

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství

Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zvyšování odolnosti ocelí vůči opotřebení

Autor: Vojtěch Bílek

Vedoucí práce: Doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch BÍLEK**
Osobní číslo: **S19B0563P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**
Téma práce: **Zvyšování odolnosti ocelí vůči opotřebení**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Literární rešerše
 - 2.1. Nástrojové oceli
 - 2.2. Opotřebení
 - 2.3. Metody zvyšování odolnosti nástrojových ocelí vůči opotřebení
3. Experimentální program
 - 3.1. Charakterizace vstupního materiálu a použitého zařízení a metod
 - 3.2. Aplikace úprav pro zvýšení opotřebení
 - 3.3. Metalografie a tvrdost
 - 3.4. Zkouška opotřebení
4. Diskuse výsledků
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

PEDROSO DE SILVA, S., ABRAO, A. M., DE SALIVA, E. R., CAMARA, M.A. Surface modification of AISI H13 steel by die-sinking electrical discharge machining and TiAlN coating: A promising hybrid technique to improve wear resistance. *Wear* 462-463 (2020) 203509.

HAIKO, O., JAVAHERI, V., VALTONEN, K., KAIJAINEN, A. , HANNULA, J., KOMI, J. Effect of prior austenite grain size on the abrasive wear resistance of ultra-high strength martensitic steels. 454-455 (2020), 203336.

RUBEŠOVÁ, K. PEKOVIĆ, M. JIRKOVÁ, H. BYSTRIANSKÝ, M. Effects of Deformation on the Behaviour of Chromium Carbides in Tool Steel Studied by Use of Semi-Solid Forming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing LTD, 2020. s. nestránkováno. ISBN: neuvedeno , ISSN: 1757-8981.

CHAUS, A.S., SAHUL, M., MORAVČÍK, R., SOBOTA, R. Role of microstructural factor in wear resistance and cutting performance of high-speed steel end mills, 474-475 (2021), 203865.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Štěpán Jeníček**
Regionální technologický institut
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.

děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.

vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Bílek	Vojtěch	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Kučerová, Ph.D.	Jméno Ludmila	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zvyšování odolnosti ocelí vůči opotřebení		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	41	GRAFICKÁ ČÁST	35
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL</p> <p>POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá porovnáváním metod pro zvýšení odolnosti proti opotřebení u materiálu HO a MS1. Jedná se o tepelné zpracování, nitridování, kuličkování. Tyto metody jsou porovnávány z hlediska opotřebení a tvrdosti za cílem nalezení nejvhodnější metody pro zvýšení odolnosti proti opotřebení.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA</p> <p>JEDNOSLOVNÉ POJMY,</p> <p>KTERÉ VYSTIHUJÍ</p> <p>PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Odolnost proti opotřebení, tepelné zpracování, nitridování, kuličkování, mikrotvrdost, opotřebení</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Bílek	Vojtěch	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Kučerová, Ph.D.	Name Ludmila	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Increase of the wear resistance of the steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76	TEXT PART	41	GRAPHICAL PART	35
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<p>BRIEF DESCRIPTION</p> <p>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</p>	<p>The bachelor thesis deals with the comparison of methods for increasing wear resistance in HO and MS1 material. This is heat treatment, nitriding, shot peening. These methods are compared in terms of wear and hardness in order to find the most suitable method for increasing wear resistance.</p>
<p>KEY WORDS</p>	<p>Wear resistance, heat treatment, nitriding, shot peening, microhardness, wear</p>

Obsah

Úvod.....	1
1 Nástrojové oceli.....	2
1.1 Uhlíkové nástrojové oceli.....	3
1.2 Slitinové nástrojové oceli	3
1.3 Rychlořezné oceli	4
1.4 Značení nástrojových ocelí.....	4
1.5 Legující prvky obsažené v nástrojových ocelích.....	5
1.5.1 Uhlík.....	5
1.5.2 Mangan.....	6
1.5.3 Křemík.....	6
1.5.4 Chrom.....	6
1.5.5 Wolfram.....	6
1.5.6 Molybden.....	7
1.5.7 Vanad.....	7
1.5.8 Titan.....	7
1.5.9 Kobalt	8
1.5.10 Nikl.....	8
2 Opotřebení.....	8
2.1 Typy opotřebení	8
2.1.1 Opotřebení hřbetu.....	9
2.1.2 Opotřebení čela ve formě žlábků.....	9
2.1.3 Plastická deformace břitu	9
2.1.4 Vrub na hřbetě břitu.....	9
2.1.5 Hřebenové trhliny na břitu.....	9
2.1.6 Únavový lom	10
2.1.7 Vydrolování břitu	10

2.1.8	Lom břitu	10
3	Metody zvyšování odolnosti nástrojových ocelí vůči opotřebení	10
3.1	Tepelné zpracování.....	11
3.1.1	Neutrální kalení	11
3.1.2	Popouštění	13
3.1.3	Precipitační vytvrzení	13
3.1.4	Normalizační žíhání	13
3.2	Chemicko-tepelné zpracování	14
3.2.1	Sycení povrchu nekovy	14
3.2.2	Sycení povrchu kovy	15
3.3	Kuličkování, válečkování, brokování.....	16
3.4	PVD a CVD povlaky	16
3.4.1	PVD povlaky	16
3.4.2	CVD povlaky.....	18
4	Experimentální program.....	18
4.1	Charakterizace vstupního materiálu a použitého zařízení a metod	18
4.1.1	MS1	18
4.1.2	HO	19
4.2	Aplikace úprav pro zvýšení opotřebení.....	20
4.2.1	Tepelné zpracování.....	20
4.2.2	Nitridování – Plazmová nitridace.....	21
4.2.3	Kuličkování	22
4.3	Metalografie a tvrdost	22
4.3.1	Tvrdost u materiálu MS1	24
4.3.2	Tvrdost u materiálu HO.....	32
4.3.3	Elektronová mikroskopie.....	40
4.4	Zkouška opotřebení	61
4.4.1	MS1	62
4.4.2	HO	66

5	Diskuze výsledků	70
6	Závěr.....	74
	Použitá literatura.....	75

Úvod

Odolnost proti opotřebení je vedle mechanických vlastností jednou z klíčových vlastností nástrojových ocelí a existují různě efektivní a cenově dostupné možnosti, jak ji zvýšit. V rámci této práce budou testovány různé metody zvýšení odolnosti nástrojové oceli proti opotřebení, a to jednak úpravou metody tepelného zpracování objemového materiálu nástrojových ocelí, nebo prostřednictvím povrchových úprav spojených s deformací povrchu, chemicko-tepelným zpracování povrchu. Vliv těchto úprav bude hodnocen metalograficky s využitím světelné a řádkovací elektronové mikroskopie, měřením tvrdosti materiálu a tribologickými testy.

Cílem práce je zjistit, která metoda bude mít nejefektivnější vliv na zvýšení odolnosti materiálu proti opotřebení.

1 Nástrojové oceli

Při výrobě součástí požadovaného tvaru mají velký význam nástroje, jejichž vlastnosti ovlivňují jak výrobní proces, tak i kvalitu vlastního výrobku. Proto se na materiály nástrojů kladou vysoké požadavky (vysoká tvrdost, pevnost, dostatečná houževnatost, stálost vlastností za tepla, odolnost proti opotřebení atd.). Optimální kombinace vlastností určitého nástroje s ohledem na jeho namáhání je možno dosáhnout správnou volbou materiálu a tepelným zpracováním. Materiály na nástroje se dělí podle různých hledisek. Pro uživatele nástrojů je užitečné třídění podle druhu nástroje a technologického pochodu, k němuž nástroj slouží (materiály pro řezné nástroje, nástroje pro tváření, měřicí nástroje a pomocné nástroje a přípravky). Oceli pro výrobu řezných nástrojů k třískovému obrábění musí být tvrdé, a to i za vysokých teplot a musí odolávat opotřebení. Zvláště vysoké požadavky jsou kladeny na oceli rychlořezné, neboť s vysokými řeznými rychlostmi jsou spojeny vyšší pracovní teploty, což klade značné nároky na trvanlivost ostří. Od ocelí k výrobě nástrojů pro tváření (lisování, válcování, kování, stříhání atd.) se vyžaduje vysoká povrchová tvrdost a houževnatost jádra vzhledem k tomu, že nástroje jsou namáhány hlavně na tlak a třením. Oceli použité k výrobě měřicích nástrojů musí být odolné proti otěru, nesmí obsahovat nestabilní strukturní součásti a musí být bez vnitřního pnutí, aby byla zachována rozměrová stálost přesných nástrojů. Nástrojových ocelí se užívá též k výrobě pomocných zařízení jako jsou upínací přípravky, vodící lišty apod., neboť tato zařízení musí mít určitou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Pro výrobu některých nástrojů se užívá také slinutých karbidů (zejména WC a TiC s kobaltem jako pojivem), které se připravují cestou práškové metalurgie. Uplatňují se i další speciální kovové i nekovové materiály, které svými vlastnostmi ještě převyšují rychlořezné oceli. Jsou to především stelly – slitiny na bázi kobaltu a materiály keramické (slinutý Al_2O_3), které vynikají vysokou tvrdostí i při teplotách do 1200 °C. Základním požadavkem, kladeným na nástrojové materiály, je vysoká tvrdost (nad 60 HRC). Oceli proto ve většině případů obsahují větší množství uhlíku (nad 0,6 %). Výjimkou jsou cementační oceli, používané k výrobě nástrojů pro tváření (zejména pro tváření plastických hmot), které mají houževnaté jádro a tvrdý povrch po cementaci. Zvětšením obsahu uhlíku nad 0,8% tvrdost oceli po zakalení sice nevzrůstá, přesto se však často užívá i ocelí nadeutektoidních, neboť karbidy přítomné ve struktuře zvyšují odolnost proti opotřebení. Houževnatost je však nižší. Při tepelném zpracování nástrojových ocelí je možno použít všech způsobů kalení. Prokalitelnost oceli nemá v tomto případě tak velký význam jako u ocelí konstrukčních. Kalící prostředí musí být voleno tak, aby po zakalení vznikla povrchová vrstva o požadované tvrdosti. Měkčí neprokalené jádro s vyšší houževnatostí zde není nevýhodou, ale může naopak působit příznivě zvýšením odolnosti nástroje proti rázům. Tepelné zpracování nástrojových ocelí má v porovnání se zpracováním ocelí konstrukčních některé zvláštnosti. To se týká především slitinových ocelí s vysokým podílem karbidických fází, u nichž má velký význam správná volba rychlosti ochlazování. U rychlořezných ocelí je ve struktuře po kalení až

