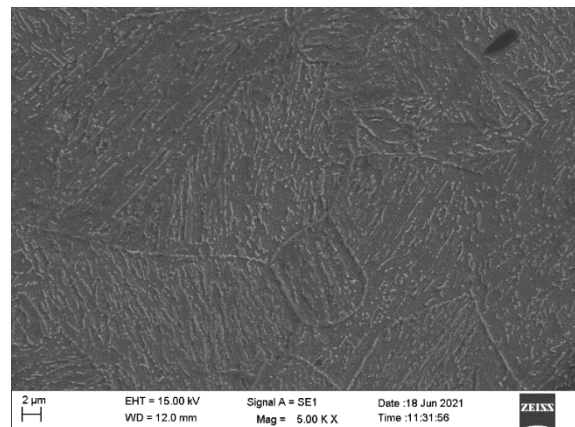
Obr. 27 Detail nitridované vrstvy (zv. 500x)

Elektronová mikroskopie

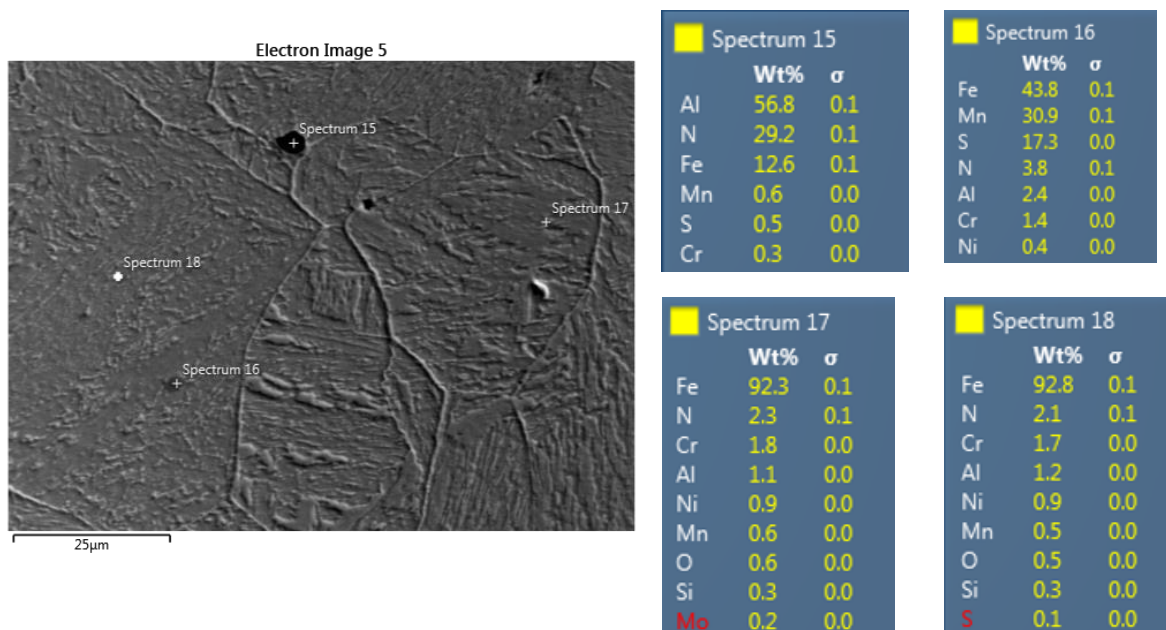
Ze snímku z elektronové mikroskopie (Obr. 28, Obr. 29) je patrná velmi jemná martenzitická mikrostruktura s vměstky, které byly klasifikovány pomocí EDS analýzy jako sulfidy manganu, kterých se ve struktuře vyskytovalo nejvíce (Obr. 30 – Spektrum 16). Ve stejné oblasti ve vrstvě byl také identifikován hrubý nitrid hliníku (Obr. 30 – Spektrum 15). S ohledem na jeho velikost by se v tomto případě mohlo jednat i o primární nitrid. Na Obr. 30 – Spektrum 17,18 je lokální chemické složení povrchové vrstvy s cca 2% dusíku.



Obr. 28 Mikrostruktura rozhraní vrstvy a základního materiálu u vzorku 3 (zv. 5000x)



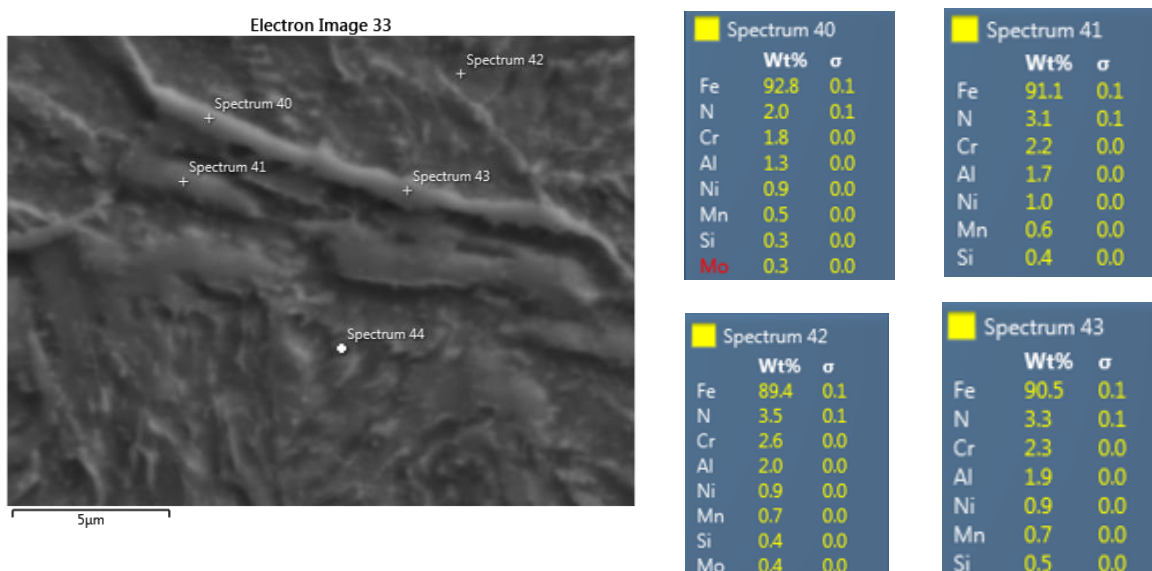
Obr. 29 Mikrostruktura vrstvy materiálu u vzorku 3 (zv. 5000x)



Obr. 30 Bodová EDS analýza v nitrbované vrstvě u vzorku 3

EDS analýza

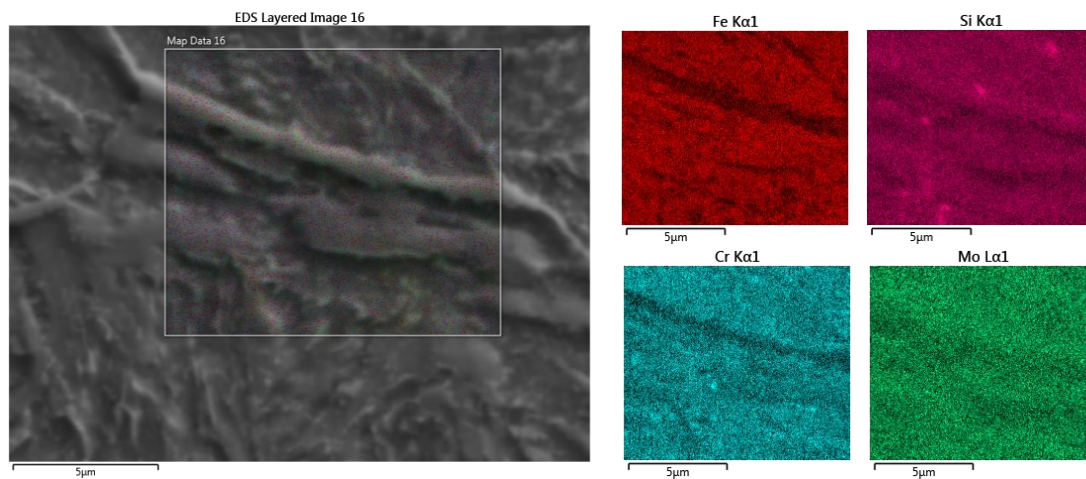
Na EDS analýze na Obr. 31 je v jednotlivých spektrech rovněž patrný zvýšený obsah dusíku v rozmezí 2-3,5%. I při tomto zvětšení nejsou v mikrostruktuře patrné částice nitridů a zdá se, že dusík je spíše přítomen přímo v matici.



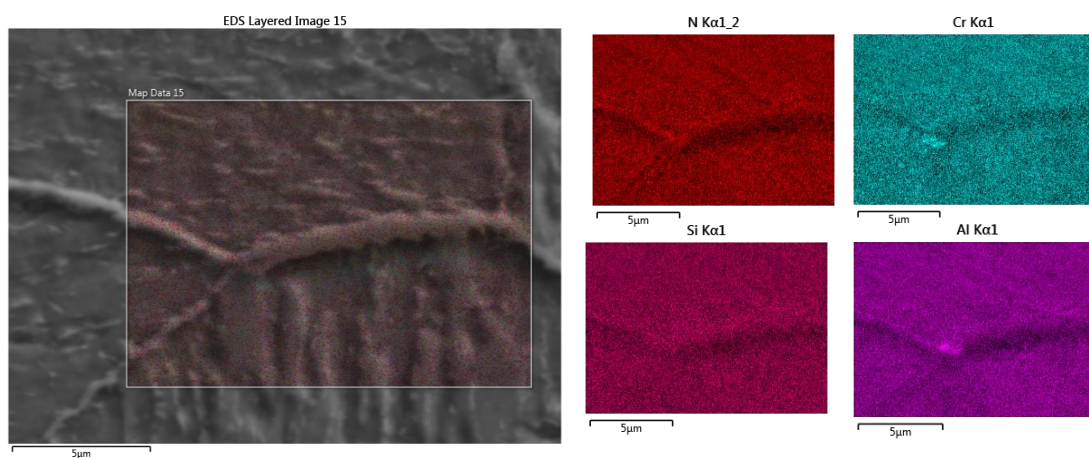
Obr. 31 Bodová analýza nitrbované vrstvy u vzorku 2

Podobně na mapách na Obr. 32, Obr. 33 jsou sice patrné částice Si, Cr a Al, ale není zde lokálně zvýšená koncentrace dusíku, která by nasvědčovala přítomnosti nitridů. Na Obr. 34 je naměřená liniová EDS analýza směrem od povrchu vzorku do základního materiálu. Na

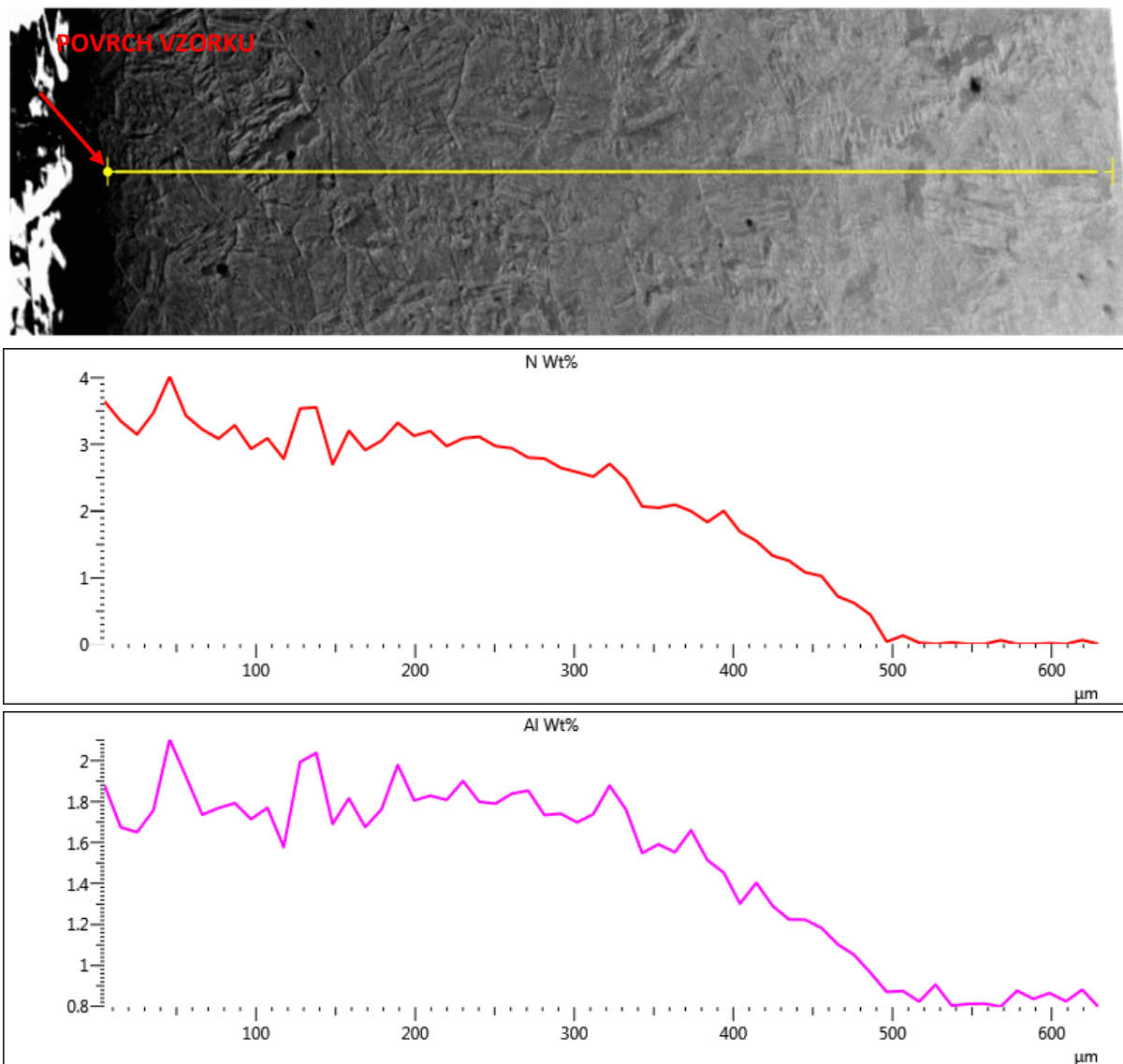
průběhu je patrný postupný pokles obsahu dusíku a hliníku s rostoucí vzdáleností od povrchu vzorku, a to v obou případech do hloubky cca 500 μm . Vzhledem k tomu, že velké lokální výkyvy v průbězích chemického složení jsou u křivek obou prvků stejné, nachází se pravděpodobně v těchto místech ve struktuře větší nitridy hliníku, podobné tomu na Obr. 31.



Obr. 32 EDS mapa vzorku 2, částice Cr a Si



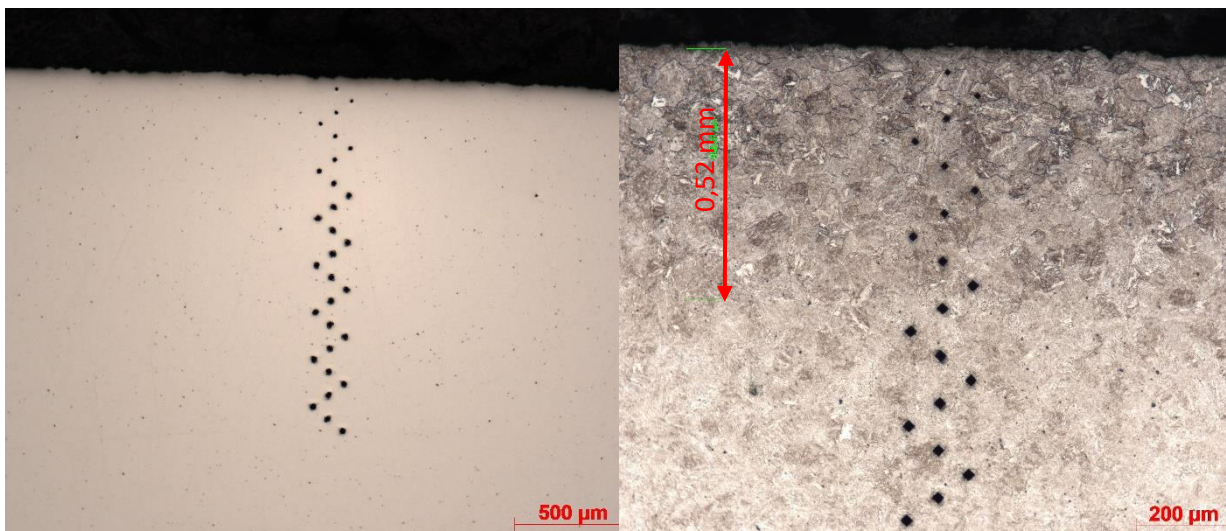
Obr. 33 EDS mapa vzorku 2



Obr. 34 Liniová EDS analýza – od povrchu (nitridovaná vrstva) do základního materiálu, klesající hmotnostní podíl N a Al Wt% směrem do základního materiálu

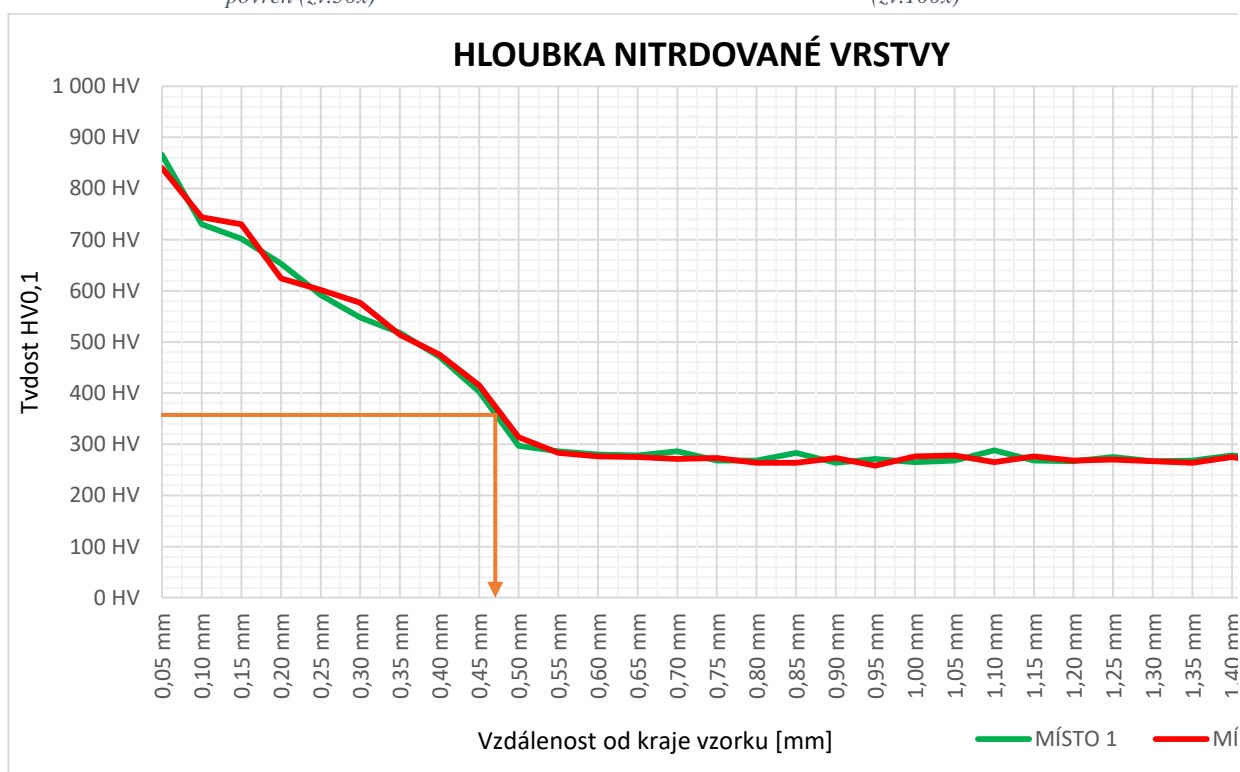
Měření mikrotvrdomosti

Nejčastější a nejspolehlivější metodou pro stanovení hloubky nitridace je měření průběhu mikrotvrdomosti. Hloubku nitridační vrstvy je možné určovat podle různých parametrů. V rámci tohoto projektu bylo zvoleno kritérium vycházející z normy DIN 50 190-4. Ta určuje tvrdost jádra jako tvrdost základního materiálu + 50 HV. V tomto případě bylo měřeno několik řad vtisků (Obr. 35, Obr. 36) – na dvou protilehlých místech na řezu vřetenem. Jako zatížení bylo zvoleno 100 g, tedy HV0,1. Výsledkem měření je graf (Obr. 37). Na něm je demonstrováno určení hloubky nitridace, přičemž hodnoty mikrotvrdomosti jsou na obou zkoumaných protilehlých místech stejné. V obou případech vyšla hloubka cca 0,47 mm.



Obr. 35 Linie měření mikrotvrlosti HV_{0,1} – nenaleptaný povrch (zv.50x)

Obr. 36 Detail měření mikrotvrlosti HV_{0,1} po naleptání (zv.100x)



Obr. 37 Graf měření mikrotvrlosti HV_{0,1} – hloubka nitridace cca 0,45 mm

Spektrometrie (chemické složení)

Chemické složení bylo měřeno celkem na třech místech rozřezaných kusů. V Tab. 2 jsou zanešené průměrné hodnoty.

	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]
Průměr	95,05	0,325	0,196	0,510	0,011	0,022	1,554	0,168	1,003	0,882
Směrodatná odchylka	0,02	0,013	0,014	0,006	0,000	0,004	0,009	0,010	0,009	0,011

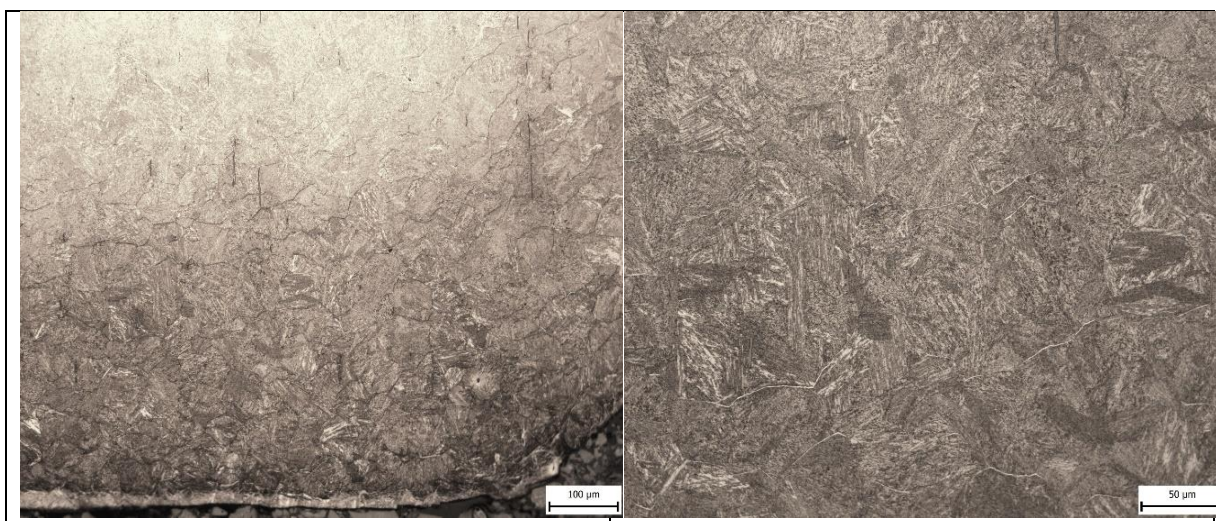
Tab. 2 Naměřené procentuální zastoupení prvků vřetene spektrometrem Q4 TASMAN

4.1.1.2 Neobrobené nitridované vřeteno

Celkem byly připraveny dva vzorky s označením – 1A, 2A (Obr. 16).

Světelná mikroskopie

Na klasicky připraveném metalografickém výbrusu byla pomocí leptadla Nital 3 % zvýrazněna mikrostruktura zkoumaných vzorků. Na Obr. 38 je vidět, že nitridační vrstva postupně přechází do základního materiálu zhruba v hloubce cca 0,6 mm pod povrchem, kde má většinový podíl mikrostruktura jádra. Na Obr. 39 je zobrazen detail nitridační vrstvy u povrchu materiálu. Opět je patrné zvýraznění hranic původních austenitických zrn, které může být způsobeno přednostní segregací legujících prvků.



Obr. 38 Nitridovaná vrstva (zv. 100x)

Obr. 39 Detail nitridované vrstvy (zv. 500x)

Elektronová mikroskopie

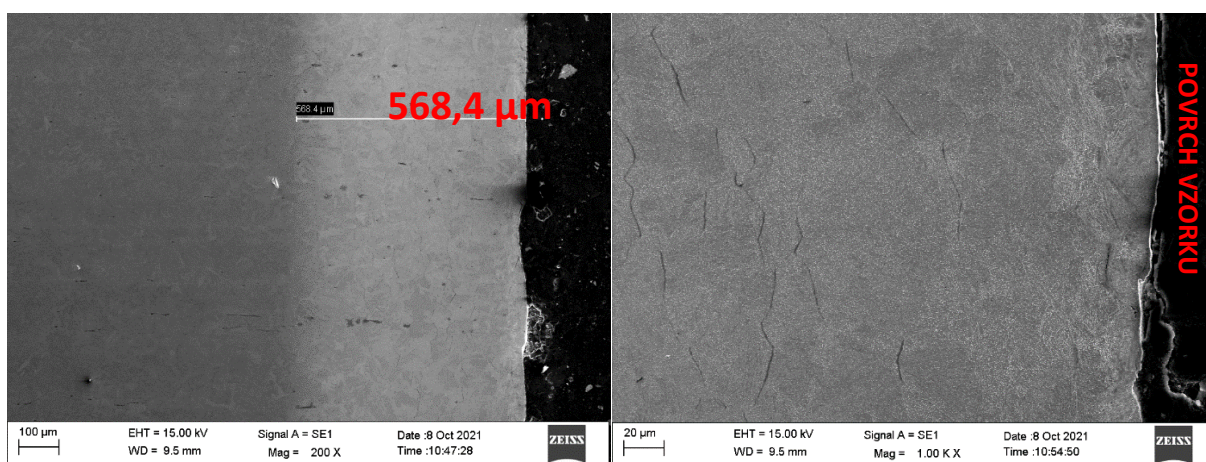
K lepšímu popisu mikrostruktury byla provedena analýza pomocí řádkovací elektronové mikroskopie. Na Obr. 40 je přehledný snímek celé zkoumané oblasti s orientačním označením hloubky nitridační vrstvy 568,4 µm. Na Obr. 41 a Obr. 43 jsou vidět drobné interkrystalické trhlinky na hranicích primárních austenitických zrn. Šipka na Obr. 43 označuje odlupování vrstvy. Na Obr. 44 a Obr. 45 je uvedený detail mikrostruktury v nitridované vrstvě, ve které jsou patrné malé částice a shluky částic, které jsou dále specifikovány pomocí EDS analýzy.

Šipka na Obr. 44 označuje povrch vzorku a tenká bíle svítící vrstvička na okraji může být artefaktem z přípravy výbrusů a s největší pravděpodobností nesouvisí s mikrostrukturou nitridovaného povrchu (nejedná se o bílou vrstvu). Na Obr. 46 a Obr. 47 je vidět mikrostruktura ve středové oblasti vzorku, v níž jsou patrné malé pravidelně rozptýlené částice. V porovnání s mikrostrukturou povrchových oblastí také v základním materiálu nebyly pozorovány tlusté martenzitické laťky patrné na Obr. 44 a v levé části Obr. 45.

EDS analýza

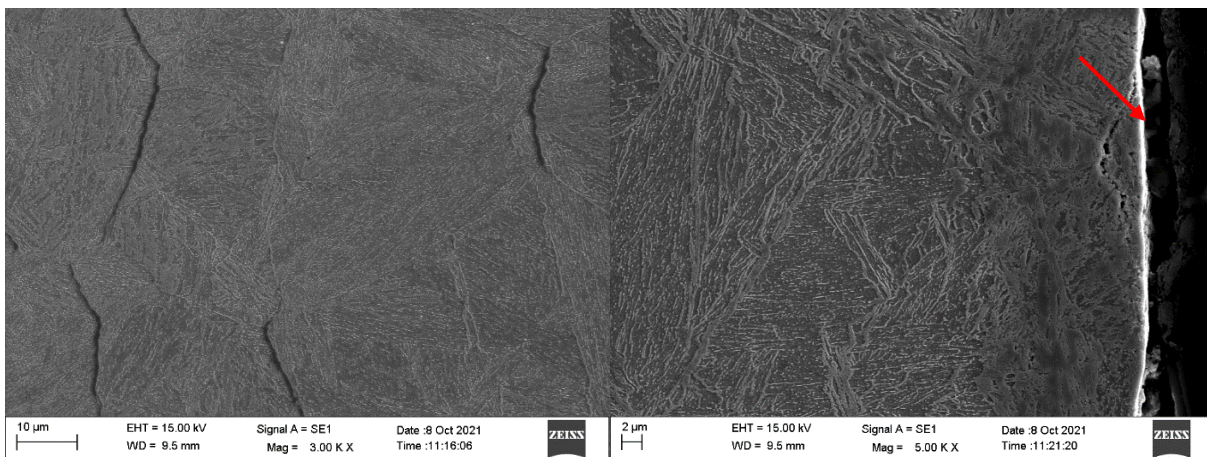
Obr. 48 ukazuje liniovou EDS analýzu ve směru od povrchu vzorku do jeho středu. Na průběhu obsahu dusíku je klesající trend směrem do středu vzorku. Pokles obsahu dusíku však není v celé nitridační vrstvě rovnoměrný, dochází k velmi prudkému poklesu v prvních cca 30 μm od povrchu. Ve větších hloubkách pod povrchem už je postupně pokles obsahu dusíku lineární dalších cca 600 μm . Velké osamocené píky na křivkách koncentrací Mn, S ukazují na přítomnost sulfidických vměstků v materiálu. Výrazné píky na křivkách koncentrací Cr a Al můžou indikovat lokální přítomnost hrubších částic bohatých na daný prvek. Jemnější ojedinělá částice nitridu chromu v pod-povrchové oblasti je vidět rovněž na liniové analýze.

Obr. 49, Obr. 50, Obr. 51 ukazují bodovou EDS analýzu v detailu mikrostruktury nitridované vrstvy a základního materiálu. V nitridované vrstvě jsou mohutnější hranice látek s mírně zvýšeným obsahem dusíku, stejné zvýšení obsahu dusíku bylo však detekováno také v okolní matici (měřicí bod 29). Výsledky tohoto měření by opět naznačovaly rozpuštění většiny atomů dusíku v tuhém roztoku matrice s občasným výskytem jemnějších nitridů chromu. Mikrostruktura základního materiálu mimo nitridovanou vrstvu je velmi podobná, pouze v ní nebyly pozorovány silnější laťky, které byly nejvýraznější a nejtypičtější pro těsně pod-povrchové oblasti nitridační vrstvy (pravá část Obr. 44) a v menší míře se vyskytovaly rovněž v hlubších oblastech nitridační vrstvy (levá část Obr. 45). V hrubších částicích základního materiálu vykazují bodová spektra cca o 1% vyšší obsah chromu, než v okolní matici (Obr. 51).



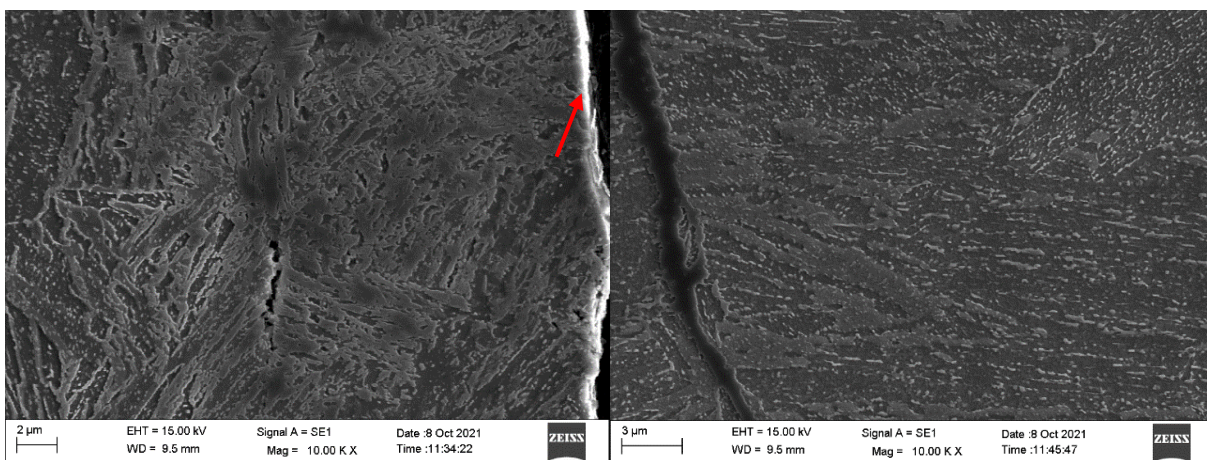
Obr. 40 Hloubka nitridace stanovená opticky (zv.200x)

Obr. 41 Nitridační vrstva s trhlinami (zv. 1000x)



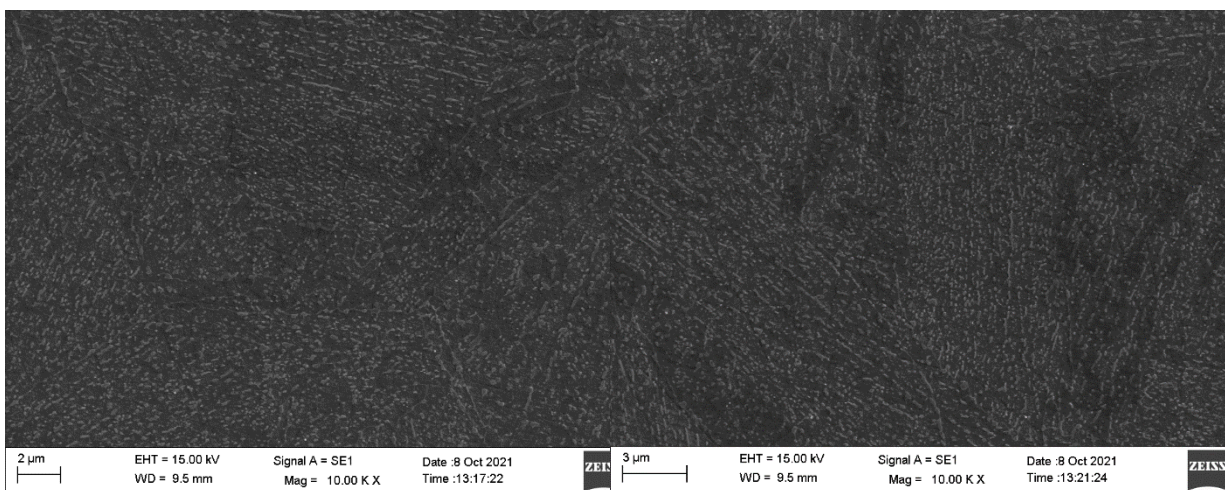
Obr. 42 Detail trhlin v nitridační vrstvě (zv. 3000)

Obr. 43 Odlupování části nitridovaného povrchu (zv. 5000)



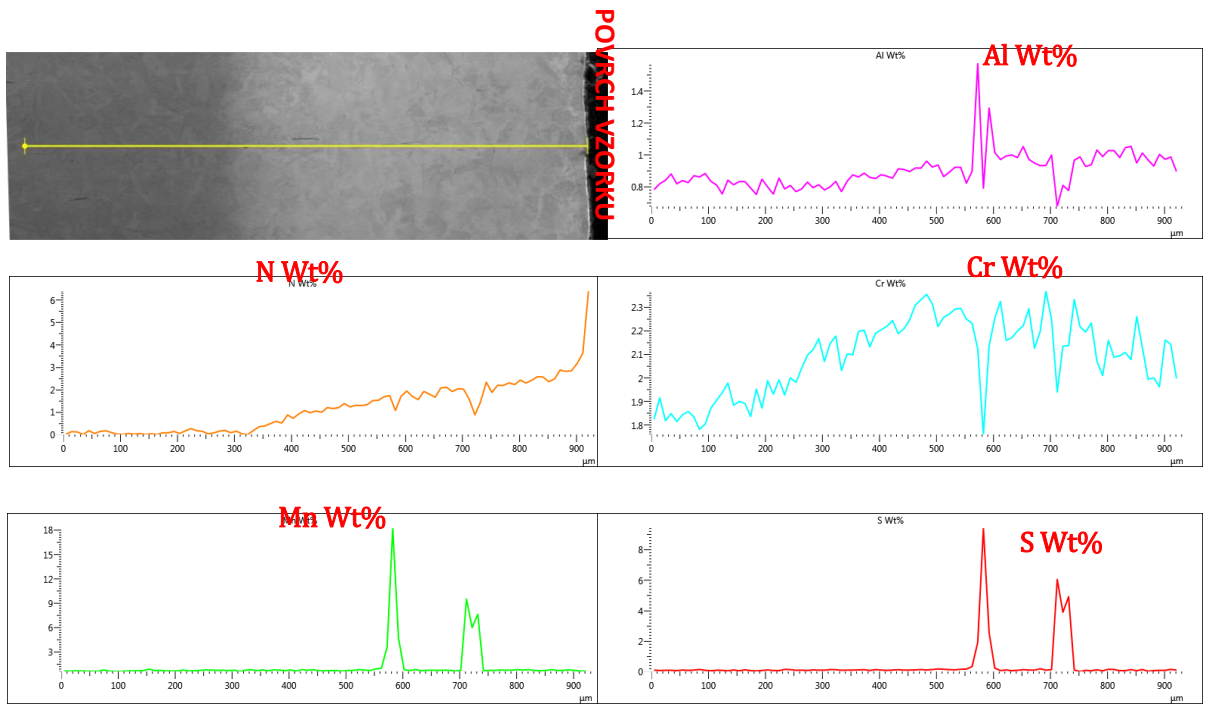
Obr. 44 Detail nitridované vrstvy (zv. 10000x)

Obr. 45 Detail nitridované vrstvy (zv. 10000x)

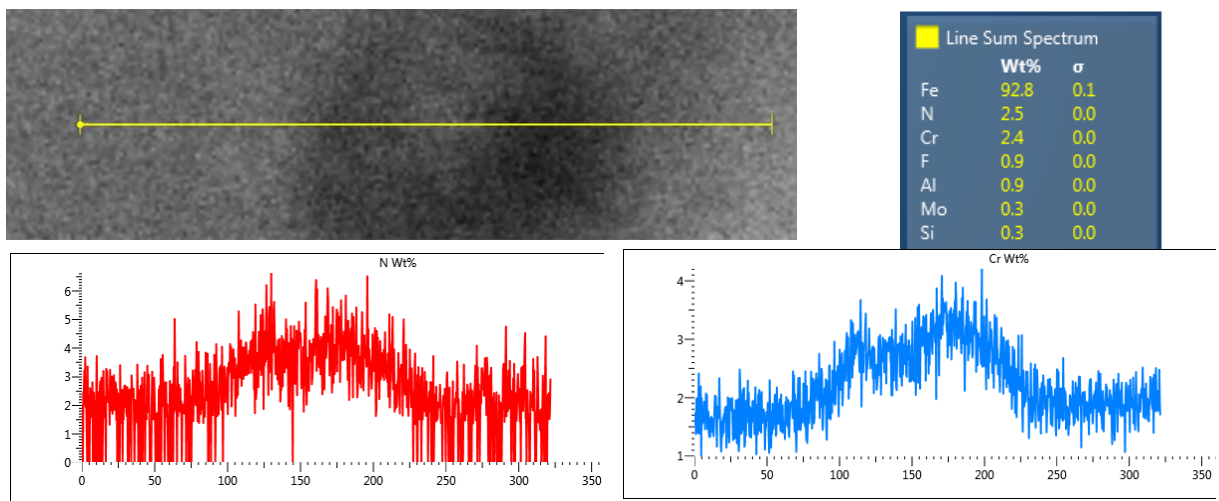


Obr. 46 Detail středové oblasti (zv. 10000x)

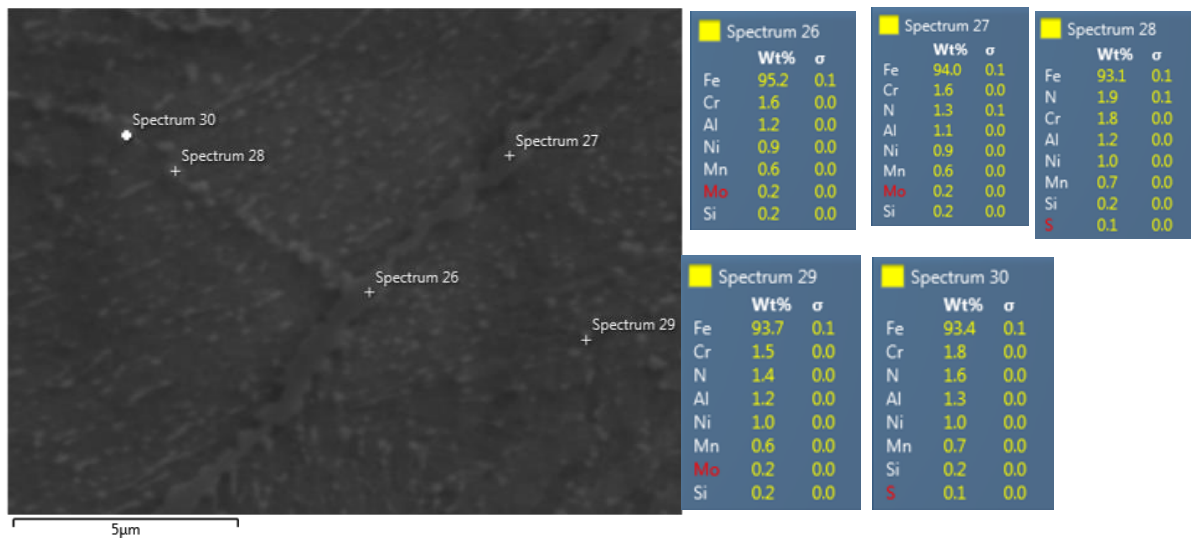
Obr. 47 Detail středové oblasti (zv. 10000x)



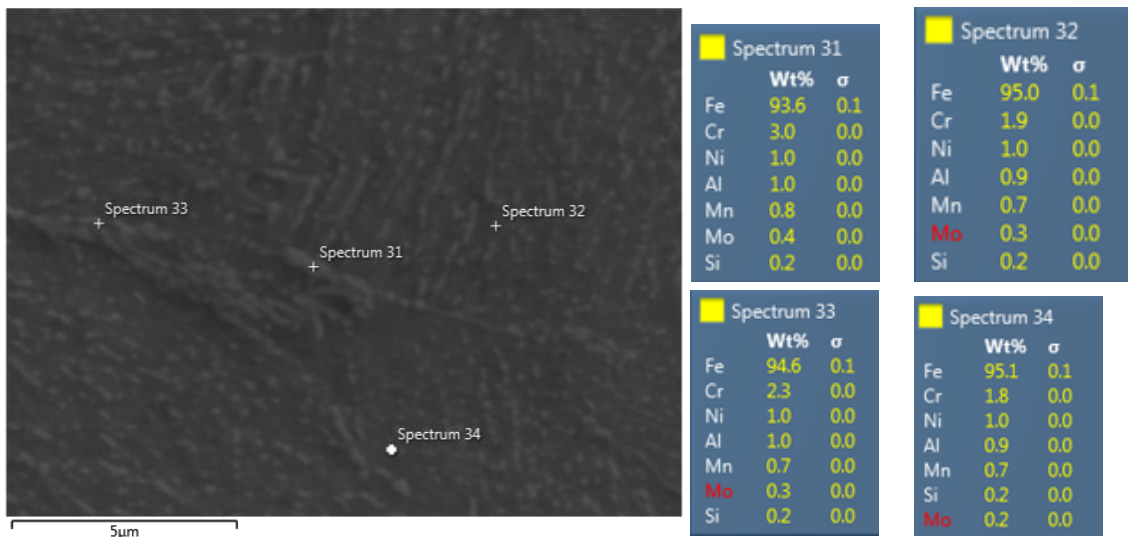
Obr. 48 EDS liniová analýza vzorku 1A



Obr. 49 EDS liniová analýza vzorku 1A při velkém zvětšení přes částici Cr, velikost částice cca 200 nm



Obr. 50 Bodová analýza vrstvy vzorku (zv. 20000x)



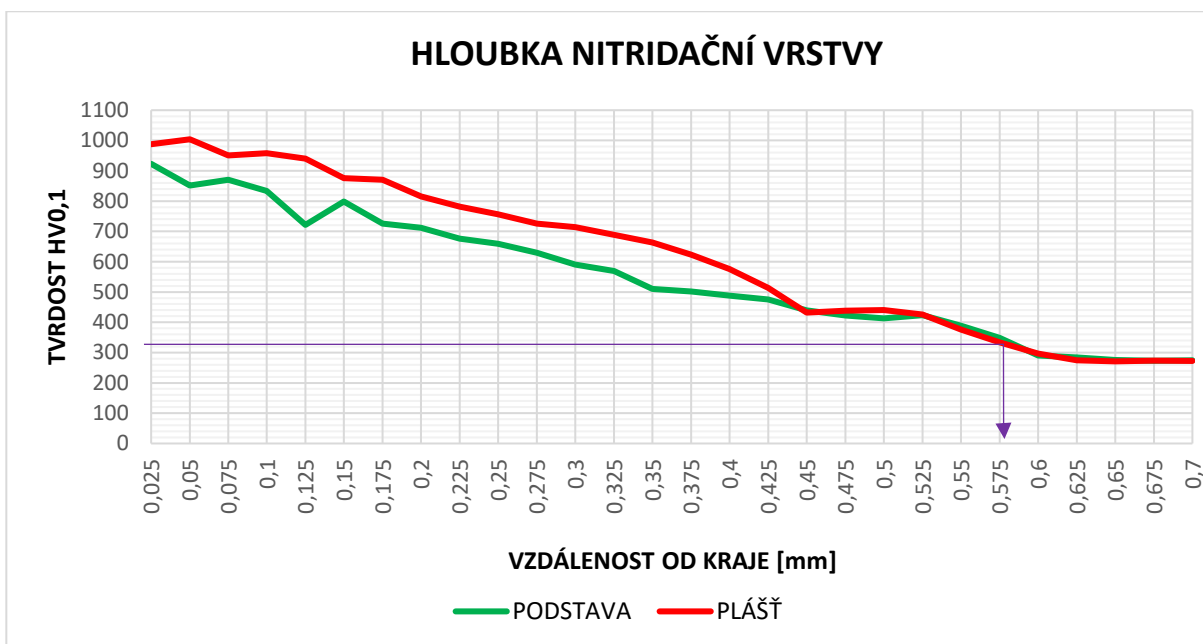
Obr. 51 Bodová analýza středu vzorku (zv. 20000x)

Měření mikrotvrdoti

Hloubka nitridační vrstvy byla opět stanovena podle DIN 50 190-4, jako hloubka, ve které tvrdost dosahuje o 50HV vyšší hodnoty, než je tvrdost jádra. Jako zatížení bylo zvoleno 100 g, tedy HV0,1. Měření bylo provedeno ve dvou směrech – směr z povrchu pláště válce do jádra a směr z povrchu podstavy do jádra (Obr. 52). Výsledkem měření je graf (Obr. 53), na němž je demonstrováno určení hloubky nitridace, přičemž trendy naměřených hodnot mikrotvrdoti jsou v obou případech stejné (u směru z podstavy jsou hodnoty mírně nižší – zelená křivka). V tomto případě vyšla hloubka cca 0,575 mm.