70 % zbytkového austenitu, který snižuje tvrdost. Proto je třeba u těchto materiálů věnovat zvláštní pozornost popouštění. U řezných nástrojů přesných tvarů a rozměrů nelze připustit objemové změny a pnutí spojené s rozpadem zbytkového austenitu, a proto se jeho obsah snižuje zmrazováním. Životnost nástroje je ovlivněna také jakostí povrchu, jehož úprava (nitridování, chromování, povlakování pomocí plazmatických technologií aj.) může životnost prodloužit. [1] [2]

1.1 Uhlíkové nástrojové oceli

Většina uhlíkových nástrojových ocelí má obsah uhlíku od 0,7 do 1,5 %. Mangan se přitom udržuje do 0,4 % a křemíku bývá max. 0,35 %. Uhlíkových ocelí se užívá na výrobu nástrojů, které nejsou vystaveny vlivu vyšších teplot: pro méně namáhané řezné nástroje (nože, frézy, vrtáky, závitníky), pro nástroje namáhané rázem (oceli s nižším obsahem uhlíku) a na ruční nástroje a nářadí. Oceli s nejnižším obsahem uhlíku (0,55 až 0,7 %) s relativně dobrou kovatelností a malými objemovými změnami při kalení jsou vhodné i pro výrobu nástrojů velkých rozměrů. Prokalitelnost uhlíkových nástrojových ocelí zvyšují již poměrně malá množství Mn, Si a Cr. Obsah těchto prvků musí být nízký zejména v případě drobných nástrojů, kde je potřebná vyšší houževnatost a prokalení v jádře nástroje je nežádoucí. Nástroje z uhlíkových ocelí mají většinou martenzitickou strukturu jen v povrchové vrstvě, jádro je tvořeno jemným perlitem. [1] [2]

1.2 Slitinové nástrojové oceli

U řezných nástrojů pracujících při vysokých řezných rychlostech a u nástrojů pro tváření za tepla musí být zaručena stálost vlastností za tepla. Tento požadavek uhlíkové oceli nespĺňují. Nedají se použít ani pro velmi namáhané nástroje větších rozměrů a složitých tvarů, neboť nemají dostatečnou prokalitelnost. Teplota, kterou může dlouhodobě snášet nástroj z uhlíkové oceli bez poklesu tvrdosti, je kolem 150 až 200 °C. Vhodnými přísadami lze požadované vlastnosti zajistit a pozitivně ovlivnit i další vlastnosti, jako houževnatost, odolnost proti tepelné únavě, rozměrovou stálost atd. Slitinové oceli na nástroje se dělí na oceli na nástroje pracující za studena a na nástroje pracující za tepla. Hlavními legurami ve slitinových nástrojových ocelích jsou prvky, které tvoří tvrdé karbidy, stále za vysokých teplot (Cr, Mo, W, V). Tím se zvyšuje nejen tvrdost oceli, ale také odolnost proti popouštění a stálost břitů za vysokých teplot. Celkové množství přísad bývá 3 až 5 %, v některých zápusťkových ocelích i vyšší. Vlivem přísad se u těchto ocelí snižuje eutektoidní koncentrace i maximální rozpustnost uhlíku v austenitu, a proto se ve struktuře objevuje ledeburit, i když je obsah uhlíku nižší než udává rovnovážný diagram. [1] [2]

1.3 Rychlořezné oceli

Slitinové oceli s vyšší odolností proti popouštění umožnily určité zvýšení pracovních parametrů při obrábění. Podstatné zvýšení umožnily však teprve rychlořezné oceli a slinuté karbidy. Rychlořezné oceli vynikají stabilitou vlastností za tepla, neboť až do 650 °C nedochází k poklesu tvrdosti a zhoršení řezných vlastností. Obsahují 0,7 až 1,3 % uhlíku a jsou legovány W, Cr, V, případně i Co v celkovém množství nad 20 %. Klasické složení představuje 18 % W, 4 % Cr a 1 % V při 0,8 % C. Ve struktuře mají více než 25 % vysoce stabilních karbidů. Dalšího zlepšení řezných vlastností se dosahuje přísadou Co do 10 %, případně náhradou části W molybdenem. Vlivem účinku vysokého obsahu přísadových prvků je rozpustnost uhlíku v rychlořezných ocelích jen asi do 0,7 %. Proto mají většinou ledeburitickou strukturu. [1] [2]

1.4 Značení nástrojových ocelí

Nástrojovým ocelím je vyhrazena třída 19, kde se podle chemického složení rozlišují oceli uhlíkové, slitinové a rychlořezné (slitinové, bohatě legované). Samotnou skupinu tvoří ve třídě 19 slitinové oceli na lité nástroje.

Oceli třídy 19 – třetí a čtvrtá číslice v číselné značce vyjadřuje přísadovou skupinu, respektive kombinaci přísadových prvků:

0,1,2 – nástrojové oceli uhlíkové

3- nástrojové oceli slitinové manganové (Mn, Mn-V, Mn- Cr-V, Mn-Cr-W-V, Mn-Si)

4- nástrojové oceli slitinové chromové (Cr, Cr-V, Cr-Si, Cr-Mn-V)

5- nástrojové oceli slitinové chrommolybdenové (Cr-Mo, Cr-Mo-V, Cr-Mo-Mn, Cr-Mo-Si, Cr-Mo-Si-V)

6- nástrojové oceli slitinové niklové (Ni-V, Cr-Ni, Cr- Ni-V, Cr- Ni-V-Mn, Cr-Ni-Mo/V)

7- nástrojové oceli slitinové wolframové (W, W-Cr, W-Cr-V, W-Cr-Si, W-Cr-Si-V, W-Cr-Ni-V, W-Cr-Ni-V, W-Cr-Mo-V, W-Cr-Co-V)

8- nástrojové oceli rychlořezné (úsporně legované wolframem, s vysokým obsahem wolframu, legované wolframem a molybdenem, legované kobaltem a dalšími přísadami)

9- nástrojové oceli slitinové a na lité nástroje

Dvojčíslí ze třetí a čtvrté číslice udává u nástrojových uhlíkových ocelí střední obsah uhlíku, který je stupňován po 0,05 % v rozsahu 0,05 až 1,50 %, takže většímu obsahu uhlíku odpovídají postupně vyšší dvojčíslí 00 až 29.

U ocelí nástrojových slitinových vyjadřuje čtvrtá číslice zpravidla příslušnou kombinaci přísadových prvků.

U ocelí nástrojových uhlíkových vyjadřuje pátá číslice 1,2,3 zpravidla dosud obvyklé jakosti nástrojových uhlíkových ocelí, číslice 4,5,6,7,8 a 9 vyjadřují některé výrobní zásahy do složení ocelí, které ovlivňují jejich použití pro zvláštní účely.

V číselné značce ocelí nástrojových slitinových je pátá číslice číslicí pořadovou a rozlišuje jemněji oceli určitého způsobu výroby.

Doplňková první číslice určuje stav oceli (druh tepelného zpracování)

Doplňková druhá číslice udává stupeň přetváření oceli.

Oceli na odlitky se označují šesti základními a dvěma doplňkovými číslicemi.

První dvě číslice: 42 vyjadřují třídu norem hutnictví

Druhé dvojčíslí: 26 a 27 značí uhlíkové oceli na odlitky

28 a 29 značí slitinové oceli na odlitky

Pátá číslice: u uhlíkových ocelí charakterizuje pevnost v tahu, u slitinových ocelí přísadovou skupinu

Šestá číslice: u uhlíkových ocelí vyjadřuje význačné vlastnosti, u slitinových ocelí jemněji rozlišuje oceli téže přísadové skupiny

První doplňková číslice vyjadřuje stav oceli na odlitky (druh tepelného zpracování), druhá doplňková číslice uvádí zvláštní požadované vlastnosti. [1] [2] [3]

1.5 Legující prvky obsažené v nástrojových ocelích

Karbidy vyskytující se v matici nástrojových ocelí jsou tvrdší než základní matrice. Zvyšují odolnost proti opotřebení. Obvykle mají stechiometrické složení M₃C, M₇C₃, M₂₃C₆, M₆C a M₄C₃. Jejich vliv je tím větší, čím vyšší je jejich tvrdost a stabilita. Hlavní složkou v karbidech M₇C₃ jsou Cr, Fe, Mo, W, V a v karbidech M₂₃C₆ je obvykle chrom. Tyto karbidy s rozpouštějí při austenitizaci za teploty 950 až 1000 °C, což je při vyšší teplotě než karbid M₃C. Karbidy M₆C tvoří obvykle W, Mo, Fe, Cr, W a vyskytují se v matici wolframových a wolframmolybdenových rychlořezných ocelí. Největší tvrdost má karbid vanadu, ve kterém se rozpouští i menší množství molybdenu, wolframu a chromu. Karbid M₄C₃ tvoří obvykle vanad, tento karbid se rozpouští až při vysokých teplotách. [4]

1.5.1 Uhlík

Zvyšuje kalitelnost (tvrdost) a prokalitelnost oceli. Rostoucí obsah uhlíku v oceli snižuje teploty kalení, snižuje teploty přeměny austenitu na martenzit. S některými slitinovými prvky, zejména Cr, W, Mo, V, Ti apod., tvoří karbidy, které zajišťují u ocelí odolnost proti popouštění, odolnost

proti otěru a řezné vlastnosti. Při vyšším obsahu se snižuje houževnatost, plastické vlastnosti a tepelná vodivost. [4]

1.5.2 Mangan

V přítomnosti železa tvoří s uhlíkem komplexní karbidy typu $(Fe, Mn)_3C$. Zvyšuje značně prokalitelnost, ale zároveň i obsah zbytkového austenitu. Při vyšším obsahu podporuje vznik popouštěcí křehkosti. Paralyzuje škodlivý vliv síry v oceli a tím zabraňuje křehkosti oceli za tepla. Mangan se rozpouští v tuhém roztoku i v cementitu. V cementitu nahrazuje železo a zvyšuje jeho rozpustnost při ohřevu, takže v manganových ocelích brání cementit méně růstu Obrázek 2 Rozdělení a označení ocelí na nástroje podle ČSN [1] 6 zrna než v uhlíkových nebo jiných slitinových ocelích. V množství do 3% nezvyšuje mangan výrazně množství cementitu a nepodporuje vznik karbidické nestejnorodosti. Zvyšuje stálost austenitu jak v perlitické, tak v bainitické oblasti. Při obsahu nad 1% Mn se zvyšuje množství zbytkového austenitu a tímto způsobem se snižuje napětí a deformace při kalení. [4]

1.5.3 Křemík

Mírně zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popouštění. V železe karbidy s uhlíkem netvoří. Zvyšuje žárovzdornost a mez únavy. Křemík je výhradně rozpouštěn v tuhém roztoku. Brzdí rozpad martenzitu a koagulaci cementitu při popouštění, a tím zvyšuje stálost oceli za tepla. Zvyšuje stálost podchlazeného austenitu v oblasti perlitické a bainitické přeměny. Protože zvyšuje náchylnost oceli ke grafítizaci, je třeba tento negativní vliv kompenzovat současně přísadou chromu. [4]

1.5.4 Chrom

V ocelích tvoří podvojně karbidy. Zvyšuje odolnost proti popouštění, ovšem při stejném obsahu v menší míře než wolfram a molybden. Značně zlepšuje prokalitelnost. Zvyšuje teploty kalení při snížení teploty martenzitické přeměny. Působí příznivě proti oxidaci za vyšší teploty i proti korozi. Podporuje však vznik popouštěcí křehkosti. Při větším obsahu zvyšuje ve formě karbidů řezivost a odolnost proti otěru. Při nižších koncentracích (do 3%) se rozpouští v tuhém roztoku, tak i v cementitu. V nadeutektoidních ocelích zjemňuje přítomné karbidy a zvyšuje jejich stabilitu (obtěžně se rozpouští v austenitu), proto je nutné volit vyšší teplotu kalení. V podeutektoidních ocelích je Cr téměř všechen rozpuštěn v austenitu. Oceli s obsahem 12% Cr jsou kalitelné na vzduchu. Při vysokých koncentracích se zvyšuje podíl zbytkového austenitu a tvoří se speciální karbidy chromu Cr_7C_3 a $Cr_{23}C_6$, které jsou stabilnější než cementit. [4]

1.5.5 Wolfram

Tvoří v oceli podvojně karbidy, stále i při zvýšených teplotách asi do 600°C, a tím podporuje velmi účinně odolnost proti popouštění a vzniku sekundární tvrdosti. Malé množství zvyšuje relativně víc prokalitelnost než velké množství. Větší množství podporuje tvorbu přechodových

struktur a zbytkového austenitu. Mimo to snižuje odolnost oceli proti tvorbě trhlinek při tepelné únavě. Při větším obsahu snižuje houževnatost a plastické vlastnosti oceli. Karbidy wolframu se při austenitizaci obtížně rozpouštějí, a proto se wolframové oceli kalí z vysokých teplot, obvykle nad 1000°C. Wolfram zvyšuje odolnost proti otěru a řezivost oceli při zvýšených teplotách. Wolfram vytváří již při koncentraci nad 0,5 % obtížně rozpustný speciální karbid, jehož složení se mění od $\text{Fe}_2\text{W}_4\text{C}$ do $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$. Karbid W_6C , zejména v ocelích s vysokou koncentrací W, je metastabilní fází a po dlouhodobém žhánání může transformovat na hexagonální stabilní karbid WC nebo W_2C . Přítomnost komplexního karbidu wolframu potlačuje růst zrna při obsahu 1 až 1,5% W účinněji než týž obsah Cr. Zvyšuje tvrdost zakalené oceli, neboť zachovává jemné zrno do vysokých teplot kalení a nezvyšuje množství zbytkového austenitu. Vzhledem ke značné karbidotvornosti snižuje W prokalitelnost a kalitelnost, a proto je nutné volit pro wolframové oceli radikálnější ochlazovací prostředí. Při obsahu W nad 0,8% a při současné přítomnosti Si (nad 0,5%) jsou tyto oceli náchylné k oduhlíčení při tváření za tepla. [4]

1.5.6 Molybden

Působí podobně jako wolfram, zvláště pokud jde o tvorbu karbidů a zvyšování prokalitelnosti. V malém množství zlepšuje houževnatost oceli a zvyšuje odolnost proti vývoji popouštěcí křehkosti. Snižuje teplotu martenzitické přeměny, avšak podporuje tvorbu přechodové struktury i zbytkového austenitu. Velkou nevýhodou větší přísady molybdenu je snadná tvorba okují, která se při kování nebezpečně rozstříkává. Molybden již při malém obsahu (0,2 až 0,4%) zjemňuje karbidy a potlačuje růst zrna. Molybden též zvyšuje náchylnost oceli k oduhlíčení, je-li současně přítomen Si. [4]

1.5.7 Vanad

V oceli tvoří s uhlíkem samostatný karbid V_4C_3 , který má velmi vysokou tvrdost. Zvyšuje prokalitelnost, ale hlavně odolnost proti popouštění. Při malém obsahu zvyšuje jemnozrnnost oceli, a tím příznivě ovlivňuje houževnatost. Podporuje však křehnutí oceli za tepla. S uhlíkem vytváří karbidy, které účinně zvyšují řezivost a odolnost proti otěru. Velká afinita vanadu k uhlíku způsobuje, že vanad snižuje kalitelnost a prokalitelnost tím účinněji, čím méně obsahuje ocel uhlíku. Vanad při malé koncentraci (0,1 až 0,2%) tvoří speciální karbid VC, nepatrně se rozpouštějící v austenitu při ohřevu na teploty 1000 až 1100°C. Vanad potlačuje růst austenitického zrna, zvláště v eutektoidních ocelích a zmenšuje citlivost k přehřátí a množství zbytkového austenitu. [4]

1.5.8 Titan

Má větší afinitu k uhlíku než Cr, Mo, W i V, takže jeho karbid je velmi stálý. Snadno se také slučuje s kyslíkem a dusíkem, což je výhodné se zřetelem ke škodlivým vlivům těchto prvků. U nástrojových ocelí se zatím používá výjimečně v množství kolem 0,1%. [4]

1.5.9 Kobalt

Svým chováním se liší od ostatních prvků. Se železem tvoří tuhý roztok, s uhlíkem netvoří karbidy. Snižuje značně prokalitelnost. Zvyšuje teploty kalení i přeměny martenzitu. V nástrojových ocelích zvyšuje velmi značně odolnost proti popouštění. [4]

1.5.10 Nikl

Rozpouští se v základní hmotě. S uhlíkem netvoří karbidy. Zvyšuje prokalitelnost i prokalitelnost již při malých koncentracích. Podporuje tvorbu jemného zrna, a tím příznivě ovlivňuje houževnatost oceli. Je téměř výhradně rozpouštěn v tuhém roztoku a zvětšuje množství zbytkového austenitu účinněji než mangan. [4]

2 Opotřebení

Opotřebení je výsledek vzájemného pohybu a kontaktu mezi nástrojem a tvářenou nebo obráběnou součástí. Faktory, které nám ovlivňují opotřebení jsou fyzikální a mechanické vlastnosti nástroje a obráběného materiálu, geometrie nástroje, pracovní podmínky, druh tvářecí nebo obráběcí operace (přerušovaný řez zvyšuje opotřebení) a řezné prostředí.