Obr. 52 Vzorek a výbrus s označnými směry zatěžování



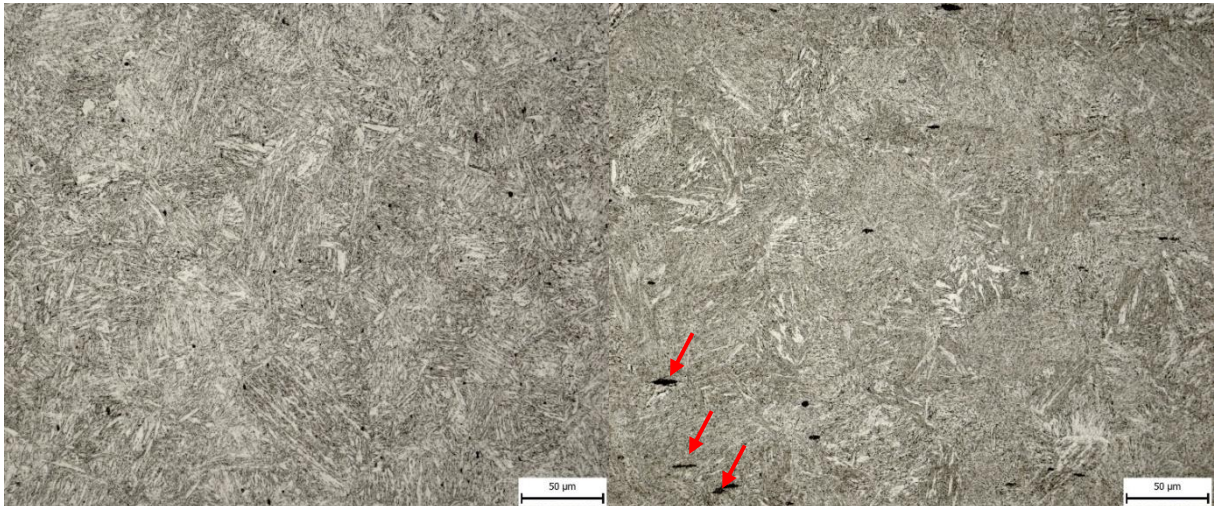
Obr. 53 Graf měření mikrotvrlosti HV 0,1 – hloubka nitridace cca 0,575 mm

4.1.1.3 Vstupní tyče

Celkem byly vytvořeny čtyři vzorky. Z každého kusu (označených 1 a 2) byly vždy připraveny výbrusy ve dvou na sebe kolmých směrech, označované jako: 1 - plocha, průřez a 2 - plocha, průřez (Obr. 17). Cílem analýzy bylo porovnání mikrostruktury mezi těmito dodanými kusy a rovněž porovnání se základním materiálem dříve dodaných vřeten.

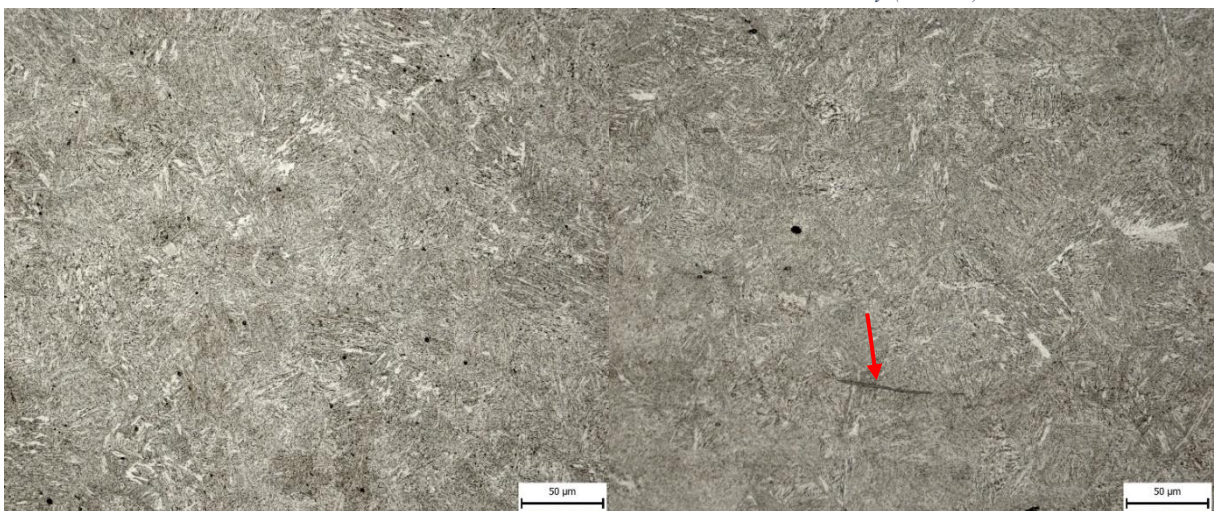
Světelná mikroskopie

Na klasicky připraveném metalografickém vzorku byla zvýrazněna mikrostruktura. Na vzorcích není patrný žádný rozdíl mezi plochou a průřezem ani mezi stavy 1, 2 – mělo by být stejné z důvodu dodání tyčí jedním dodavatelem (Obr. 54, Obr. 55, Obr. 56, Obr. 57). Jedná se ve všech případech o jemnou strukturu s četným výskytem drobnějších vměstků. Tato nižší metalurgická čistota základního materiálu byla pozorována i u obou vřeten.



Obr. 54 Mikrostruktura vzorku 1 - plocha (zv.500x)

Obr. 55 Mikrostruktura vzorku 1-průřez s viditelnými vměstkami (zv.500x)



Obr. 56 Mikrostruktura vzorku 2 - plocha (zv.500x)

Obr. 57 Mikrostruktura vzorku 2 - průřez u šipky podlouhlá částice (zv.500x)

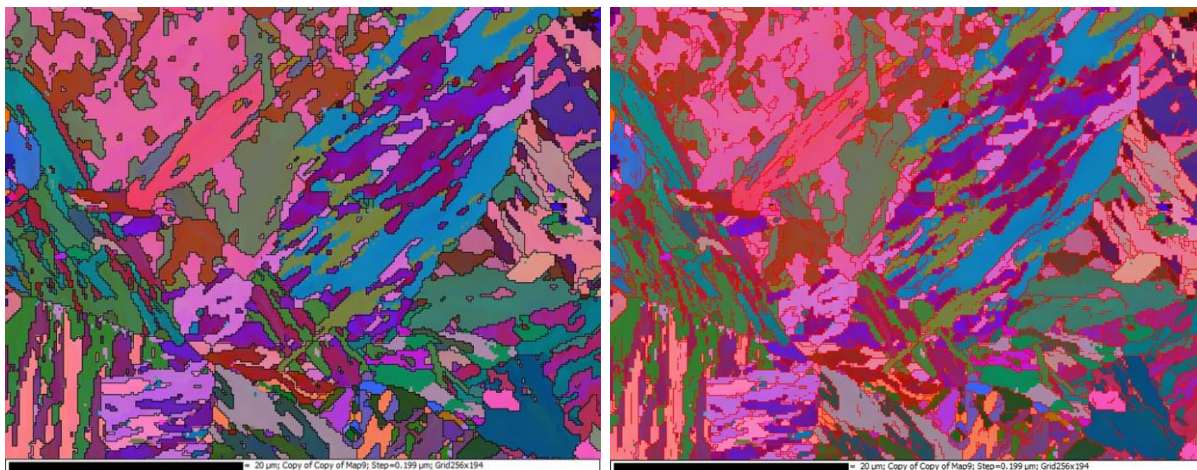
Protože lidské oko není schopno spolehlivě vyhodnotit zastoupení velkého množství různě velkých a rozmístěných drobných objektů v ploše, byla pro přesnou kvantifikaci mikročistoty použita obrazová analýza. Ta se nejčastěji hodnotí z nenaleptaných metalografických výbrusů, na kterých se na světelném mikroskopu jeví vměstky jako černé útvary na jinak bílém pozadí. Tyto snímky jsou potom prahovány na základě barevného kontrastu a softwarově je hodnocen podíl naprahované plochy vzhledem k celkové ploše hodnoceného obrazu. Průměrná mikročistota se počítala na každém výbrusu z pěti snímků a je uvedena v Tab. 3.

Vzorek		1	2	3	4	5	∅	Směrodatná odch.
1	plocha	0,13	0,14	0,14	0,12	0,13	0,132	0,007
	průřez	0,11	0,16	0,13	0,15	0,18	0,146	0,017
2	plocha	0,08	0,09	0,09	0,09	0,1	0,09	0,004
	průřez	0,09	0,15	0,17	0,13	0,1	0,128	0,023

Tab. 3 Měření mikročistoty vstupních tyčí, uveden plošný podíl vměstků v mikrostruktuře v %

EBSD analýza

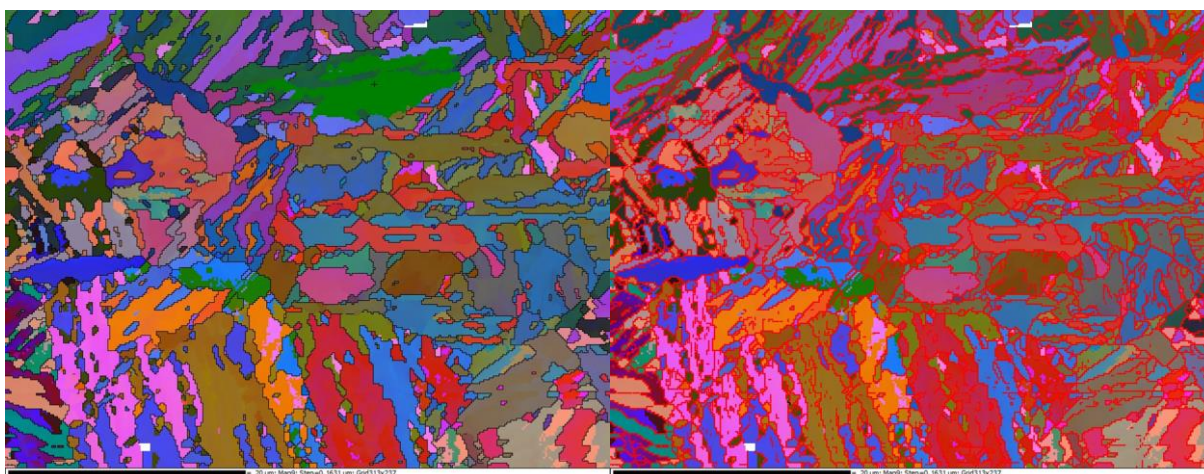
Pro přesnější porovnání stavu matrice martenzitické oceli byla využita analýza difrakcí zpětně odražených elektronů (EBSD). Analýza byla provedena na vyleštěných vzorcích 1 a 2 a na výsledných snímcích jsou zvláště zobrazena černou čarou zrna s úhlem misfitu na hranicích větším než 10° (Obr. 58a, Obr. 59a) a červenou čarou hranice subzrna s menším rozdílem orientací krystalografických mříží (Obr. 58b, Obr. 59b). Hodnocení bylo vždy provedeno z 3 snímků pořízených při zvětšení 5000 x, na každém snímku bylo cca 500 zrn a kolem 1000 subzrn (Tab. 4). Kromě velikosti zrna a plochy zrna byl stanoven také tvarový ukazatel Aspect ratio, který vyjadřuje, jak se tvar zrna podobá kruhovému. Zrna s tvarem blízcím se kruhu mají $AR=1$, čím je zrn protaženější do jedno směru, tím více AR roste. V analyzovaných martenzitických strukturách byly patrné většinou protažené laťky martenzitu. Většina analyzovaných zrn a subzrn měla hodnotu AR menší než 10, výjimečně se objevovala vyšší. Mezi vzorky 1 a 2 nebyl zjištěn výrazný rozdíl, pouze plocha jednotlivých zrn byla u vzorku 1 v průměru o $0,5 \mu\text{m}^2$ menší než u vzorku 2.



a) Zrna

b) Subzrna

Obr. 58 Vzorek 1, EBSD analýza



a) Zrna

b) Subzrna

Obr. 59 Vzorek 2, EBSD analýza

	vzorek 1				vzorek 2			
	1. snímek	2. snímek	3. snímek	Průměr	1. snímek	2. snímek	3. snímek	Průměr
D [μm]	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6	1,8	1,9	1,8
A [μm^2]	4,3	3,7	2,6	3,5	3,2	4,2	4,5	4
AR	2,7	2,6	2,7	2,7	2,5	2,9	2,5	2,6

Tab. 4 Tabulka průměrných hodnot velikosti zrna (D), plochy zrna (A) a tvarového faktoru Aspect ratio (AR)

Měření tvrdosti

Tyče byly měřeny tvrdostí dle Vickerse HV10 – zatížení 10 kg, které je určeno spíše do provozních podmínek. To znamená, že povrch vzorku nemusí dosahovat takové kvality jako je to u mikrotvrdosti (vtisk je dostatečně velký a dobře čitelný). Měření bylo provedeno na třech místech a z nich vypočítaný průměr je uveden v Tab. 5. Rozdíl tvrdostí vzorku 1 a 2 byl velmi malý a lze ho považovat za zanedbatelný v rámci běžného rozptylu hodnot dosahovaných na tepelně zpracovaných ocelích.

Vzorek		1.	2.	3.	$\bar{\sigma}$	směr.odch.
1	plocha	271	270	273	271	1
	průřez	275	268	270	271	3
2	plocha	275	273	275	274	1
	průřez	268	268	270	269	1

Tab. 5 Naměřená tvrdost HV10

Spektrometrie (chemické složení)

Chemické složení bylo stanoveno na obou vzorcích 1,2 a stejně jako se potvrdila shodná mikrostruktura, potvrdilo se i obdobné chemické složení (Tab. 6), které bylo srovnatelné

s chemickým složením nitridovaného vřetene. Rozdíl byl zjištěn pouze u obsahu Ni, který byl u vzorku 2 cca o 0,5% vyšší než u vzorku 1 i než u nitridovaného vřetene.

	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]
Vzorek 1	94,95	0,353	0,159	0,611	0,012	0,015	1,587	0,192	0,971	1,012
Směrodatná odchylka 1	0,076	0,021	0,0006	0,011	0,001	0,001	0,019	0,005	0,025	0,006
Vzorek 2	94,93	0,356	0,016	0,615	0,013	0,019	1,582	0,194	1,582	1,011
Směrodatná odchylka 2	0,045	0,017	0,002	0,009	0,000	0,004	0,009	0,006	0,009	0,002
Vřeteno	95,05	0,325	0,196	0,510	0,011	0,022	1,554	0,168	1,003	0,882
Směrodatná odchylka	0,02	0,013	0,014	0,006	0,000	0,004	0,009	0,010	0,009	0,011

Tab. 6 Průměrné chemické složení vzorků 1 a 2, směrodatné odchylky měření a srovnání s chemickým složením základního materiálu nitridovaného vřetene

Závěrečné zhodnocení

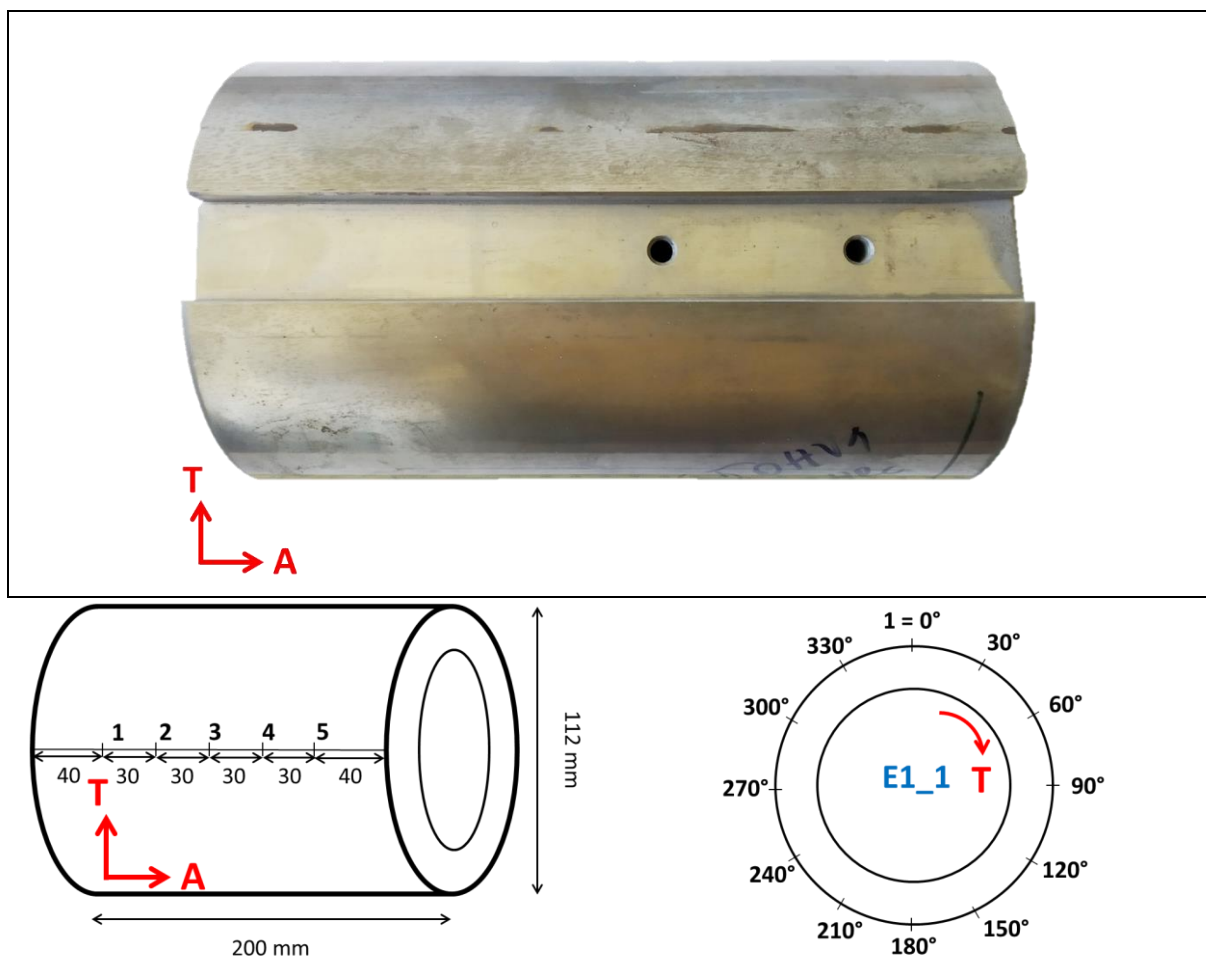
Byly analyzovány celkem tři stavy dodaného vřetene. Prvním stavem bylo nitridované vřeteno po obrábění – po odebrání materiálu, druhým stavem bylo nitridované vřeteno bez obrábění – tedy bez rozměrového úběru a třetím stavem byly základní tyčové polotovary.

U prvních dvou vřeten byly analýzy zaměřeny především na charakterizaci nitridační vrstvy, která dle DIN 50 190-4 dosahuje v případě obrobeného vřetene hloubky cca 0,45 mm (tvrdost na povrchu 840 HV0,1) a u neobrobeného cca 0,575 mm (tvrdost na povrchu 980 HV0,1).

Tvrdost jádra u obou vřeten byla cca 300 HV0,1. Dále byla pomocí řádkovací elektronové mikroskopie detailněji analyzována mikrostruktura materiálu i nitridované vrstvy a chemické složení částic a vměstků v matici.

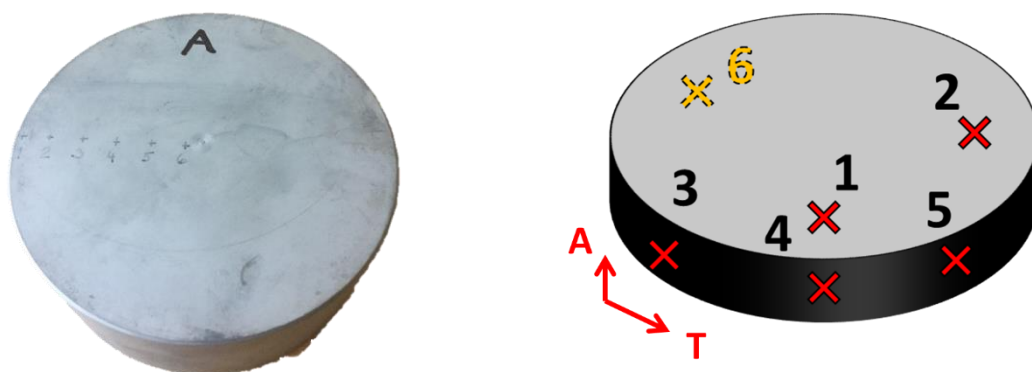
4.1.2 Ověřování mechanických vlastností povrchové vrstvy vybraných vzorků

Difrakční analýza byla aplikována na dvou vzorcích vřeten (označené jako E1 a E2), viz Obr. 60, na nichž byl zjišťován stav zbytkových napětí, fázové složení a mikrostrukturní parametry, a to jak podél rotační osy (axiální), tak po obvodu (transverzální). V jenom vybraném místě byly také získány hloubkové profily všech sledovaných veličin.



Obr. 60 Segment vřetena s vyznačenými směry a nákresy s vyznačenými analyzovanými místy podél osy a po obvodu

Pro ověření procesu nitridace pracovních vřeten byly použity dva segmenty, viz Obr. 61, kde byla zkoumána zbytková napětí, fázové složení a mikrostrukturní parametry v 6 místech (jak na plášti, tak podstavě) s tím, že byly také v jednom místě získány hloubkové profily fázového složení a mikrostrukturních parametrů.



Obr. 61 Segment nitridovaného pracovního vřetena s vyznačenými analyzovanými místy a směry

Analyzovány byly také vzorky z materiálu pro výrobu vřeten od jiného dodavatele, viz Obr. 62, kde byla provedena fázová analýza a popsány mikrostrukturní parametry s tím, že výsledky byly porovnány s původním materiálem.



Obr. 62 Vzorky nového materiálu s elektro-chemicky odleštěnou oblastí, kde byly provedeny difrakční analýzy

Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$. Difrakční měření na vzorcích bylo prováděno na přístroji *X'Pert Pro MPD* v Braggově-Brentanově geometrii s následujícími parametry:

- rentgenka s chromovou anodou a bodovým ohniskem,
- křížové clony $4 \times 1 \text{ mm}^2$, resp. $4 \times 0,25 \text{ mm}^2$,
- β -filtr (absorbující difraktované záření $\text{CrK}\beta$) z tenké vanadové fólie umístěný před proporcionálním xenonovým detektorem.

Parametry difrakčních experimentů:

- interval měření $2\theta_p - 2\theta_k$: $144,9^\circ - 167,1^\circ$,
- velikost kroku $\Delta 2\theta$: $0,6^\circ$,
- hodnoty $\sin^2\psi$ odpovídající náklonům vzorku ψ : 0; 0,15; ...; 0,6 pro kladné i záporné hodnoty úhlu ψ .

Byly analyzovány difrakční linie $\{211\}$ fáze α -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu jednoosého stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel $2\theta^{211}$ byl určen jako těžiště dubletu $\text{CrK}\alpha_1\alpha_2$ difraktovaného mřížkovými rovinami $\{211\}$ fáze α -Fe. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [36]. FWHM parametr (Full Width at Half Maximum) byl určen jako pološířka analyzované difrakční linie $\{211\}$ při náklonu $\psi = 0^\circ$.

Šířka difrakčního maxima je ovlivněna kolísáním mřížkového parametru v ozářeném objemu. Pološířka roste s napětím druhého druhu – mikrodeformací (napětí homogenní v rámci jednotlivých zrn) a s klesající velikostí krystalitů (kdy krystalit se rozumí oblast s téměř ideální krystalickou strukturou; metalografické zrno se obvykle skládá z více krystalitů) [36].

Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenového záření do zkoumaného materiálu, což je v případě železa ca 3–5,5 μm [36].

Difrakční záznamy byly naměřeny na přístroji *X'Pert Pro MPD* v Braggově-Brentanově geometrii s následujícími parametry:

- rentgenka s kobaltovou anodou a bodovým ohniskem,
- křížové clony $4 \times 1 \text{ mm}^2$,
- β -filtr (absorbující difraktované záření $\text{CoK}\beta$) z tenké železné fólie umístěný před 1D detektorem *X'Celerator* s aktivní délkou $2,17^\circ 2\theta$.

Parametry difrakčních experimentů:

- interval měření $2\theta_p-2\theta_k$: $30^\circ-105^\circ$,
- velikost kroku $\Delta 2\theta$: $0,05^\circ$.

Difrakční záznamy byly zpracovány Rietveldovou upřesňovací metodou pro získání fázového složení, mřížkových parametrů a mikrostrukturních parametrů (mikrodeformace a velikosti krystalitů) pomocí softwaru *MStruct*.

Je potřeba zmínit, že u ocelí s nízkým obsahem uhlíku, není možné pomocí difrakčních metod rozlišit mezi jednotlivými modifikacemi α -Fe (železo s kubickou prostorově centrovanou strukturou krystalové mřížky) jako je ferit, perlit, bainit a martenzit, jelikož jejich mřížkové parametry jsou velmi podobné. Legující prvky se mohou vyskytovat jak v substitučním tuhém roztoku α -Fe i nitridů (náhrada atomů železa legujícím prvkem), tak v intersticiálních (atomy jsou v meziatomárních polohách).

Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenového záření do zkoumaného materiálu, což je v případě železa ca $3-9 \mu\text{m}$ [36].

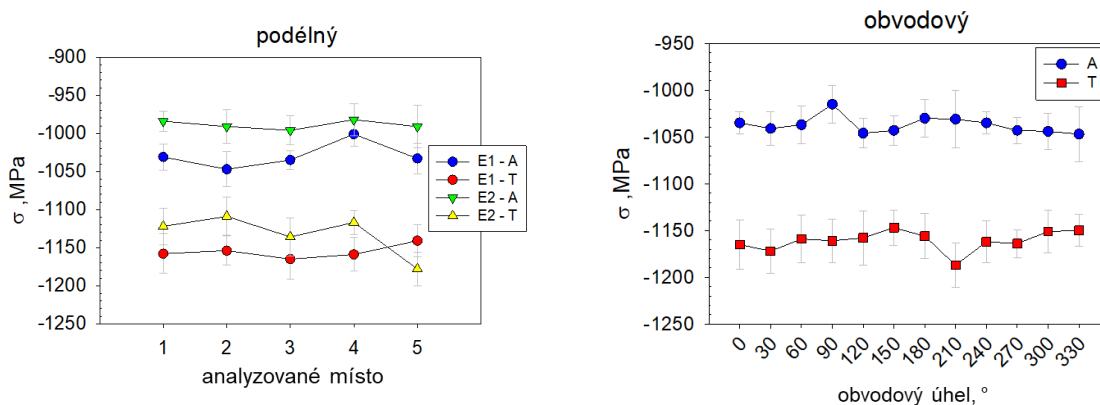
Polohování vzorků při jejich měření na difraktometru bylo provedeno pomocí triangulačního laserového zaměřování s $5\mu\text{m}$ přesností stanovení polohy měřené oblasti povrchu vzorku vůči zdroji laserového svazku.

4.1.2.1 Obrobené nitridované vřeteno – analýzy povrchové vrstvy

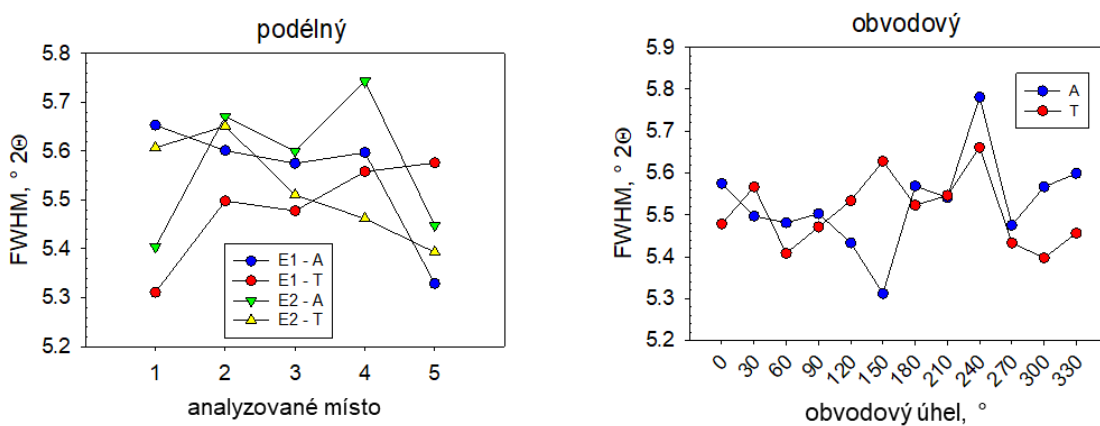
Analýza zbytkových napětí

Na povrchu vzorků vřetena byla zjištěna vysoká tlaková zbytková napětí na povrchu vřetena jak ve směru A, tak ve směru T, s tím, že ve směru T dosahují tlaková napětí hodnot vyšších o ca 100 MPa (Obr. 63). Dva analyzované segmenty se v rámci hodnot zbytkových napětí od sebe výrazně neliší. Zbytková napětí jak v podélném směru, tedy podél axiální osy, tak po obvodu jsou v rámci experimentální chyby shodná. Nebyly pozorovány žádné výraznější lokální nehomogenity.

Parametr FWHM, tedy pološířka difrakčního maxima, je také jak podél axiální osy, tak po obvodu homogenní. Nebyly pozorovány žádné výrazné lokální nehomogenity (Obr. 64).

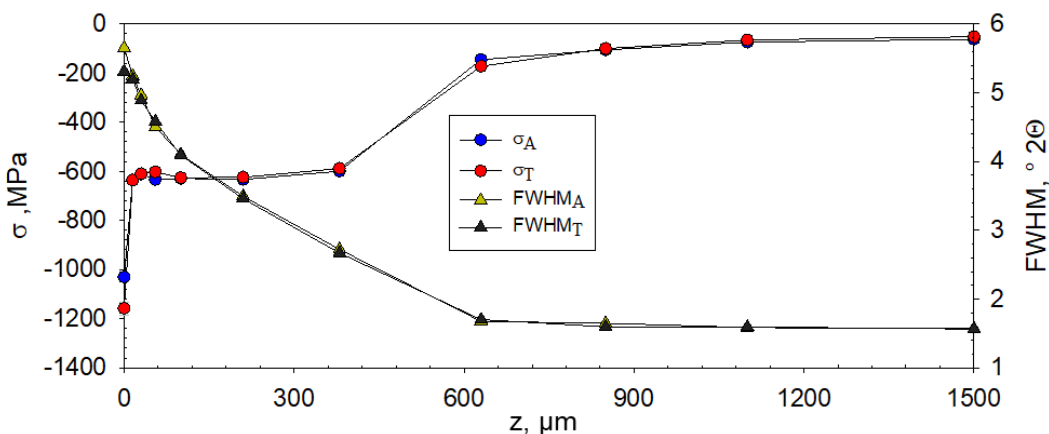


Obr. 63 Rozložení povrchových makroskopických zbytkových napětí



Obr. 64 Rozložení parametru FWHM na povrchu vřetena

U daných vzorků byla analyzována makroskopická zbytková napětí a parametr pološírky FWHM také ve větších hloubkách, kdy byly postupně odleptávány dílčí vrstvy materiálu a byly provedeny analýzy (Obr. 65).



Obr. 65 Hloubkový profil makroskopických zbytkových napětí a parametru FWHM

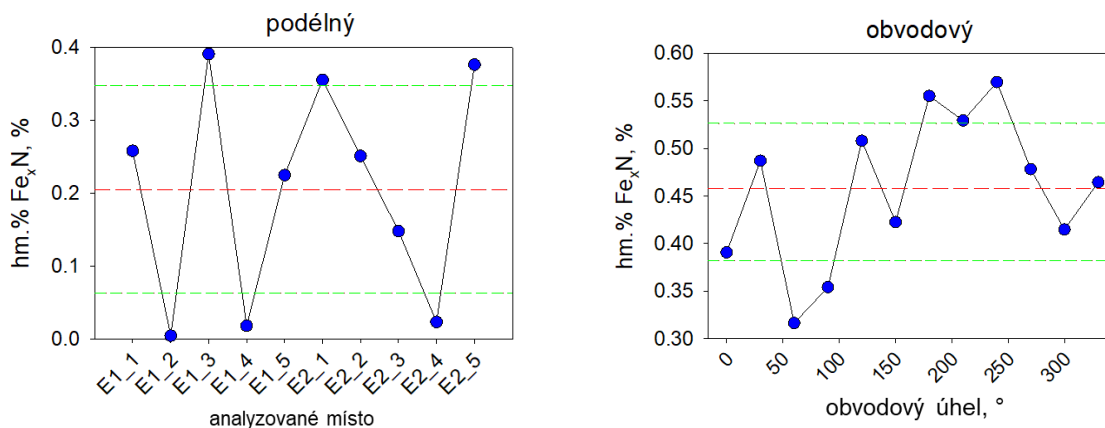
V povrchových vrstvách vřetena do ca 600 μm klesají tlaková zbytková napětí i pološírka. Největší gradient pozorujeme v prvních 20 μm , což je důsledek finálního mechanického

opracování vřeten. Z průběhu zbytkových napětí a pološířky je možné tvrdit, že hloubka nitridace je ca 600 μm , kde atomy dusíku v intersticiálních polohách způsobují lokální napětí krystalické mřížky.

Průběh zbytkových napětí a dalších sledovaných veličin je ovlivněn jednak nitridací, ale také mechanickým zpracováním vřetena.

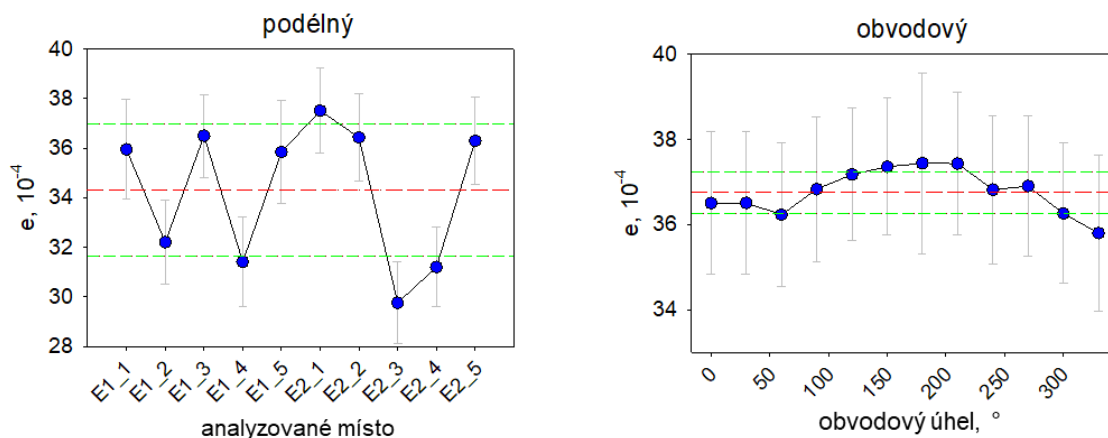
Kvalitativní a kvantitativní fázová analýza

Pomocí fázové analýzy byly na povrchu segmentu identifikovány čtyři fáze: $\alpha\text{-Fe}$, Fe_3C , Fe_3N a Fe_4N . Fáze legujících prvků nebyly pozorovány, jejich podíl je pod hranicí citlivosti analýzy (většinou $<0,1$ hm.%). Byl zjištěn velmi nízký podíl nitridů železa na povrchu vřetena ($<0,5$ hm.%), kdy podél axiální osy je větší rozptyl hodnot než po obvodu vřetena (Obr. 66). Přesnost výpočtu je ovšem negativně ovlivněna nízkým podílem minoritních fází.

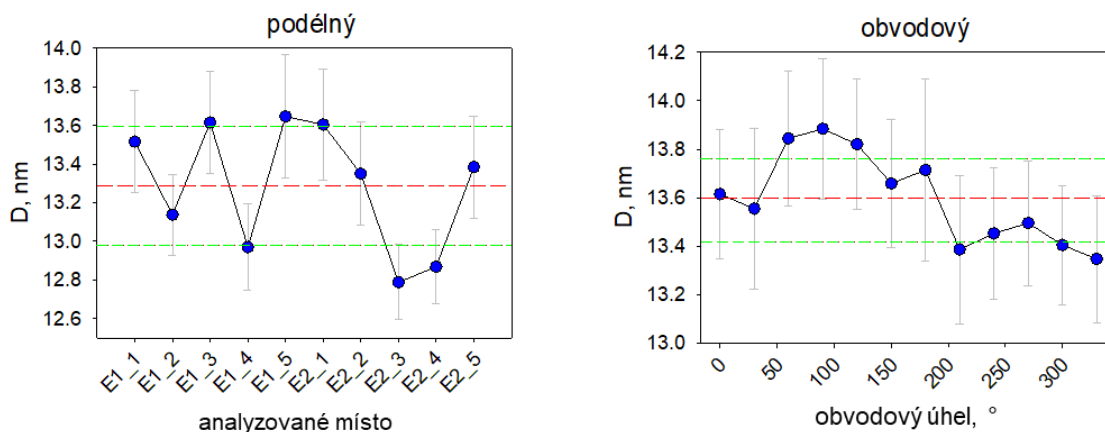


Obr. 66 Fázové zastoupení nitridů na povrchu vřetena

Hodnoty mikrostrukturních parametrů (velikosti krystalitů a mikrodeformace) $\alpha\text{-Fe}$ jsou na povrchu vřetena homogenní. Avšak v axiálním směru vykazují hodnoty opět vyšší rozptyl než po obvodu vřetena. Nicméně chyby mikrostrukturních parametrů jsou srovnatelné se směrodatnou odchylkou jejich hodnot.

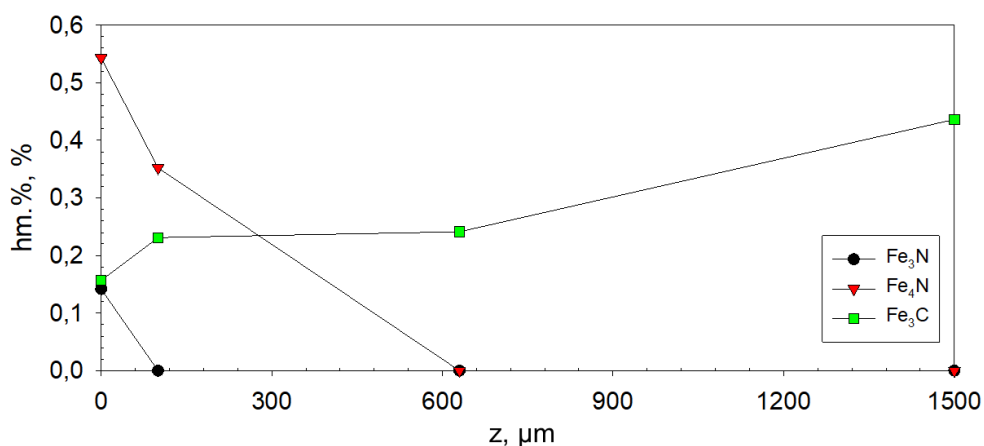


Obr. 67 Rozložení mikrodeformace $\alpha\text{-Fe}$



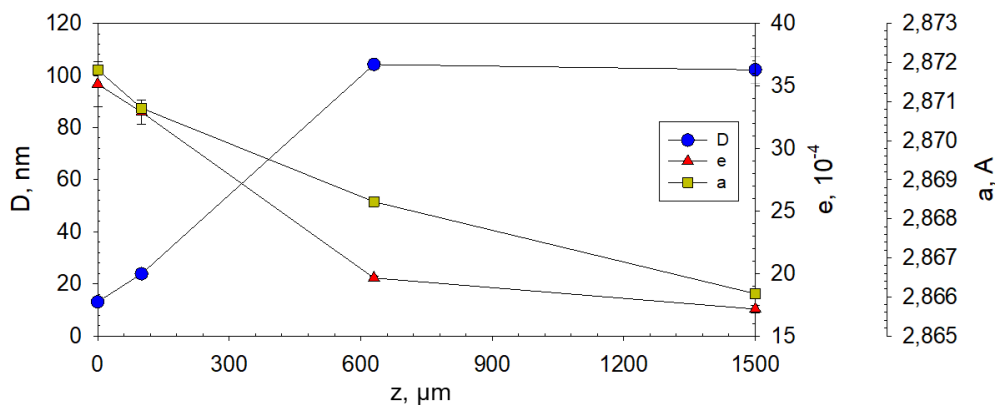
Obr. 68 Rozložení velikosti krystalitů D α -Fe

Ze zjištěného hloubkového profilu fázového složení lze tvrdit, že dle předpokladů s hloubkou podíl nitridů klesá, a naopak mírně roste podíl karbidu. Přesnost výpočtu je ovšem negativně ovlivněna nízkým podílem zmiňovaných fází.



Obr. 69 Hloubkový profil hmotnostního zastoupení minoritních fází

Hodnoty mřížkového parametru α -Fe i mikrodeformace ve sledované hloubce klesají. Větší mřížkový parametr α -Fe je opět důsledkem nitridace, kdy atomy dusíků v intersticiálních polohách roztahují krystalovou mřížku. Konvergence hodnot velikosti krystalitů a mikrodeformace ke svému maximumu, resp. minimumu, lze opět korelovat s hloubkou nitridace – cca 600 μm .