Opotřebení u řezných nástrojů nám vzniká vlivem velikého zatěžování a vysokých teplot při obrábění. Každý nástroj má svou trvanlivost, po této době dochází k opotřebení a otupení nástroje úbytkem materiálu na břitu nástroje.

Mezi základní mechanismy opotřebení patří například adheze, abraze, difúze, oxidace, křehký lom, plastická deformace, tepelná únava, mechanická únava, chemické opotřebení, 8 rozpouštění, termoelektrické opotřebení a delaminační opotřebení (kde nám dochází k odlupování tenkých vrstev z povrchu nástroje).

Abrazivní opotřebení nám vzniká, když se dostane tvrdá částice mezi povrch obrobku a nástroje. U adhezivního opotřebení nám dochází k vytváření nárůstku mezi třískou a břitem a dochází k navařování a vytvrzování vrstev z třísky. Následně dochází k poškození břitu vylomením či vydrolením. Při difúzním opotřebení hraje klíčovou roli chemický vliv na samotný proces obrábění, tedy jaké chemické vlastnosti a afinitu má materiál nástroje vůči materiálu obrobku. U oxidačního opotřebení mají zase veliký vliv vysoké teploty a přítomnost okolního vzduchu. K plastické deformaci nám dochází za vysokých teplot a vysokého mechanického zatížení, kdy nám břit nástroje nevratně změní tvar. Ke křehkému lomu nám dochází vlivem kolísání teplot (teplotní šoky). [6] [7] [8]

2.1 Typy opotřebení

Při obrábění má klíčovou roli na opotřebení velikost řezné rychlosti, intenzita chlazení místa řezu a velikost posuvu. Na břit nástroje nepříznivě působí mechanické a tepelné vlivy, které

vznikají při obrábění. Nástroj se opotřebovává a tvar pracovních ploch břitů se mění. Vzniklé opotřebení může být náhlé (plastická deformace), nebo postupné opotřebení (nepravidelně opotřebovaná plocha v místě styku ostří nástroje s obrobkem). [5] [7]

2.1.1 Opotřebení hřbetu

Vzniká nám při styku hřbetu nástroje s obrobkem. Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní fasetce jsou zvláště vystaveny působení materiálu obrobku. Příliš velké opotřebení má za následek zhoršení povrchu, nepřesnost rozměrů a zvýšené tření, které vzniká změnou geometrie břitů. Toto opotřebení můžeme snížit zvolením otěruvzdornějšího materiálu, snížení řezné rychlosti, zvýšení posuvu nebo zvýšení intenzity chlazení. [5] [7]

2.1.2 Opotřebení čela ve formě žlábků

K tomuto opotřebení nám dochází kvůli teplu, které vznikne při opotřebení. Je způsobeno působením mechanismů difuzního opotřebení a abraze. Žlábků vzniká částečně úběrem řezného nástrojového materiálu, působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale hlavně difúzí v místě břitů s nejvyšší teplotou, tedy v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitů. Velké opotřebení tohoto typu způsobuje změnu geometrie břitů, ovlivnění třísky, zeslabení břitů a jeho následnou destrukci. Opotřebení můžeme zabránit otěruvzdornějším materiálem, povlakem CVD, snížení řezné rychlosti, zvýšení intenzity chlazení, pozitivní typ geometrie. [5] [7]

2.1.3 Plastická deformace břitů

K plastické deformaci dochází přetížením břitů nástroje vlivem vysokých posuvů a řezných rychlostí. Vzniká především působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit. Proto je důležité dbát na správný řezný materiál, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje. Rozhodujícím faktorem je zde tvrdost za tepla. Toto opotřebení lze zmírnit použitím řezného materiálu s vyšší otěruvzdorností a správným zaoblením ostří. Plastické deformaci se můžeme vyvarovat snížením řezné rychlosti a posuvu nebo zvětšením úhlu špičky nástroje, zaoblení špičky. [5] [7]

2.1.4 Vrub na hřbetě břitů

Vrub nám vznikne vlivem zpevnění povrchových vrstev obrobku a vlivem otřepů. Opotřebení ve tvaru vrubu je způsobeno především abrazivním účinkem tvrdé povrchové vrstvy. Může však souviset i s jevem oxidačního opotřebení, kdy vzniká v místě, kde dochází ke kontaktu břitů s bokem třísky přesněji v místě průniku vzduchu do oblasti obrábění. K předejití vrubu na hřbetě břitů musí VBD obsahovat povlak Al_2O_3 . [5] [7]

2.1.5 Hřebenové trhliny na břitě

Nejčastěji dochází při frézování, kdy je nástroj vystaven tepelnými šoky. Vyznačuje se trhlínkami, které jsou kolmé na ostří. Tomuto opotřebení můžeme předejít snížením tloušťky

třísky. Použití chladicích kapalin se v tomto případě nedoporučuje z důvodu zvýšení rozdílu teplot při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj. [5] [7]

2.1.6 Únavový lom

Dochází při přerušovaném řezu, kdy nástroj je vystaven velkými změnami řezných sil. Tento druh opotřebení vzniká součtem měnících se různých zatížení, kdy vřezávání nástroje do materiálu obrobku a změna velikosti a směru působení sil řezání mohou být pro břitovou destičku příliš náročné a dojde k její destrukci. Lomové plochy vznikají paralelně s ostřím. [5] [7]

2.1.7 Vydrolování břitu

K vydrolování břitu nám dochází také při přerušovaném řezu, kdy je nástroj velice přetěžován. Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení, při kterých se drobné částice začnou oddělovat z povrchu břitu. Břit se tedy namísto stejnosměrného opotřebení vydroluje. Mezi faktory, které způsobují tento druh opotřebení, patří nejčastěji obrábění přerušovaným řezem, nevhodná volba řezného materiálu nebo nevhodná volba ostří. [5] [7]

2.1.8 Lom břitu

Na lom břitu má zejména vliv tuhost soustavy (stroj-nástroj-obrobek). Představuje konec funkčnosti řezného elementu. Za každých okolností by se lomu břitu mělo zabránit. Totální lom je často velmi nebezpečný a je nutné ho v každém případě považovat za konec trvanlivosti. [5] [7]

3 Metody zvyšování odolnosti nástrojových ocelí vůči opotřebení

Jako nejstarší způsob zvyšování odolnosti u nástrojů se využívalo tepelné zpracování materiálu tedy kalení, kdy na povrchu materiálu vznikla tvrdá martenzitická vrstva a jádro zůstalo houževnaté. Po operaci kalení může být materiál ještě popuštěn, dohromady tedy dojde ke zušlechtní. Ke zvýšení odolnosti se také využívá chemicko-tepelného zpracování, do kterého spadá nitridování a cementování. Po chemicko-tepelném zpracování nám dojde k obohacení povrchu uhlíkem nebo dusíkem, a to může mít za následek zlepšení povrchových vlastností materiálu. Povrch materiálu může být vytvrzen i mechanicky, jedná se o kuličkování, brokování, válečkování. Další variantou jak zvýšit odolnost u nástrojových ocelí bylo využito tenké vrstvy, která byla nanášena na základní materiál, jedná se o povlaky PVD, CVD, DLC. Všechny moderní technologie povlakování – chemické i fyzikální – vytvářejí velmi odolné vrstvy přímo na povrchu součástí bez potřeby dalšího spojování. Velmi tvrdé (až supertvrde – více než 70 GPa), ale i měkké povlaky tak dokážou zachovat již hotovou geometrii nástrojů a přitom zvýšit podmínky zatížení nebo prodloužit jejich dobu užití. Výrobní náklady na tyto

vrstvy tvoří obvykle zlomek ceny nástroje, ale dosahované kvalitativní parametry jsou bez povlaků prakticky nedosažitelné. Tím získávají povlakované nástroje na přidané hodnotě a zvyšují efektivitu výroby. [14]

3.1 Tepelné zpracování

3.1.1 Neutrální kalení

Neutrální kalení, které se rovněž označuje jako martenzitické kalení nebo jen zakalení, je tepelné zpracování používané k dosažení vysoké tvrdosti/pevnosti oceli. Skládá se z austenitizace, rychlého ochlazení a popuštění, za účelem získání popuštěného martenzitu či bainitické struktury. [17]

Zde popsané procesy kalení jsou obvykle neutrální, což znamená, že chemické složení povrchu oceli dílů by se během těchto procesů nemělo změnit.

První krok spočívá v zahřátí na kalící teplotu, která se v závislosti na typu oceli pohybuje mezi 800 °C a 1220 °C. Při teplotě mezi 730 °C a 900 °C (podle typu oceli) probíhá transformace mikrostruktury na austenit. [17]

Druhým krokem je výdrž kalící austenitizační teplotě tak, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí při této teplotě k přeměně mikrostruktury na austenit. Poznámka: Tím dochází ke snížení měrného objemu. [17]

Třetím krokem je rychlé ochlazení z teploty austenitizace do studeného prostředí. V závislosti na typu oceli a rozměrech dílu je obvykle kalícím médiem voda, roztavená sůl, olej či dusík pod vysokým tlakem. Rychlost kalení musí být dostatečně vysoká, aby se zabránilo zpětné přeměně materiálu do původního měkkého stavu. [17]

Martenzit vzniká rychlým ochlazením austenitu pod teplotu M_s (u uhlíkových ocelí v rozmezí 200°C až 300°C) v důsledku čehož je difúze substitučních a intersticiálních prvků eliminována a austenit je transformován bezdifúzně, nicméně přeměna není dokonalá a ve struktuře oceli vždy zůstává určité procento zbytkového austenitu. Martenzit má tetragonální prostorovou mřížku. Základní buňkou je pravoúhlý hranol s parametrem výšky c a základny a , v němž jsou atomy železa středěny prostorově (BCT), kdežto atomy uhlíku intersticiálně. Poměr parametrů c/a je závislý na obsahu uhlíku oceli, čím větší poměr, tím větší obsah uhlíku, se označuje jako tetragonalita. [12]

3.1.1.1 Teplota kalení

K ohřevu na kalící teplotu by mělo docházet rovnoměrně a pozvolně. Prudký ohřev by mohl způsobit deformaci tvaru či vznik trhlin. Zejména ocele s horší tepelnou vodivostí jsou náchylná k výše zmíněným problémům a z tohoto důvodu je kalící teploty dosaženo stupňovitým ohříváním. Výška kalící teploty je specifická pro každou ocel a závisí na jejím chemickém

složení. Podeutektoidní oceli se kalí z teplot $30^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ nad teplotou způsobující přechod austenitu na ferit označenou bodem Ac3 v diagramu (Fe-Fe₃C). Nadeutektoidní oceli mají kalící teplotu $30^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ nad teplotou, při které dochází k přeměně austenitu na sekundární cementit znázorněnou bodem Ac1,2. Doba potřebná pro ohřátí materiálu na kalící teplotu se odvíjí od průřezu materiálu, prostředí, ve kterém je nástroj ohříván, a od výšky předeřívací a kalící teploty. Správná doba ohřevu se určí s pomocí diagramů nebo tabulek definujících doby ohřevu v závislosti na průřezu ohřívávaného materiálu. Udržování kalící teploty by mělo trvat pouze po dobu potřebnou pro stejnoměrné prohřátí celého objemu kaleného materiálu. Při příliš dlouhém ohřívání by mohlo dojít k nežádoucí strukturní změně jako je zhrubnutí austenitického zrna. [10] [1]

3.1.1.2 Prostředí pro kalení

Kalící prostředí volíme podle chemického složení kalené oceli a její polohy v ARA diagramu. K snížení vnitřního pnutí vznikajícího při kalení se používá kalící prostředí s menší ochlazovací intenzitou. Nejběžněji používaným kalícím médiem je voda a kalící olej. Voda je výhodná díky tomu, že je levná, nehořlavá a má vysokou ochlazovací účinnost, kterou lze ještě zvýšit přidáním solí (NaCl, NaNO₃ nebo KNO₃) či hydroxidů (NaOH) nebo kyselin (H₂SO₄). Ochlazovací účinnost je závislá na tepelné vodivosti, viskozitě kalícího prostředí a na měrném a výparném teple. Pokud dochází při kalení k odparu kalícího média (např. vody, oleje), pak je nutno tvořící se „parní polštář“ rozrušit pohybem ať už kaleného předmětu nebo chladícího média. Ochlazovací účinnost je také ovlivněna velikostí měrného povrchu předmětu a jeho čistotou. Ochlazovací účinnost vody lze regulovat přidáním rozpustných polymerů (např. polyalkylenglykol a polyakryláty). Tyto přísady zpomalují ochlazovací účinek vody a tím eliminují možnost vzniku různých strukturních defektů, jako jsou například trhliny či deformace kaleného materiálu. Oleje mají oproti vodě tři až čtyřikrát menší ochlazovací rychlost v perlitické oblasti a v martenzitické oblasti je až desetkrát nižší. Olejem se kalí především legované oceli z důvodu eliminace vzniku vnitřního pnutí. Nejčastěji se používají minerální oleje s různými aditivami. Jako další kalící médium se používá vzduch za běžného tlaku nebo plyny za vyšších tlaků (např. dusík, helium či argon). Chlazení vzduchem je postupné a používá se ke kalení vysokolegovaných ocelí. [1] [11]

3.1.1.3 Metody kalení

Jsou známé dva druhy martenzitického kalení. Rozdělují se podle průběhu ochlazování na nepřetržitě (přímé) a přetržité, které se dále dělí na kalení lomené, kalení termální a kalení se zmrazováním (známé též jako kryogenní kalení). [1]

3.1.2 Popouštění

Popouštění je proces tepelného zpracování při nízké teplotě (pod A1) běžně prováděný po neutrálním kalení, dvojitém kalení, cementaci v atmosféře, nitrocementaci či indukčním kalení za účelem dosažení požadovaného poměru tvrdost/houževnatost.

Teplota popouštění se může lišit v závislosti na požadavcích a složení oceli od 160 °C do 500 °C či více. Popouštění se normálně provádí v popouštěcích pecích, které lze volitelně vybavit ochrannou atmosférou. Ochranná atmosféra zabraňuje oxidaci povrchu během procesu a používá se zejména při vyšších teplotách popouštění. U některých typů ocelí je doba popouštění velmi důležitá, delší doba popouštění odpovídá vyšší teplotě popouštění. V závislosti na chemickém složení oceli se při určitých teplotních intervalech může objevit fenomén označovaný jako popouštěcí křehkost. Popouštění v rámci této teploty by se normálně nemělo provádět. Tyto oblasti jsou obvykle uváděny v materiálovém listu příslušné oceli výrobcem oceli nebo ve specifikaci spolu s nevhodnější teplotou popouštění pro konkrétní požadavky tvrdosti. [17]

3.1.3 Precipitační vytvrzení

Precipitační zpevnění materiálů procesy tepelného zpracování jsou založeny vylučování fází ve shlucích precipitátů, které tím významně zvýší pevnost zpracovávaného dílu.

Precipitačního tvrzení stárnutím se obvykle provádí při teplotách od 482 do 621 °C ve vakuu, v inertní atmosféře nebo na vzduchu po dobu 1 až 4 hodin (i více) v závislosti na přesné specifikaci a materiálu. [17]

Rozpouštění žháním se obvykle provádí při teplotách od 926 °C do 1066 °C ve vakuu nebo v inertní atmosféře, které musí být zakončeno rychlým ochlazením plynem s podporou ventilátoru případně ochlazením do oleje na normální teplotu místnosti. [17]

3.1.4 Normalizační žhání

Normalizační žhání má za cíl dodat oceli homogenní a jemnozrnnou strukturu. Tento proces se používá k dosažení požadované mikrostruktury a zajištění mechanických vlastností oceli.

Normalizačním žháním je materiál ohřát na teplotu přibližně odpovídající teplotě kalení (800 °C až 920 °C). Při této teplotě vzniknou nová austenitická zrna. Austenitická zrna jsou mnohem menší než předchozí zrna z feritu. Po ohřevu a krátké výdrži při dané teplotě (1 h) jsou díly volně ochlazeny na vzduchu (v plynu). Během chlazení se vznikají nová feritová zrna o menší velikosti. V některých případech je prováděno vše, jak ohřev, tak chlazení, v ochranné atmosféře, tím se zabrání oxidaci či oduhličení. [17]

3.2 Chemicko-tepelné zpracování

Jako chemicko-tepelné zpracování se označují způsoby difusního sycení povrchu ocelí různými prvky (kovy i nekovy). S cílem dosáhnout rozdílných mechanických nebo chemických vlastností povrchu a jádra součásti. Na rozdíl od povrchového kalení, při němž se rozdíl povrchu a jádra získají změnou struktury povrchové vrstvy teplotního průřezu součásti, je základem chemicko-tepelného zpracování změna chemického složení povrchové vrstvy.