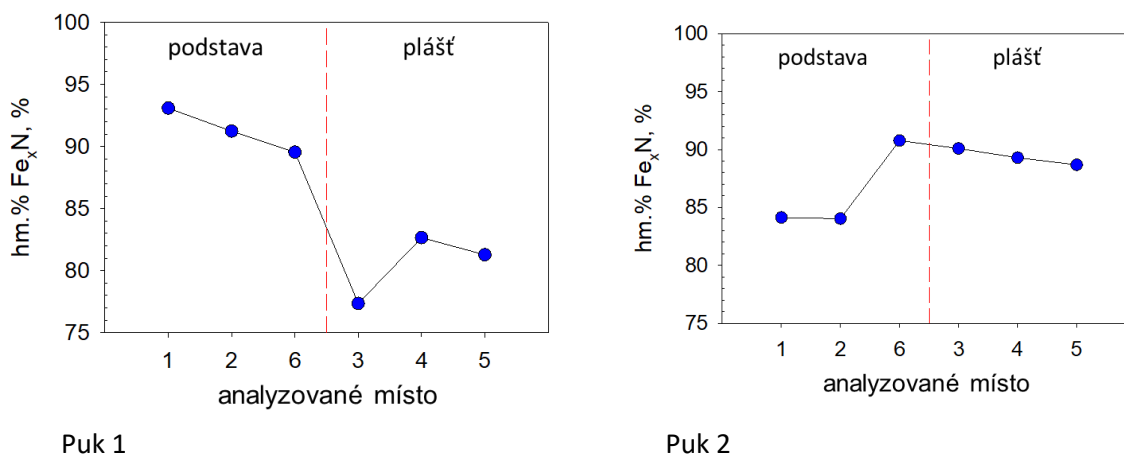


Obr. 70 Hloubkový profil velikosti krystalitů D , mikrodeformace e a mřížkového parametru a α -Fe

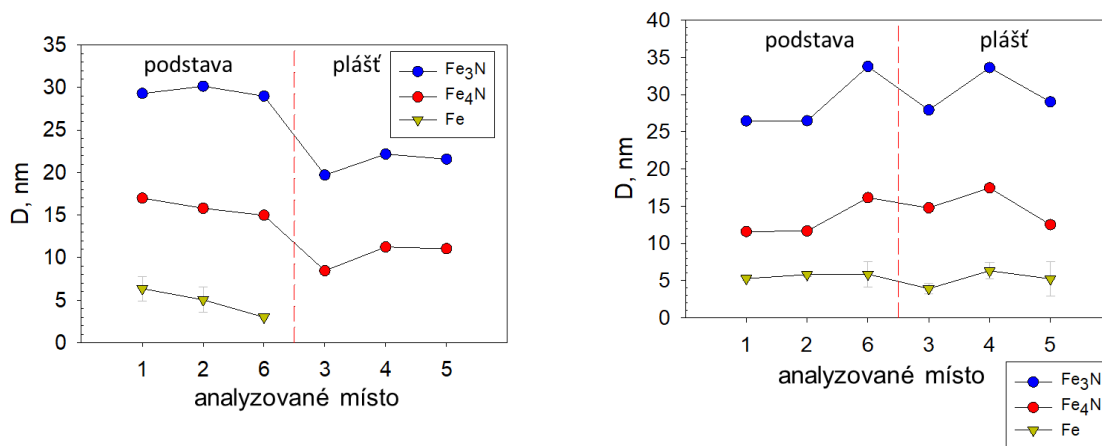
4.1.2.2 Neobrobené nitridované vřeteno

Kvalitativní a kvantitativní fázová analýza

U vzorků neobrobeného nitridovaného vřetena byla provedena pouze fázová analýza a byly popsány mikrostrukturní parametry. Porovnání hodnot fázového složení a velikosti krystalitů na povrchu vzorku 1 a 2 je na Obr. 71 a Obr. 72 a hloubkové profily sledovaných veličin jsou na Obr. 73 a Obr. 74. Velikost krystalitů α -Fe oblastí 3–5 puku 1 byla odhadnuta na menší než 2 nm (zpřesňování velikosti krystalitů pomocí Rietveldovy metody bylo v tomto případě nestabilní). Mikrodeformace vykazovala pro všechny analyzovaná místa nevýznamné hodnoty.



Obr. 71 Porovnání hmotnostního zastoupení fází nitridů, zbytek tvoří α -Fe

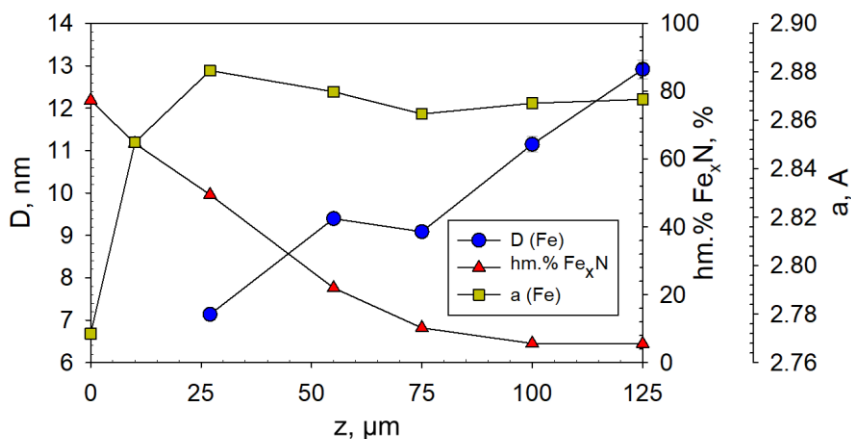


Puk 1

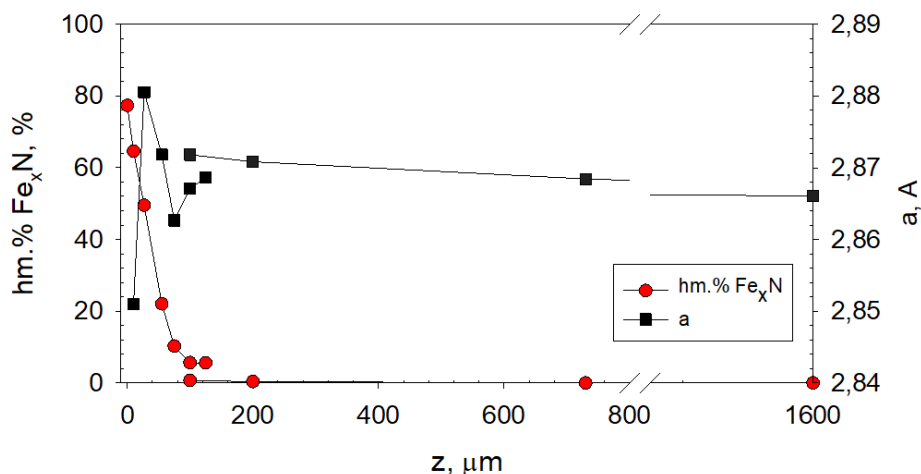
Puk 2

Obr. 72 Porovnání velikosti krystalitů D jednotlivých fází

Z hloubkového profilu (Obr. 73) je patrné, že podíl nitridů v povrchové 100 μm vrstvě puku rychle klesá. Naopak velikost krystalitů $\alpha\text{-Fe}$ stoupá a mřížkový parametr se ustálí na hodnotě 2,87 Å. Na povrchu dochází hlavně k růstu nitridů, naopak v podpovrchových vrstvách jsou atomy dusíku pravděpodobně v intersticiálních polohách. Růstem nitridů dochází k rozpadu krystalitů $\alpha\text{-Fe}$.

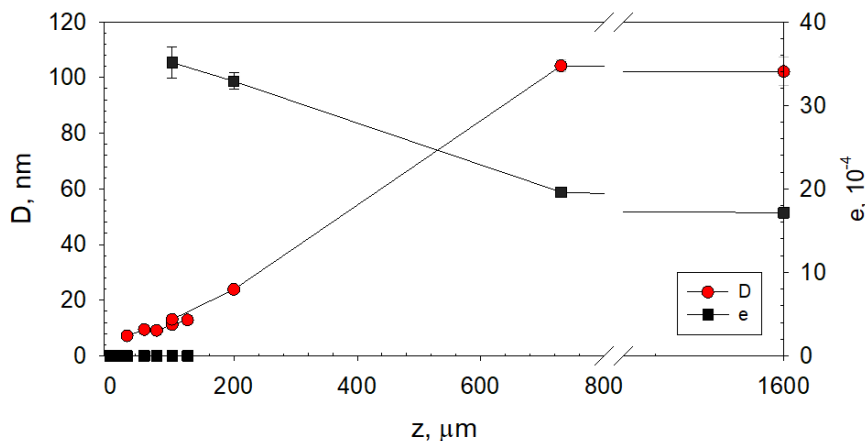


Obr. 73 Hloubkový profil velikosti krystalitů D , hmotnostního zastoupení nitridů a mřížkového parametru a $\alpha\text{-Fe}$ v místě 3 na puku 1



Obr. 74 Porovnání hloubkových profilů hmotnostního zastoupení nitridů a mřížkového parametru a $\alpha\text{-Fe}$, kdy je napojen profil vřetena na nitridovaný segment

Z porovnání hloubkových profilů hmotnostního zastoupení nitridů a mřížkového parametru α -Fe (Obr. 74) je patrné, že profily pracovního vřetena a nitridovaných segmentů na sebe navazují. Největšímu gradientu u obou veličin dochází v prvních 100 μm , které jsou při finálním opracování odstraněny.



Obr. 75 Porovnání hloubkových profilů velikosti krystalitů D a mikrodeformace e α -Fe, kdy je napojen profil vřetena na nitridovaný segment

Hloubkový profil velikost krystalitů (Obr. 75) také navazuje, ale mikrodeformace byla pro nitridovaný segment nepatrná. Z toho lze vyvodit, že hloubkový profil krystalitů je primárně důsledkem nitridace a naopak profil mikrodeformace je důsledkem mechanického opracování po nitridaci.

4.1.2.3 Vstupní tyče

Kvalitativní a kvantitativní fázová analýza

U vzorků vstupních tyčí byla provedena pouze fázová analýza a byly popsány mikrostrukturní parametry s tím, že výsledky byly porovnány s původním materiálem. Porovnání sledovaných parametrů u původního a nového materiálu pro výrobu vřeten je uvedeno v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Pomocí fázové analýzy byly pro objemový materiál jak původní, tak nový určeny pouze dvě fáze: α -Fe a Fe_3C .

	Hloubka [μm]	hm. % ferit	D [nm]	ΔD [nm]	$e \cdot 10^{-4}$	$\Delta e \cdot 10^{-4}$	a [\AA]
Původní materiál	1500	99,5	102	5	17,1	0,3	2,86608
Nový materiál - 1	300	99,2	214	9	21,4	0,1	2,86547
Nový materiál - 2	400	99,4	116	5	19,6	0,2	2,86730

Tab. 7 Porovnání fázového složení, velikosti krystalitů D , mikrodeformace e a mřížkového parametru a α -Fe u původního a nového materiálu

Z tabulky porovnávající původní a nový materiál je patrné, že z hlediska rentgenografické difrakční analýzy jsou oba materiály shodné.

Dva analyzované vzorky nového materiálu se liší pouze ve velikosti krystalitů, což lze vysvětlit jiným tepelně-mechanickým zpracováním, případně lokální nehomogenitou. Tento rozdíl však není zásadní, jelikož tyče jsou při výrobě vřeten zušlechťovány.

4.1.3 Závěrečné zhodnocení k úvodní studii návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena.

V rámci této kapitoly byly na konkrétním příkladu materiálu stávajícího pracovního vřetena popsány jednotlivé metody materiálových analýz, destruktivní i nedestruktivní, které umožňují dostatečným způsobem popsat vlastnosti daného materiálu. Díky tomu byly definovány vlastnosti pracovního vřetena vyráběného stávajícím výrobním postupem. Popsané materiálové analýzy budou následně z důvodu zachování objektivitu postupu analýzy materiálových vlastností použity také v rámci hodnocení materiálových povlaků u vzorků reprezentujících duté vřeteno.

Pro další analýzu vzorků, které budou reprezentovat duté vřeteno, však není nutné realizovat veškeré popsané metody. Budou vybrány pouze některé metody, a sice s ohledem na potenciál budoucího využití rychlé analýzy materiálových vlastností z pohledu průkaznosti metody, její rychlosti a náročnosti.

Pro další postup řešení disertační práce proto byly zvoleny tyto metody:

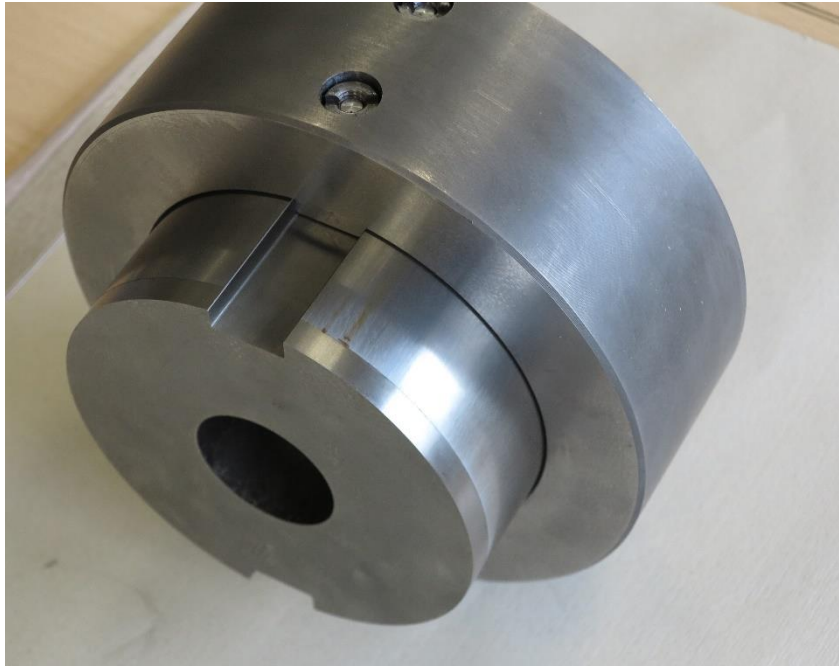
- Světelná mikroskopie
- Elektronová mikroskopie
- Měření mikrotvrdosti
- EDX analýza
- Analýza zbytkových napětí
- Kvalitativní fázová analýza
- Kvantitativní fázová analýza pomocí Rietveldovy metody

4.1.4 Výroba pracovního a dutého vřetena

Pracovní vřeteno bylo vyrobeno přesně dle výkresové dokumentace, tedy včetně předepsaného tepelného zpracování a finálního opracování na požadovaný rozměr. Výroba dutého vřetena taktéž zahrnovala kompletní předepsané tepelné zpracování, avšak finálního rozměru bylo dosaženo až následně na dílčích vzorcích, a to z důvodu, který bude popsán dále v textu.

Pracovní vřeteno je uloženo v dutém vřetenu posuvně s minimální vůlí 0,007 – 0,015 mm, avšak nikoli v rámci celé délky dutého vřetena, nýbrž pouze ve dvou pruzích o určité šíři. Z toho důvodu byly jak pracovní, tak také duté vřeteno rozřezáno na stejně široké vzorky, které byly následně v dalším průběhu řešení použity jako sestava reprezentující reálné vzájemné uložení těchto dvou těles, včetně unášecích per, které slouží pro přenos krouticího momentu z dutého na pracovní vřeteno, jak je patrné z Obr. 76. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění

vzorku při dělení vzorků, bylo použita technologie řezání vodním paprskem. Takto byl tedy vytvořen dostatečný počet vzorků na plánované experimenty.



Obr. 76 Sestava vzorku dutého a pracovního vřetena

Myšlenka disertační práce spočívá v porovnávání vzájemné interakce různých materiálů mezi sebou s cílem eliminovat vznik nežádoucí vibrační koroze při zachování požadovaných vlastností povrchové vrstvy součástí. Záměrem tedy je nanášet na základní materiál různé typy materiálů. Jak již bylo uvedeno výše, mezi pracovním a dutým vřetenem je umožněn vzájemný relativní přímočarý pohyb. Z technického a zároveň také ekonomického hlediska je tedy výhodnější nanášet přídatným materiál na duté vřeteno, neboť je potřeba takto ošetřit pouze část dutého vřetena v šíři, která je ve styku s pracovním vřetenem. V opačném případě by bylo potřeba ošetřit pracovní vřeteno téměř v celé jeho délce.

Nyní již k popisu důvodu, proč bude finální průměr vzorku dutého vřetena opracován na finální rozměr jednotlivě na každém vzorku samostatně. Je to právě z důvodu nanášení vrstvy přídatného materiálu, kdy je zapotřebí nejprve zvětšit vnitřní průměr vzorku dutého vřetena. Zároveň tím dojde k odstranění původní nitrídané vrstvy a následně bude nanášena nová vrstva přídatného materiálu a teprve posléze dojde k finálnímu opracování na požadovaný rozměr tak, aby byla dodržena předepsaná vůle mezi vzorkem dutého a pracovního vřetena.

Jak bylo popsáno v kapitole 2.6.1, materiál používaný k výrobě dutého vřetena je výkovek z legované konstrukční oceli s označením dle normy DIN 34CrAl6, což odpovídá dříve uváděnému označení dle ČSN třídě 14340. Během výroby prochází duté vřeteno několikrát procesem chemicko-teplého zpracování, což je zejména časově velmi náročné. Alternativní aplikací povlaků s požadovanými vlastnostmi může dojít k náhradě za některé procesy chemicko-teplého zpracování a tím pádem k výraznému zkrácení průběžné doby výroby a následně také k úspoře finanční.

Po konzultaci s odborníky z oblasti aplikace žárových nástřiků byly s ohledem na požadované antikorozi a mechanické vlastnosti vytipovány materiály povlaků, které budou aplikovány na vzorky a následně budou analyzovány vlastnosti těchto povlaků, resp. použitých materiálů. Přehled vybraných materiálů povlaku, včetně použité metody aplikace materiálu povlaku je uveden níže:

NiCrBSi	HVOF
WC-CoCr	HVOF
Nistelle C276W	Laser (LMD)
Stellite 6	Laser (LMD)
Ferro 55	Laser (LMD)

Veškeré analyzované vzorky byly před prováděním samotných analýz obrobny, kdy finální technologická operace byla broušení, z důvodu dodržení požadovaných tvarových a rozměrových tolerancí. Z důvodů možné pozdější potřeby a zejména zdokumentování všech podstatných podmínek vzniku jednotlivých vzorků jsou níže uvedeny technické podmínky použité při obrábění jednotlivých vzorků, a to jak při hrubování (Tab. 8), tak také na čisto (Tab. 9) Tab. 8 Řezné podmínky použité při hrubování vzorků.

Hrubování							
	Typ nástroje	Řezná rychlost [m/s]	Otáčky nástroje [1/min]	Otáčky obrobku [1/min]	Posuv [mm/min]	Přísuv [mm]	Procesní kapalina
NiCrBSi	CBN 1A1-D20-T15-H8 B151	16,75	16 000	0	8 750	0,003	Olej, Diamond 100
WC-Co-Cr	Diamant 1A1-D20-T15-H8 D46	16,75	16 000	0	8 750	0,003	Olej, Diamond 100
Nistelle C276W	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,005	Quakercool 2902 BFF
Stellite 6	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,005	Quakercool 2902 BFF
Ferro 55	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,005	Quakercool 2902 BFF

Tab. 8 Řezné podmínky použité při hrubování vzorků

Dokončování							
	Typ nástroje	Řezná rychlost [m/s]	Otáčky nástroje [1/min]	Otáčky obrotu [1/min]	Posuv [mm/min]	Přísuv [mm]	Procesní kapalina
NiCrBSi	CBN 1A8-D20-T14-H8 B91	16,75	16 000	0	4 550	0,001	Olej, Diamond 100
WC-Co-Cr	Diamant 1A1-D20-T15-H8 D46	16,75	16 000	0	4 550	0,001	Olej, Diamond 100
Nistelle C276W	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,003	Quakercool 2902 BFF
Stellite 6	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,003	Quakercool 2902 BFF
Ferro 55	110x45x50,8 mm 31C80 - J7V500	32,54	5 700	80	500	0,003	Quakercool 2902 BFF

Tab. 9 Řezné podmínky použité při obrábění vzorků na čisto

Jak pro hrubování, tak pro obrábění na čisto byly použity brusky. Nástroje byly použity různé typy brousících koučů, jejichž popis je uveden níže.

Brousící kotouč CBN 1A8-D20-T14-H8 B91

- 1A8 materiál kotouče kubický bor nitrid
- D20 vnější průměr kotouče
- T14 šířka kotouče
- H8 průměr dřívku, na němž je přichycen vlastní kotouč
- B91 zrnitost

Analogicky to platí i pro kotouč z diamantu (1A1).

Pro vzorky s povlaky vyrobenými metodou LMD byl použit kotouč na bázi karbidu křemíku.

Brousící kotouč 110x45x50,8 mm 31C80-J7V500

- 110 vnější průměr kotouče
- 45 šířka kotouče
- 50,8 vnitřní průměr kotouče
- 31C materiál kotouče na bázi karbidu křemíku
- 80 zrnitost (jemná)
- J tvrdost kotouče (měkká)
- 7 struktura (otevřená)
- V typ pojiva (keramické)
- 500 maximální povolená rychlost (50 m/s)

Pro vzorky s povlaky z materiálu NiCrBSi a WC-Co-Cr byl jako procesní kapalina použit olej Diamond 100, pro zbylé vzorky byla použita procesní kapalina vodou ředitelná Quarkercool 2902 BFF.

4.2 Návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků

K analýzám bylo dodáno celkem pět vzorků povlaků po finálním obrobení. V rámci experimentů bylo využito standardní vybavení metalografické laboratoře, které je blíže popsáno v kapitole 4.2.

4.2.1 Povlak NiCrBSi - Technologie HVOF

K analýze byly dodány k porovnání dva kusy vzorků s označením A a B s vrstvami nástřiku NiCrBSi provedené ve VZÚ v Plzni technologií HVOF (Obr. 77). Z obou kusů byly provedeny metalografické výbrusy a byla na nich provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodu vrstvy a substrátu. Analýza chemického složení vrstvy a přechodu do základního materiálu byla provedena u obou vzorků pomocí energeticky disperzní rentgenová spektrometrie (EDX) s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Tescan Vega3 (Obr. 78). Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti přes vrstvu do základního materiálu.



Obr. 77 Vzorky s vrstvami nástřiku NiCrBSi s označením A, B s vyznačeným místem řezu pro odběr metalografických vzorků

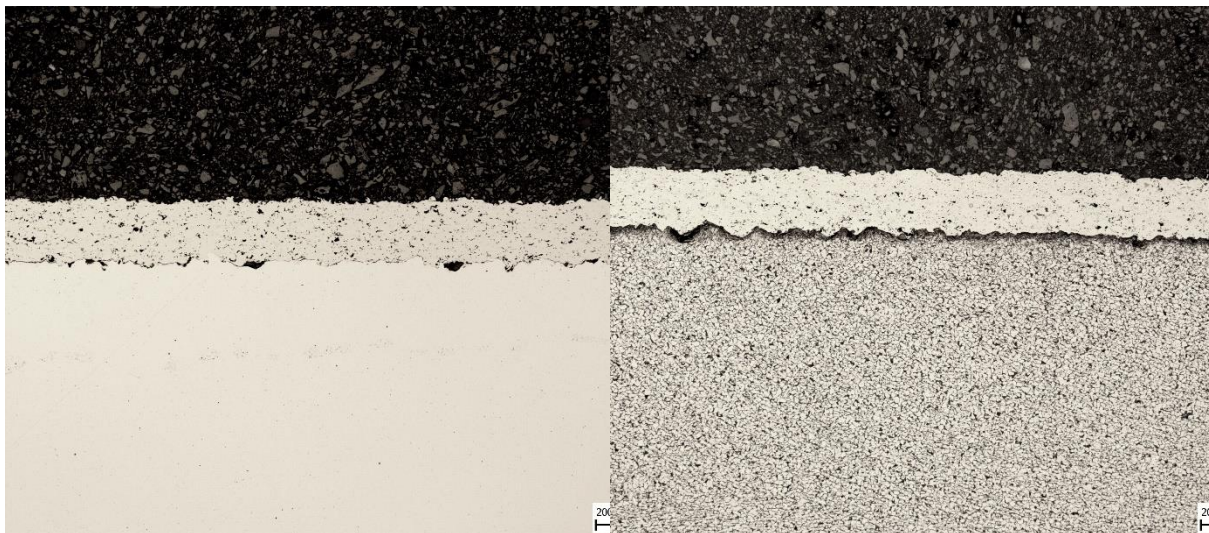


Obr. 78 Řádkovací elektronový mikroskop Tescan Vega3

Světelná mikroskopie

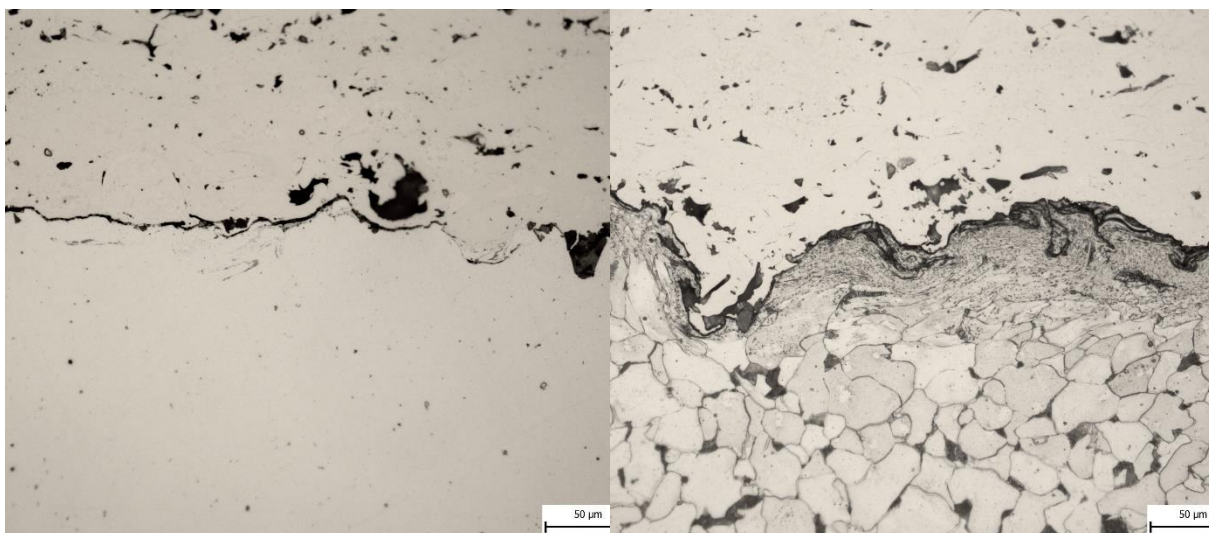
Na obou kusech vzorků byla provedena světelná mikroskopie vrstvy a přechodu do základního materiálu v neleptaném i leptaném stavu v 3 % Nitalu (Obr. 79 - Obr. 86) a

skenovací elektronová mikroskopie vrstvy a přechodu do základního materiálu (Obr. 87 - Obr. 94). Již na snímcích pořízených ve vyleštěném, nenaleptaném, stavu je patrná pórovitost vrstvy, která je pro žárové nástřiky typická. Dále jsou patrné kavity na rozhraní vrstva/substrát. Místy je patrná výrazná plastická deformace povrchu substrátu (Obr. 81) a v některých případech rovněž původní tvar kuliček nástřiku na hranici vrstva/substrát (Obr. 85). Výrazná plastická deformace povrchových oblastí substrátu je ještě lépe patrná v detailních snímcích naleptaných struktur (Obr. 82, Obr. 86).



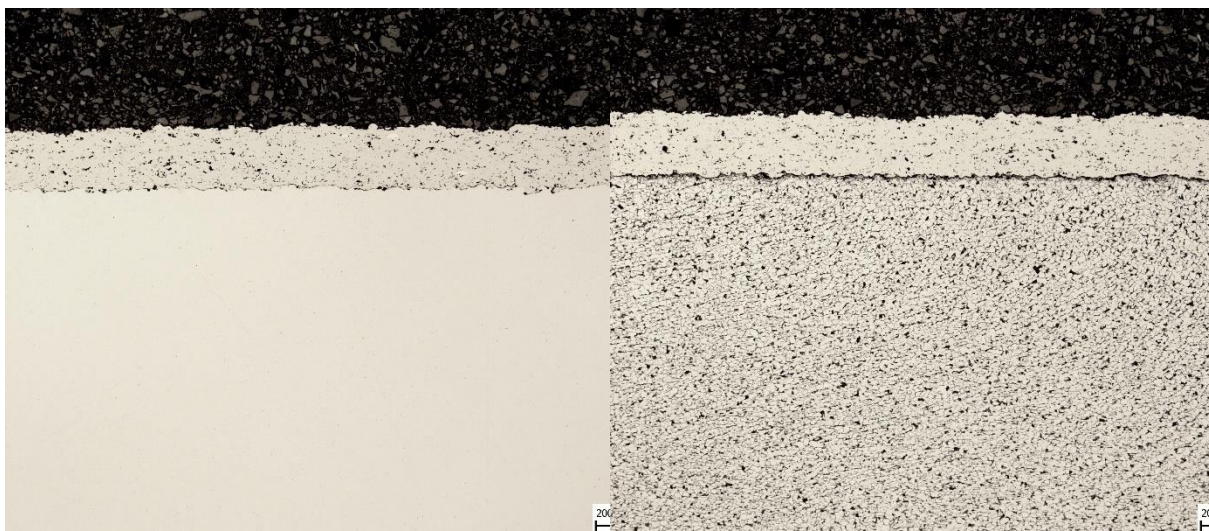
Obr. 79 Vzorek A-vrstva-ZM-neleptáno-50x-SM

Obr. 80 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-50x-SM



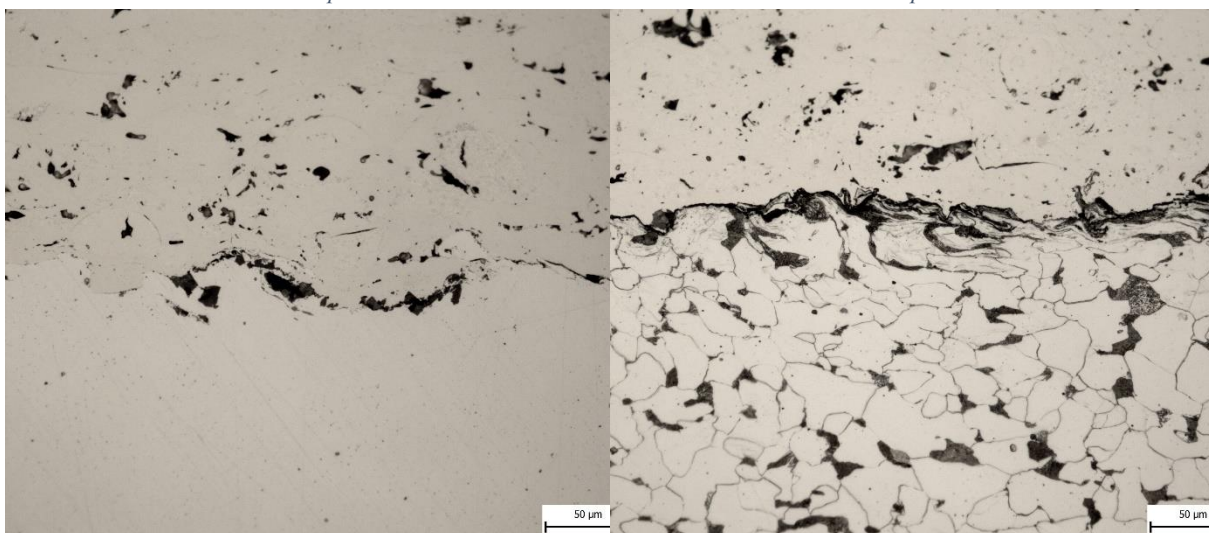
Obr. 81 Vzorek A-vrstva-ZM-neleptáno-500x-SM

Obr. 82 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-500x-SM



Obr. 83 Vzorek B-vrstva-ZM-neleptáno-50x-SM

Obr. 84 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-50x-SM

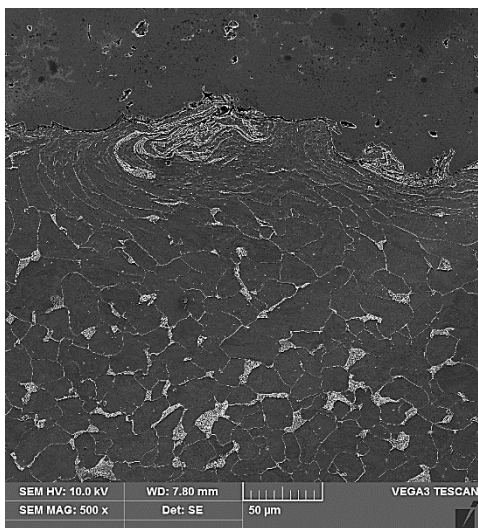


Obr. 85 Vzorek B-vrstva-ZM-neleptáno-500x-SM

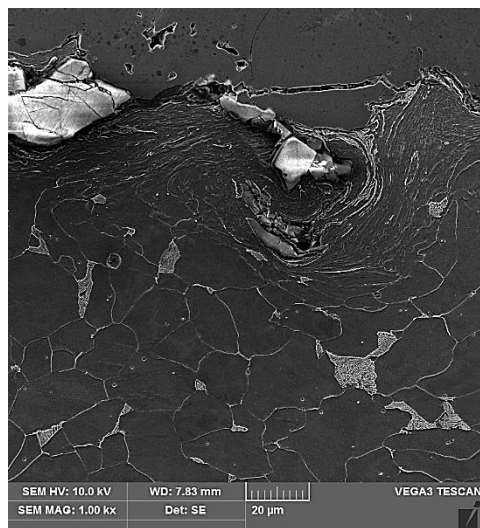
Obr. 86 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-500x-SM

Řádkovací elektronová mikroskopie

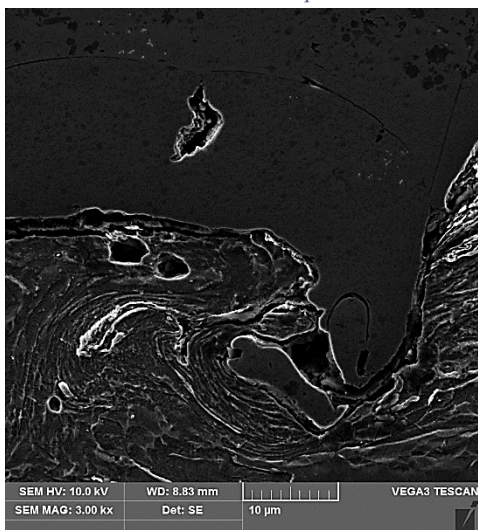
Detailní dokumentace vrstev a přechodu vrstva/substrát byla dále provedena s využitím řádkovací elektronové mikroskopie (Obr. 87 - Obr. 94). Orientace vzorku na snímcích je stejná, jako byla u světelné mikroskopie, substrát je v dolní části snímků, vrstva v horní. Na snímcích je patrná jak intenzivní plastická deformace povrchu substrátu, tak rovněž místní přítomnost poměrně velkých křehkých částic na rozhraní tenká vrstva/substrát (Obr. 88). Může se v tomto případě jednat o zbytky tryskacího materiálu, protože povrch substrátu je před nanášením nástřiku typicky čistěna a zdrsňen otryskáním. Tato operace může přispívat rovněž k lokální plastické deformaci povrchu substrátu. Při větším zvětšení je kromě toku deformovaného materiálu patrná rovněž deformace povrchových perlitických oblastí (Obr. 93, Obr. 94).



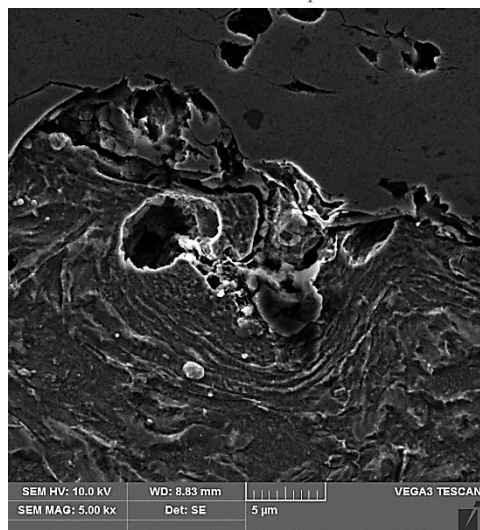
Obr. 87 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-500x-SEM



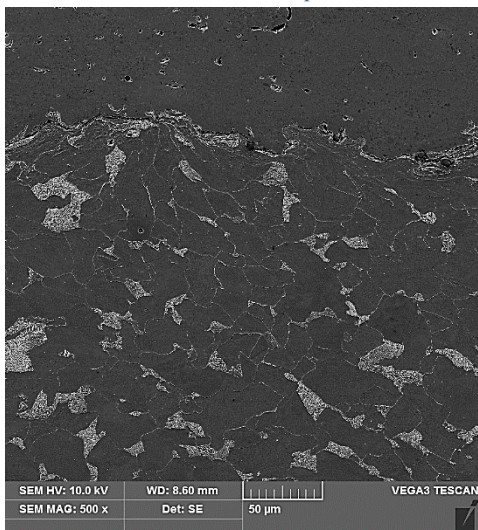
Obr. 88 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-1000x-SEM



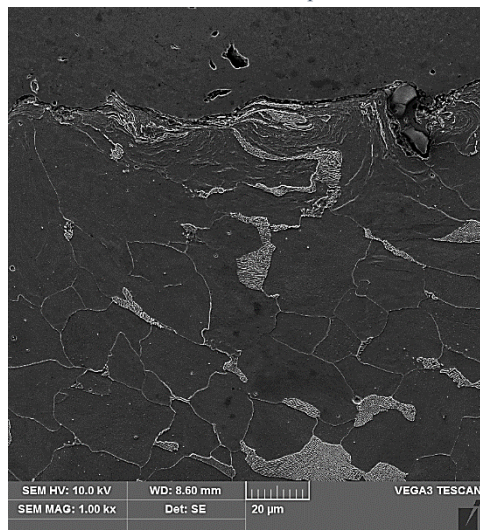
Obr. 89 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-3000x-SEM



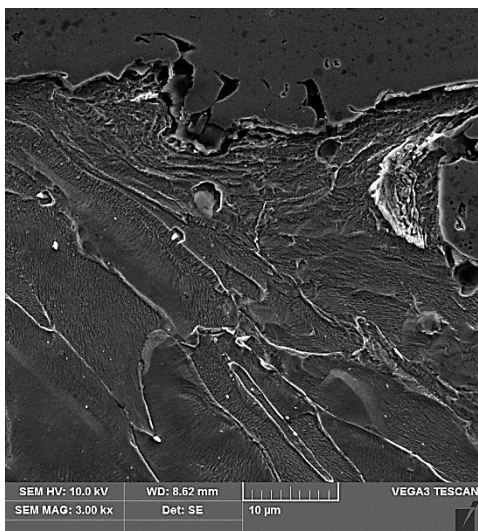
Obr. 90 Vzorek A-vrstva-ZM-leptáno-5000x-SEM



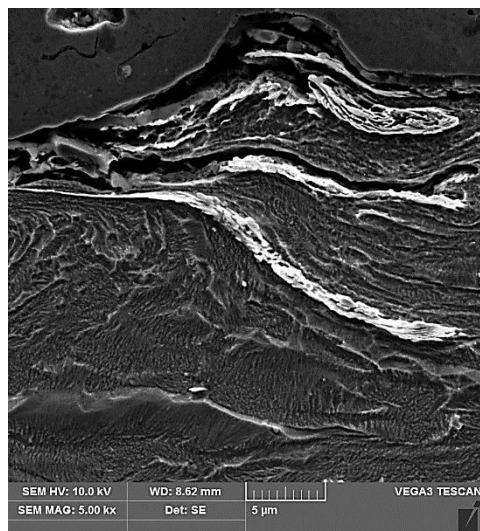
Obr. 91 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-500x-SEM



Obr. 92 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-1000x-SEM



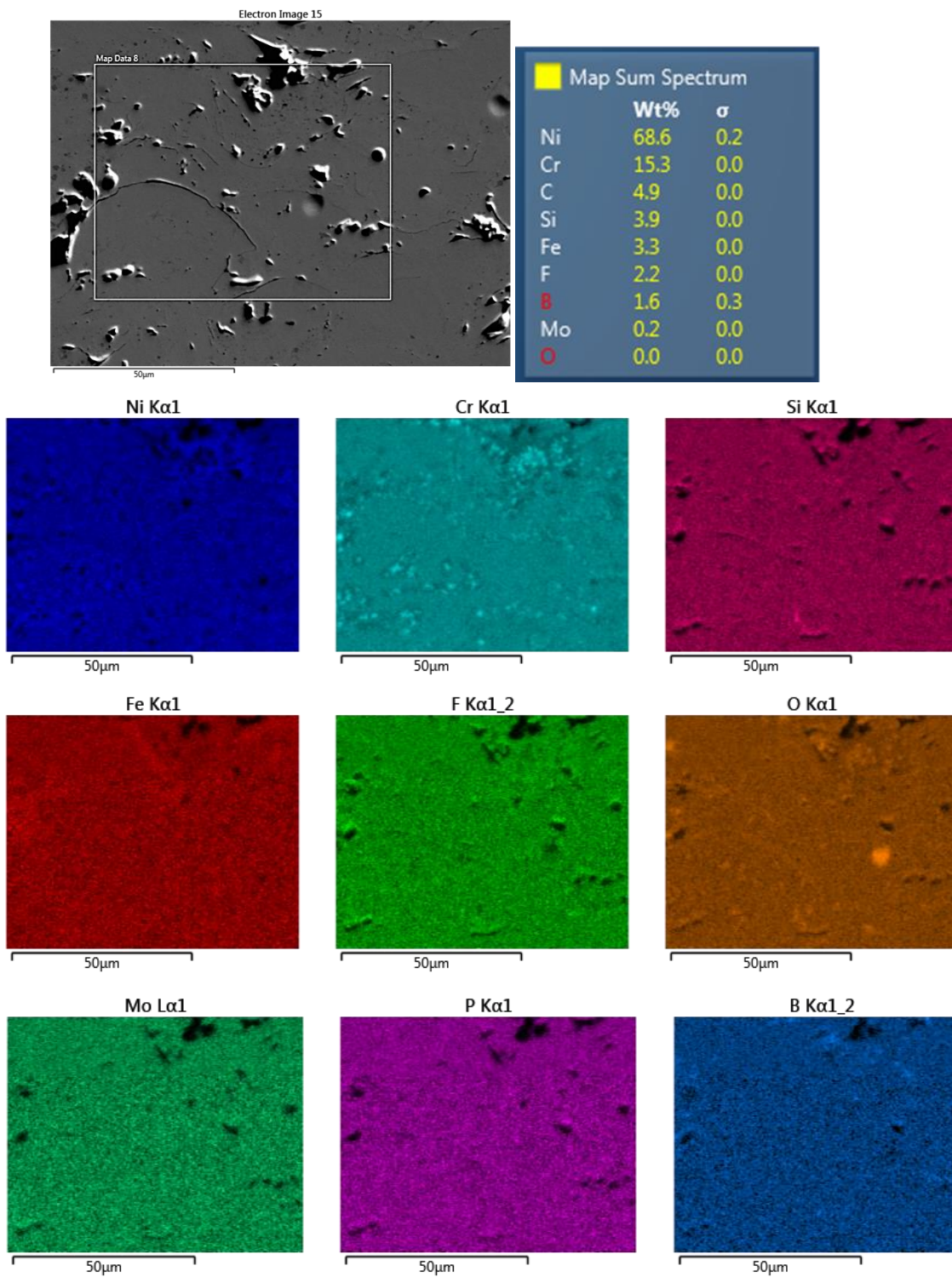
Obr. 93 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-3000x-SEM



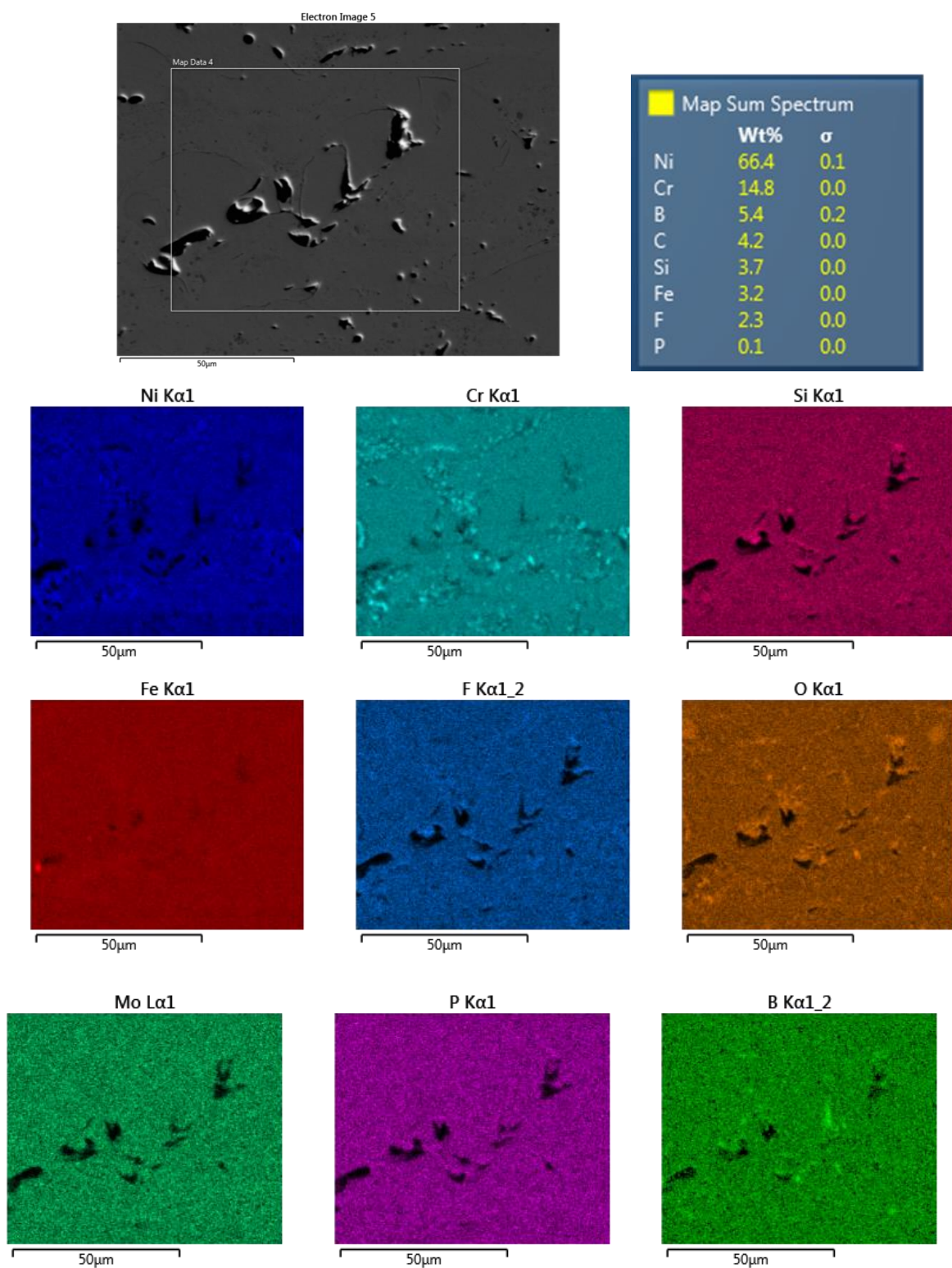
Obr. 94 Vzorek B-vrstva-ZM-leptáno-5000x-SEM

EDS, EDX analýza

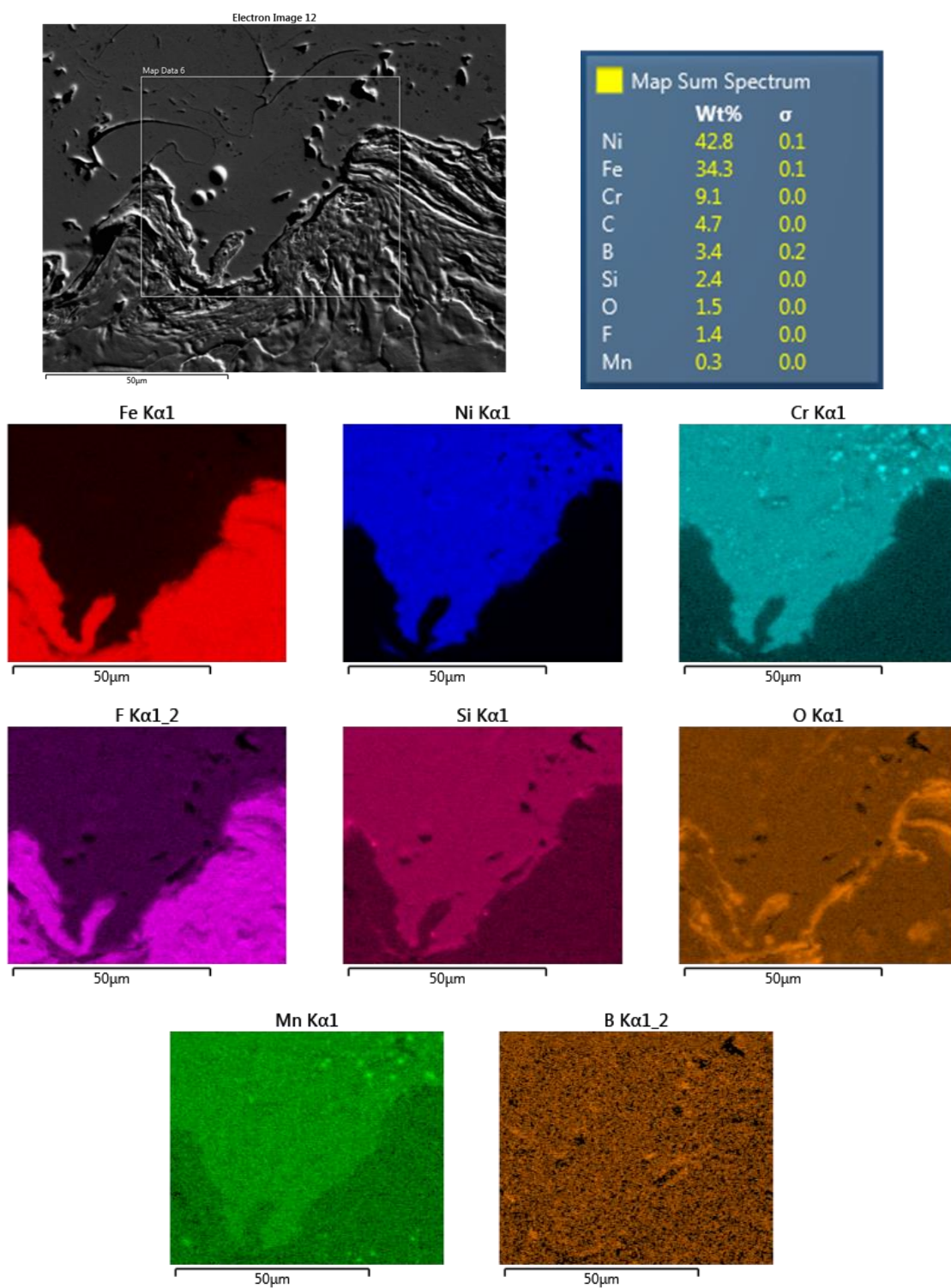
U obou vzorků byla provedena na několika místech plošná EDS analýza vrstvy a přechodu do základního materiálu při zvětšení 3000x s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků (Obr. 95 - Obr. 98). Dále byla změřena liniová EDX analýza přes vrstvu do základního materiálu při zvětšení 200x (Obr. 99, Obr. 100).