Požadovaných vlastností se buď dosahuje přímo tzn. jen obohacením povrchové vrstvy přísadovým prvkem za zvýšených teplot a pomalým ochlazováním (nitridováním), nebo následujícím tepelným zpracováním, který bývá obvykle kalení a popouštění při nízkých teplotách.

Cílem chemicko-tepelného zpracování bývá často zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebením a zachováním houževnatého jádra.

Podle druhu sycení se následně provádí nebo neprovádí následné tepelné zpracování (kalení a popouštění). [18]

3.2.1 Sycení povrchu nekovy

3.2.1.1 Cementace

Povrch oceli je sycen uhlíkem (C) a proces se provádí za účelem zvýšení tvrdosti povrchu součásti při zachování houževnatého jádra. Pro oceli s obsahem uhlíku do 0,25%. [18]

3.2.1.2 Nitridace

Povrch oceli je sycen dusíkem (N) a provádí se ke zvýšení R_m na povrchu součásti. [18]

3.2.1.3 Karbonitridace

Karbonitridací se rozumí obohacení povrchové vrstvy železných materiálů dusíkem (N) a v malých množstvích uhlíkem (C). Toto chemicko-tepelné zpracování slouží ke zlepšení odolnosti proti opotřebením a trvalé pevnosti. V případě použití silné oxidační ochlazovací lázně dostanou navíc součástky efektní černý vzhled a odolnost proti korozi. [18]

3.2.1.4 Nitrocementace

Povrch oceli je sycen dusíkem (N) a uhlíkem (C) a proces se provádí za účelem zvýšení tvrdosti povrchu součásti při zachování houževnatého jádra. Pro oceli s obsahem uhlíku 0,3-0,4 %. [18]

3.2.1.5 Sulfonitridace

Je to difúzní sycení povrchů kovových materiálů sírou (S), dusíkem (N) a uhlíkem (C) v plynném prostředí. Součástky takto chemicko-tepelně upravené mají velmi tvrdou povrchovou vrstvu s vynikajícími kluznými vlastnostmi. [18]

3.2.1.6 Sulfinizace

Je to stejně jako sulfonitridace difuzní sycení kovových povrchů sírou ovšem v solných lázních. [18]

3.2.1.7 Boridování

Povrch součásti je sycen borem (B). Tímto postupem se rozumí nadifundování boru do povrchu kovového obrobku. U železných materiálů se podle způsobu účinku boridovacího prostředku vytvářejí jednofázové nebo dvoufázové vrstvy. Význačnou vlastností této železoboridové vrstvy je vysoká tvrdost. [18]

3.2.2 Sycení povrchu kovy

3.2.2.1 Chromování

Povrch součásti je sycen (Cr) za účelem zvýšení tvrdosti a estetičnosti. [18]

3.2.2.2 Zinkování

Povrch součásti je sycen zinkem (Zn) za účelem zvýšení korozivzdornosti a estetičnosti. [18]

3.2.2.3 Niklování

Při tomto procesu je povrch součásti sycen niklem (Ni) elektrochemicky po předcházejícím nasycení povrchu mědí. Nikluje se za účelem zvýšení korozivzdornosti. [18]

3.2.2.4 Alitování

Tento proces je nasycování povrchů kovů hliníkem (Al). Hliník difunduje do povrchu ocelové součásti za vysokých teplot a materiál je tak odolnější proti korozi. Podstatou je difúze hliníku do povrchu základního ocelového materiálu při teplotě zpravidla 800-1100 °C v prášku feroaluminia s přidávkem chloridu amonného. [18]

3.2.2.5 Alümetování

Alümetování je úprava povrchu ocelových součástí hliníkem. Provádí se metalizací hliníku o tloušťce až 0,5 mm na hrubě otryskaný povrch, nátěrem vodního skla na vrstvu hliníku a ohřevem v peci na 650 °C po dobu 2 hodin a pak při 900-1000 °C několik hodin. Hliník difunduje do povrchu a kromě toho vytvoří na povrch tenký film Al_2O_3 , který zabraňuje pronikání kyslíku do předmětu a jeho okujení. Součásti takto upravené lze používat do teplot 800-1000 °C. [18]

3.2.2.6 Inchromování

Je nasycování povrchu oceli chromem. Výrobky se žíhají v práškovém ferochromu při teplotě asi 1000 °C. Chrom vniká do povrchu ocelových výrobků asi do hloubky 0,1 mm.

Inchromované výrobky jsou odolné proti účinkům slané vody. [18]

3.2.2.7 Šerardování

Jde o nasycování povrchu drobných ocelových součástek zinkem při teplotě 380 až 450 °C.

Zinek vniká do součástí (šrouby, matice, podložky....) a vytváří na jejich povrchu vrstvu, která je chrání před škodlivými atmosférickými vlivy. [18]

3.3 Kuličkování, válečkování, brokování

Tváření povrchové vrstvy otryskáváním kulovitými částicemi tryskacího prostředku je známé pod názvem kuličkování, brokování nebo balotínování. Povrch součásti je bombardován kuličkami, které – urychlené pneumaticky nebo mechanicky – dopadají velkou rychlostí na povrch součásti. Během velmi krátkého času nárazu působí lokálně velmi vysoká síla, která způsobuje plastické přetvoření povrchu a mechanické zpevnění.

Kuličkování je pracovní proces za studena používaný k výrobě vrstvy zbytkového tlakového napětí a k úpravě mechanických vlastností kovů. To má za následek dopad na povrch s pískem (kruhovými, kovovými, skleněnými nebo keramickými částicemi) s dostatečnou silou pro vytvoření plastické deformace. Kuličkování povrchu jej plasticky rozšíří a tím způsobí změny v mechanických vlastnostech tohoto povrchu

Hlavním přínosem kuličkování je zpoždění nebo zabránění vzniku trhlin ve vysoce pevných zdůrazněných slitinových komponentech.

Tato nežádoucí výrobní a provozní tahová napětí lze přeměnit na zbytková tlaková namáhání, a prodloužit tak životnost součásti.

Proces funguje tak, že je zbytkové tlakové napětí zavedeno na povrch součásti. Tlakové napětí pomáhá předcházet trhlinám, jelikož se trhliny nemohou šířit v tlakovém prostředí generovaném kuličkováním. [19]

3.4 PVD a CVD povlaky

3.4.1 PVD povlaky

Technologie vytváření vrstev PVD (Physical Vapour Deposition) je založena na odpaření nebo odprášení pevné látky v řízené atmosféře. Podmínky vzniku a vlastností vytvořených vrstev jsou velmi rozmanité, proto budeme věnovat pozornost pouze oblastem jejich nejčastějšího využití. Povlaky vznikají při tlaku mezi 0,1 - 1 Pa ve vakuové komoře, do níž je vpouštěn pracovní plyn, např. argon nebo dusík. Podle způsobu získání kovových iontů rozlišujeme metodu odpaření nízkonapěťovým obloukovým výbojem (obloukové odpařování) nebo metodu odprášení ionty (magnetronové naprašování). [13]

3.4.1.1 Vznik povlakové vrstvy

Ve fázi přípravy je třeba nejprve provést dokonalé očištění a odmaštění povrchu nástroje. K odmašťování používáme mírně alkalické vodné roztoky tenzidů, ultrazvukové lázně a vodné oplachy. Sušíme proudem teplého vzduchu nebo nahříváme v sušičkách, v závislosti na možnostech výroby. Druhá část přípravy povrchu probíhá již ve vakuové komoře, kde se nejprve odčerpávají povrchově vázané plyny a následně se proudem iontů plynu nebo kovu odstraní několik nanometrů povrchové vrstvy. Zároveň se nástroje ohřívají. Přípravná fáze končí dosažením maximální možné kovové čistoty povrchu nástrojů a jejich zahřátím na požadovanou teplotu. Teplota vhodná pro povlakování se může měnit v závislosti na vlastnostech povlakovaných předmětů a druhu povlaku od 30 do 500 °C.

Tvorba vrstvy samotné je dána možnostmi povlakovacího zařízení a zkušeností obsluhy. Kotvení vrstvy může probíhat částečnou modifikací povrchu implantací částic nebo tvorbou mezivrstvy zvyšující adhezi vrstvy k nástroji. Právě tato adheze je základním parametrem celého procesu PVD povlakování a z tohoto hlediska je vhodnější princip obloukového odpařování. Využívá skutečnosti, že obloukový výboj za nízkého tlaku hoří na katodě pouze v náhodně proměnlivém bodě, vysokou teplotou odpařuje materiál katody, přičemž převážná část je ionizována. Pohyb katodové skvrny lze do jisté míry řídit magnetickým polem. Princip magnetronového odprašování je složitější v tom, že je nejprve potřeba ionizovat pomocný inertní plyn, např. argon, a pomocí urychlení těchto iontů bombardovat katodový terč a tak 13 odpráší požadované částice. [13]

V případě obloukového odpařování jsou odpařené částice, převážně kladné ionty, urychlovány záporným předpětím na planetový stolek s vhodně rozmístěnými nástroji. V této fázi mají ionty kvazikapalný charakter a po povrchu nástrojů se pohybují, spojují a postupně vytvářejí vrstvu po celém povrchu. Pohyb částic po povrchu nástrojů je žádoucí z hlediska rovnoměrnosti vrstvy. Je ovlivňován teplotou povrchu a energií částic. Po zakotvení probíhá růst vrstvy dle požadavků na výsledné vlastnosti - jedno- nebo vícevrstevné povlaky s jednoduchou či gradientní strukturou, různé tloušťky apod. Závěr povlakovacího procesu spočívá ve zchlazení povlakovaných nástrojů pod teplotu oxidace oceli, tedy pod 200 °C a vyjmutí z komory. Nyní opustíme náš příklad a budeme se věnovat obecným vlastnostem vytvořených vrstev. [13]

3.4.1.2 Běžně užívané povlaky

TiN (nitrid titanu) - základní a nejdéle používaná vrstva. Mikrotvrdotost od 20 do 25 GPa, barva zlatá. Je použitelný téměř ve všech aplikacích. Pokud uživatel není schopen přesněji popsat, proti jakým procesům hodlá tenké PVD vrstvy nasadit, i z ekonomických důvodů to bývá právě tento povlak, z něhož se vychází. Po pozorování způsobu opotřebení je možné pokročit k volbě vhodnějšího povlaku. Výhodou TiN je dobrá elasticita a adheze. Navíc většina povlakovacích středisek má právě s touto vrstvou největší zkušenosti. TiAlN (titan aluminium nitrid) -

mikrotvrdot 25 až 33 GPa, barva od růžovofialové po černošedou. V oblasti řezných nástrojů stále zvyšuje podíl na trhu na úkor ostatních vrstev, především TiN, i přes vyšší výrobní náklady. Má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám. V současné době ideální pro vysokorychlostní obrábění. Jeho zajímavou vlastností je vytváření povrchové vrstvy Al₂O₃, jež při řezu přispívá ke snížení tření, zvýšení difúzní odolnosti a zlepšení řezných vlastností. DLC - diamantu podobné uhlíkové povlaky s velmi nízkým koeficientem tření a vysokou tvrdostí (do 60 GPa), barva černá. Používají se především v automobilovém průmyslu na povlakování dílů (čerpadla, zámky apod.) Nevhodné jsou na nástroje obrábějící ocel. [13]

3.4.2 CVD povlaky

První technologie povlakování na počátku 50. let byly chemické (Chemical Vapour Deposition – CVD) a k jejich aplikacím bylo potřeba vysokých teplot (nad 1 000 °C), nutných k disociaci plynů pro tvorbu tvrdých povlaků. Prudký rozvoj zaznamenaly zejména povlaky TiN a TiC, které vzhledem ke stejné mřížce umožňovaly jejich různé mísení Ti(C,N), tvorbu supermřížek a výborné řezné vlastnosti (např. odolnost proti tvorbě žlábků na čele břitů). Jejich aplikace poskytovaly dobrou adhezi, odolnost proti difuzi, rovnoměrné pokrytí všech ploch bez směrového účinku, a dokonce přispěly k zaoblení ostří, což se osvědčovalo zejména u hrubovacích řezných nástrojů pro obrábění litých materiálů s kůrou. Základními aplikacemi byly slinuté karbidy s vrstvami ZrN, Al(O,N) a Al₂O₃, schopné vydržet toto zatížení. [14]

4 Experimentální program

4.1 Charakterizace vstupního materiálu a použitého zařízení a metod

Pro experimentální část byly vybrány dva následující materiály MS1 a HO.

4.1.1 MS1

Jedná se o tištěnou nástrojovou ocel, která je známá také mimo svého označení MS1 také jako 18Ni300 nebo 1.2709. MS1 je bezuhlíková precipitačně vytvrditelná ocel, s vyšším obsahem legujících prvků (Ti, Mo, Co, Ni).

	C	Si	Mn	P	S	Cr
MS1	≤0,03	≤0,1	≤0,1	≤0,01	≤0,01	≤0,5
	Mo	Ni	Co	Ti	Cu	Al
MS1	4,5÷5,2	17÷19	8,5÷9,5	0,6÷0,8	≤0,5	0,05÷0,15

Porovnávací hodnoty opotřebení a tvrdosti výchozího stavu:

Míra opotřebení $W = 1,75049 \cdot 10^{-7}$ (mm³/(N*mm)); Tvrdost HV_{0,1} = 380 HV

U MS1 budeme porovnávat různé metody:

4.1.1.1 Tepelné zpracování

- Precipitace 490°C/6 hodin.
- 940°C/2 hodiny, 490°C/6 hodin.
- 820°C/1 hodiny, 490°C/6 hodin.

4.1.1.2 Nitridování

- Nitridováno v plazmě při teplotě 490°C po dobu 20 hodin.
- Nitridovány byly vzorky po následujících tepelných zpracování:
 1. Výchozí stav
 2. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
 3. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin
 4. 490°C/ 6 hodin

4.1.1.3 Kuličkování, válečkování, brokování

- Vzorky budou kuličkovány po následujícím tepelným zpracování:
 5. Výchozí stav
 6. 490°C/ 6 hodin
 7. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
 8. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin

4.1.2 HO

Experimentální martenzitická ocel, která obsahuje 0,43% C a 1,33% Cr.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Nb	Mo
Ho-42SiCr	0,43	0,59	2,03	0,009	0,004	1,33	0,07		0,008	0,03	0,03

Porovnávací hodnoty opotřebení a tvrdosti výchozího stavu:

Míra opotřebení $W = 1,79471 \cdot 10^{-7}$ ($\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$); Tvrdost HV0,1= 320 HV

4.1.2.1 Kalení a popouštění

- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny

4.1.2.2 Nitridování

- Nitridováno v plazmě při teplotě 490°C po dobu 20 hodin.
- Nitridovány byly vzorky po následujících tepelných zpracování:
 1. Výchozí stav
 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 500°C/ 30 min
 4. Kaleno 1000°C/30 min

4.1.2.3 Kuličkování, válečkování, brokování

- Vzorky budou kuličkovány po následujícím tepelným zpracování:
 1. Výchozí stav
 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 350°C/ 2 hodin

4.2 Aplikace úprav pro zvýšení opotřebení

4.2.1 Tepelné zpracování

4.2.1.1 Neutrální kalení

Pro zakalení byla použita Komorová elektrická pec. Vzorky byly zahřáty na teploty mezi 950-1050 °C, následovala výdrž 30 minut na této teplotě a následně byly vzorky prudce zchlazeny do vody. Při chlazení bylo použito víření.

4.2.1.2 Popouštění

Pro popouštění byla použita Komorová elektrická pec. Vzorky byly zahřáty na teploty mezi 250-350 °C, následovala výdrž 2 hodiny na této teplotě a následně byly vzorky vyndány z pece a chlazení probíhalo na vzduchu.

4.2.1.3 Precipitační vytvrzení

Precipitační zpevnění materiálů procesy tepelného zpracování jsou založeny vylučování fází ve shlucích precipitátu, které tím významně zvýší pevnost zpracovávaného dílu.

Precipitačního tvrzení stárnutím se obvykle provádí při teplotách od 482 do 621 °C ve vakuu, v inertní atmosféře nebo na vzduchu po dobu 1 až 4 hodin (i více) v závislosti na přesné specifikaci a materiálu.

Rozpouštění žiháním se obvykle provádí při teplotách od 926 °C do 1066 °C ve vakuu nebo v inertní atmosféře, které musí být zakončeno rychlým ochlazením plynem s podporou ventilátoru případně ochlazením do oleje na normální teplotu místnosti. [17]

Materiál MS1 byl precipitačně vytvrzen při teplotě 490 °C po dobu 6 hodin.