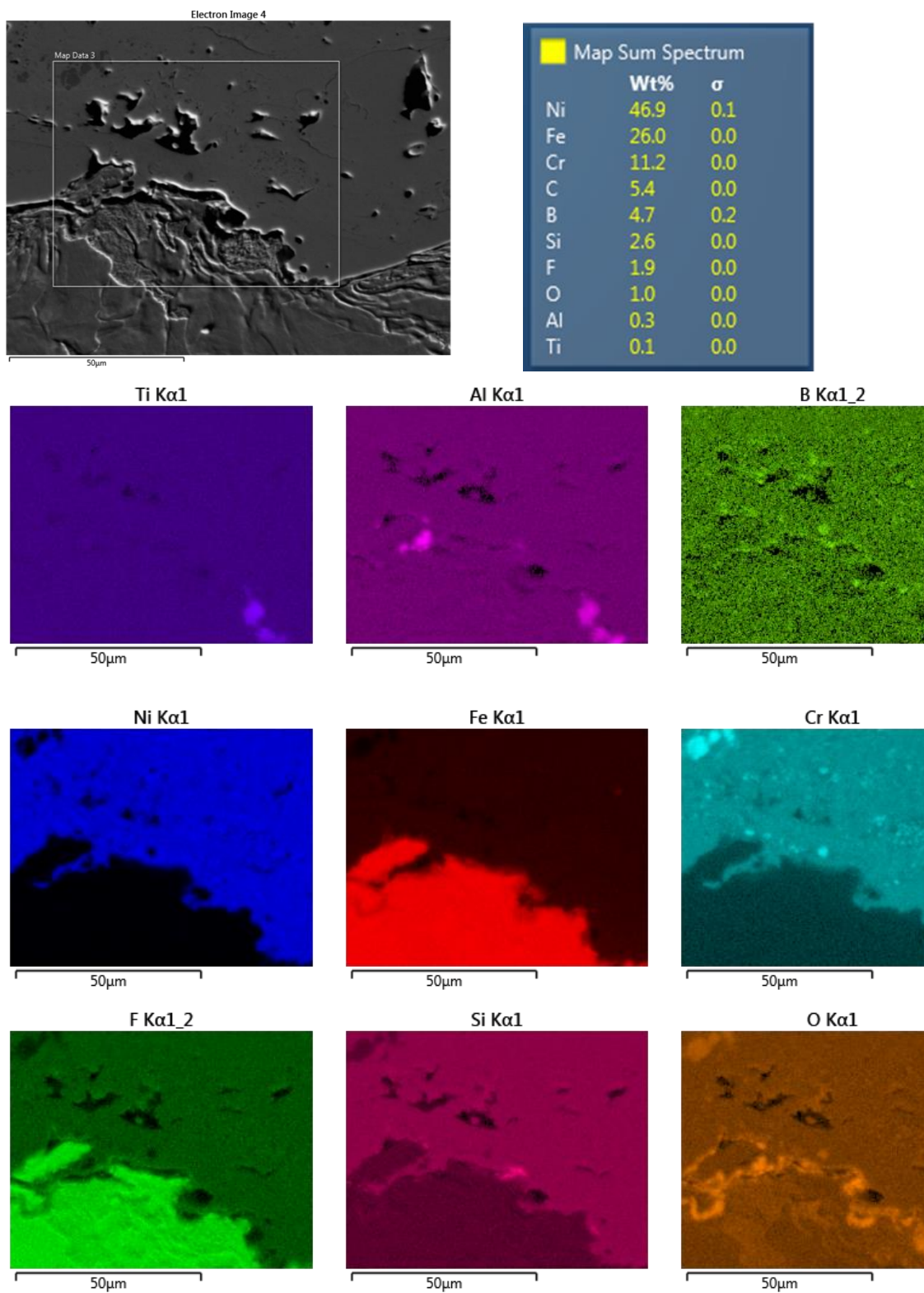
Obr. 95 Vzorek A-ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků-zvětšení 3000x. Lokálně zvýšený obsah chormu v částicích.



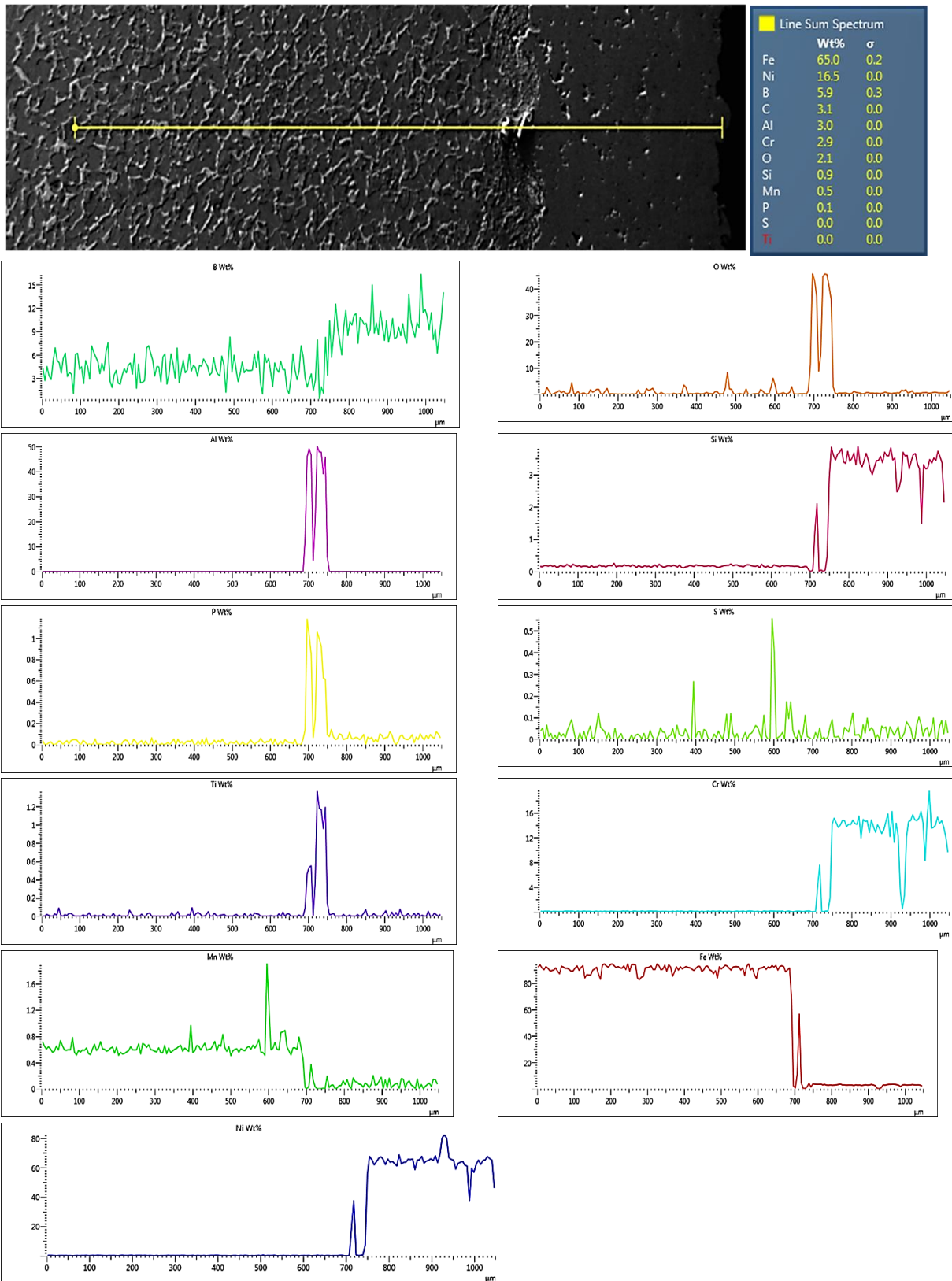
Obr. 96 Vzorek B-ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků-zvětšení 3000x. Lokálně zvýšený obsah chromu v částicích a místy rovněž boru.



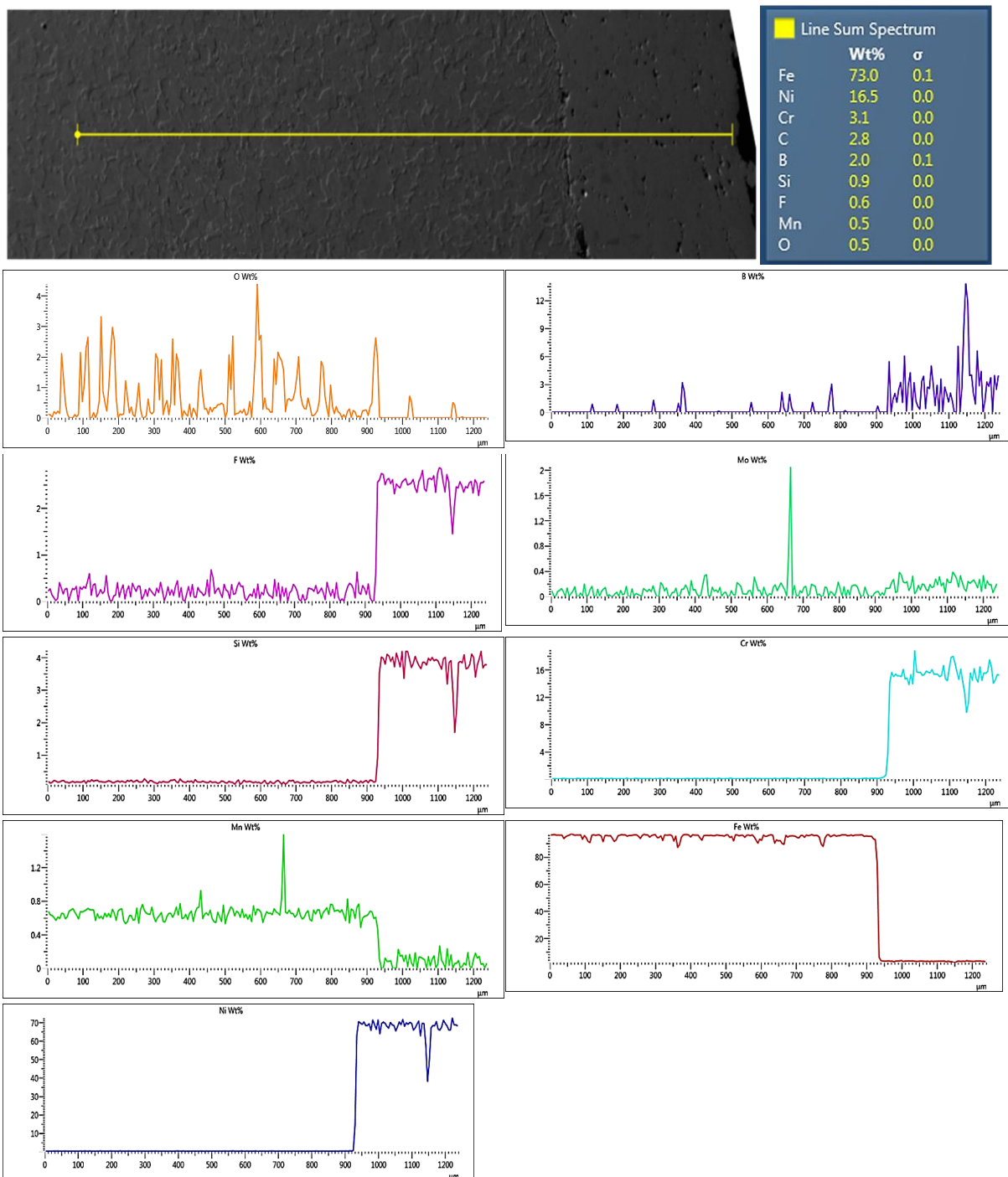
Obr. 97 Vzorek A-ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do ZM s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků-zvětšení 3000x



Obr. 98 Vzorek B-ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do ZM s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků-zvětšení 3000x. Na rozhraní materiálů je patrná výrazná oxidace a přítomnost Ti a Al obohacených oblastí. V nástřiku drobné chromové částice.



Obr. 99 Vzorek A-ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra -zvětšení 200x. I zde je patrná oxidace rozhraní a přítomnost hliníku a titanu (píky na pozicích cca 680-750 μm .)

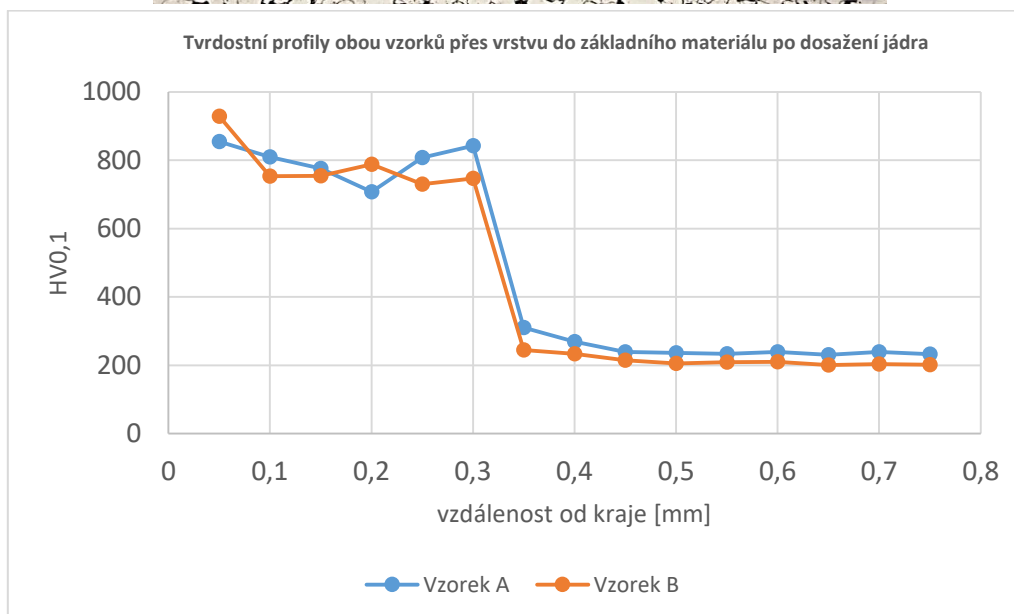


Obr. 100 Vzorek B-ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra -zvětšení 200x

Měření mikrotvrdomosti

U obou vzorků byl změřen průběh mikrotvrdomosti se zatížením 100 gramů, HV 0,1, a to ve směru od povrchu přes vrstvu do základního materiálu po dosažení tvrdosti jádra (Obr. 101). Z výsledků je zřejmé, že průběhy mikrotvrdomostí byly u obou měřených vzorků obdobné,

s maximálními tvrdostmi přesahujícími 800 HV 0,1 u povrchu. K rychlému poklesu tvrdosti došlo v obou případech v rozmezí hloubek cca 0,3 - 0,35 mm pod povrchem. Tvrdost substrátu lehce přesahovala 200 HV 0,1 a tvrdosti vzorku A byly většinou vyšší než u vzorku B.



Obr. 101 Průběh mikrotvrdosti HV0,1 přes vrstvu do základního materiálu po dosažení jádra u obou vzorků s označením A, B

4.2.2 WC-Co-Cr – Technologie HVOF

K analýze byl dodán vzorek ve tvaru prstence z oceli 14340 s označením WC s předpokládanou vrstvou nástřiku WC (Obr. 102). Ze vzorku z vnější strany bez vrstvy i vnitřní strany prstence s vrstvou byly provedeny metalografické výbrusy a byla na nich provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodových oblastí. Analýza chemického složení byla provedena na vnitřní straně prstence u povrchových a přechodových oblastí a přes

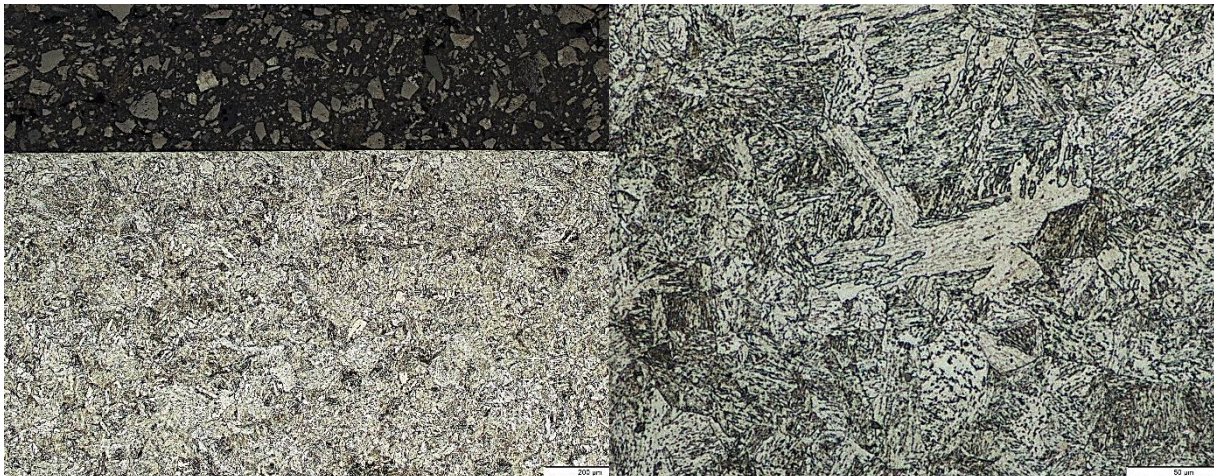
vrstvu do základního materiálu pomocí energeticky disperzní spektrometrie (EDS) s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Zeiss CrossBeam Auriga 340. Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti přes vrstvu do základního materiálu.



Obr. 102 Vzorek s označením WC s vrstvou nástřiku WC s vyznačenými místy řezu na metalografii

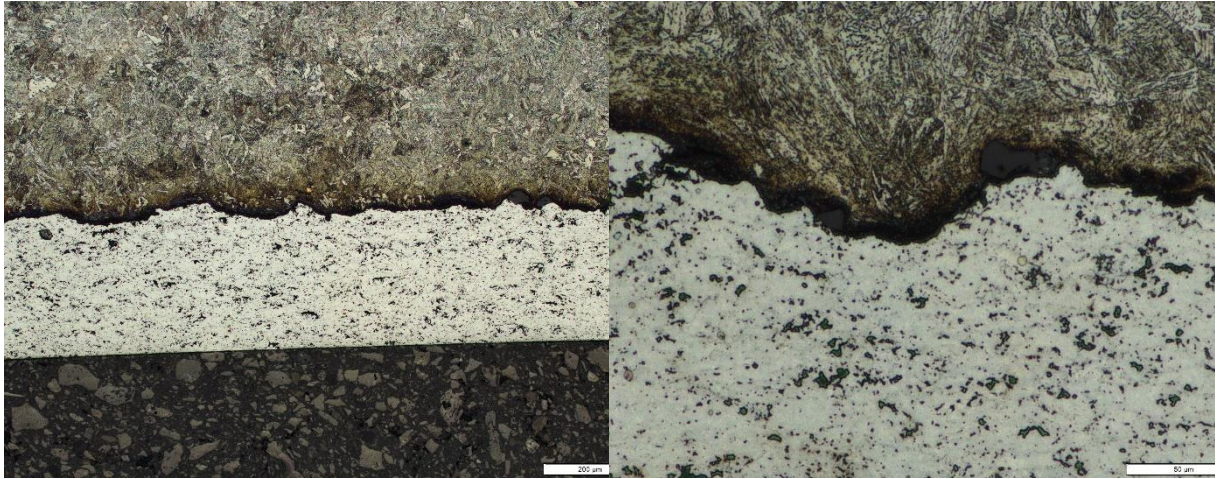
Světelná a elektronová mikroskopie

Na vzorku na vnější straně bez vrstvy a vnitřní straně prstence s vrstvou byla provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodů mezi oblastmi v základním materiálu v leptaném stavu ve 3 % nitalu (Obr. 103 - Obr. 111).



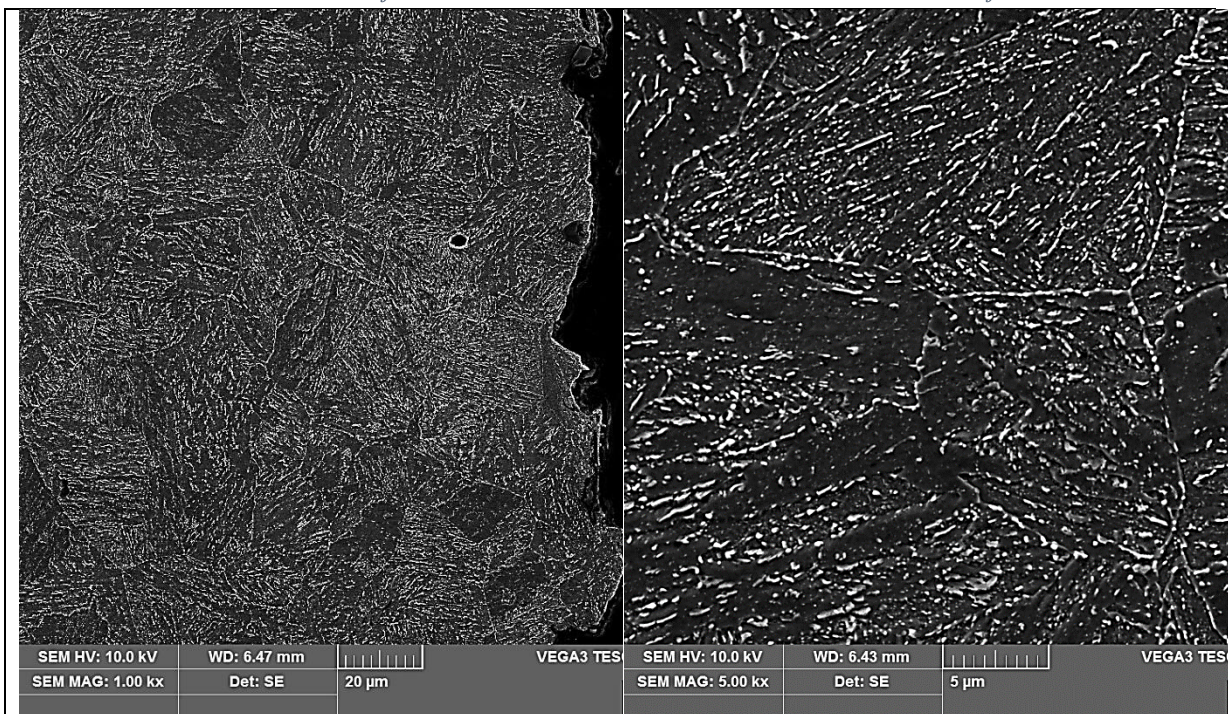
Obr. 103 Vzorek s označením WC, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-100x-SM

Obr. 104 Vzorek s označením WC, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-1000x-SM



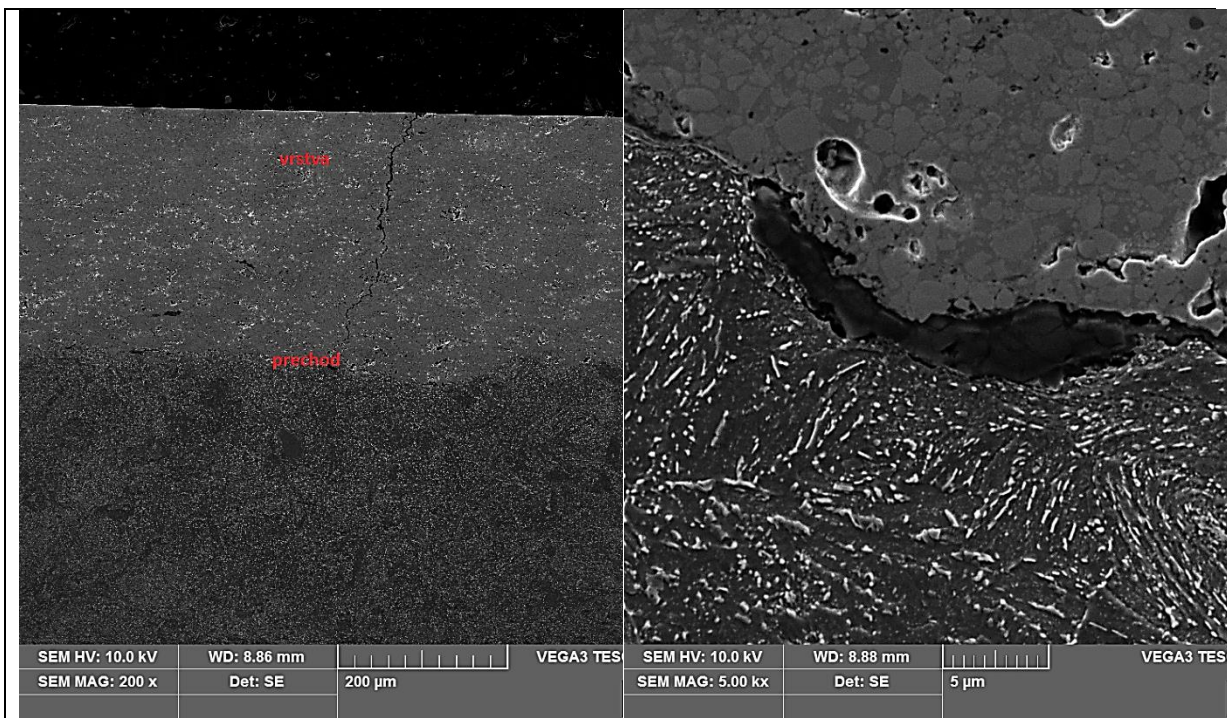
Obr. 105 Vzorek s označením WC, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC, kraj-100x-SM

Obr. 106 Vzorek s označením WC, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC, kraj-500x-SM



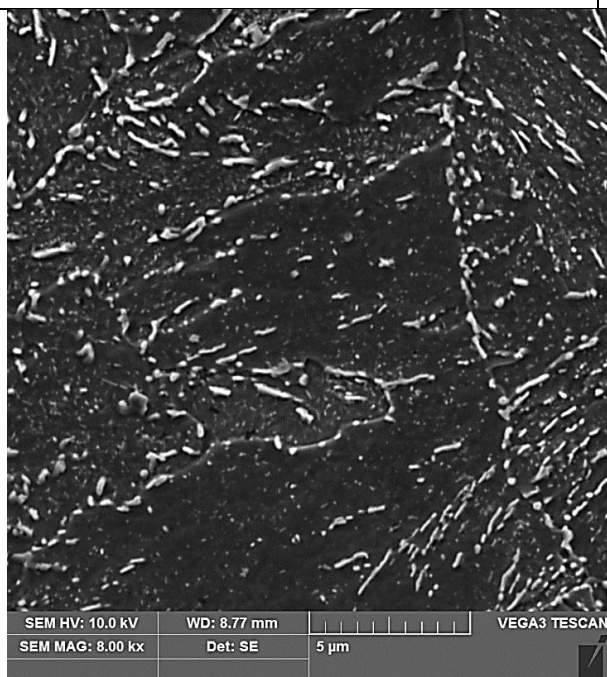
Obr. 107 Vzorek s označením WC, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-1000x-SEM

Obr. 108 Vzorek s označením WC, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-5000x-SEM



Obr. 109 Vzorek s označením WC, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC, kraj-popis oblastí-200x-SEM

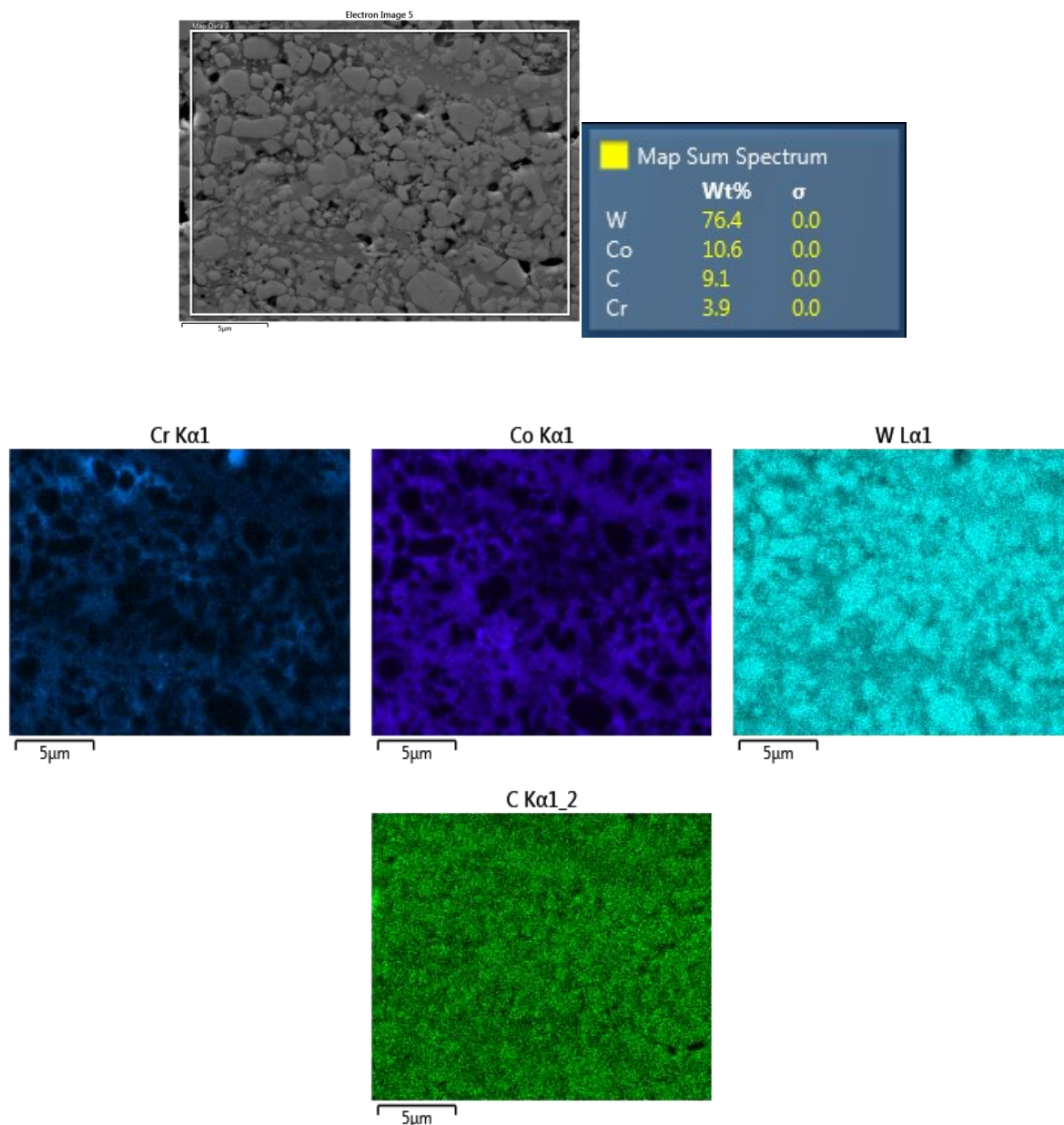
Obr. 110 Vzorek s označením WC, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC, přechod-detail-vrstva-feriticko-cementická struktura-3000x-SEM



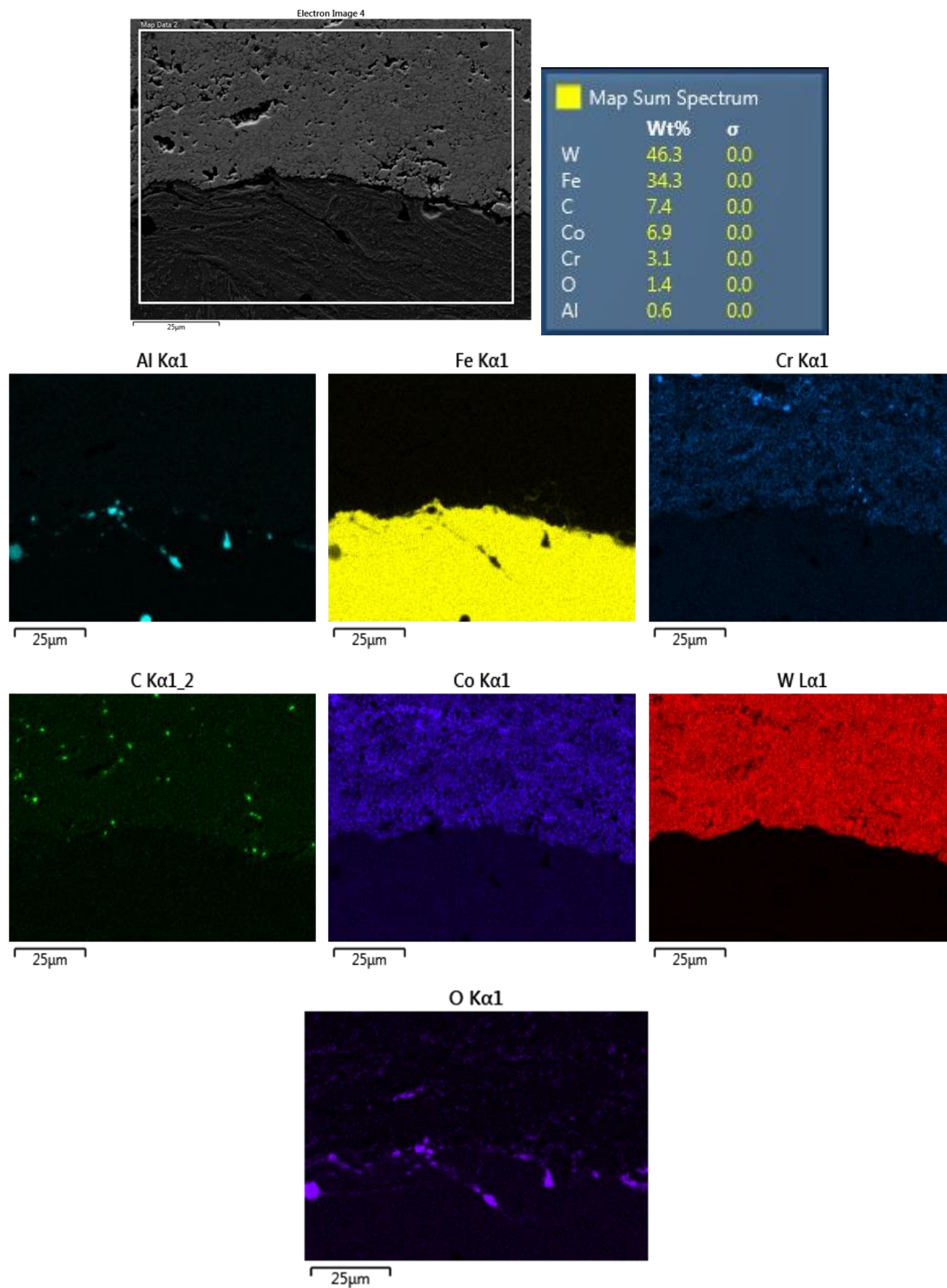
Obr. 111 Vzorek s označením WC, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC, střed-detail-feriticko-cementická struktura-8000x-SEM

EDS, EDX analýza

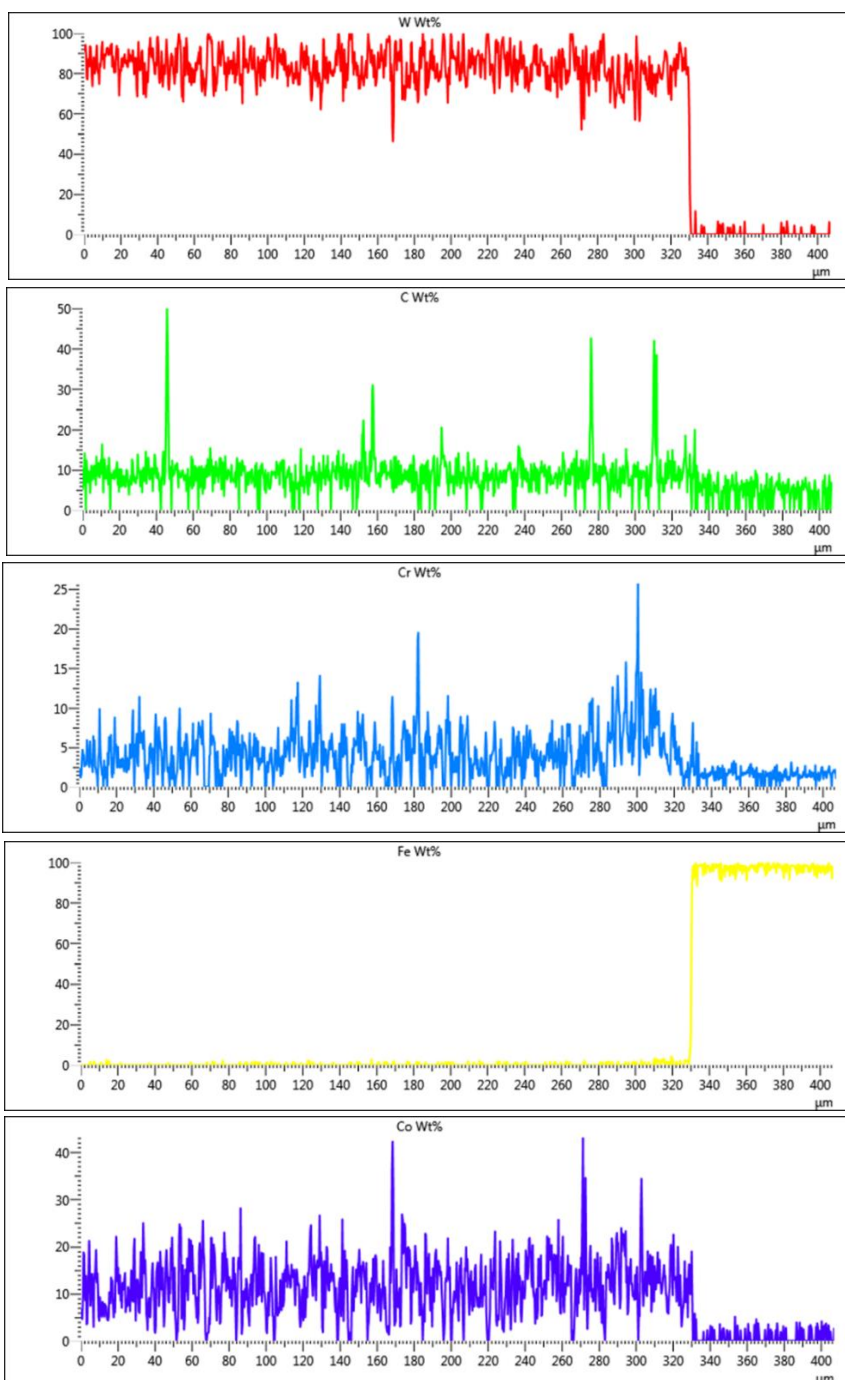
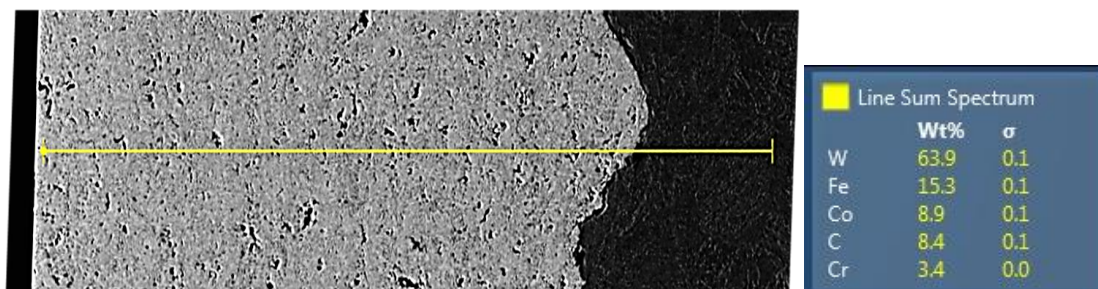
U vzorků s vrstvou nástřiku byla u vnitřní části prstence provedena plošná EDS analýza vrstvy a přechodu do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků. Dále byla změřena liniová EDX analýza přes vrstvu do základního materiálu.



Obr. 112 Vzorek s označením WC-vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC-ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků, zvětšení 5000x



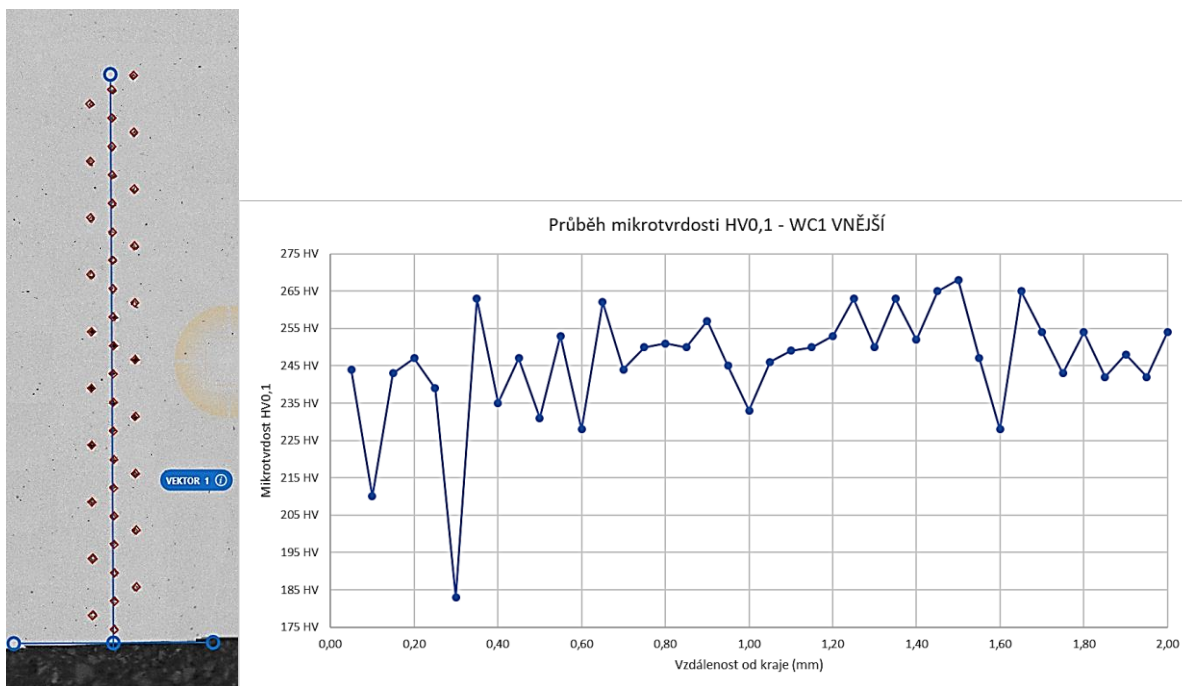
Obr. 113 Vzorek s označením WC-vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC-ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků, zvětšení 1000x



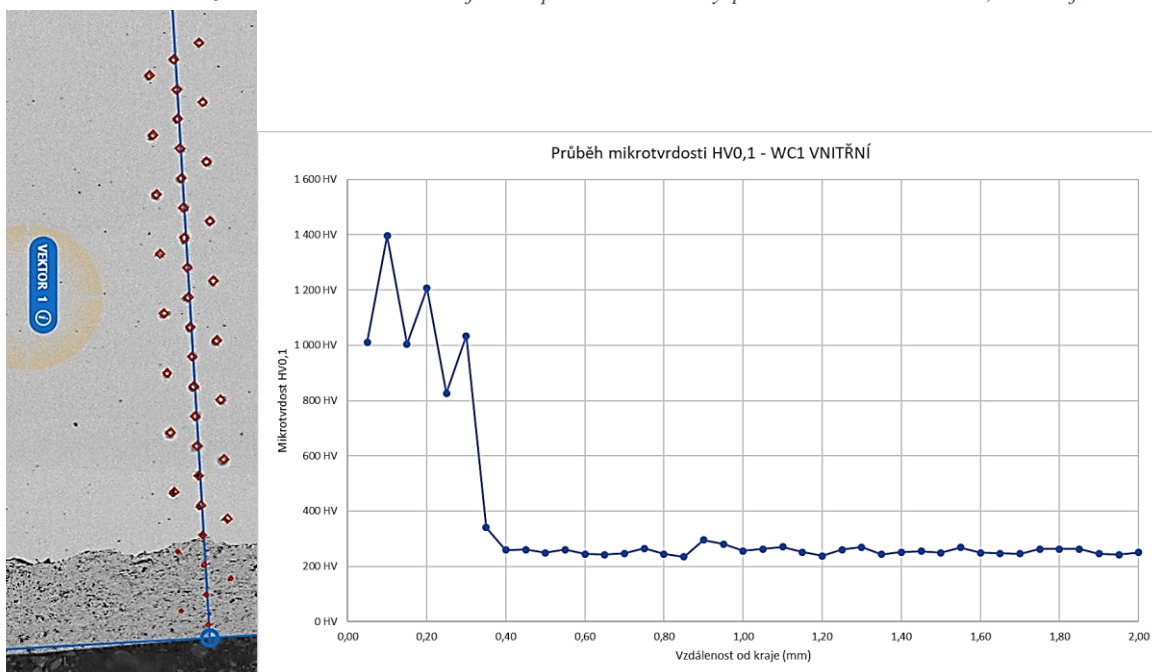
Obr. 114 Vzorek s označením WC-vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC-ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra, zvětšení 200x

Měření mikrotvrdosti

Od povrchu přes vrstvu do základního materiálu byl u vzorku z vnější části prstence bez vrstvy a z vnitřní části prstence s vrstvou nástřiku změřen průběh mikrotvrdosti se zatížením 100 gramů (Obr. 115, Obr. 116).



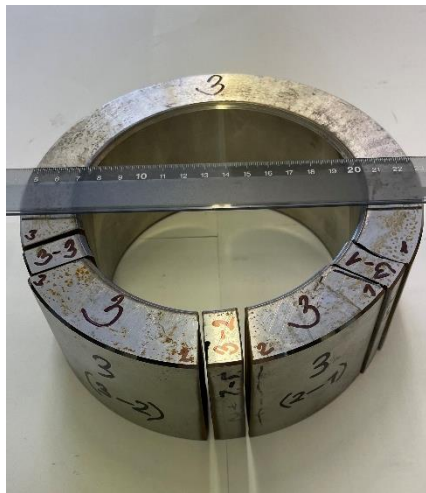
Obr. 115 Vzorek s označením WC-vnější část prstence bez vrstvy-průběh mikrotvrdosti HV0,1 od kraje



Obr. 116 Vzorek s označením WC-vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku WC-průběh mikrotvrdosti HV0,1 přes vrstvu do základního materiálu

4.2.3 Povlak Nistelle C276W - Technologie LMD

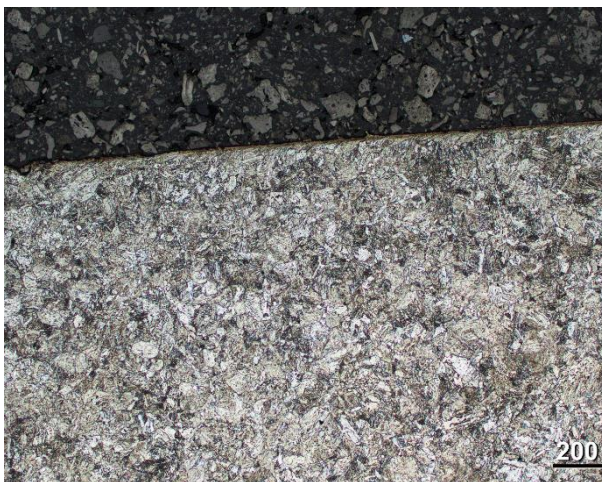
K analýze byly dodán vzorek ve tvaru prstence z oceli 14340 s předpokládanou vrstvou nástřiku tloušťky 0,6 mm (Obr. 117). Ze vzorku z vnější strany bez vrstvy i vnitřní strany prstence s vrstvou byl proveden metalografický výbrus a byla na něm provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodové oblasti. Analýza chemického složení byla provedena na vnitřní straně prstence u povrchové a přechodové oblasti a přes vrstvu do základního materiálu pomocí energeticky disperzní spektrometrie (EDS) s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Zeiss CrossBeam Auriga 340. Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti přes vrstvu do základního materiálu.



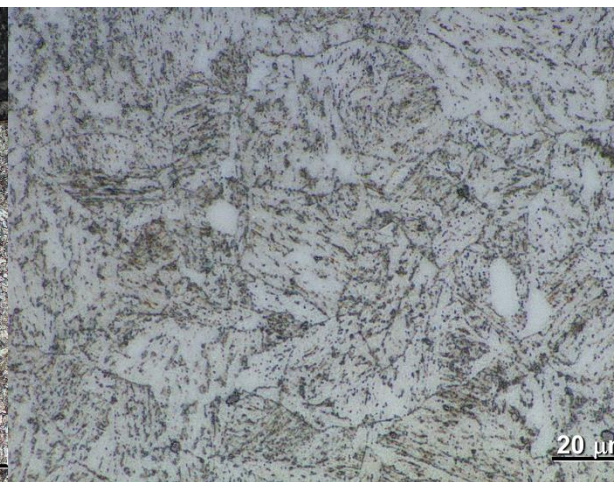
Obr. 117 Vzorek s vrstvou nástřiku Nistelle C276 W 45° s vyznačenými místy řezu na metalografii

Světelná a elektronová mikroskopie

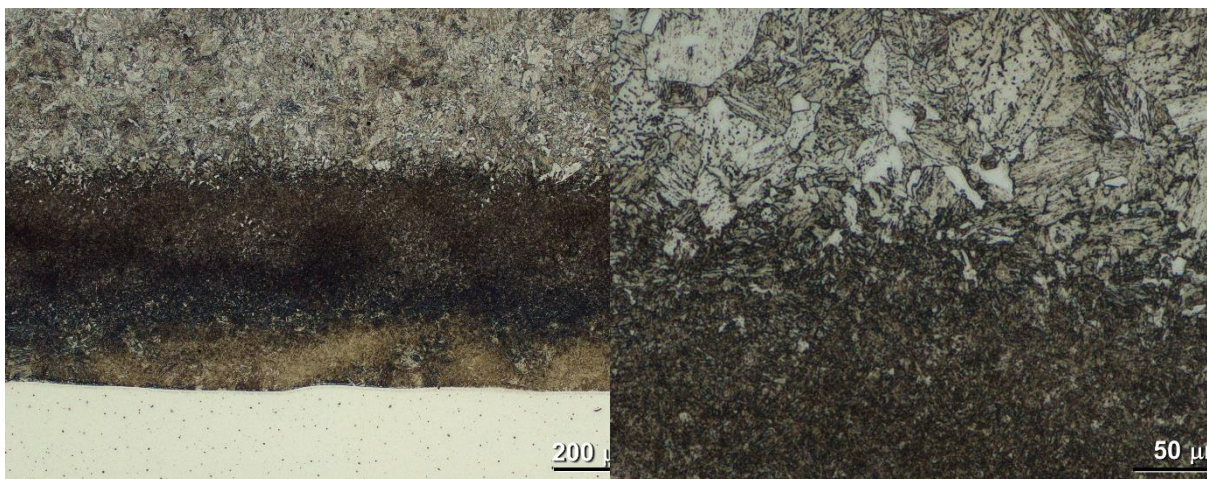
Na vzorku na vnější straně bez vrstvy a vnitřní straně prstence s vrstvou byla provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodu mezi oblastí v základním materiálu v leptaném stavu ve 3 % nitalu (Obr. 118 - Obr. 128).



Obr. 118 Vzorek Nistelle, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-100x-SM

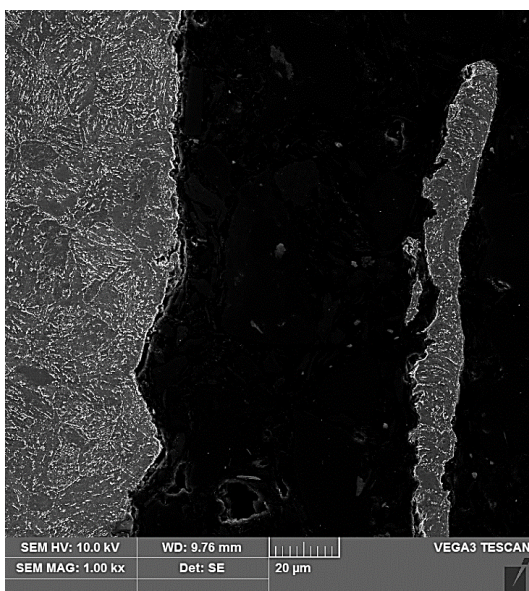


Obr. 119 Vzorek Nistelle, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-1000x-SM

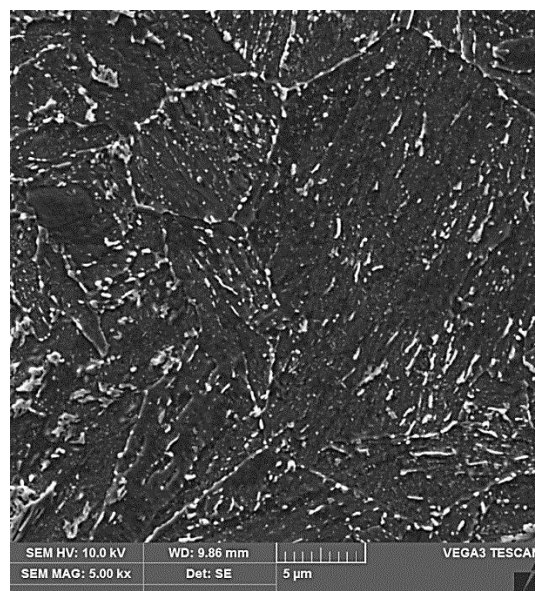


Obr. 120 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, kraj-100x-SM

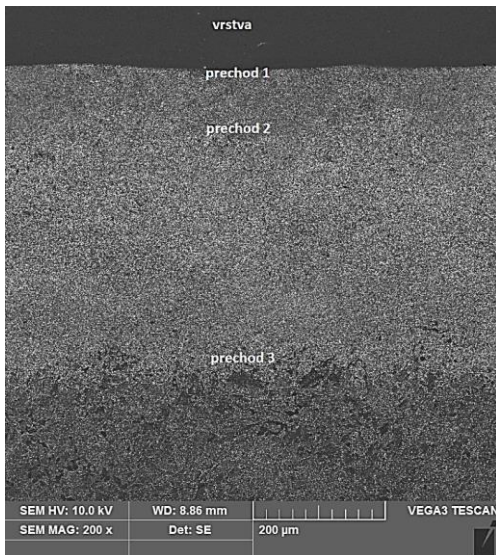
Obr. 121 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence, přechody mezi oblastmi v základním materiálu pod vrstvou-500x-SM



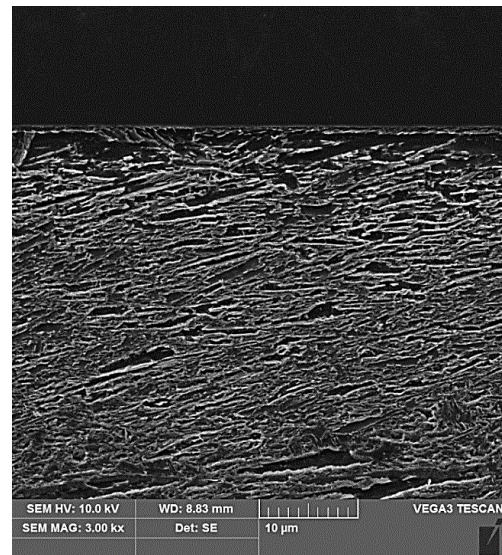
Obr. 122 Vzorek Nistelle, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-1000x-SEM



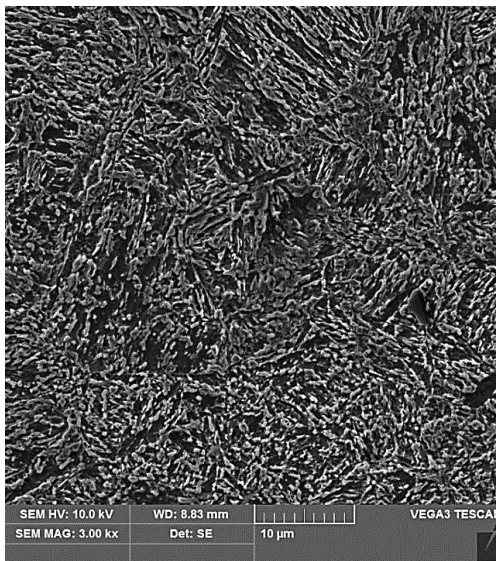
Obr. 123 Vzorek Nistelle, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-5000x-SEM



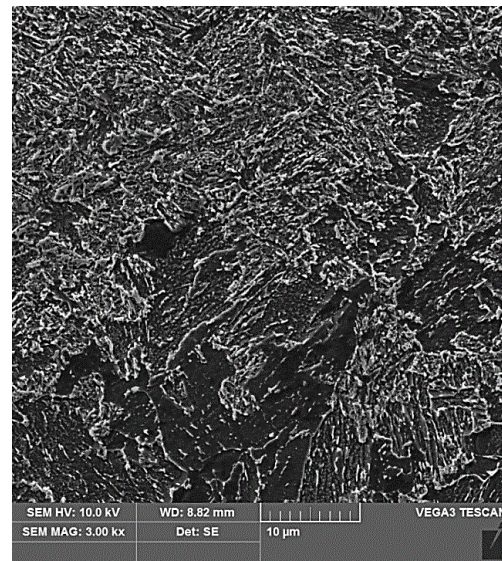
Obr. 124 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, kraj-popis oblasti-200x-SEM



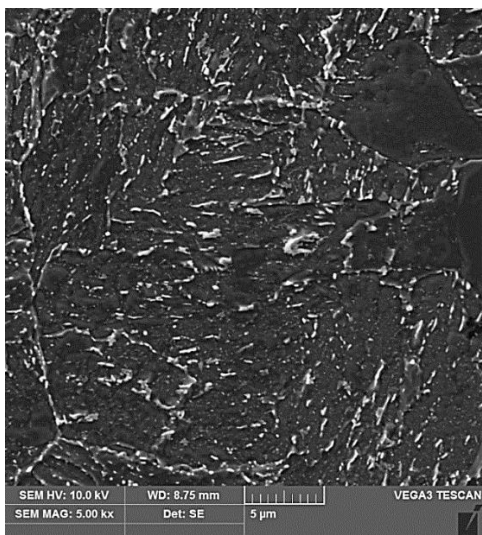
Obr. 125 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, přechod 1-detail-vrstva-martenziticko-bainitická struktura-3000x-SEM



Obr. 126 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, přechod 2-detail-martenziticko-bainitická struktura-martenziticko-bainitická struktura s vyšším podílem bainitu-3000x-SEM



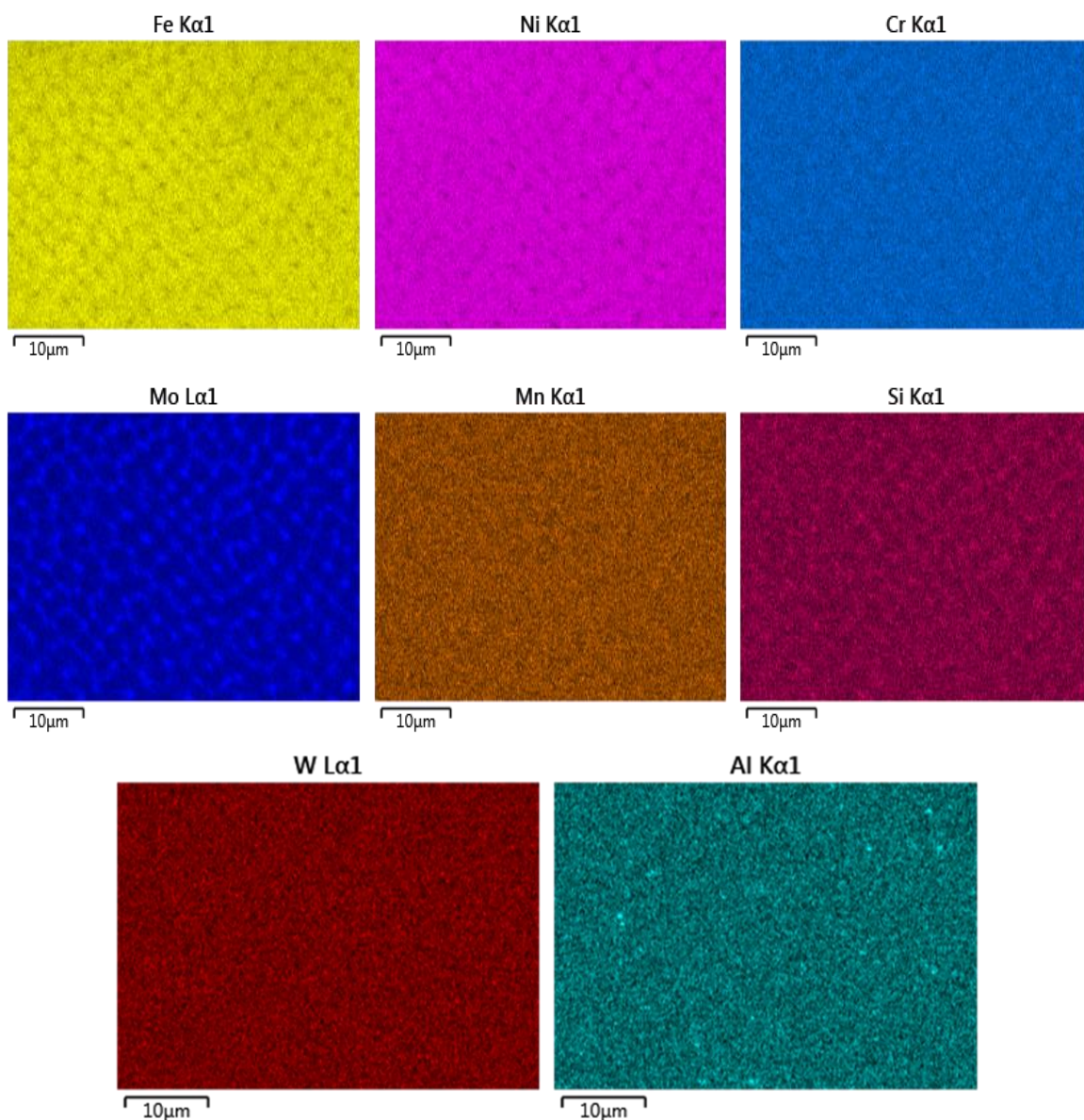
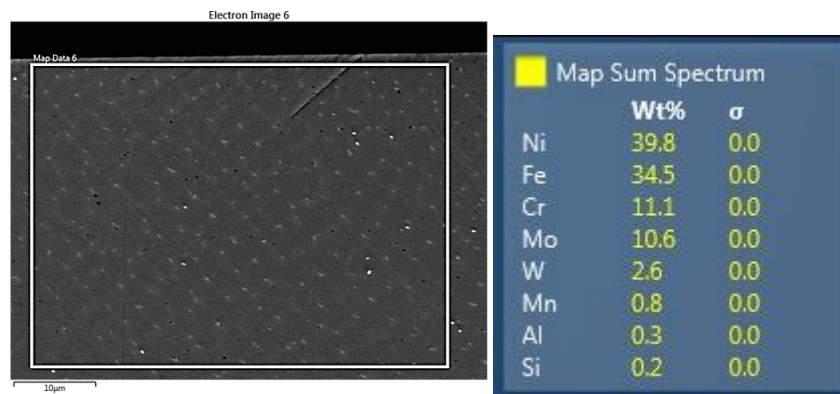
Obr. 127 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, přechod 3-detail-martenziticko-bainitická struktura s vyšším podílem feriticko-cementická struktura-3000x-SEM



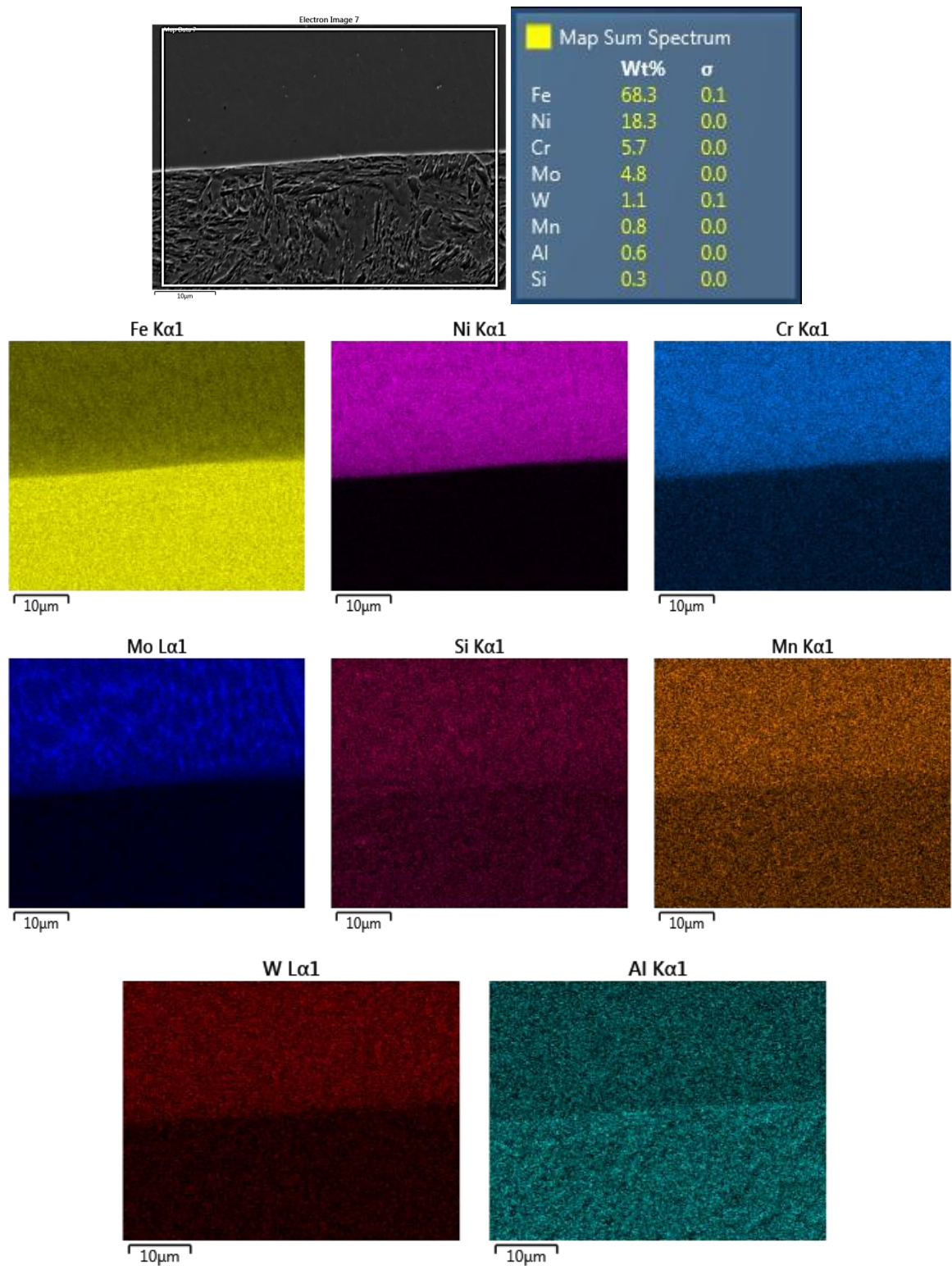
Obr. 128 Vzorek Nistelle, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle, střed-detail-feriticko-cementická struktura-5000x-SEM

EDS, EDX analýza

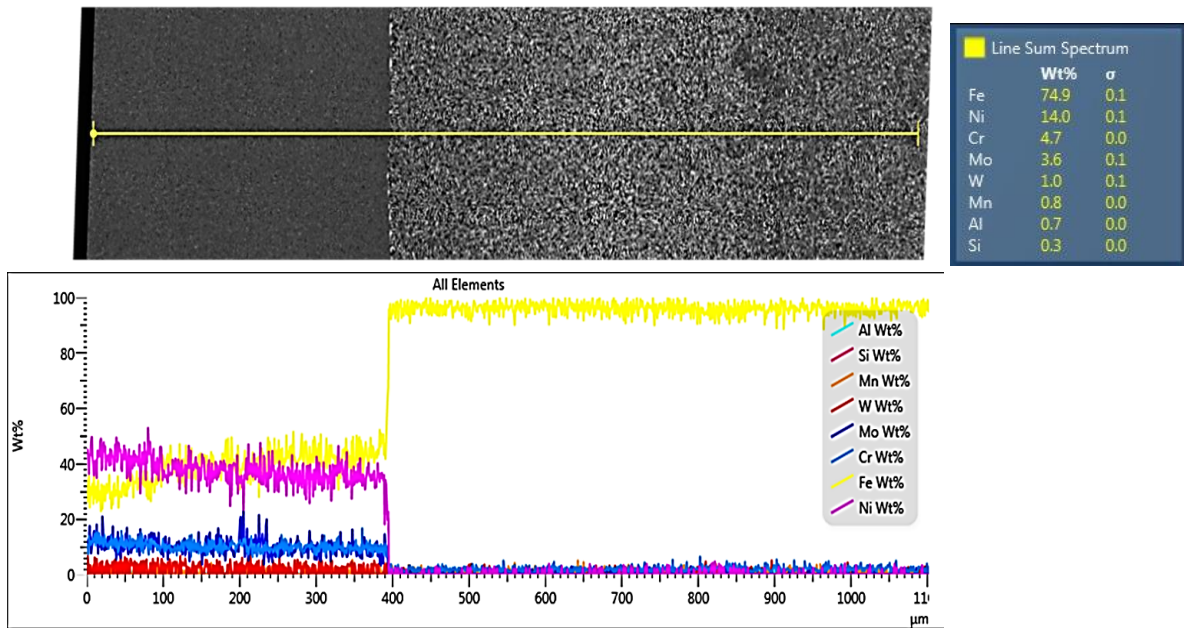
U vzorku byla u vnitřní části prstence provedena plošná EDS analýza vrstvy a přechodu do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků (Obr. 129, Obr. 130) Dále byla změřena liniová EDX analýza přes vrstvu do základního materiálu (Obr. 131).



Obr. 129 Vzorek Nistelle - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle - ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



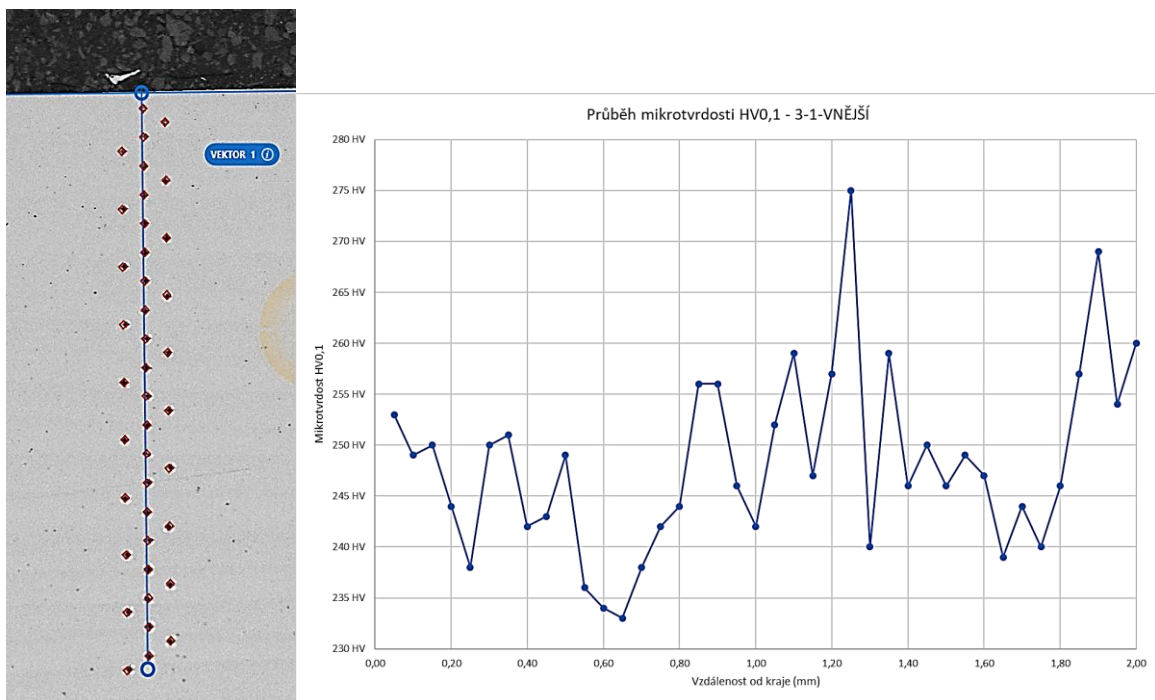
Obr. 130 Vzorek Nistelle - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle - ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



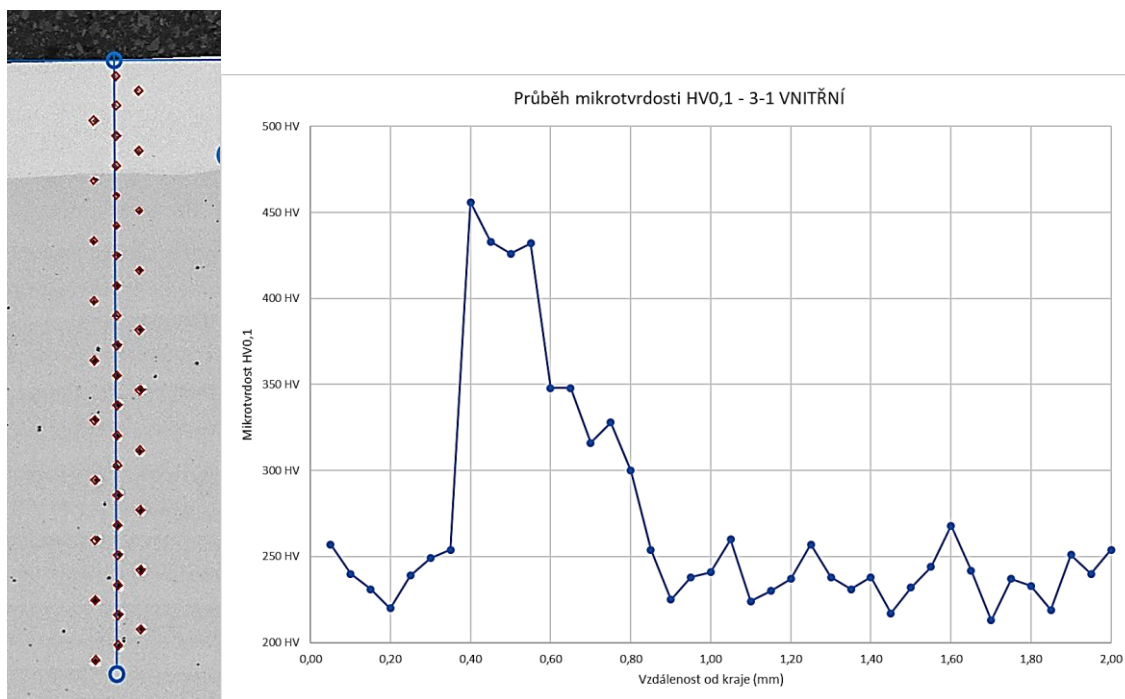
Obr. 131 Vzorek Nistelle - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle - ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra

Měření mikrotvrdosti

Od povrchu přes vrstvu do základního materiálu byl u vzorku z vnější části prstence bez vrstvy a z vnitřní části prstence s vrstvou nástřiku změřen průběh mikrotvrdosti se zatížením 100 gramů (Obr. 132, Obr. 133).



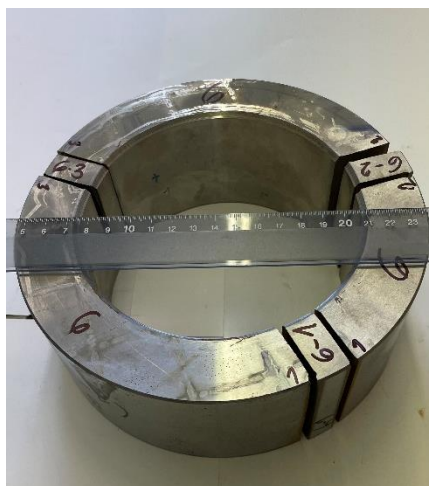
Obr. 132 Vzorek Nistelle - vnější část prstence bez vrstvy - průběh mikrotvrdosti HV0,1 od kraje



Obr. 133 Vzorek Nistelle - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Nistelle - průběh mikrotvrdosti HV0,1 přes vrstvu do základního materiálu

4.2.4 Povlak Stellite 6 – Technologie LMD

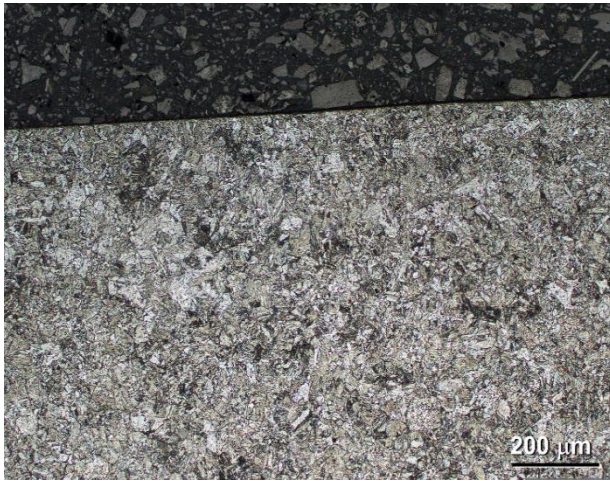
K analýze byly dodán vzorek ve tvaru prstence z oceli 14340 s označením č. 6 s předpokládanou vrstvou nástřiku tloušťky 0,6 mm (Obr. 134). Ze vzorku z vnější strany bez vrstvy i vnitřní strany prstence s vrstvou byl proveden metalografický výbrusy a byla na něm provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodové oblasti. Analýza chemického složení byla provedena na vnitřní straně prstence u povrchové a přechodové oblasti a přes vrstvu do základního materiálu pomocí energeticky disperzní spektrometrie (EDS) s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Zeiss CrossBeam Auriga 340. Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti přes vrstvu do základního materiálu.



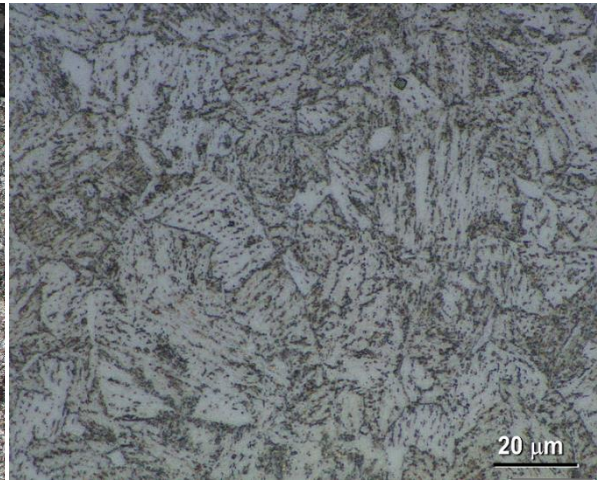
Obr. 134 Vzorek Stellite s vrstvou nástřiku Stellite 6, 45° s vyznačenými místy řezu na metalografii

Světelná a elektronová mikroskopie

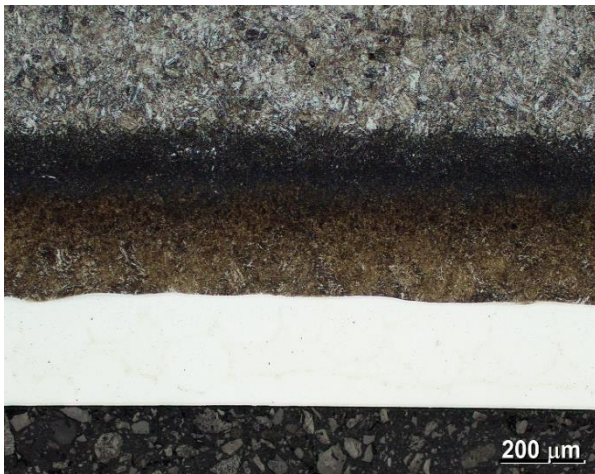
Na vzorku na vnější straně bez vrstvy a vnitřní straně prstence s vrstvou byla provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodu mezi oblastmi v základním materiálu v leptaném stavu ve 3 % nitalu (Obr. 135 - Obr. 145).



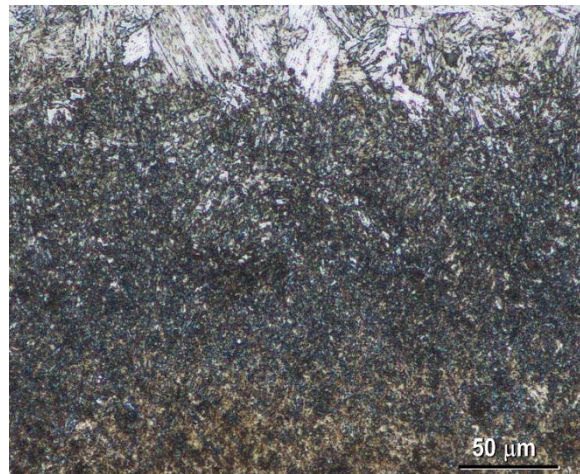
Obr. 135 Vzorek Stellite, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-100x-SM



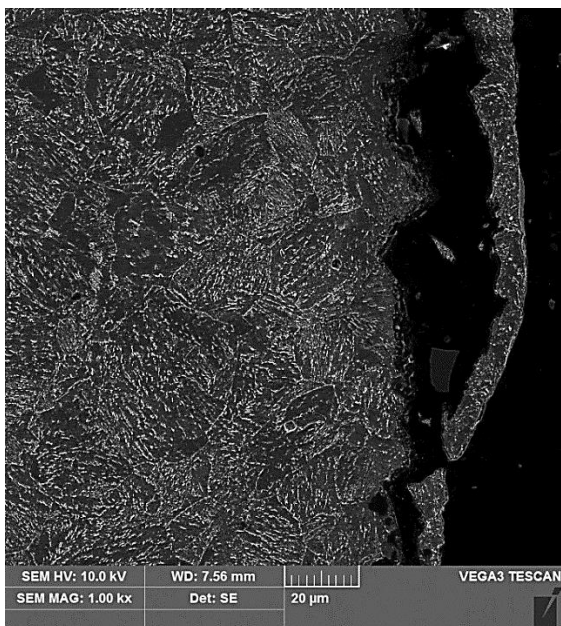
Obr. 136 Vzorek Stellite, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-1000x-SM



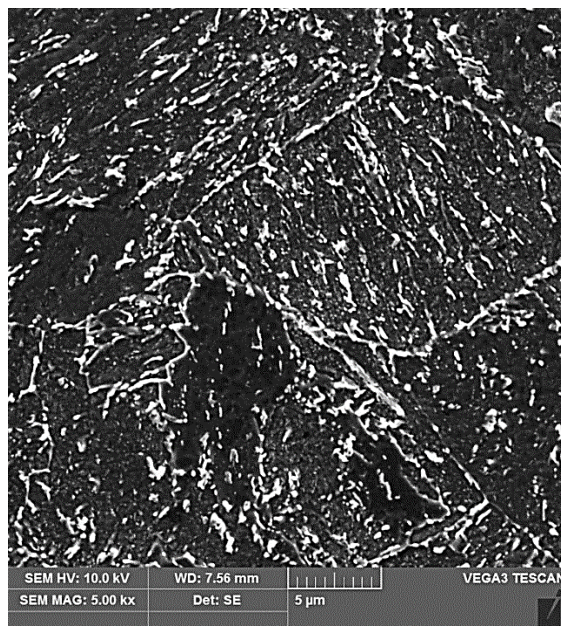
Obr. 137 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, kraj-100x-SM



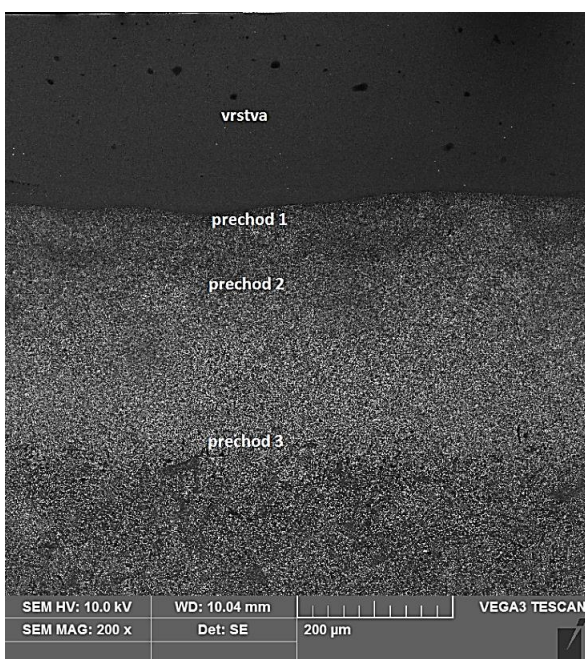
Obr. 138 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence, přechody mezi oblastmi v základním materiálu pod vrstvou-500x-SM



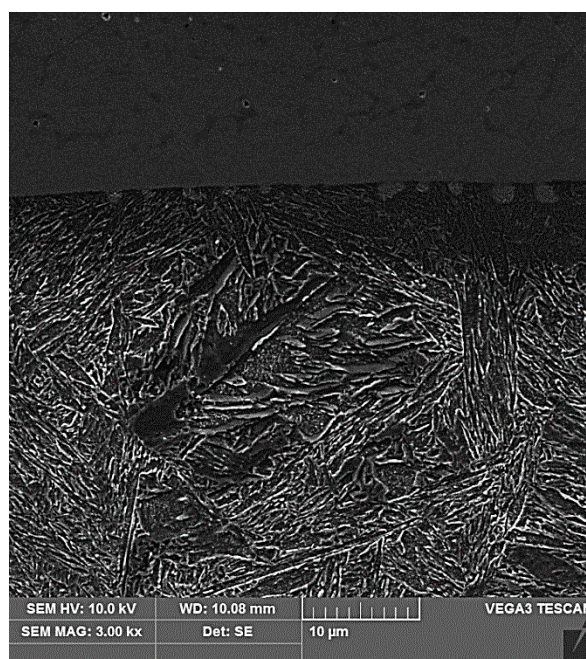
Obr. 139 Vzorek Stellite, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-1000x-SEM



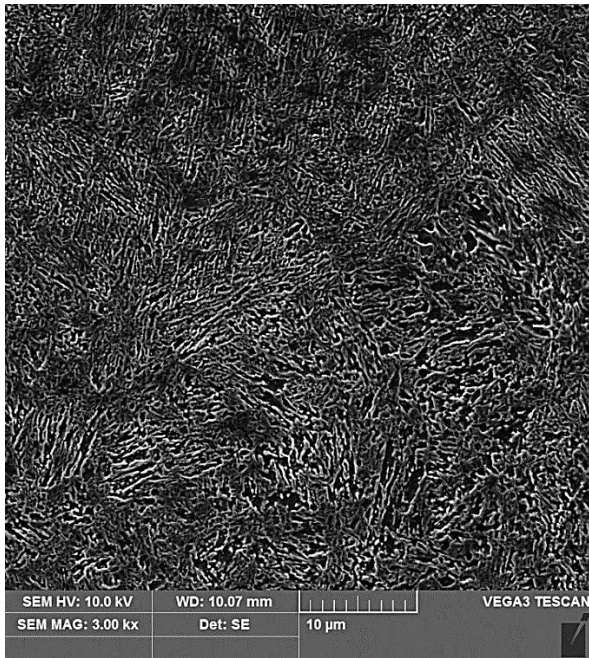
Obr. 140 Vzorek Stellite, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-5000x-SEM



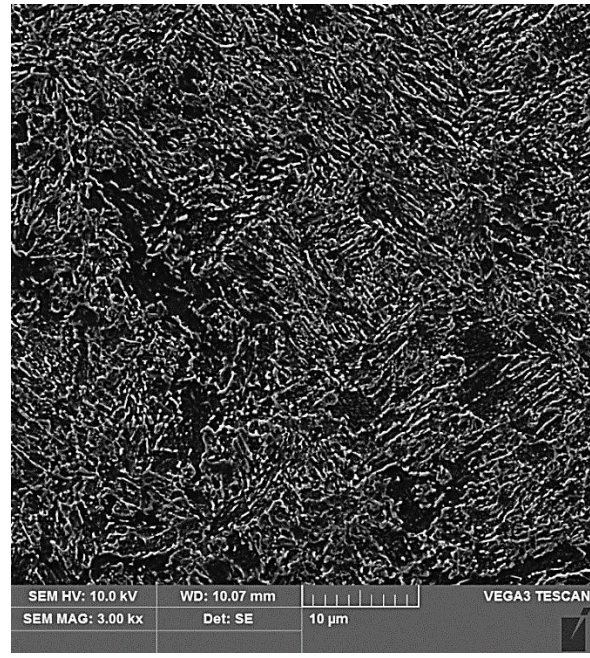
Obr. 141 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, kraj-popis oblastí-200x-SEM



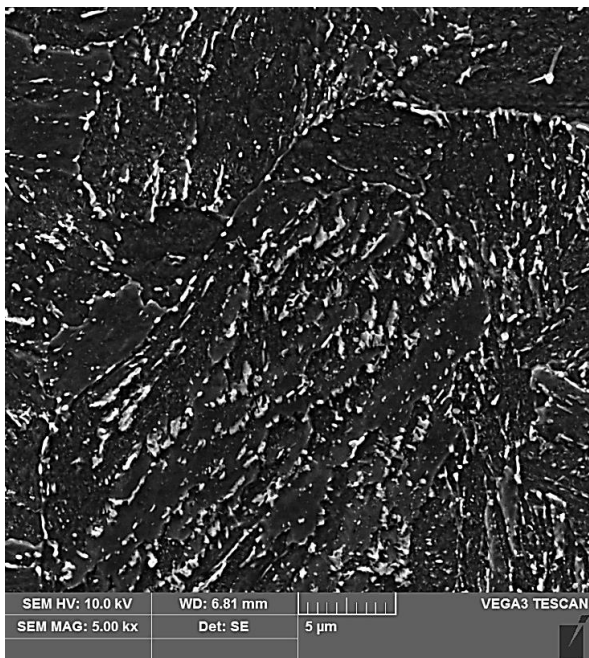
Obr. 142 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, přechod 1-detail-vrstva-martenziticko-bainitická struktura-3000x-SEM



Obr. 143 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, přechod 2-detail-martenziticko-bainitická struktura-martenziticko-bainitická struktura s vyšším podílem bainitu-3000x-SEM



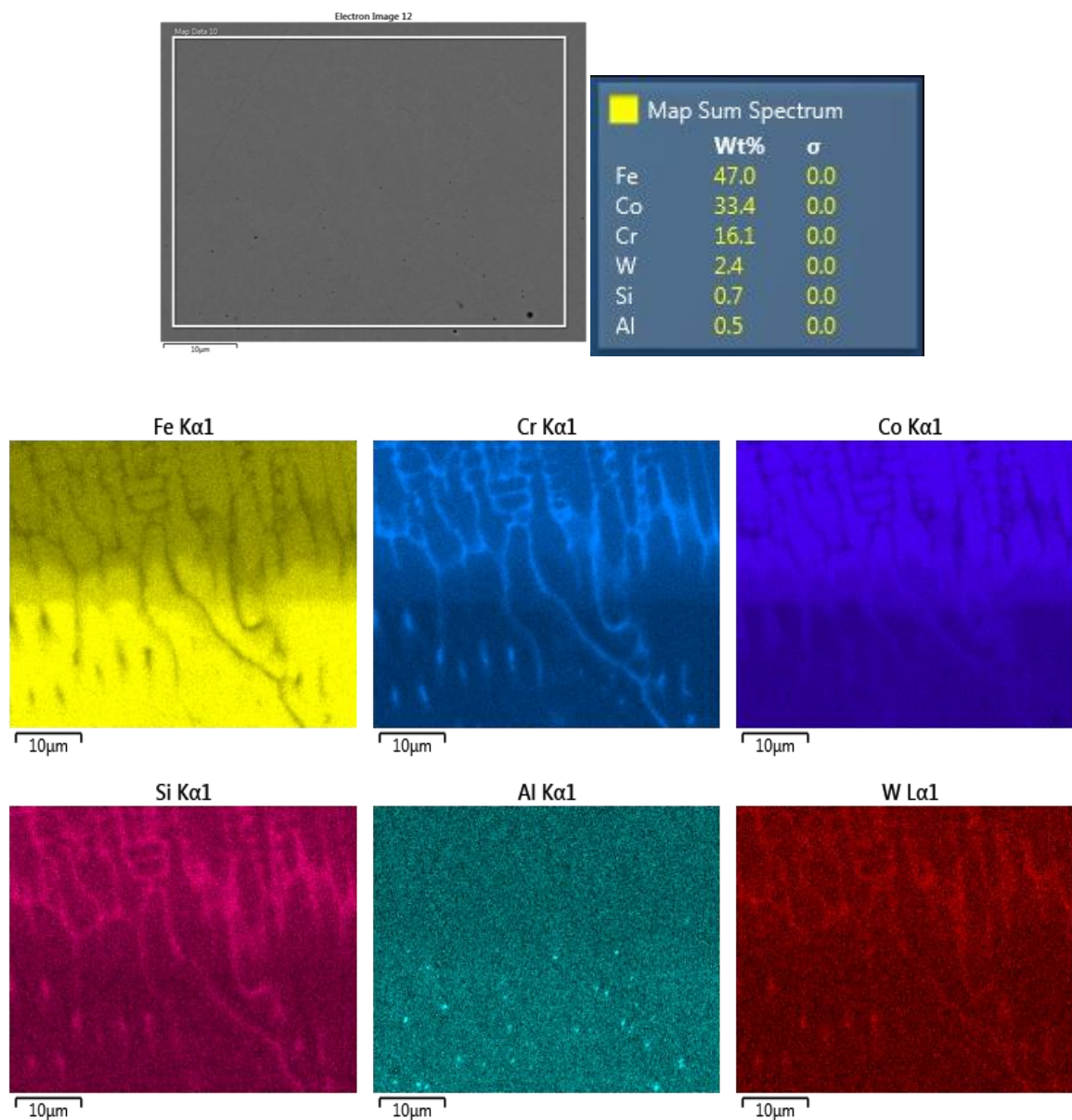
Obr. 144 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, přechod 3-detail-martenziticko-bainitická struktura s vyšším podílem bainitu-feriticko-cementická struktura-3000x-SEM



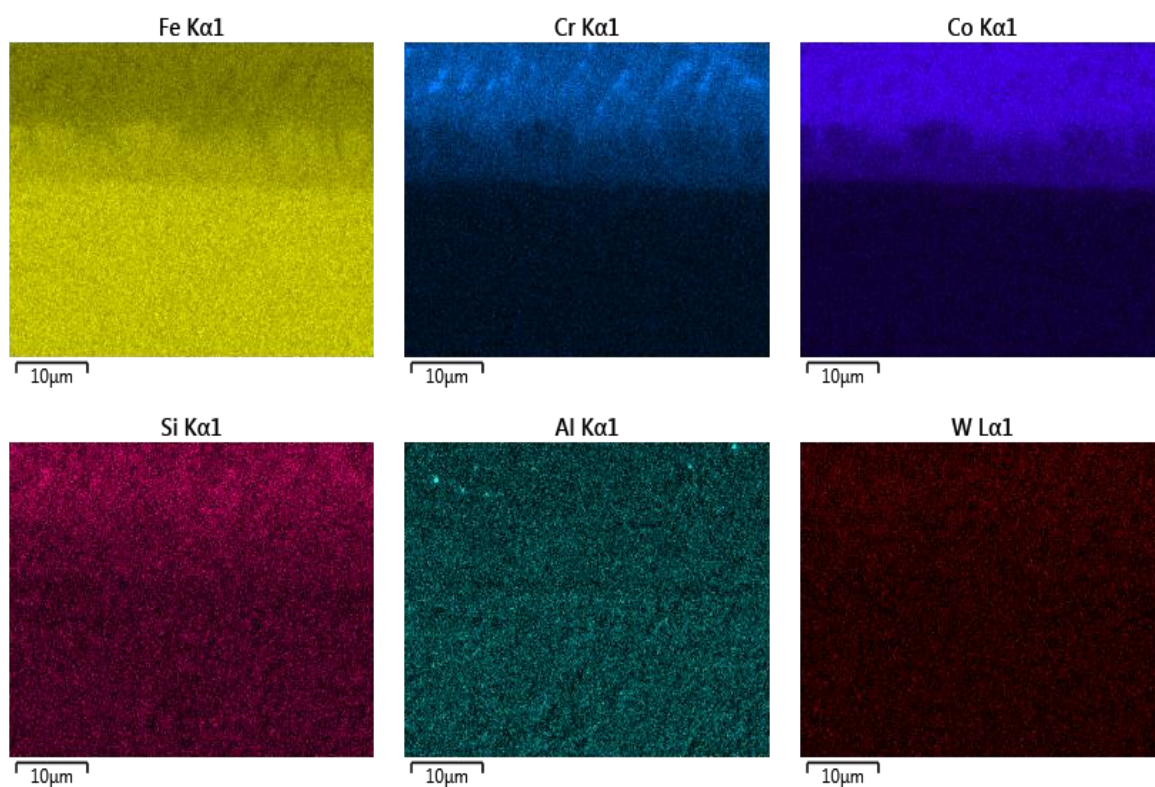
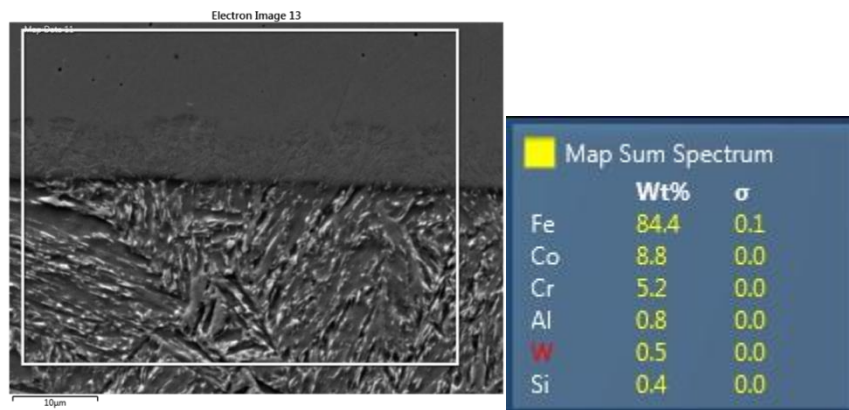
Obr. 145 Vzorek Stellite, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite, střed-detail-feriticko-cementická struktura-5000x-SEM

EDS, EDX analýza

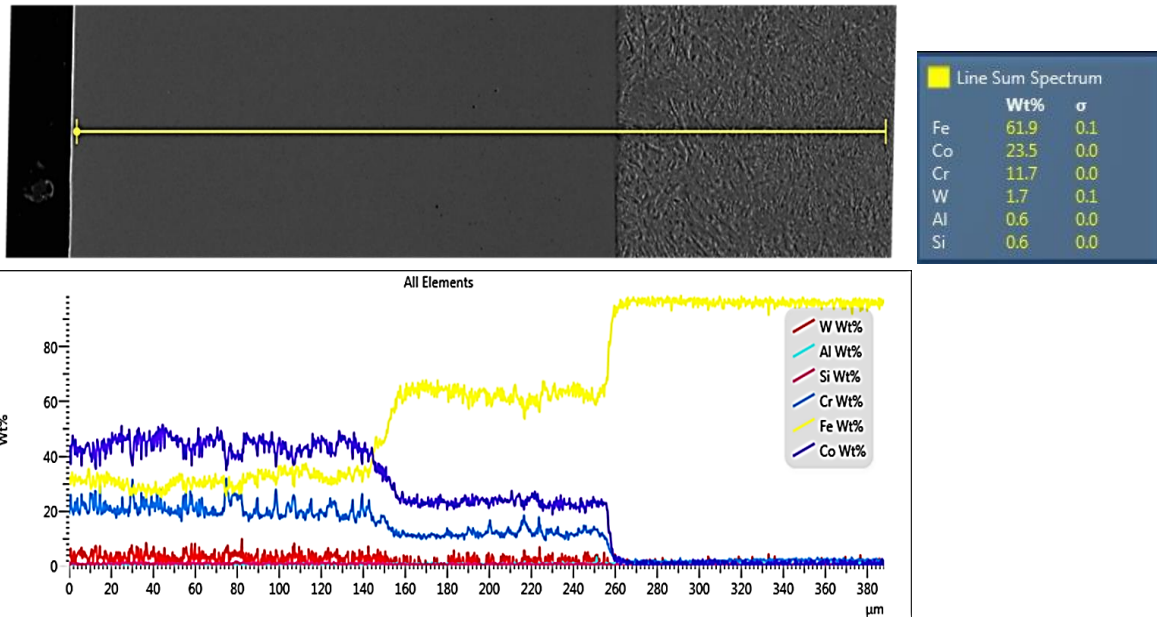
U vzorku byla u vnitřní části prstence provedena plošná EDS analýza vrstvy a přechodu do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků (Obr. 146, Obr. 147). Dále byla změřena liniová EDX analýza přes vrstvu do základního materiálu (Obr. 148).



Obr. 146 Vzorek Stellite - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite - ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



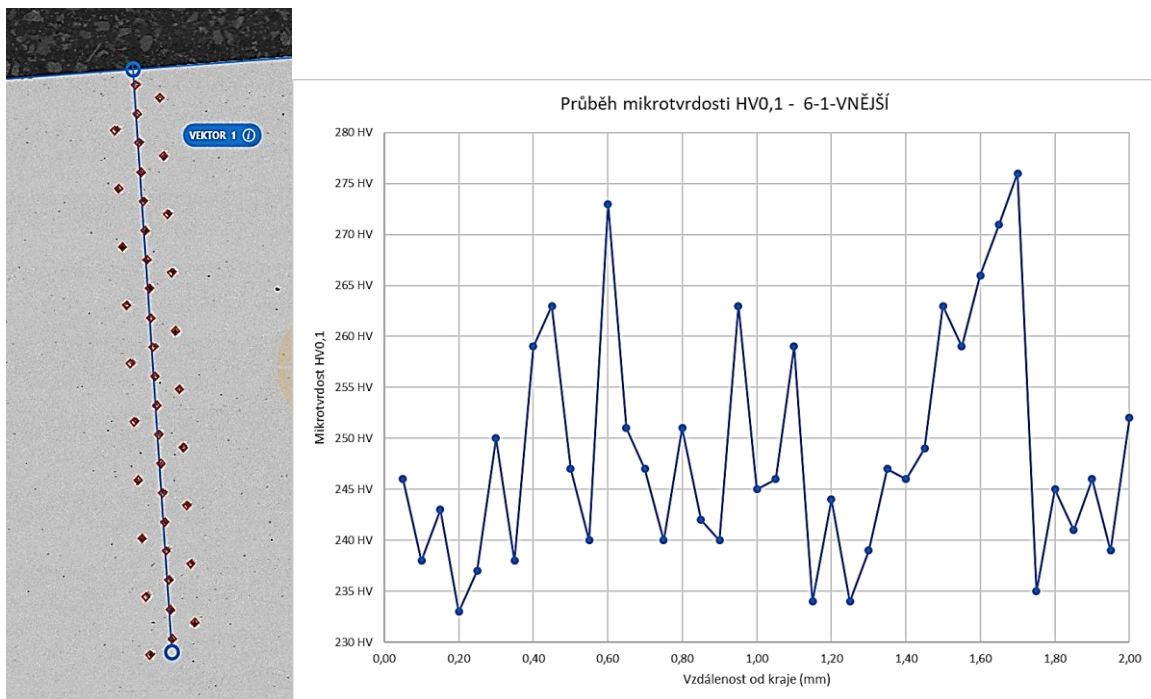
Obr. 147 Vzorek Stellite - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite - ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



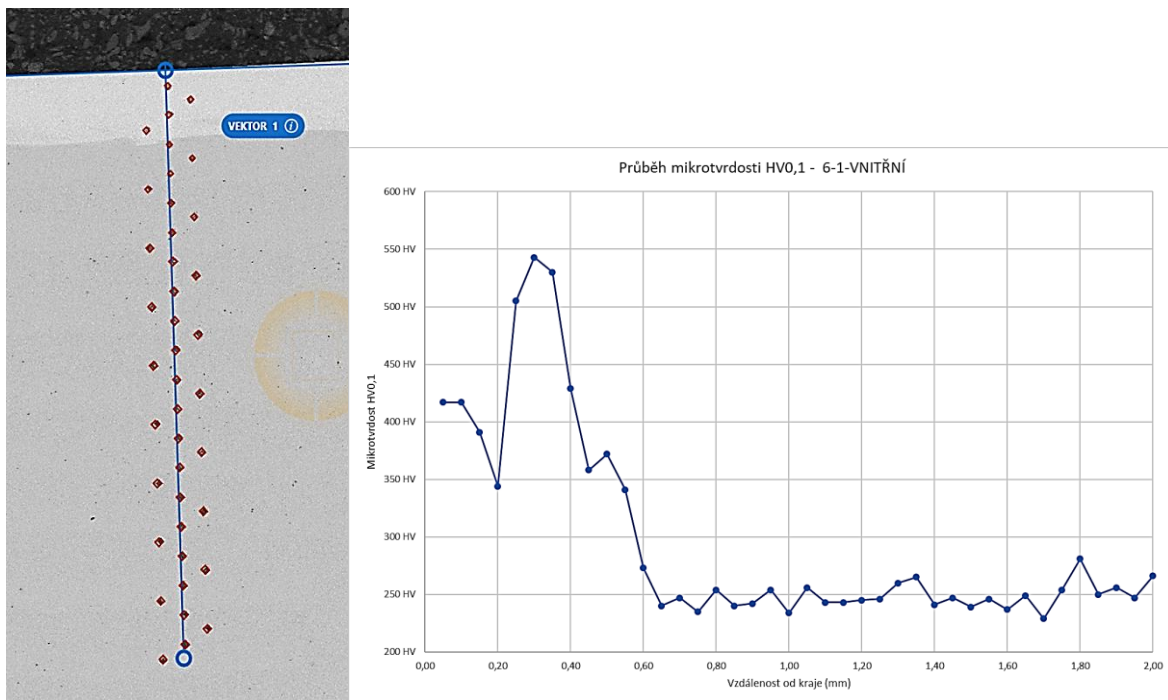
Obr. 148 Vzorek Stellite - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite - ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra

Měření mikrotvrdomosti

Od povrchu přes vrstvu do základního materiálu byl u vzorku z vnější části prstence bez vrstvy a z vnitřní části prstence s vrstvou nástřiku změřen průběh mikrotvrdomosti se zatížením 100 gramů (Obr. 149, Obr. 150).



Obr. 149 Vzorek Stellite - vnější část prstence bez vrstvy - průběh mikrotvrdomosti HV0,1 od kraje



Obr. 150 Vzorek Stellite - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Stellite - průběh mikrotvrdosti HV0,1 přes vrstvu do základního materiálu

4.2.5 Povlak Ferro 55 – Technologie LMD (FeCrMo)

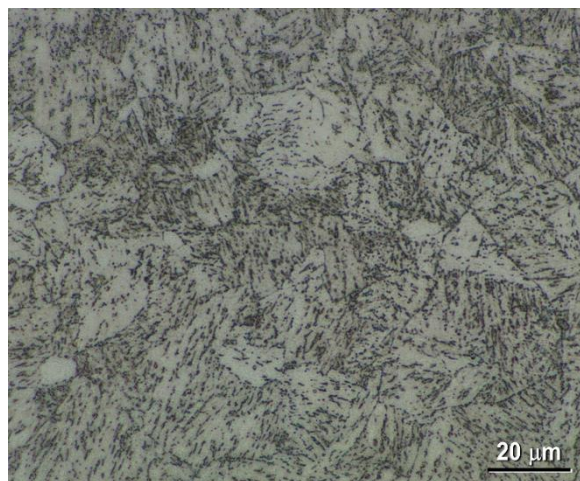
K analýze byly dodán vzorek ve tvaru prstence z oceli 14340 s označením Ferro s předpokládanou vrstvou nástřiku tloušťky 0,6 mm (Obr. 152 - Obr. 162). Ze vzorku z vnější strany bez vrstvy i vnitřní strany prstence s vrstvou byl proveden metalografický výbrus a byla na něm provedena světelná a elektronová mikroskopie vrstvy a přechodové oblasti. Analýza chemického složení byla provedena na vnitřní straně prstence u povrchové a přechodové oblasti a přes vrstvu do základního materiálu pomocí energeticky disperzní spektrometrie (EDS) s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Zeiss CrossBeam Auriga 340. Dále byl změřen průběh mikrotvrdosti přes vrstvu do základního materiálu.



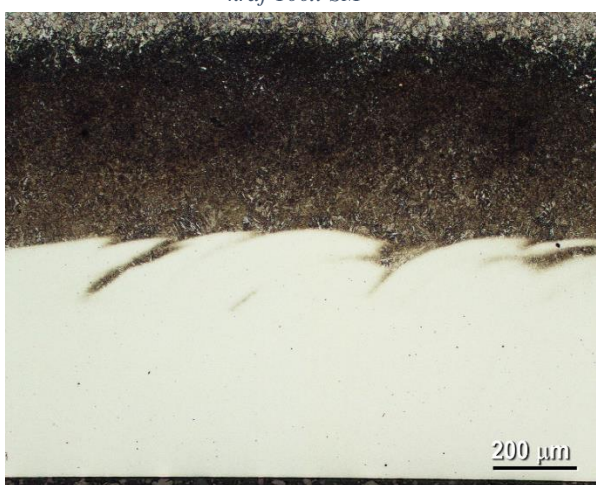
Obr. 151 Vzorek Ferro s vrstvou nástřiku Ferro 55 (FeCrMo) s vyznačenými místy řezu na metalografii



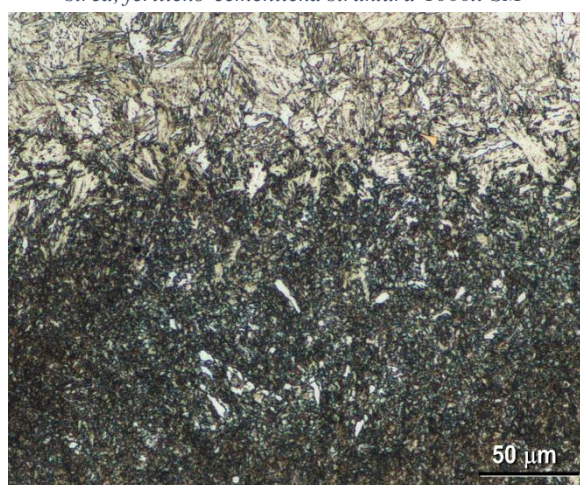
Obr. 152 Vzorek Ferro, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-100x-SM



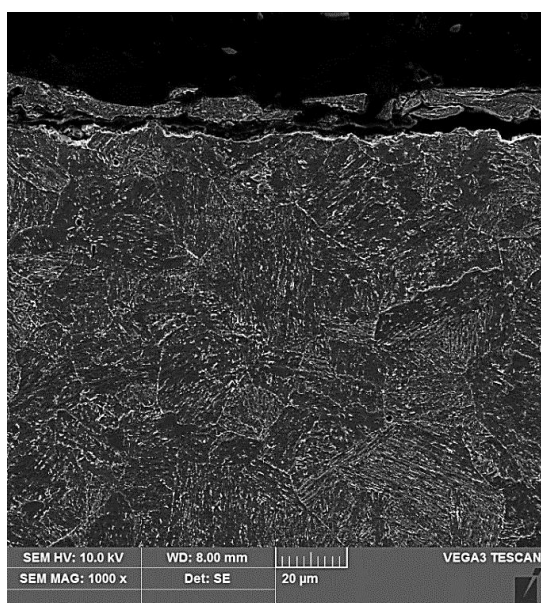
Obr. 153 Vzorek Ferro, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-1000x-SM



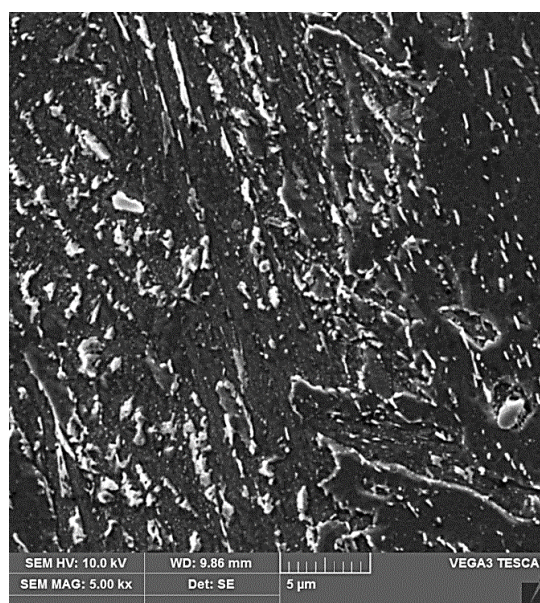
Obr. 154 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro 55, kraj-100x-SM



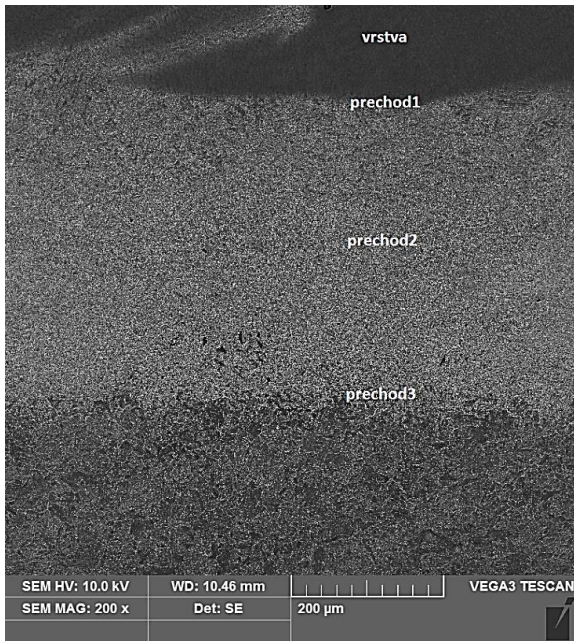
Obr. 155 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence, přechody mezi oblastmi v základním materiálu pod vrstvou-500x-SM



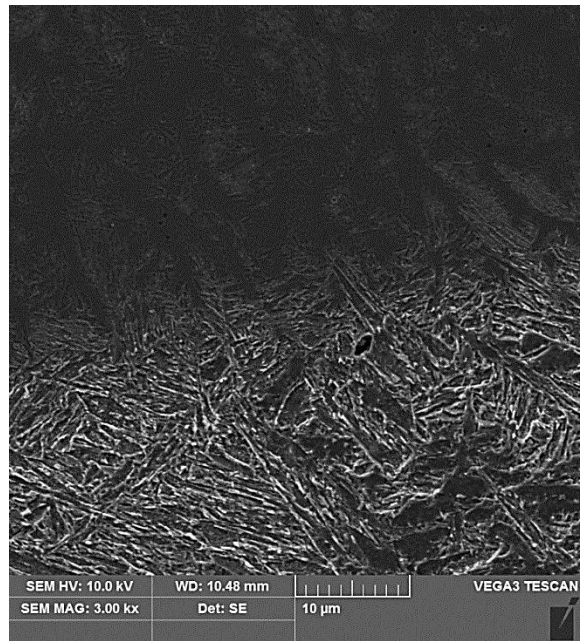
Obr. 156 Vzorek Ferro, vnější část prstence bez vrstvy, kraj-1000x-SEM



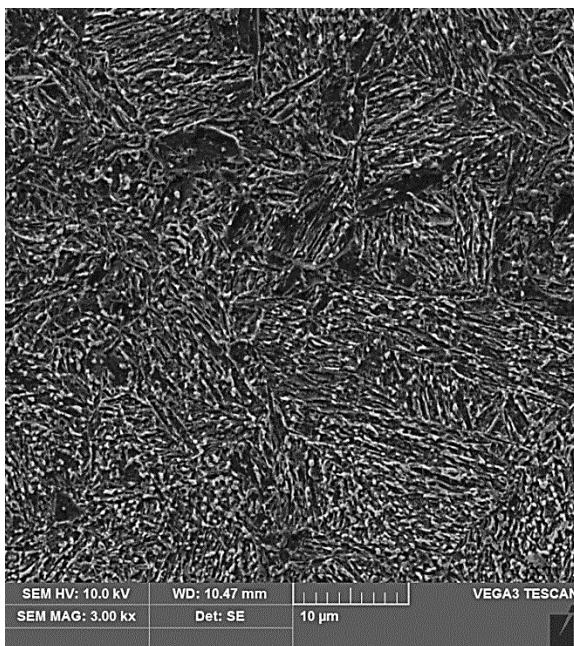
Obr. 157 Vzorek Ferro, vnější část prstence bez vrstvy, střed, feriticko-cementická struktura-5000x-SEM



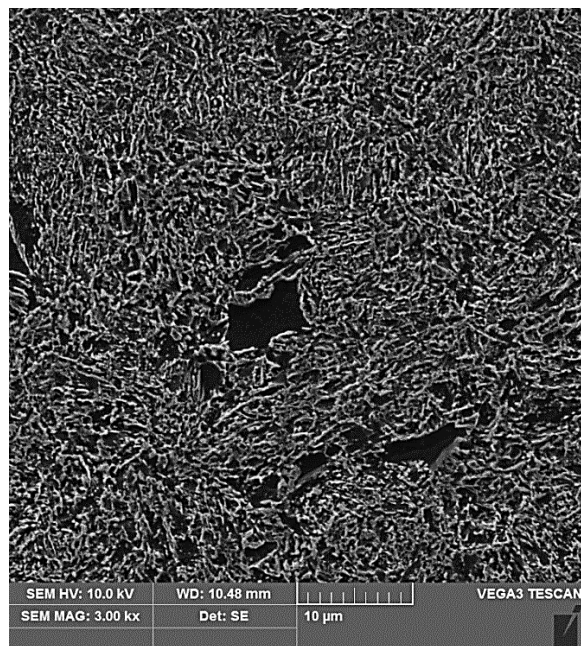
Obr. 158 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55, kraj-popis oblastí-200x-SEM



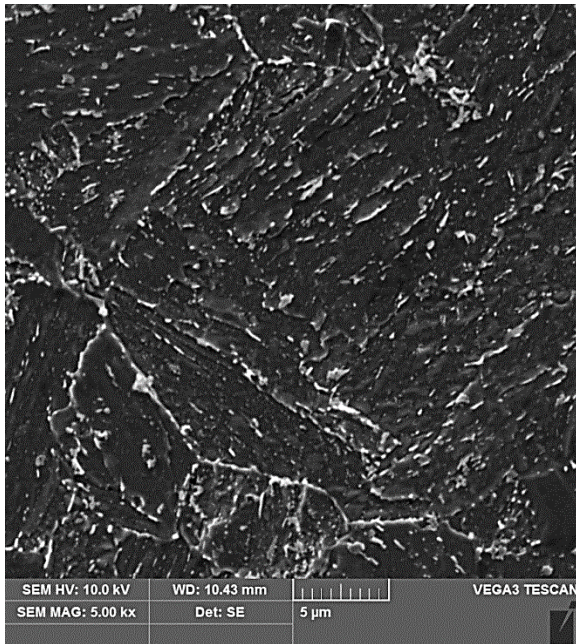
Obr. 159 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55, přechod 1-detail-vrstva-martenziticko-bainitická struktura-3000x-SEM



Obr. 160 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55, přechod 2-detail-martenziticko-bainitická struktura-martenziticko-bainitická struktura s vyšším podílem bainitu-3000x-SEM



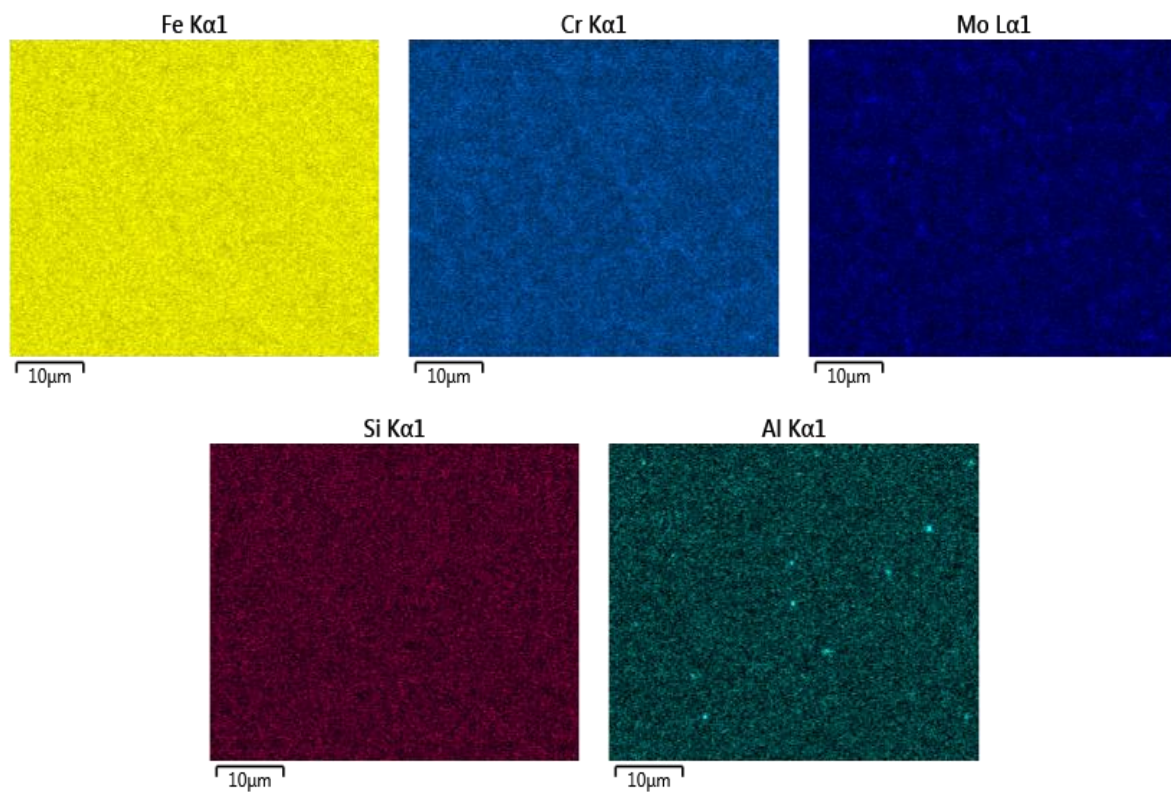
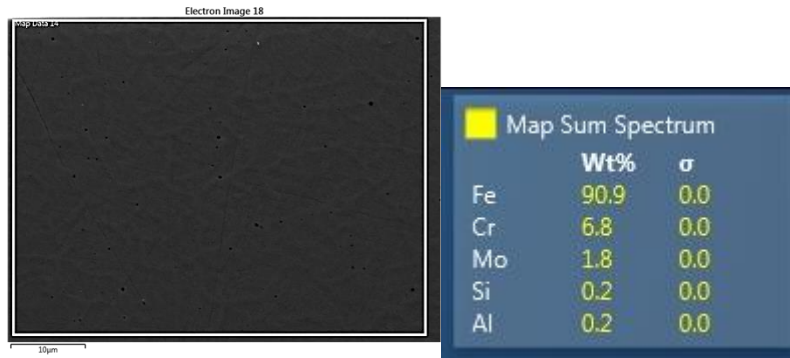
Obr. 161 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55, přechod 2-detail-martenziticko-bainitická struktura v vyšším podílem bainitu-feriticko-cementická struktura-3000x-SEM



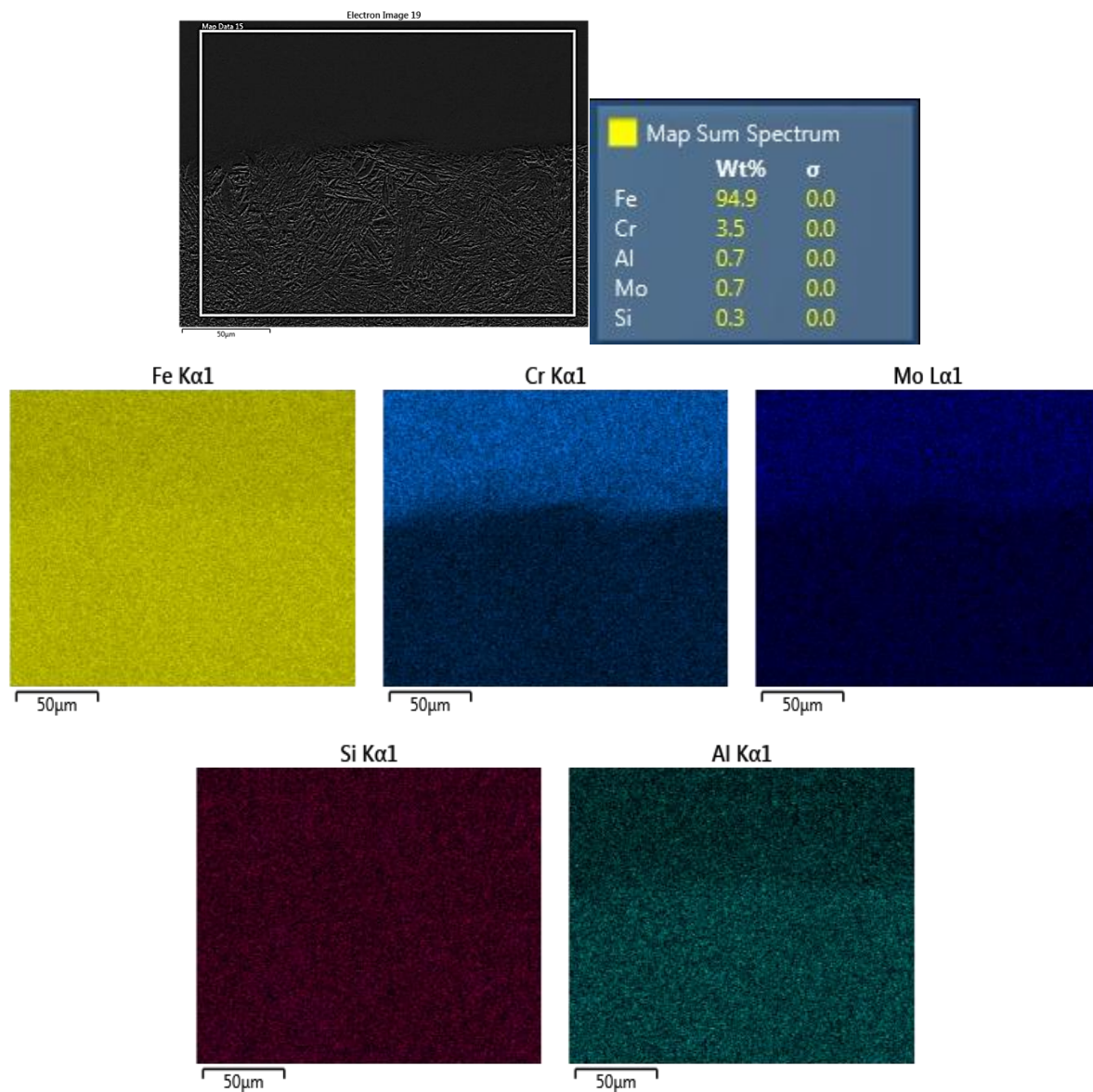
*Obr. 162 Vzorek Ferro, vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku
Ferro55, střed-detail-feriticko-cementická struktura-5000x-SEM*

EDS, EDX analýza

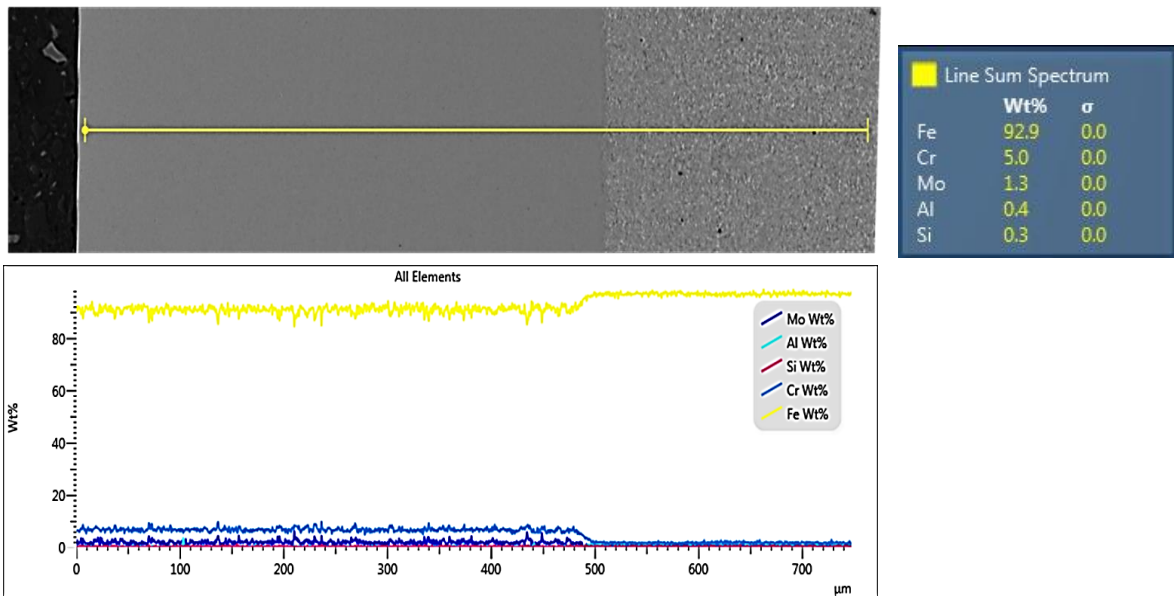
U vzorku byla u vnitřní části prstence provedena plošná EDS analýza vrstvy a přechodu do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků (Obr. 163, Obr. 164). Dále byla změřena liniová EDX analýza přes vrstvu do základního materiálu (Obr. 165).



Obr. 163 Vzorek Ferro - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55 - ukázka místa měření plošné EDS analýzy ve vrstvě nástřiku s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



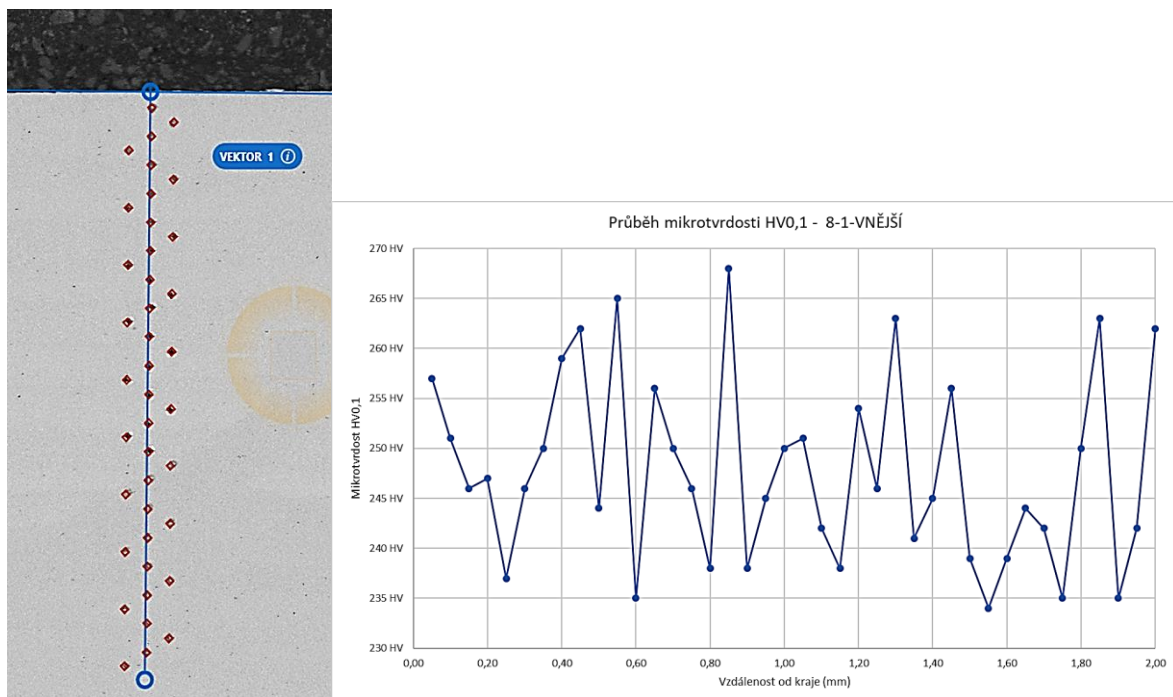
Obr. 164 Vzorek Ferro - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55 - ukázka místa měření plošné EDS analýzy v přechodu vrstvy nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a mapou rozložení jednotlivých prvků



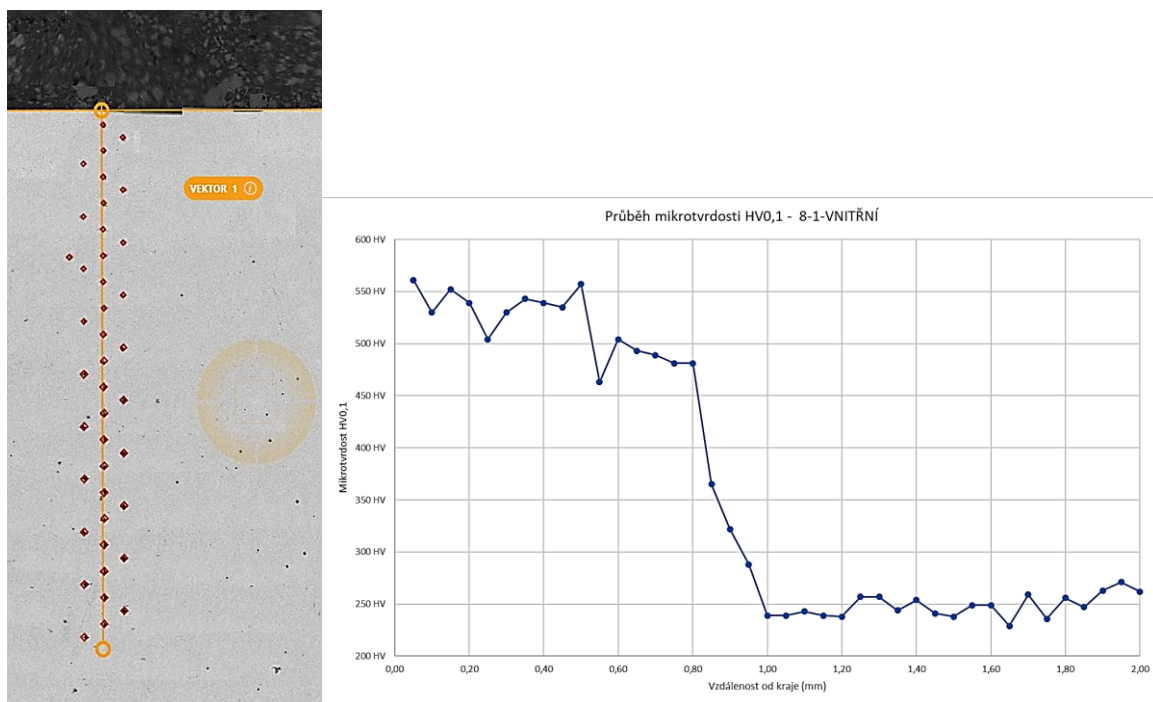
Obr. 165 Vzorek Ferro - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55 - ukázka místa měření liniové EDS analýzy přes vrstvu nástřiku do základního materiálu s naměřeným chemickým spektrem a s průběhem jednotlivých prvků spektra

Měření mikrotvrdosti

Od povrchu přes vrstvu do základního materiálu byl u vzorku z vnější části prstence bez vrstvy a z vnitřní části prstence s vrstvou nástřiku změřen průběh mikrotvrdosti se zatížením 100 gramů (Obr. 166, Obr. 167).



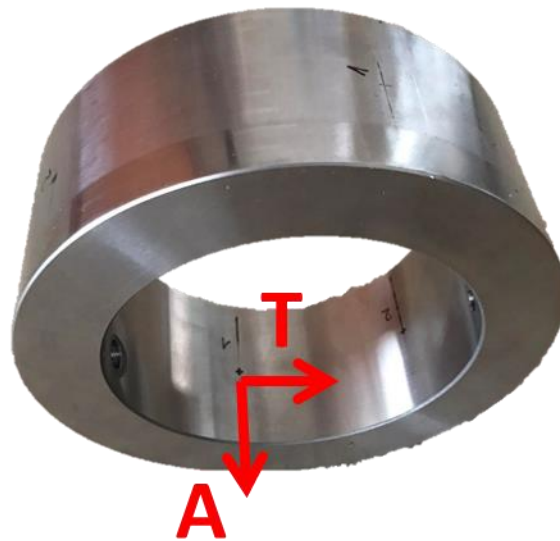
Obr. 166 Vzorek Ferro - vnější část prstence bez vrstvy-průběh mikrotvrdosti HV_{0,1} od kraje



Obr. 167 Vzorek Ferro - vnitřní část prstence s vrstvou nástřiku Ferro55-průběh mikrotvrdosti HV0,1 přes vrstvu do základního materiálu

4.3 Návrh metodiky a experimentální ověřování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků

Difrakčním analýzám bylo podrobena celkem pět vzorků dutých vřeten po finálním obrobení. Ve třech náhodně vybraných místech byla popsána zbytková napětí a fázové složení, a to ve směru rotační osy vzorku (axiální směr, směr A, kolmý na hlavní řezný pohyb nástroje). Geometrické, resp. přístrojové, omezení experimentu by vyžadovalo pro popsání zbytkových napětí ve směru kolmém (směr T, ve směru hlavního řezného pohybu nástroje) znehodnocení vzorku. Vzhledem k velmi omezenému počtu vzorků bylo pro potřeby zmapování zbytkových napětí ve směru kolmém poptáno měření na externím pracovišti. Bohužel kapacitní možnosti externího pracoviště neumožňovaly realizovat měření u všech vzorků. Měření tedy posloužilo pouze pro orientační představu o stavu napjatosti v kolmém směru. I přes uvedený nedostatek vzorků se přesto podařilo zajistit dva vzorky, které byly v průběhu řešení rozřezány a použity pro popsání zbytkových napětí v kolmém směru T. Z důvodu objektivit jednotlivých experimentů v rámci této práce byly však dále uvažovány pouze hodnoty v axiálním směru A. Nicméně zjištění související s hodnotami zbytkových napětí v kolmém směru jsou zmíněna a budou okomentována v diskuzi výsledků. Blíže byl způsob realizace analýz, včetně popisu použitých přístrojů a jejich parametrů popsán v kapitole 4.1.2. Níže jsou uvedeny již aktualizované parametry experimentu přizpůsobené konkrétním analyzovaným vzorkům.



Obr. 168 Segment dutého vřetena s vyznačenými směry analýz

Analýza zbytkových napětí ve směru A

Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$. Difrakční měření na vzorcích bylo prováděno na přístroji *X'Pert Pro MPD* v Braggově-Brentanově geometrii s následujícími parametry:

- rentgenka s chromovou nebo manganovou anodou a bodovým ohniskem,
- křížové clony $4 \times 2 \text{ mm}^2$,
- β -filtr (absorbující difraktované záření $K\beta$) z tenké vanadové nebo chrom-berylíové fólie a umístěný před proporcionálním xenonovým detektorem,
- měřeno při 9 náklonech úhlu ψ .

Byly analyzovány difrakční linie $\{102\}$ fáze WC, $\{311\}$ fáze Ni a Co, a $\{211\}$ fáze α -Fe v závislosti na vzorku. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$ za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel 2θ byl určen jako těžiště dubletu $K\alpha_1\alpha_2$ difraktovaného příslušnými mřížkovými rovinami dané fáze. Při výpočtu napětí byly použity následující rentgenografické elastické konstanty: pro WC $\frac{1}{2}s_2 = 1,61 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -0,27 \text{ TPa}^{-1}$, pro Ni $\frac{1}{2}s_2 = 6,74 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,56 \text{ TPa}^{-1}$, pro Co $\frac{1}{2}s_2 = 6,68 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,62 \text{ TPa}^{-1}$, a pro α -Fe $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1,25 \text{ TPa}^{-1}$. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [36]. FWHM parametr (Full Width at Half Maximum) byl určen jako pološířka analyzované difrakční linie při náklonu $\psi = -40^\circ$.

Analýza zbytkových napětí ve směru T

Difrakční měření bylo prováděno na přístroji *PROTO iXRD COMBO* v geometrii ω -goniometru s následujícími parametry:

- rentgenka s manganovou anodou,
- β -filtr (absorbující difraktované záření $K\beta$) z tenké vanadové fólie umístěný před detektorem.
- doba expozice 2 s,
- 20 opakování expozice pro každé měřené difrakční maximum,
- kolimátor o průměru 2 mm,
- měřeno při 11 náklonech úhlu ψ , tzn. celkem získáno 22 difrakčních maxim,
- vzorky oscilovaly ve směru A o ± 1 mm.

Translace měla za účel potlačení vlivu případné lokální nehomogenity zbytkových napětí v měřené oblasti na výslednou hodnotu zbytkových napětí. Výpočet zbytkových makroskopických napětí byl prováděn pomocí softwaru *XRD Win 2000* s použitím rentgenografických elastických konstant $s_1 = -1,56 \text{ TPa}^{-1}$ a $\frac{1}{2}s_2 = 6,74 \text{ TPa}^{-1}$. Difrakční úhly 2θ byly určeny z maxim difrakčních linií $K\alpha_1$ příslušných mřížkových rovin niklové fáze aproximací Gaussovou funkcí metodou *Absolute peak*. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ” [36].

Šířka difrakčního maxima je ovlivněna kolísáním velikosti mřížkového parametru v ozářeném objemu. Šířka roste s napětím druhého druhu – mikrodeformací (napětí homogenní v rámci jednotlivých zrn) a s klesající velikostí krystalitů (kdy krystalit se rozumí oblast s téměř ideální krystalickou strukturou; metalografické zrno se obvykle skládá z více krystalitů) [36].

Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenového záření do zkoumaného materiálu, což je v případě železa ca 3–5,5 μm [36].

Kvalitativní fázová analýza (Rietveld)

Difrakční záznamy byly naměřeny na přístroji *X'Pert Pro MPD* v Braggově-Brentanově geometrii s následujícími parametry:

- rentgenka s kobaltovou anodou a bodovým ohniskem,
- křížové clony $4 \times 2 \text{ mm}^2$,
- β -filtr (absorbující difraktované záření $\text{Co}K\beta$) z tenké železné fólie umístěný před 1D detektorem *X'Celerator* s aktivní délkou $2,17^\circ 2\theta$.

Difrakční záznamy byly zpracovány pro popsání fázového složení pomocí softwaru *HighScore Plus*.

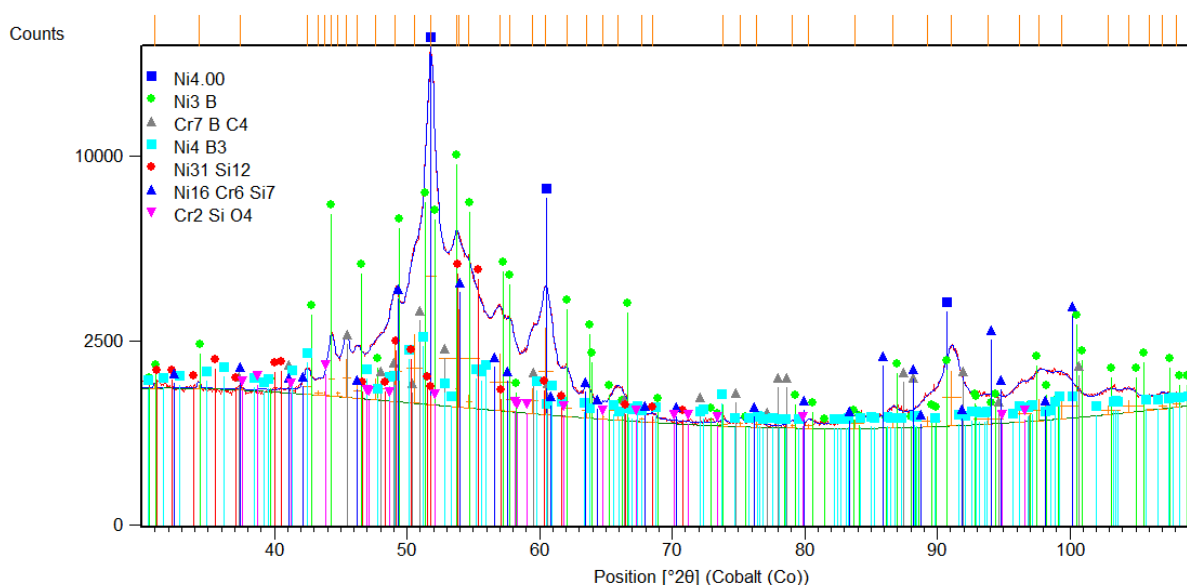
Velikost difraktujícího objemu je dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání

použitého rentgenového záření do zkoumaného materiálu, což je v případě železa ca 3–9 μm [36].

Polohování vzorků při jejich měření na difraktometru bylo provedeno pomocí triangulačního laserového zaměřování s 5 μm přesností stanovení polohy měřené oblasti povrchu vzorku vůči zdroji laserového svazku. – prověřit jestli to není opakování toho samého z úvodu

4.3.1 Povlak NiCrBSi - Technologie HVOF

Z hlediska mechanických vlastností se nástřik NiCrBSi vyznačuje výbornou korozní odolností a žáruvzdorností, vykazuje také značnou tvrdost (cca 400 HV). Korozivzdornost a žáruvzdornost nástřiku poskytuje nikl a chrom, který zlepšuje pasivační vlastnosti povlaku. Nikl, a především karbidy chromu a boru zvyšují tvrdost a bor společně s křemíkem zlepšuje smáčivost nástřiku a lepší vzájemnou přilnavost částic [37]. Povrchová vrstva nástřiku NiCrBSi, HVOF dle fázové analýzy obsahuje majoritně fázi Ni s krystalovou mřížkou fcc, kde mřížkové parametry jsou trochu odlišné od tabulkových, proto se pravděpodobně jedná o tuhý roztok s Cr. Dále byly popsány minoritní fáze boridů, karbidů a oxidů. Matrice B a Si, která spojuje jednotlivé částice, nemá žádná výrazná difrakční maxima, proto ji nebylo možné fázovou analýzou identifikovat. Makroskopická ZN byla určena pro majoritní fázi Ni. Na obrázcích níže je uvedena průměrná hodnota makroskopických ZN ze třech bodů s vypočítanou chybou nepřímého měření jednotlivých nástřiků po obrábění.



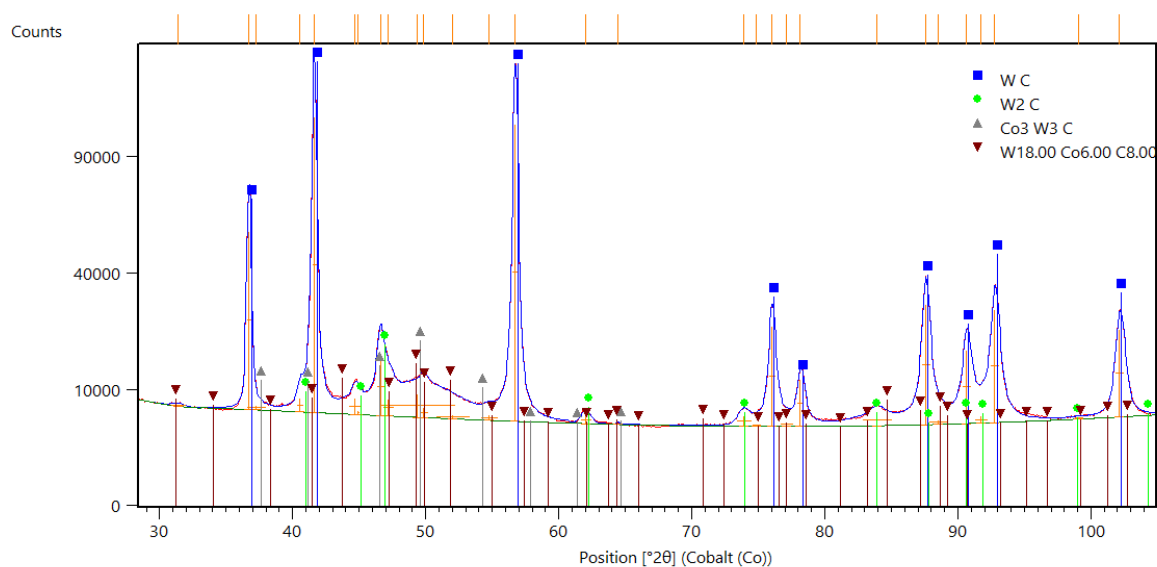
Obr. 169 Difrakční záznam segmentu dutého vřetena s nástřikem NiCrBSi, HVOF spolu s liniemi určující jednotlivé popsané krystalické fáze

Bod měření	Směr A		
	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	FWHM [$^{\circ}2\Theta$]
1	-493	48	5,285
2	-480	76	5,919
3	-464	67	5,127

Tab. 10 Povrchová makroskopická ZN a hodnoty pološířky segmentů dutého vřetena s nástřikem NiCrBSi, HVOF, kdy byla analyzována difrakční linie {311} fáze Ni

4.3.2 Povlak WC-Co-Cr – Technologie HVOF

Povrchová vrstva nástřiku WC-Co-Cr obsahuje dle fázové analýzy majoritně WC, dále také křehký W_2C a minoritní fáze W_3Co_3C a $W_9Co_3C_4$. Matrice, která spojuje jednotlivá zrna karbidů, nemá žádná výrazná difrakční maxima, proto ji nebylo možné fázovou analýzou identifikovat. Makroskopická ZN byla určena pro majoritní fázi WC.



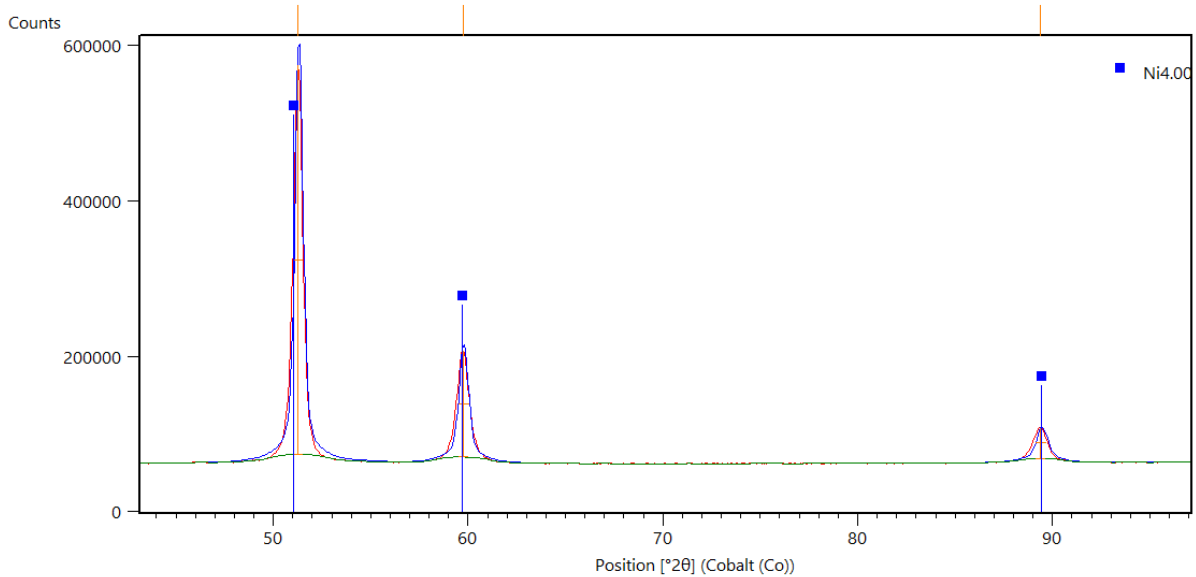
Obr. 170 Difrakční záznam segmentu dutého vřetena s nástřikem WC-Co-Cr, HVOF spolu s liniemi určující jednotlivé popsané krystalické fáze

Bod měření	Směr A		
	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	FWHM [$^{\circ}2\Theta$]
1	-1966	217	1,815
2	-3234	305	1,880
3	-1521	406	1,980

Tab. 11 Povrchová makroskopická ZN a hodnoty pološířky ve směru A segmentů dutého vřetena s nástřikem WC-Co-Cr, HVOF, kdy byla analyzována difrakční linie {102} fáze WC

4.3.3 Povlak Nistelle C276W - Technologie LMD

Povrchová vrstva nástřiku NISTELLE C276W, HSC dle fázové analýzy obsahuje majoritně Ni s krystalovou mřížkou fcc, kde mřížkové parametry jsou trochu odlišné od tabulkových, proto se pravděpodobně jedná o tuhý roztok. Makroskopická ZN byla určena pro majoritní fázi Ni.



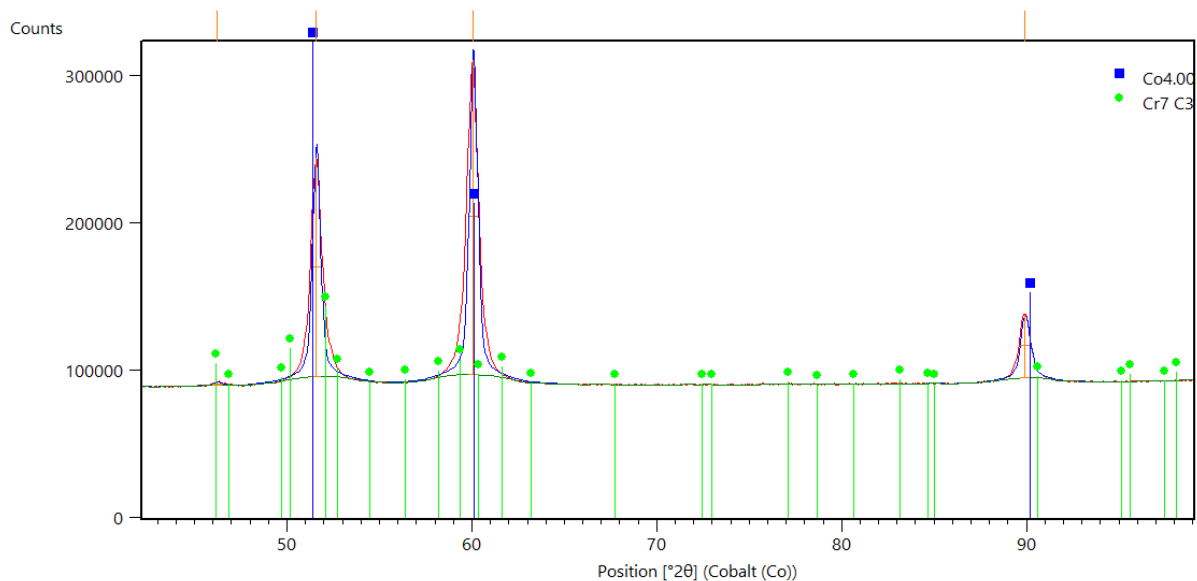
Obr. 171 Difrakční záznam segmentu dutého vřetena s nástřikem NISTELLE C 276 W, LMD spolu s liniemi určující jednotlivé popsané krystalické fáze

Bod měření	Směr A		
	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	FWHM [$^{\circ}2\theta$]
1	-503	32	3,483
2	-408	29	3,740
3	-328	13	3,797

Tab. 12 Hodnoty pološířky ve směru A segmentů dutého vřetena s nástřikem NISTELLE C276W, LMD po obrobení, kdy byla analyzována difrakční linie $\{311\}$ fáze Ni, $\{311\}$ fáze Co a $\{211\}$ fáze α -Fe

4.3.4 Povlak Stellite 6 – Technologie LMD

Povrchová vrstva nástřiku Stellite 6, HSC dle fázové analýzy obsahuje majoritně Co s krystalovou mřížkou fcc, kde mřížkové parametry jsou trochu odlišné od tabulkových, proto se pravděpodobně jedná o tuhý roztok. Dále byla popsána minoritní fáze Cr_7C_3 . Makroskopická ZN byla určena pro majoritní fázi Co.



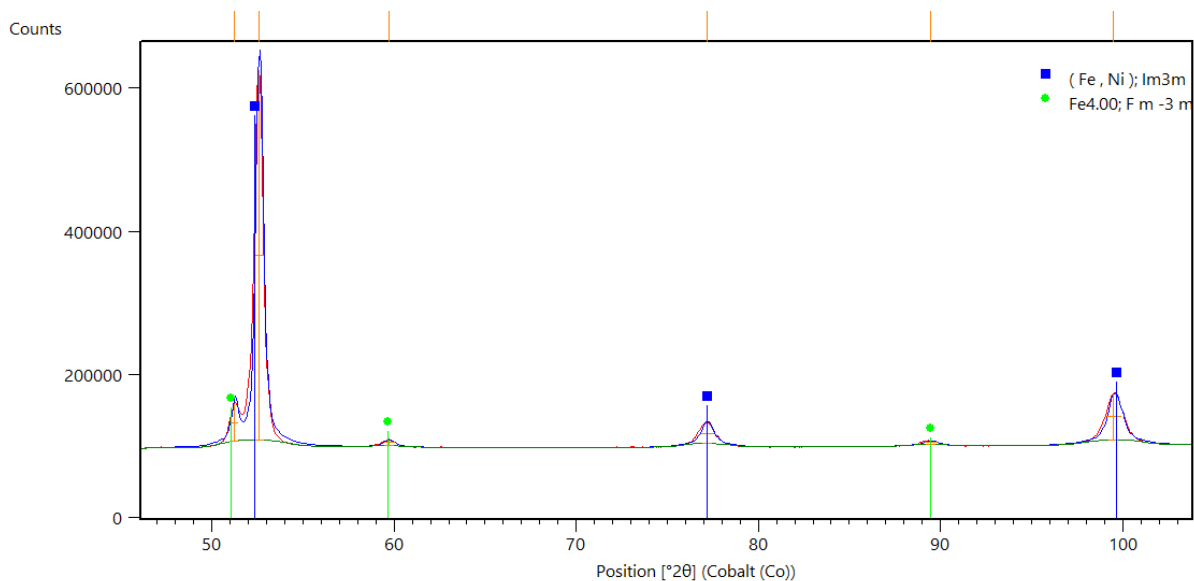
Obr. 172 Difrakční záznam segmentu dutého vřetena s nástřikem Stellite 6, LMD spolu s liniemi určující jednotlivé popsané krystalické fáze

Bod měření	Směr A		
	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	FWHM [$^{\circ}2\theta$]
1	-800	42	2,950
2	-765	30	3,180
3	-788	53	3,120

Tab. 13 Hodnoty pološířky ve směru A segmentů dutého vřetena s nástřikem Stellite 6, LMD po obrobení, kdy byla analyzována difrakční linie $\{311\}$ fáze Ni, $\{311\}$ fáze Co a $\{211\}$ fáze α -Fe

4.3.5 Povlak Ferro 55 – Technologie LMD

Povrchová vrstva nástřiku Ferro55, dle fázové analýzy obsahuje majoritně fázi s krystalovou mřížkou bcc, dále byla popsána i minoritní fáze s fcc mřížkou. Jelikož se jedná o materiál s majoritním zastoupením železa s příměsí Cr, Mo a Mn, lze považovat fáze za ferit a austenit. Makroskopická ZN byla určena pro majoritní fázi tedy ferit, α -Fe.



Obr. 173 Difrakční záznam segmentu dutého vřetena s nástřikem Ferro55, LMD spolu s liniemi určující jednotlivé popsané krystalické fáze

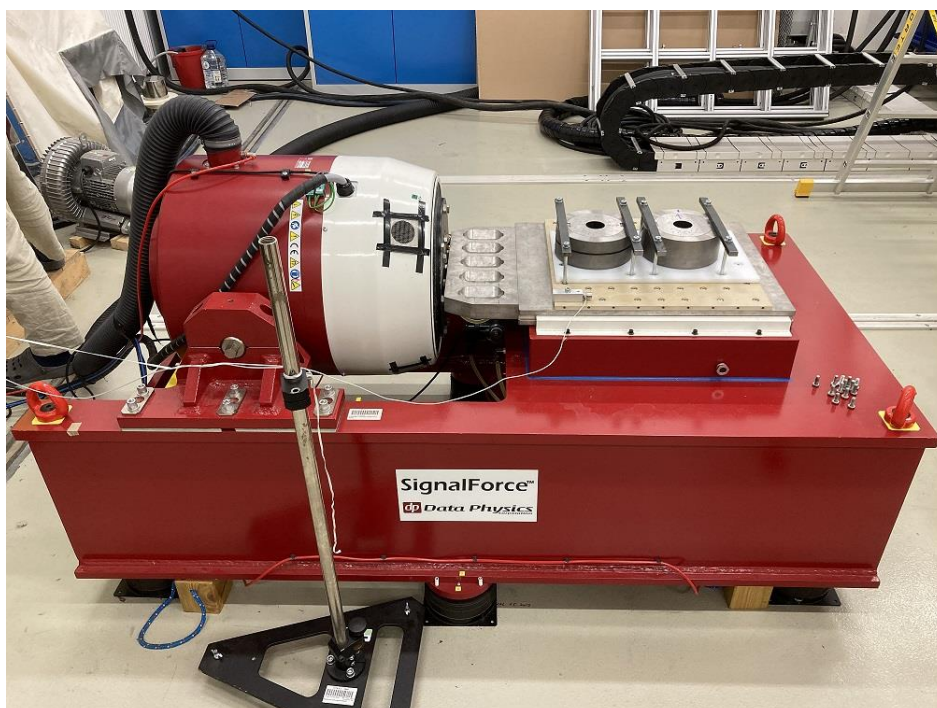
Bod měření	Směr A		
	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	FWHM [$^{\circ}2\Theta$]
1	-776	30	4,001
2	-865	95	3,757
3	-631	63	3,476

Tab. 14 Hodnoty pološířky ve směru A segmentů dutého vřetena s nástřikem Ferro 55, LMD po obrobení, kdy byla analyzována difrakční linie $\{311\}$ fáze Ni, $\{311\}$ fáze Co a $\{211\}$ fáze α -Fe

4.4 Návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

Využití obráběcích strojů v průmyslové praxi je velmi různorodé, a to jak z pohledu obráběných materiálů, technologických operací, rezných podmínek apod. Výskyt vibrační koroze je jev nepředvídatelný a hledání konkrétních podmínek, za kterých vibrační koze vzniká, přímo na obráběcím stroji v reálném provozu by bylo časově a finančně velmi náročné.

Byla proto hledána alternativa, která by umožnila velmi realisticky docílit obdobných podmínek, které nastávají při obrábění na obráběcím stroji, tedy vyvolat relativní pohyb mezi vnitřní a vnější částí vzorku, a to ve směru kolmém na osu vzorku, tedy ve směru radiálním. Pro tyto účely byl vtipován elektrodynamický budič vibrací Data Physics GW-V400LT DSA5-10K s řídicím systémem SignalStar Vector II.



Obr. 174 Elektrodynamický budič vibrací Data Physics GW-V400LT DSA5-10K s řídicím systémem SignalStar Vector II

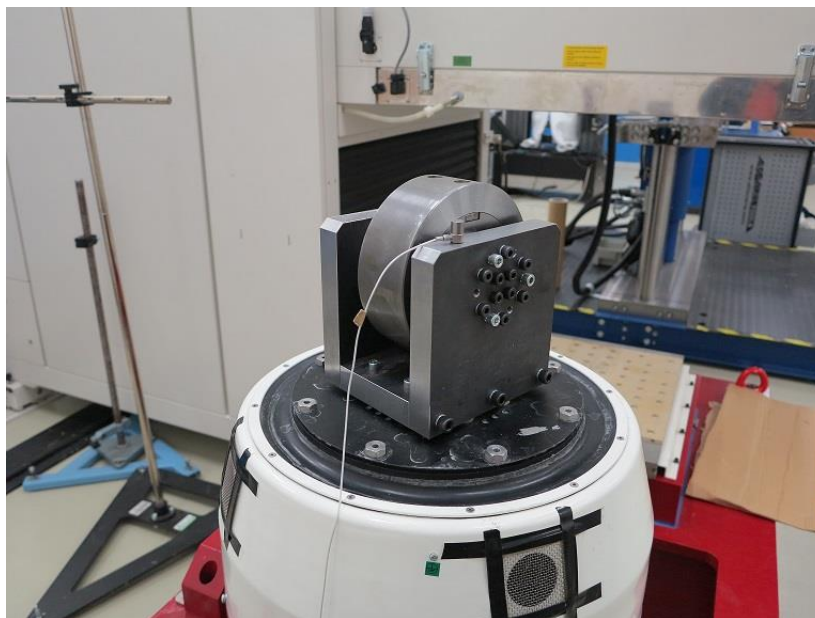
V první fázi bylo zvoleno vodorovné buzení vibrací vzorku vřetene se svislou osou uložení vzorku na stole budiče. Vnější část vzorku byla pevně spojena s horizontálním stolem budiče prostřednictvím upínek a vnitřní část byla uložena volně. Celý vzorek byl uložen na teflonové desce (Obr. 175). Ukázalo se však, že při tomto způsobu uložení vzorku nebylo možné vyvolat výraznější poškození povrchu, a to pravděpodobně kvůli nezanedbatelnému tření mezi vzorkem a podložkou, které omezovalo pohyb vnitřní části vzorku, který simuluje pracovní vřeteno.



Obr. 175 Zobrazení horizontálního uložení vzorků na budiči vibrací

Pro další část zkoušek tedy bylo zvoleno vertikální uložení vzorku s horizontální osou vzorku a buzením ve svislém směru. Se stolem budiče je pomocí upevňovacího přípravku pevně

spojena vnitřní část zkušební vzorku, vnější část může volně kmitat (Obr. 176). Tento způsob uložení vzorku odpovídá reálnému uložení pracovního vřetena v obráběcím stroji a zahrnuje také statické zatížení vnitřní části vzorku hmotností vnějšího kroužku. Při zkouškách byla axiální poloha vnějšího kroužku fixována pomocí teflonových válečků volně vložených do mezery mezi vzorkem a bočnicemi přípravku.



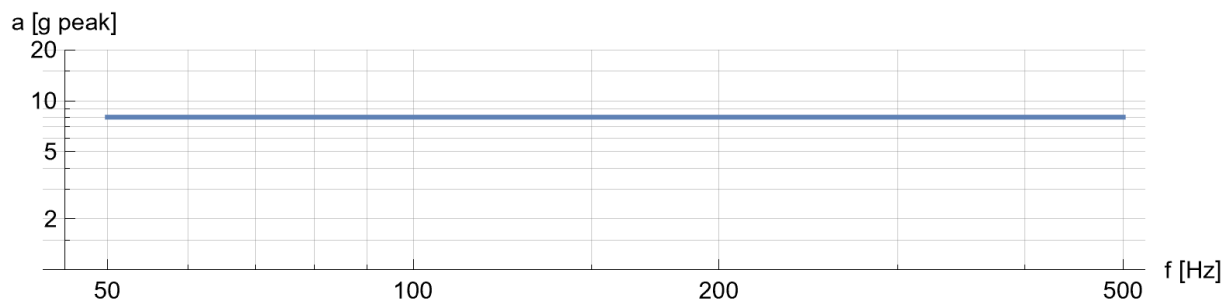
Obr. 176 Zobrazení vertikálního uložení vzorků na budiči vibrací

Protože nejsou známy velikosti ani frekvenční spektra dynamických sil vznikajících při zatěžování pracovního vřetena v reálných podmínkách, které se na víc mohou lišit podle zvolených rezných podmínek, bylo postupně zvoleno několik úrovní amplitudy budícího zrychlení (řádově desetiny až jednotky g peak). Dynamické zatížení bylo vyvoláno harmonickým kmitáním s konstantní frekvencí nebo sinusovým rozmítáním s plynulou změnou frekvence. Rychlost rozmítání byla v řádu desítek a stovek oct/min. Jako krajní hodnoty frekvence byly zvoleny 50 Hz (odpovídá otáčkám pracovního vřetena $3\,000\text{ min}^{-1}$) a 500 Hz (10. harmonická frekvence, vyvolána např. zuby frézovacího nástroje).

Nalezení optimálních zkušebních podmínek, za kterých bylo dosaženo vzniku vibrační koroze, bylo velmi obtížné a zdlouhavé a bylo použito několika základních zkušebních vzorků, tedy vzorků odpovídajících reálnému stavu současných vřeten. Nicméně postupným zkoušením byly nalezeny následující podmínky:

- Buzení rozmítaným sinem (sine sweep) v pásmu 50 až 500 Hz s rychlostí rozmítání 120 oct/min a konstantní amplitudou 8 g peak. Doba trvání jedné zkoušky byla 8 hodin.
- Zatěžovací cyklus je složen z postupného nárůstu a poklesu budící frekvence, délka úplného cyklu je cca 3,32 s. Při době trvání testu 8 hodin to odpovídá cca 8 675 zatěžovacím cyklům.

Uvedený zatěžovací profil (Obr. 177) lze nastavit na běžných budičích vibrací se zpětnovazebním řízením.



Obr. 177 Zatěžovací profil pro testování vzorků

Nalezené zkušební podmínky byly ověřeny na dvou nových vzorcích odpovídajících reálnému stavu současných vřeten s neporušeným standardním povrchem bez následné úpravy. V obou případech se podařilo za uvedených podmínek docílit vzniku výrazné vibrační koroze, což je patrné na obrázku Obr. 178.



Obr. 178 Původní vzorek po zkouškách na budiči vibrací - vznik vibrační koroze na dutém i pracovním vřetenu

Za identických podmínek byly následně testovány další vzorky, které však již byly opatřeny daným typem povlaku. Výsledkem je informace, zda na vzorku vzniká či nevzniká vibrační koroze, je uvedena v tabulce viz tabulka níže (Tab. 15).

Materiál povlaku	Vznik vibrační koroze
NiCrBSi	NE
WC-Co-Cr	NE
Nistelle C276W	NE
Stellite 6	NE
Ferro 55	ANO

Tab. 15 Tabulka výsledků vzniku vibrační koroze po 8 hodinovém testu na budiči vibrací

Jak je patrné z Tab. 15, vibrační koroze se objevila pouze na vzorku s povlakem z materiálu Ferro 55. Z provedené liniové EDS analýzy (Obr. 165) je velmi dobře patrné složení jednotlivých prvků daného povlaku, kdy majoritním prvkem povlaku je železo na úkor ostatních prvků. Toto může být příčinou nízké antikorozní ochrany tohoto povlaku.

V rámci této etapy bylo předmětem řešení nalezení metodiky testování vzorků na budiči vibrací. Na základním vzorku bez naneseného povlaku byly nalezeny podmínky vzniku vibrační koroze. Za identických podmínek byly testovány vzorky s různými povlaky, kdy se pouze na vzorku s povlakem Ferro 55 objevila vibrační koroze.

5. Diskuze

- 1) Návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.
- 2) Návrh metodiky a experimentální ověřování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.
- 3) Návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

5.1 Výsledky z metodiky testování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků

Světelná a elektronová mikroskopie prokázala u všech vzorků vnější části prstence bez vrstvy nástřiku homogenní feriticko-cementickou strukturu v morfologii sorbitu (např. Obr. 103, Obr. 104), což je správně, neboť vzorky by rozřezány z jednoho původního dutého vřetena. Kdyby analýza ukázala rozdílné výsledky, byla to chyba v realizaci dané analýzy. Tomu odpovídal i průběh naměřené mikrotvrdoti HV_{0,1}, kdy byla průměrná hodnota 249 HV_{0,1}.

U všech vzorků realizovaných metodou LMD z vnitřní části prstence s vrstvou byla mikroskopií prokázána změna struktury pod vrstvou nástřiku. Pod vrstvou nástřiku byla prokázána martenziticko-bainitická struktura (Obr. 125, Obr. 142, Obr. 159), která postupně přecházela ve feriticko-cementickou strukturu (Obr. 128, Obr. 145, Obr. 162). Tomu odpovídala u jednotlivých vrstev nástřiku i naměřená mikrotvrdotost HV_{0,1} (Obr. 133, Obr. 150, Obr. 167).

NiCrBSi

Světelná a elektronová mikroskopie prokázala u vzorků s nástřikem NiCrBNi feriticko-perlitickou mikrostrukturu základního materiálu (Obr. 79 - Obr. 88). Průměrná hodnota mikrotvrdotosti vrstvy u vzorku A byla 800 HV_{0,1}, u vzorku B byla o něco nižší 784 HV_{0,1}, což je téměř identické v porovnání s hodnotami stávajících dutých vřeten (800 HV). Průměrná hodnota mikrotvrdotosti jádra byla vzorku A 234 HV_{0,1}, u vzorku B opět o něco nižší 202 HV_{0,1}.

Plošná a liniová EDS analýza neprokázala mezi vzorky A a B velký rozdíl v chemickém složení vrstvy a v přechodu do základního materiálu (Obr. 95 - Obr. 100). Chemické složení odpovídalo vrstvě nástřiku a základnímu materiálu. U vzorku vrstva nástřiku se základní 69 % Ni matricí, 15 % Cr, 5 % C, 4 % Si (Obr. 95).

WC-Co-Cr

U vzorku z vnitřní části prstence s vrstvou nástřiku WC-Co-Cr byla světelnou i elektronovou mikroskopií prokázána homogenní feriticko-cementická struktura i pod vrstvou nástřiku (Obr. 105, Obr. 106, Obr. 109 - Obr. 111). U vzorku byla průměrná hodnota mikrotvrdotosti vrstvy nástřiku 1037 HV_{0,1}, což je v porovnání s hodnotami stávajících dutých vřeten (800 HV) vyšší hodnota. Ve vrstvě nástřiku však byly elektronovou mikroskopií prokázány praskliny (Obr. 105), což může souviset s poměrně velkou hodnotou mikrotvrdotosti.

Obecně je možno konstatovat, že tento typ nástřiku je velmi tvrdý, ale také velmi křehký, neboť i v průběhu realizace analýz došlo neopatrnou manipulací se vzorkem k oštípnutí části nástřiku. Průměrná hodnota mikrotvrdomosti 254 HV_{0,1} pod vrstvou nástřiku odpovídala feriticko-cementické struktúře (Obr. 116).

U vzorků z vnitřní části prstence s vrstvou byla provedena plošná a liniová EDS analýza, která neprokázala na povrchu nauhličenou ani nitridovanou vrstvu (Obr. 112 - Obr. 114). Chemické složení odpovídalo vrstvě nástřiku a základnímu materiálu. U vzorku vrstva nástřiku se základní 76 % W matricí, 9 % C, 11 % Co, 4 % Cr (Obr. 112).

Nistelle C276W

U vzorku s vrstvou nástřiku Nistelle C276W byla průměrná hodnota mikrotvrdomosti vrstvy nástřiku 241 HV_{0,1}, což je v porovnání s hodnotami stávajících dutých vřeten výrazně nižší hodnota. Hodnota mikrotvrdomosti 437 HV_{0,1} pod vrstvou nástřiku odpovídala martenziticko-bainitické struktúře a je pravděpodobně zapříčiněná teplotním ovlivněním základního materiálu samotným procesem nástřiku povlaku. Martenziticko-bainitická struktura přecházela ve feriticko-cementickou strukturu s průměrnou mikrotvrdomostí 238 HV_{0,1}.

U vzorku z vnitřní části prstence s vrstvou byla provedena plošná a liniová EDS analýza, která neprokázala na povrchu nauhličenou ani nitridovanou vrstvu (Obr. 130, Obr. 131). Chemické složení odpovídalo jednotlivým vrstvám nástřiku a základnímu materiálu. U vzorku byla vrstva nástřiku se základní 40 % Ni matricí, 35 % Fe, 11 % Cr, 11 % Mo, 3 % W (Obr. 129).

Stellite 6

U vzorku s vrstvou nástřiku Stellite 6 byla průměrná hodnota mikrotvrdomosti vrstvy nástřiku 392 HV_{0,1}, což je v porovnání s hodnotami stávajících dutých vřeten nižší hodnota, nicméně výrazně vyšší oproti hodnotě vrstvy nástřiku Nistelle C276W. Hodnota mikrotvrdomosti 502 HV_{0,1} pod vrstvou nástřiku odpovídala martenziticko-bainitické struktúře a je pravděpodobně zapříčiněná teplotním ovlivněním základního materiálu samotným procesem nástřiku povlaku. Martenziticko-bainitická struktura přecházela ve feriticko-cementickou strukturu s průměrnou mikrotvrdomostí 249 HV_{0,1}.

U vzorku z vnitřní části prstence s vrstvou byla provedena plošná a liniová EDS analýza, která neprokázala na povrchu nauhličenou ani nitridovanou vrstvu (Obr. 147, Obr. 148). U vzorku byla vrstva nástřiku se základní 33 % Co matricí, 47 % Fe, 16 % Cr, 2 % W (Obr. 146).

Ferro 55

U vzorku s vrstvou nástřiku Ferro55 byla průměrná hodnota mikrotvrdomosti vrstvy nástřiku nejvyšší 537 HV_{0,1} ze vzorků nástřiků aplikovaných metodou LMD. Hodnota mikrotvrdomosti 495 HV_{0,1} pod vrstvou nástřiku odpovídala martenziticko-bainitické struktúře a je pravděpodobně zapříčiněná teplotním ovlivněním základního materiálu samotným procesem nástřiku povlaku a zhruba odpovídá hodnotám u vzorků s nástřikem Nistelle C276W a Stellite

6. Martenziticko-bainitická struktura přecházela ve feriticko-cementickou strukturu s průměrnou mikrotvrdostí 248 HV_{0,1}.

U vzorku z vnitřní části prstence s vrstvou byla provedena plošná a liniová EDS analýza, která neprokázala na povrchu nauhličenou ani nitridovanou vrstvu (Obr. 164, Obr. 165). U vzorku vrstva nástřiku se základní 91 % Fe matricí, 7 % Cr, 2 % Mo (Obr. 163).

5.2 Výsledky z metodiky testování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků

Na základě výsledků získaných rentgenografickou difrakční analýzou lze konstatovat, že nástřiky vyrobené metodou HVOF jsou z hlediska fázového složení velice komplexní, naopak nástřiky LMD obsahují pouze jednu majoritní fázi nebo nanejvýš jednu minoritní.

NiCrBSi

Povrchová vrstva nástřiku NiCrBSi (HVOF) dle fázové analýzy obsahuje majoritně tuhý roztok Ni a dalších příměsových prvků s krystalovou mřížkou fcc. Pro majoritní fázi byla popsána na vnitřním povrchu dutého vřetena vysoká tlaková zbytková napětí ve směru A, což je důsledkem obrábění. Kolmo na hlavní řezný pohyb, tedy kolmo na brusné čáry, dosahují tlaková zbytková napětí při optimálních podmínkách broušení vždy vyšších hodnot.

WC-Co-Cr

Povrchová vrstva nástřiku WC-Co-Cr (HVOF) dle fázové analýzy obsahuje majoritně WC, dále i křehký W₂C. Makroskopická zbytková napětí majoritní fáze dosahují po obrobení vysokých tlakových. Tlaková zbytková napětí jsou z hlediska provozu většinou příznivá, jelikož zvyšují únavovou životnost, kdy oddalují vznik trhlin a snižují rychlost šíření. Obrobením došlo také ke zvětšení pološířky (parametr FWHM), což značí zvýšení úrovně plastické deformace z důvodu obrábění. Při zvyšování pološířky dochází ke zjemnění krystalitů (metalografická zrna se většinou skládají z více krystalů, které jsou odděleny malouhlovými hranicemi) a/nebo ke zvýšení mikrodeformace (deformace jednotlivých zrn, často korelovaná s hustotou dislokací).

Nistelle C276W

Povrchová vrstva nástřiku NISTELLE C 276 W (LMD) dle fázové analýzy obsahuje majoritně tuhý roztok Ni, respektive Co a dalších příměsových prvků s krystalovou mřížkou fcc. Makroskopická zbytková napětí majoritní fáze dosahují vysokých tlakových hodnot.

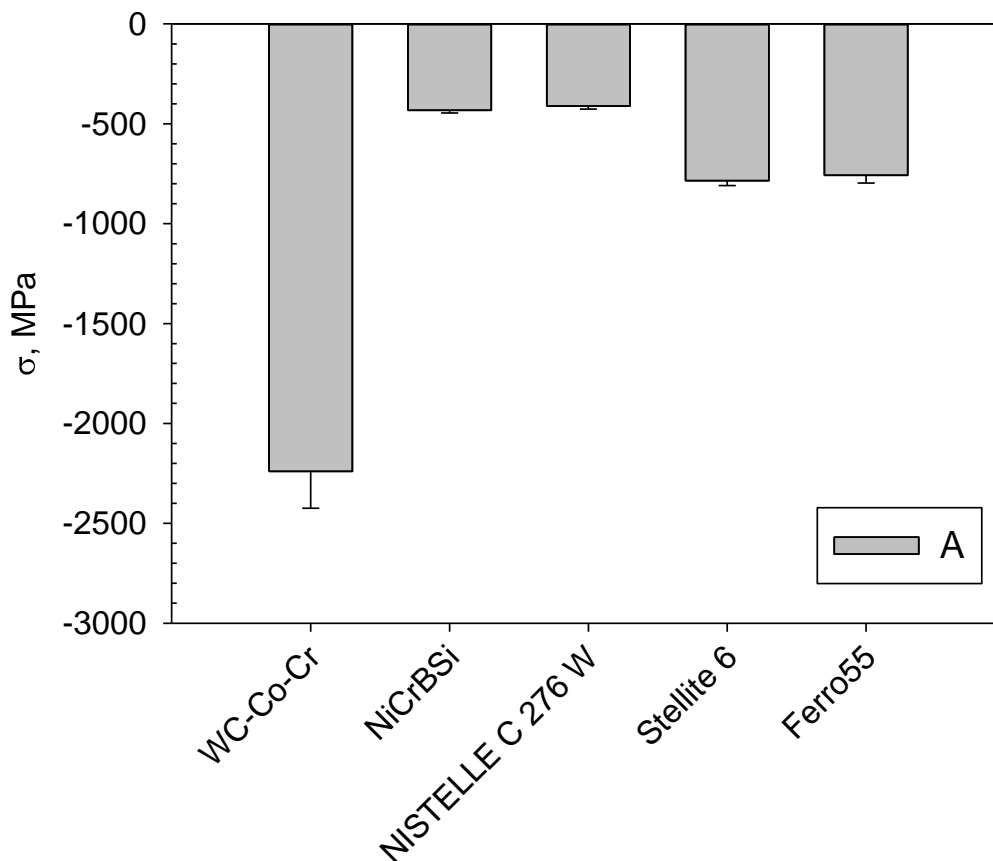
Stellite 6

Povrchová vrstva nástřiku Stellite 6 (LMD) dle fázové analýzy obsahuje majoritně tuhý roztok Ni, respektive Co a dalších příměsových prvků s krystalovou mřížkou fcc. Dále byly ještě pozorovány difrakční maxima minoritní fáze Cr₇C₃. Makroskopická zbytková napětí majoritní fáze dosahují vysokých tlakových hodnot.

Ferro 55

Povrchová vrstva nástřiku Ferro 55 (LMD) dle fázové analýzy obsahuje majoritně fázi s krystalovou mřížkou bcc, dále byla popsána i minoritní fáze s fcc mřížkou. Jelikož se jedná o materiál s majoritním zastoupením železa s příměsemi Cr, Mo a Mn, lze považovat fáze za ferit a austenit. Makroskopická zbytková napětí majoritní fáze dosahují vysokých tlakových hodnot.

Z porovnání makroskopických zbytkových napětí jednotlivých nástřiků po obrábění ve směru A, viz Obr. 179, lze říci, že ve všech případech dosahovala zbytková napětí tlakových hodnot. Vzorek WC-Co-Cr vykazuje nejvyšší hodnoty, vzorek Nistelle C276W naopak nejnižší. Nástřik NiCrBSi z hlediska zbytkových napětí odpovídá vzorku Nistelle C276W. Makroskopické zbytkové napětí zbylých dvou nástřiků dosahují dvounásobných hodnot. Stav zbytkové napjatosti po obrábění je superpozicí stavu jak po samotného nanášení, tak vlivu obrábění. Za předpokladu stejných brusných podmínek, tedy i podobného ovlivnění obráběním, nástřiků LMD, lze říci, že Stellite 6 a Ferro55 by mohly mít podobný stav zbytkové napjatosti po nanesení vrstvy. A lze vyslovit hypotézu, že zbytková napětí vzorku Nistelle C276W naopak dosahovala vyšších hodnot. Pro potvrzení je však zapotřebí analyzovat i stav před obráběním.



Obr. 179 Povrchová makroskopická zbytková napětí segmentů dutého vřetena po obrábění

5.3 Výsledky z metodiky testování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek

V první fázi bylo zvoleno vodorovné buzení vibrační vzorku vřetene se svislou osou uložení vzorku na stole budiče. Vnější část vzorku byla pevně spojena s horizontálním stolem budiče prostřednictvím upínek a vnitřní část byla uložena volně. Celý vzorek byl uložen na teflonové desce (Obr. 175). Ukázalo se však, že při tomto způsobu uložení vzorku nebylo možné vyvolat výraznější poškození povrchu, a to pravděpodobně kvůli nezanedbatelnému tření mezi vzorkem a podložkou, které omezovalo pohyb vnitřní části vzorku, který simuluje pracovní vřeteno.

Pro další část zkoušek tedy bylo zvoleno vertikální uložení vzorku s horizontální osou vzorku a buzením ve svislém směru. Se stolem budiče je pomocí upevňovacího přípravku pevně spojena vnitřní část zkušební vzorku, vnější část může volně kmitat (Obr. 176). Tento způsob uložení vzorku odpovídá reálnému uložení pracovního vřetena v obráběcím stroji a zahrnuje také statické zatížení vnitřní části vzorku hmotností vnějšího kroužku. Při zkouškách byla axiální poloha vnějšího kroužku fixována pomocí teflonových válečků volně vložených do mezery mezi vzorkem a bočnicemi přípravku.

Materiál povlaku	Vznik vibrační koroze
NiCrBSi	NE
WC-Co-Cr	NE
Nistelle C276W	NE
Stellite 6	NE
Ferro 55	ANO

Tab. 16 Tabulka výsledků vzniku vibrační koroze po 8 hodinovém testu na budiči vibrací

Jak je patrné z Tab. 15, vibrační koroze se objevila pouze na vzorku s povlakem z materiálu Ferro 55. Z provedené liniové EDS analýzy (Obr. 165) je velmi dobře patrné složení jednotlivých prvků daného povlaku, kdy majoritním prvkem povlaku je železo na úkor ostatních prvků. Toto může být příčinou nízké antikorozi ochrany tohoto povlaku.

5.4 Závěrečná diskuze nad dosaženými výsledky s ohledem na využití v TOS VARNSDORF a.s.

Výsledky jednotlivých analýz umožnily získat základní představu o vlastnostech jednotlivých nástřiků a jejich odolnosti vůči vibrační korozi. Z hlediska využitelnosti v praxi by však bylo dobré zohlednit také další aspekty, které jsou v průmyslu řešeny, jako je časová, technická a finanční náročnost realizace daného nástřiku, resp. dané technologie nástřiku.

Technologie HVOF je velmi náročná na spotřebu plynů nutných k samotnému procesu hoření a natavení daných částic. S tím je spojená také velká hlučnost procesu a tedy nároky velmi dobré zakrytí celého pracoviště. V neposlední řadě je tu omezení prostorové, kdy je

tato metoda velmi vhodná pro aplikaci na vnější plochy těles. Pro aplikaci nástřiku na vnitřní plochy těles je nutné, aby otvor byl dostatečně velký, aby se do vešla aplikační hlava a zároveň byla dodržena požadovaná vzdálenost od stříkaného povrchu.

Technologie LMD využívá k aplikaci nástřiku laser. Časová příprava není příliš náročná a nevyžaduje zvláštní podmínky aplikace. Moderní přístroje umožňují aplikovat nástřik velmi rychle, a to jak na vnějším, tak i vnitřním povrchu součástí. Minimální vnitřní průměr součásti se pohybuje okolo 100 mm a maximální hloubka aplikace nástřiku je zhruba 1,5 m.

6. Splnění cílů práce

Cílem disertační práce bylo navrhnout vhodný materiál a složení povrchové vrstvy (povlaku), který by minimalizoval proces vzniku vibrační koroze u dutého a pracovního vřetene, které jsou důležitou součástí CNC obráběcího stroje.

V práci byly definovány dílčí cíle:

1. Úvodní studie k návrhu metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena.

Úvodní studie byla realizována na vybraných 3 typech vzorků (obrobené nitridované vřeteno, neobrobené nitridované vřeteno a vstupní tyče). Výsledky významně posloužily k nadefinování metod pro měření mechanických a materiálových vlastností u dutého vřetena. Informace z realizované studie jsou uvedeny v podkapitolách 4.1.1 až 4.1.4.

Dílčí cíl byl splněn.

2. Návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.

Na základě úvodní studie byla navržena a experimentálně ověřena metodika (světelná mikroskopie, řádkovací elektronová mikroskopie, EDS, EDX analýza a měření mikrotvrdomosti) pro testování materiálových vlastností u dutého vřetena po aplikaci vybraných typů povlaků. Informace z realizovaného měření jsou uvedeny v podkapitolách 4.2.1 až 4.2.5.

Dílčí cíl byl splněn.

3. Návrh metodiky a experimentální ověřování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci povlaků.

Opět na základě úvodní studie byla navržena a experimentálně ověřena metodika (makroskopická zbytková napětí ve směru A, kvalitativní a kvantitativní fázová analýza) pro testování mechanických vlastností u dutého vřetena po aplikaci vybraných typů povlaků. Informace z realizovaného měření jsou uvedeny v podkapitolách 4.3.1 až 4.3.5.

Dílčí cíl byl splněn.

4. Návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

Byla navržena a experimentálně ověřena zcela nová metoda testování vzniku výrazné vibrační koroze. Daná metoda významně přispěla k celkovému vyhodnocení vhodnosti různých typů aplikovaných povlaků na dutém vřeteni. Informace z realizovaného měření jsou uvedeny v podkapitole 4.4.

Dílčí cíl byl splněn.

7. Závěr

Předložená disertační práce zpracována na téma „**Výzkum parametrů integrity povrchu u dynamicky namáhaných strojních součástí**“ přispívá k rozšíření poznatků o problematice vibrační koroze u CNC obráběcích strojů.

Hlavním cílem předkládané práce bylo navrhnout vhodný materiál a složení povrchové vrstvy (povlaku), který by minimalizoval proces vzniku vibrační koroze u dutého a pracovního vřetene, které jsou důležitou součástí CNC obráběcího stroje.

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné nejprve provést rozbor vzniku vibrační koroze. Dále vytvořit kompletní metodiku pro testování mechanických a materiálových vlastností vhodně navržených a vytvořených povlaků. A v neposlední řadě navrhnout a vytvořit metodiku pro testování tvorby vibrační koroze za simulovaných/reálných podmínek.

Práce je členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Hlavní pozornost byla věnována integritě povrchu, jakosti povrchové vrstvy a jejímu hodnocení, vzniku zbytkových napětí a jejich stanovení, vytváření funkčního povrchu součástí, stávajícímu způsobu výroby pracovního a dutého vřetena, vibrační korozi a vhodnému způsobu nanášení povlaků.

Experimentální část byla zaměřena na čtyři oblasti. Úvodní studii k návrhu metod pro měření materiálových a mechanických vlastností u dutého vřetena, návrh metodiky a experimentální ověřování materiálových a mechanických vlastností povlaků u dutého vřetena a také na návrh metodiky a experimentální ověřování vzniku vibrační koroze za simulovaných podmínek.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze formulovat následující:

1. Pro minimalizaci vibrační koroze bylo vybráno 5 povlaků: NiCrBSi a WC-Co-Cr (technologie HVOF), dále povlaky typu Nistelle C276W, Stellite 6 a Ferro 55 (technologie LMD), na kterých byly provedeny analýzy materiálových a mechanických vlastností včetně testování vzniku vibrační koroze.
2. Výsledky jednotlivých analýz umožnily získat základní představu o vlastnostech jednotlivých povlaků a jejich odolnosti vůči vibrační korozi. Celkové porovnání jednotlivých vybraných povlaků je uvedeno v závěrečné Tab. 17.

	Základní prvek matrice	Průměrná mikrotvrdost [HV0,1]	Průměrná velikost ZN [MPa]	Vznik vibrační koroze	Technologie	Využitelnost technologie v TOS	Náklady na 1 vzorek [Kč]
NiCrBSi	Ni	800	-479	NE	HVOF	NE	16 039,-
WC-Co-Cr	W	1037	-2240	NE	HVOF	NE	16 039,-
Nistelle C276W	Ni	241	-413	NE	LMD	ANO	14 212,-
Stellite 6	Co	392	-784	NE	LMD	ANO	14 212,-
Ferro 55	Fe	537	-757	ANO	LMD	ANO	14 212,-

Tab. 17 Materiálové a mechanické vlastnosti vybraných povlaků včetně vzniku vibrační koroze

3. Z hlediska sledovaných materiálových a mechanických vlastností povlaků dosáhl nejlepších výsledků povlak typu Stellite 6. Daný povlak se jeví jako nejvhodnější pro průmyslovou aplikaci.

Zhodnocení výsledků pro vědní obor

V rámci disertační práce byla vyvinuta unikátní mechanická metoda měření vibrační koroze. Danou metodu lze využít pro další výzkumná pracoviště s určitou základní odborností v oblasti analýzy integrity povrchu.

Uvedené poznatky, které vznikly v rámci disertační práce, jsou unikátní, nebyly nikde dosud publikovány a rozšiřují současné vědecké poznání v oblasti vzniku a testování vibrační koroze. Prezentované výsledky jsou v porovnání s literaturou uvedenou v rešeršní části velmi komplexní. Výsledky materiálových a mechanických vlastností povlaků jsou dány do úzké souvislosti s povrchovým zpevněním a změnami mikrostruktury v rámci eliminace vibrační koroze. Dosažené výsledky výzkumu a realizované analýzy značně rozšiřují poznatky v oblasti teorie obrábění a konstrukce CNC obráběcích strojů.

Zhodnocení výsledků pro průmyslovou praxi

Práce souvisí s výzkumnými záměry realizovanými v posledních 10ti letech firmou TOS VARNSDORF a.s. a shrnuje rozsáhlé poznatky o vibrační korozi a eliminaci jejího vzniku.

Výsledky získané v této práci poslouží pro vědecko-výzkumný projekt TW03010172 – Vysoce produktivní stroje pro prostředí digitálních továren (2021–2024, TAČR/TREND), jehož je autor předkládané práce hlavní řešitelem jak za celý projekt, tak také za firmu TOS VARNSORF a.s. V neposlední řadě poslouží získané výsledky pro rozvoj kvality CNC obráběcích strojů a zvýšení konkurenceschopnosti firmy TOS VARNSDORF a.s.

Novost spočívá v inovaci výrobního postupu dutého vřetena a aplikace povlaku, který umožní eliminovat některé časově a finančně náročné operace, jako třeba chemicko-tepelné zpracování v podobě závěrečné nitridace povrchu dutého vřetena.

Doporučení na pokračování práce v daném tématu

Předkládaná práce umožnila získat základní představu o problematice vibrační koroze. Bylo by zajímavé navázat na dosažené výsledky a dále problematiku rozvíjet. Jako možné budoucí kroky se jeví vyzkoušet i další materiály s potenciálem korozní ochrany. Dále by bylo zajímavé povlaky navržené v této práci podrobit různým podmínkám na budiči vibrací, zda podmínky vzniku vibrační koroze nepřesunuly do jiného frekvenčního spektra. V neposlední řadě by bylo zajímavé vyrobit reálné duté vřeteno opatřené navrženým povlakem a ověřit odolnost proti vibrační korozi v reálných podmínkách přímo na obráběcím stroji.

Seznam použité literatury

- [1] V. POTÁCEL, *Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2004.
- [2] B. BUMBÁLEK, „Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci,“ VUT v Brně, 2004.
- [3] B. BUMBÁLEK a L. BUMBÁLEK, „Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu,“ *Strojírenská technologie*, sv. roč. XI, č. 3, pp. 9-15, 2006.
- [4] F. NECKÁŘ a I. KVASNIČKA, *Vybrané statě z úběru materiálu*, sv. 1. vyd., R. J. Gazda, Editor, Praha: ES ČVUT, 1991, p. 88 s..
- [5] F. HOLEŠOVSKÝ, „Zbytková napětí určovaná pomocí Barkhausenova šumu,“ *Strojírenská technologie*, sv. roč. XI, č. 3, pp. 29-31, 2006.
- [6] F. HOLEŠOVSKÝ, „Stanovení zbytkových napětí v povrchu po obrábění,“ *Strojírenská technologie*, sv. roč. XI, č. 3, pp. 29-31, 2006.
- [7] B. BUMBÁLEK a J. MALEC, „Dokončovací operace a jejich význam pro funkci součástí,“ *Strojírenská technologie*, sv. roč. XI, č. 3, pp. 25-26, 2006.
- [8] L. BUMBÁLEK, „Zbytková napětí určovaná pomocí Barkhausenova šumu,“ *Strojírenská technologie*, sv. roč. IX, č. 3, pp. 11-15, 2004.
- [9] „www.virgamet.com,“ VIRGAMET Piotr Sompolińsku, [Online]. Available: <http://www.virgamet.com>.
- [10] STEEL Data, [Online]. Available: <https://www.steeldata.info/std/demo/data/953.html>.
- [11] Wikipedia, [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze>.
- [12] ČSN EN ISO 8044, *Koroze kovů a slitin - Základní termíny a definice*, UNMZ, 2016.
- [13] R. FOKT, *Návrh metod vyhledávání koroze na draku letounů (všech typů) při provádění údržby*, Institut dopravy, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [14] L. PTÁČEK, *Nauka o materiálu*, sv. 2. opr. a rozš. vyd., Brno: CERM, 2002.
- [15] C. Vargel, *Corrosion of Aluminium, 2nd Edition*, p. 858 stran.
- [16] T.-L. Yau a V. Annamalai T., *Corrosion of Zirconium and its Alloys*, Volume 3 editor, sv. Shreir's Corrosion, 2016, pp. 2094-2134.
- [17] A. Zaki, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Bitterworth-Heinemann, 2006.

- [18] F. Schwack, F. Prigge a G. Poll, *Finite element simulation and experimental analysis of false brinelling and fretting corrosion*, Volume 126 editor, Tribology International, October 2018, pp. Pages 352-362.
- [19] H. Hadya, S. Hammood a L. L. Thair, *he role of surface roughness during fretting corrosion of 316L stainless steel*, *Materials Today*, Volume 42 editor, Materials Today: Proceedings, 2021, pp. Pages 2326-2333.
- [20] Z. Yusheng, M. Hongliang a T. Lichen, *Effect of the frequency on fretting corrosion behavior between Alloy 690TT tube and 405 stainless steel plate in high temperature pressurized water*, sv. Volume 164, December 2021.
- [21] J. Li, B. Yang a Y. Lu, *The effect of normal force on fretting corrosion behavior of Inconel 690 in 3.5% sodium chloride*, sv. Volume 131, Materials Characterization, September 2017, pp. Pages 224-233.
- [22] X. Chang, H. Huang a Y. Peng, *Friction, wear and residual strength properties of steel wire rope with different corrosion types*, Sv. %1 z %2Volumes 458-459, Wear, October 2015.
- [23] L. Xu, D. Zhang a Y. Yin, *Fretting wear behaviors of hoisting rope wires in acid medium*, Volume 55 editor, Marials & Design, March 2014, pp. Pages 50-57.
- [24] Y. Park, S. Narayanan a K. Lee, *Fretting corrosion of tin-plated contacts*, Volume 41 editor, sv. Issue 7, Tribology International, July 2008, pp. Pages 616-628.
- [25] Y. Park a S. Narayanan, *Fretting corrosion of tin-plated contacts: Evaluation of surface characteristics*, Volume 40 editor, sv. Issue 3, Tribology International, March 2007, pp. Pages 548-559.
- [26] A. Kirk, P. Shipway a W. Sun, *The effect of frequency on both the debris and the development of the tribologically transformed structure during fretting wear of a high strength steel*, Wear, 2019, pp. 426-7.
- [27] J. MEZULIÁNIK, *Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho obrobiteľnosť*, ZČU v Plzni, Fakulta strojná, Katedra technologie obrábění, 2023.
- [28] „Použití technologie,“ PLASMAMETAL, spol. s r.o., 2022-12-09. [Online]. Available: <https://plasmametal.cz/pouzite-technologie#zakladni-metody>.
- [29] J. DAVIS, *Handbook of Thermal Spray Technology*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2004.
- [30] M. LÍBAL, *Stanovení hlavních pramenů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
- [31] P. KOSINOVÁ, *Aplikace technologií žárového nástřiku v oblasti zvyšování životnosti a spolehlivosti u namáhaných součástí silničních vozidel*, Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010.
- [32] SAMMETAL, [Online]. Available: <https://www.sammetal.cz/cs/technologie/plazmovy-nastrik>.

- [33] Kolektiv autorů, *Automobilový průmysl v soudobém světě*, Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, Vysoká škola o.p.s., 2020, pp. 180-181.
- [34] TRUMPF, [Online]. Available: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/aditivni-vyroba/laserove-praskove-navarovani/.
- [35] „Struer,“ [Online]. Available: <https://www.struers.com>.
- [36] I. Kraus a N. Ganev, *Technické aplikace difrakční analýzy*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [37] C. P. Valean, „Characteristics of Thermally Sprayed NiCRBSi Coatings before and after Electromagnetic Induction Remeting Process,“ sv. 16, *Acta Polytech*, 2019, pp. 7-18.
- [38] V. Čílová, *Posouzení kvality chromové vrstvy (Adheze)*, Liberec: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra materiálu, 2000.
- [39] V. Čílová, *Metalografické posouzení kvality tepelného zpracování povrchu 2ks vzorků vřetene*, Liberec: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra materiálu, 2001.
- [40] N. Lee, C. Schimpf a H. Biermann, *Effect of Nitriding Potential KN on the Formation and Growth of a “White Layer” on Iron Aluminide Alloy*, *Metall Mater Trans B52*, 2021, pp. 414-424.
- [41] „Spektrometry,“ [Online]. Available: <https://www.spektrometry.cz>.
- [42] „Labwrench Zeiss,“ [Online]. Available: <https://www.labwrench.com>.
- [43] „Labsarena Zeiss Auriga,“ [Online]. Available: <https://labsarena.com/>.
- [44] „Leco,“ [Online]. Available: <https://cz.leco.com/products/automated-hardness-testing/>.

Seznam publikovaných prací autora

Publikace

- [1] Smolík, J.; Veselý, J.; Rybář, P.; Matyska, V.; Šindler, J.; Zavázal, T.; Havlík, L.; Kozlok, T. **Synergetic development of machine tools**, MM Science Journal. 2012,(special IS), 1-7. ISSN 1805-0476.
- [2] Švéda, J.; Hřivna, Š.; Kozlok, T.; Schut, M., **Pokročilé měření obrobků v obráběcích stroji**, MM Průmyskové spektrum. 2014,(12), XIV-XV. ISSN 1212-2572.
- [3] Halamka, V.; Moravec, J.; Beneš, P.; Neusser, Z.; Koubek, J.; Kozlok, T.; Valášek, M.; Šika, Z. **Drive axis controller optimization of production machines based on dynamic models**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, 115(4), 1277-1293. ISSN 0268-3768.
- [4] Kolář, P.; Janota, M.; Švéda, J.; Kozlok, T. **Method for Safe Experimental Testing of Machine Tool Usable Spindle Power**. MM Science Journal. 2021, 2021 5167-5174. ISSN 1803-1269.
- [5] Švéda, J.; Kolář, P.; Rytíř, M.; Fojtů, P.; Fiala, Š.; Chládek, Š.; Kozlok, T.; Machálka, M. **Framework for milling process monitoring**. MM Science Journal. 2022, 2022(3), 5969-5978. ISSN 1803-1269.
- [6] Petráček, P.; Fojtů, P.; Kozlok, T.; Sulitka, M. **Effect of CNC Interpolator Parameter Settings on Toolpath Precision and Quality in Corner Neighborhoods** Applied Sciences. 2022, 12(19), 1-24. ISSN 2076-3417.
- [7] Švéda, J.; Chládek, Š.; Hornych, T.; Kozlok, T.; Smolík, J. **Increasing Machining Accuracy Based on CNC Machine Tool Correction Data by Using Ad Hoc Modification**. Machines. 2022, 10(5), 1-17. ISSN 2075-1702.
- [8] Janota, M.; Kolář, P.; Falta, J.; Kozlok, T. **Calibration Method for In-Process Identification of Tangential Specific Cutting Force in Milling Machines**. 2022, 10(11), 1-16. ISSN 2075-1702.
- [9] Mareš, M.; Horejš, O.; Straka, M.; Švéda, J.; Kozlok, T. **An update of thermal error compensation model via on-machine measurement** MM Science Journal. 2022, 2022(5), 6275-6282. ISSN 1803-1269.

Výzkumné zprávy, prototypy, funkční vzorky, ověřené technologie

- [1] HOREJŠ, O. et al. Adaptive Thermal Error Compensation Model of a Horizontal Machining Centre. In: IHLENFELDT, S., ed. *3rd International Conference on Thermal Issues in Machine Tools (ICTIMT2023)*. International Conference on Thermal Issues in Machine Tools, Drážďany, 2023-03-21/2023-03-23. Cham: Springer, 2023. s. 83-98. ISSN 2194-0525. ISBN 978-3-031-34485-5. DOI [10.1007/978-3-031-34486-2_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-34486-2_7).
- [2] MAREŠ, M. et al. An update of thermal error compensation model via on-machine measurement. *MM Science Journal*. 2022, **2022**(5), 6275-6282. ISSN 1803-1269. DOI [10.17973/MMSJ.2022_12_2022150](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_12_2022150).
- [3] VAVRUŠKA, P. et al. Automated feed rate optimization with consideration of angular velocity according to workpiece shape. *Results in Engineering*. 2022, **16** 1-11. ISSN 2590-1230. DOI [10.1016/j.rineng.2022.100762](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100762). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022004327>
- [4] JANOTA, M. et al. Calibration Method for In-Process Identification of Tangential Specific Cutting Force in Milling. *Machines*. 2022, **10**(11), 1-16. ISSN 2075-1702. DOI [10.3390/machines10111095](https://doi.org/10.3390/machines10111095). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/11/1095>
- [5] ŠVÉDA, J. et al. Increasing Machining Accuracy Based on CNC Machine Tool Correction Data by Using Ad Hoc Modification. *Machines*. 2022, **10**(5), 1-17. ISSN 2075-1702. DOI [10.3390/machines10050288](https://doi.org/10.3390/machines10050288). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/5/288>
- [6] PETRÁČEK, P. et al. Effect of CNC Interpolator Parameter Settings on Toolpath Precision and Quality in Corner Neighborhoods. *Applied Sciences*. 2022, **12**(19), 1-24. ISSN 2076-3417. DOI [10.3390/app12199496](https://doi.org/10.3390/app12199496). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/19/9496/html>
- [7] ŠVÉDA, J. et al. Framework for milling process monitoring. *MM Science Journal*. 2022, **2022**(3), 5969-5978. ISSN 1803-1269. DOI [10.17973/MMSJ.2022_10_2022123](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2022_10_2022123).
- [8] KOLÁŘ, P. et al. Method for Safe Experimental Testing of Machine Tool Usable Spindle Power. *MM Science Journal*. 2021, **2021** 5167-5174. ISSN 1803-1269. DOI [10.17973/MMSJ.2021_11_2021176](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_11_2021176).

- [9] HALAMKA, V. et al. Drive axis controller optimization of production machines based on dynamic models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, **115**(4), 1277-1293. ISSN 0268-3768. DOI [10.1007/s00170-021-07160-w](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07160-w).
- [10] ŠVÉDA, J. et al. Pokročilé měření obrobků v obráběcích stroji. *MM Průmyslové spektrum*. 2014,(12), XIV-XV. ISSN 1212-2572.
- [11] SMOLÍK, J. et al. Synergetic development of machine tools. *MM Science Journal*. 2012,(special IS), 1-7. ISSN 1805-0476.
- [12] SMOLÍK, J. et al. *Oprava ocelové komponenty metodou WAAM*. [Ověřená technologie] 2022.
- [13] STEJSKAL, M. et al. *Efektivní tvarové frézování na strojích řady WHT*. [Ověřená technologie] 2022.
- [14] SMOLÍK, J. et al. *Technologie napojení návarů WAAM a DED na nástrojovou ocel 19552*. [Ověřená technologie] 2020.
- [15] SULITKA, M. et al. *Optimalizace upínání obrobků pro zvýšení dynamiky a výkonnosti obrábění*. [Ověřená technologie] 2015.
- [16] ŠVÉDA, J. et al. *Prototyp obráběcího stroje vybavený softwarem pro sledování provozu stroje a predikci jeho stavu*. [Prototyp] 2021.
- [17] KOZLOK, T. et al. *Prototyp dvouosé indexované frézovací hlavy S*. [Prototyp] 2019.
- [18] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 – Výsledek na stroji – TOS Varnsdorf-2019 Měření volumetrické přesnosti*. [Prototyp] 2019.
- [19] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 – Výsledek na stroji – TOS Varnsdorf-2019 Nadstavbový systém správy stroje*. [Prototyp] 2019.
- [20] KOZLOK, T. et al. *Prototyp jednoosé frézovací hlavy S*. [Prototyp] 2018.
- [21] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 - Výsledek na stroji - TOS Varnsdorf-2017 Inprocesní měření*. [Prototyp] 2017.
- [22] ŠINDLER, J. et al. *WP03 - Prototyp - TOS VARNSDORF-2017*. [Prototyp] 2017.

- [23] KOZLOK, T. et al. *Prototyp funkcionality inprocesního měření implementovaný do běžného obráběcího stroje*. [Prototyp] 2014.
- [24] KOZLOK, T. et al. *Mechatronický koncept vodorovných strojů*. [Prototyp] 2010.
- [25] ŠVÉDA, J. et al. *Nástrojové hospodářství integrované do systému správy stroje*. [Funkční vzorek] 2022.
- [26] ŠVÉDA, J. et al. *Funkční vzorek přídavného odměřování vybraného uzlu stroje*. [Funkční vzorek] 2020.
- [27] MAREŠ, M. et al. *Kompenzace teplotních chyb horizontálního vyvrtávacího stroje s rekalicací*. [Funkční vzorek] 2020.
- [28] ŠVÉDA, J. et al. *Vizualizační modul charakteristik horizontálního vyvrtávacího stroje v pracovním prostoru*. [Funkční vzorek] 2020.
- [29] HOREJŠ, O. et al. *WP06 - Funkční vzorek-TOS VARNSDORF-2019 – vývoj SW teplotních kompenzací pro stroj WHT 110 C*. [Funkční vzorek] 2019.
- [30] KOZLOK, T., T. HOLKUP a J. SMOLÍK. *Funkční vzorek stroje WRD 150 Q v.č. 0622 s modifikacemi pro snížení spotřeby energie*. [Funkční vzorek] 2013.
- [31] ŠVÉDA, J. et al. *Koncepční návrh stroje*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2023. Zpráva č. V-23-043.
- [32] ŠVÉDA, J. et al. *Optimalizace provozu stroje a vývoj příslušenství*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2023. Zpráva č. V-23-042.
- [33] ŠVÉDA, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení dílčího projektu č. 17 „Výrobní proces a jeho digitalizace“ v roce 2023*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2023. Zpráva č. V-23-041.
- [34] HOREJŠ, O. et al. *Teplotní chování výrobních strojů*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-065.
- [35] ŠVÉDA, J. et al. *Závěrečná zpráva řešení VZ8-Rozšířené funkce strojů pro uplatnění v Industry 4.0*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-064.

- [36] ŠVÉDA, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ8 v roce 2022*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-026.
- [37] SULITKA, M. et al. *Závěrečná zpráva o průběhu řešení VZ5 v letech 2019 - 2022*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-031.
- [38] SULITKA, M. et al. *Digitální dvojče stroje a technologie*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-061.
- [39] BERNARDIN, P. et al. *Odborná zpráva za výzkumný záměr VZ4 Zvyšování přenositelného výkonu do řezného procesu (stav po roce 2022, za celý projekt)*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-060, V-22-038.
- [40] ŠVÉDA, J. et al. *Datová integrace strojů a optimalizace jejich provozu*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-024.
- [41] SMOLÍK, J. et al. *Popis možností a potenciálu konstrukčních, měřicích, výrobních a softwarových prostředků pro zlepšení hlavních užitných vlastností strojů, zejména přesnosti a dynamického chování*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-050.
- [42] SULITKA, M. et al. *Popis možností a potenciálu využití virtuálních modelů a digitálních dvojčat strojů a technologií pro zdokonalení hlavních užitných vlastností strojů a jejich vyšší využitelnost*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-030.
- [43] SMOLÍK, J. et al. *Závěrečná společná zpráva*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-051.
- [44] SMOLÍK, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení dílčího projektu č. 55 „Průmyslové opravy a návrhy kovových dílců pomocí aditivních metod WAAM, DED a DLMS“ v roce 2022*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-033.
- [45] SMOLÍK, J. et al. *Ověřená technologie „Automatizovaná oprava ocelové komponenty metodou WAAM“ dílčího projektu č. 55 „Průmyslové opravy a návrhy kovových dílců pomocí aditivních metod WAAM, DED a DLMS“*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-034.

- [46] ŠVÉDA, J. et al. *Popis možností a potenciálu softwarových a mechatronických technik pro zdokonalené funkce strojů a pro jejich uplatnění v konceptu inteligentní výroby.* [Výzkumná zpráva] 2022. Zpráva č. V-22-024.
- [47] STEJSKAL, M. et al. *Efektivní tvarové frézování na strojích řady WHT.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-22-045.
- [48] ŠVÉDA, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ8 v roce 2021.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-21-033.
- [49] SULITKA, M. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ5 v roce 2021 - 2022.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2022. Zpráva č. V-21-039.
- [50] SMOLÍK, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení dílčího projektu č. 55 „Průmyslové opravy a návrhy kovových dílců pomocí aditivních metod WAAM, DED a DLMS“ v roce 2021.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-21-023.
- [51] ŠVÉDA, J. et al. *Návrh koncepce digitálního propojení strojů a zařízení.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-21-032.
- [52] ŠVÉDA, J. et al. *Implementace software pro řízení provozu stroje a systému diagnostiky vřetene.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-21-031.
- [53] ŠVÉDA, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ8 v roce 2020.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021. Zpráva č. V-20-025.
- [54] ŠVÉDA, J. et al. *Software pro řízení provozu stroje a systém diagnostiky vřetene.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-026.
- [55] SMOLÍK, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení dílčího projektu č. 4/31 „Aditivní výroba tvrdonávarů na ušlechtilé oceli – analýza technologií WAMM a DED“ v roce 2020.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-017.
- [56] SMOLÍK, J. et al. *Ověřená technologie dílčího projektu č. 4/31 „Aditivní výroba tvrdonávarů na ušlechtilé oceli – analýza technologií WAMM a DED“ v roce 2020.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-017.

- [57] SMOLÍK, J. et al. *Popis možností a potenciálu konstrukčních, měřicích, výrobních a softwarových prostředků pro zlepšení hlavních užitných vlastností strojů, zejména přesnosti a dynamického chování*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-048.
- [58] ŠVÉDA, J. et al. *Kompensace teplotních chyb horizontálního vyvrtávacího stroje s rekalicací*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-039.
- [59] ŠVÉDA, J. et al. *Vizualizační modul charakteristik horizontálního vyvrtávacího stroje v pracovním prostoru*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-038.
- [60] ŠVÉDA, J. et al. *Popis možností a potenciálu softwarových a mechatronických technik pro zdokonalené funkce strojů a pro jejich uplatnění v konceptu inteligentní výroby*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-041.
- [61] SULITKA, M. et al. *Popis možností a potenciálu využití virtuálních modelů a digitálních dvojčat strojů a technologií pro zdokonalení hlavních užitných vlastností strojů a jejich vyšší využitelnosti*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020. Zpráva č. V-20-029.
- [62] ŠVÉDA, J. et al. *Zpráva o průběhu řešení VZ8 v roce 2019*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2020. Zpráva č. V-19-062.
- [63] ŠVÉDA, J. et al. *Vývoj software pro řízení provozu stroje*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2019. Zpráva č. V-19-053.
- [64] HOREJŠ, O. et al. *Funkční vzorek-TOS VARNSDORF-2019 – vývoj SW teplotních kompenzací pro stroj WHT 110*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2019. Zpráva č. V-19-019.
- [65] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 - Výsledek na stroji - TOS Varnsdorf-2019 Měření volumetrické přesnosti*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2019. Zpráva č. V-19-061.
- [66] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 - Výsledek na stroji - TOS Varnsdorf-2019 Nadstavbový systém správy stroje*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2019. Zpráva č. V-19-060.

- [67] ŠVÉDA, J. et al. *Návrh systému správy stroje, TOS VARNSDORF*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2018. Zpráva č. V-18-039.
- [68] ŠVÉDA, J. et al. *Návrh systému rychlého měření volumetrické přesnosti, TOS VARNSDORF*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení (Ú12135), 2018. Zpráva č. V-18-038.
- [69] ŠVÉDA, J. et al. *Inprocesní měření – návod na obsluhu na stroji WHT 110 C*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2017. Zpráva č. V-17-062.
- [70] ŠVÉDA, J. et al. *WP09 – Výsledek na stroji – TOS Varnsdorf-2017 Inprocesní měření*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav výrobních strojů a zařízení, 2017. Zpráva č. V-17-061.
- [71] VYROUBAL, J. et al. *Opatření na stroji WHTec pro snížení spotřeby energie*. [Výzkumná zpráva] 2015.
- [72] ŠVÉDA, J. et al. *DV#9 (2015) - Technologie měření volumetrické přesnosti celého pracovního prostoru obráběcího stroje včetně výpočtových modelů pro 5 os*. [Výzkumná zpráva] Prague: Research Center for Manufacturing Technology, 2015. Zpráva č. V-15-054.
- [74] ŠVÉDA, J. et al. *DV#9 (2015) - Technologie inprocesního měření s využitím navržených metod měření umožňující automatizované vyhodnocení přesnosti obrobku*. [Výzkumná zpráva] Prague: Research Center for Manufacturing Technology, 2015. Zpráva č. V-15-053.
- [75] ŠVÉDA, J. et al. *Integrované odměřování deformace výsuvného smykadla*. [Výzkumná zpráva] 2015.
- [76] VYROUBAL, J. et al. *DV#5 (2015-1) – Výsledky analýzy nastavení řezných podmínek a způsobů chlazení řezného procesu*. [Výzkumná zpráva] Prague: Research Center for Manufacturing Technology, 2015. Zpráva č. V-15-060.
- [77] VYROUBAL, J. et al. *Opatření na stroji WHTec pro snížení spotřeby energie*. [Výzkumná zpráva] Prague: Research Center for Manufacturing Technology, 2015. Zpráva č. V-15-051.

- [78] HOLKUP, T. et al. *Závěrečná zpráva o řešení projektu v programu TIP - 3. vlna: Ecodesign ve stavbě obráběcích strojů*. [Výzkumná zpráva] Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013. Zpráva č. V-13-078.
- [79] HOLKUP, T. et al. *Zpráva z měření spotřeby energie a realizace úsporných opatření na strojích WRD 150 Q*. [Výzkumná zpráva] Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013. Zpráva č. V-13-024.
- [80] HOLKUP, T. et al. *Modifikace vybraných obráběcích strojů pro snížení spotřeby energie*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, FS, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2012. Zpráva č. V-12-067.
- [81] NOVOTNÝ, L. et al. *DV#4 (2012) Metodika pro budoucí měření tlumení konstrukcí strojů*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT v Praze, FS, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2012. Zpráva č. V-12-075.