4.2.2 Nitridování – Plazmová nitridace

Chemickotepelné zpracování s využitím plazmatu se používá ke zvýšení odolnosti vůči opotřebení, zvýšení tvrdosti povrchu a odolnost proti únavě s využitím tlakových pnutí v tvrdé vrstvě. [16]

Vzorky byly nitridovány ve firmě ZPS-FN Zlín, která disponuje nejmodernějším vybavením. Pro nitridaci byl použit přístroj Ruebig PN 70/120 DUO. Pracovní prostor průměr 700 mm. Hloubka pece 1200 mm. Pracovní teplota 460 až 520 °C. Pracovní plyny dusík, vodík, metan, argon. [16]

Nitridace patří mezi procesy chemicko-tepelného zpracování, jedná se o sycení povrchu oceli dusíkem při teplotě 480 až 520 °C, tvrdost nitridační vrstvy je závislá na obsahu legujících prvků v oceli tvořící tvrdé nitridy (Cr,Al,Mo,V,W). Nitridační vrstva se skládá ze dvou částí, na povrchu je vrstva o síle několika mikrometrů tzv. bílá vrstva tvořená intermetalickou sloučeninou železa a dusíku, pod touto vrstvou je difúzní vrstva, která sahá do hloubky několika desetin mm v závislosti na době nitridace. [16]

4.2.2.1 Výhody

Nevýhody nitridace v plynu lze překonat výhodami plazmové nitridace. Obzvláště při zpracování vysocelegovaných ocelí zajišťuje plazmová nitridace vysokou tvrdost povrchu, která přispívá k vysoké odolnosti vůči opotřebení, odírání, oděru a zadírání. Mez únavy je zvýšena vznikem tlakových pnutí působících na povrch. Plazmová nitridace je správnou volbou, kdykoli potřebujete nitridované díly, které mají být nitridované a zároveň na některých místech měkké. Možnost vytvoření sloučeninové vrstvy bez difúzní vrstvy se často využívá u plazmové nitridace před povlakováním PVD či CVD. Lze tak vytvářet kombinace vrstev a profilů tvrdosti podle konkrétních požadavků. [17]

4.2.2.2 Aplikace a materiály

Typicky se tento proces využívá pro převodová kola, klikové hřídele, vačkové hřídele, zdvihátka ventilů, díly ventilů, protlačovací trny, formy a nástroje pro tlakové lití, kovací zápustky, nástroje pro tváření za studena, vstřikovače a nástroje pro formování plastů, dlouhé hřídele, osy, součásti spojky a motoru. Plazmová nitridace a plazmová karbonitridace jsou často preferovány před odpovídajícími postupy zpracování plynem, pokud je během procesu vyžadováno chránění (maskování) proti nitridaci.

Plazmová nitridace je vhodná pro všechny materiály na bázi železa, a to i pro spékané součásti s vysokou porézitou, litiny a vysokolegované nástrojové oceli i s obsahem chromu nad 12 %.

Nerezové oceli a slitiny na bázi niklu lze rovněž zpracovat plazmovou nitridací a při využití nízkých teplot z velké části zachovat jejich odolnost vůči korozi. Zvláštní použití plazmové nitridace nacházíme u slitin titanu a hliníku. Při vysokém zatížení dílů velkých strojů, například hřídelí či vřeten, poskytuje použití speciálních nitridových legovaných ocelí s chromem a hliníkem velkou výhodu, jelikož plazmová nitridace vytváří povrch s tvrdostí vyšší než 1000 HV. [16] [17]

4.2.2.3 Technologie

Plazmová nitridace/karbonitridace je moderní metoda chemickotepelného zpracování, která se provádí ve směsi dusíku, vodíku a volitelném plynu uvolňujícího uhlík. Při tomto nízkotlakém procesu působí mezi vsázkou a stěnou pece elektrické napětí. Okolo dílů vsázky se vytvoří doutnavý výboj s vysokou úrovní ionizace (plazma). Na povrchu, který je přímo bombardován ionty, se tvoří částice plasmatu, které umožňují uvolnění atomárního dusíku nutného pro difuzi do povrchu vsázky. Díky tomuto procesu lze jednoduše provést odstínění zakrytím daných oblastí kovovou clonou. Plazmová nitridace umožňuje úpravu povrchu podle požadovaných vlastností. Úpravou plynné směsi lze dosahovat konkrétně zhotovených vrstev a profilů tvrdosti: od povrchu zcela prostého sloučeninové vrstvy s nízkým obsahem dusíku až po sloučeninovou vrstvu do tloušťky 20 mikronů s vysokým obsahem dusíku a či přidáním plynu uvolňujícího uhlík (plazmová karbonitridace). Široký rozsah použitelných teplot umožňuje celou řadu využití, která překračují možnosti zpracování v plynu či v solné lázni. [17]

4.2.3 Kuličkování

Vzorky byly kuličkovány pneumaticky ve firmě LB Minerals. Tváření povrchové vrstvy otryskáváním kulovitými částicemi tryskacího prostředku je známé pod názvem kuličkování, brokování nebo balotínování. Povrch součásti je bombardován kuličkami, které – urychlené pneumaticky nebo mechanicky – dopadají velkou rychlostí na povrch součásti. Během velmi krátkého času nárazu působí lokálně velmi vysoká síla, která způsobuje plastické přetvoření povrchu a mechanické zpevnění. [19]

4.3 Metalografie a tvrdost

Pro vyhodnocení tvrdosti a metalografie si nejdříve musíme vzorek řádně připravit.

Krok číslo jedna spočívá v odběru vzorku. K odběru vzorku byla použita kotoučová pila. Po odebrání vzorku následuje preparace za tepla, pro zalévání vzorku byla použita směs Multifast (černá bakelitová pryskyřice pro zalévání za tepla s dřevěným plnivem). Vzorek umístíme do vyhřívané tlakové nádoby, zasypeme práškem Multifast. Tato hmota se při současném působení zvýšené teploty a tlaku roztaví a dokonale obklopí vzorek. Probíhá při teplotě 180°C pod tlakem 30 kN při tuhnutí do 7 minut. Takto připravené vzorky můžeme začít brousit. Při broušení nám dochází k intenzivnímu odebrání hmoty z povrchu materiálu. Cílem je dosáhnout rovinného

povrchu vzorku s minimálním poškozením, které se snadno odstraní při leštění. Dokonalý výbrus se získá postupným broušením vzorku na stále jemnějších brusných kotoučích. Při přechodu na brusný kotouč s menší drsností vzorek opláchneme vodou a brousíme jej ve směru kolmém k předcházejícímu směru. Důkladné oplachování vzorku je nezbytné, aby nedošlo k znehodnocení jemnějšího kotouče uvolněnými zrnky hrubšího brusiva z předchozí operace. Brousíme tak dlouho, dokud zcela nezmizí drážky reprezentující předchozí směr broušení. Poté opět opláchneme, přejdeme na jemnější kotouč s vyšší zrnitostí a proces opakujeme. Pro první krok broušení použijeme magnetický brusný kotouč o drsnosti 500 dle evropského značení FEPA. Jako druhý krok použijeme brusný kotouč značený 1200 dle evropského značení FEPA. Při broušení byla použita voda ke chlazení a odvodu nečistot. Po broušení následuje leštění. Leštění je následná operace po broušení, kde na rozdíl od broušení, při leštění již povrch leštěného materiálu téměř neubývá, ale nastává především deformace vrcholů povrchové drsnosti. Pro první krok leštění byl použit kotouč o velikosti zrna 9 mikrometru, následně se přešlo na kotouč o velikosti zrna 3 mikrometry, a jako další byl použit kotouč o velikosti zrna 1 mikrometr. Na takto připravených vzorcích můžeme začít měřit mikrotvrdot. Pro pozorování vzorku pod mikroskopem musíme provést ještě finální leštění s přidáním chemické lešticí kapaliny. Takto připravené vzorky můžeme zkoumat pod mikroskopem, ale abychom zjistili detailnější informace, ještě vzorky naleptáme. Leptání je proces, při kterém dochází ke zviditelnění jednotlivých strukturních součástí. Struktura kovového materiálu je po mechanickém broušení a leštění zakryta tvářenou B-vrstvou. Abychom mohli strukturu pozorovat, je třeba tuto vrstvu chemicky odstranit. Leptání se provádí ponořením vzorku do vybraného leptacího činidla (v našem případě byl použit Nital 15) o správné koncentraci a teplotě po určitou dobu. Leptací činidlo na povrchu vzorku napadá přednostně energeticky bohatá místa, např. hranice zrna, fázová rozhraní mezi různými fázemi, místa bohatá na uloženou deformační energii (B- vrstva). V praxi se rozlišuje několik základních způsobů leptání: Leptání na hranice zrna, plošné, selektivní leptání a barevné. Naleptané vzorky můžeme zkoumat pod mikroskopem.

Mikrotvrdot

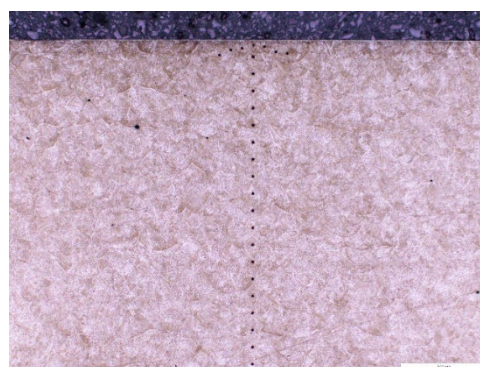
Měření mikrotvrdoti slouží pro metalografický rozbor, pro rozlišení mikrostrukturních útvarů podle jejich tvrdosti. Mikrotvrdot necharakterizuje makroskopické vlastnosti vzorku, ale pouze vlastnosti jednotlivých strukturních součástí. Princip je stejný jako u zkoušek tvrdosti, jen se používá menší síla působící na indentor. Měření dle ČSN EN ISO 6507- Vickers.

U všech vzorků byla zjišťována tvrdost vzorku od povrchu do středu vzorku. Bylo provedeno 20 vtisků po vzdálenostech 0,1 mm, tedy do hloubky 2 mm od povrchu. Pro měření mikrotvrdosti bylo použito zatížení o váze 100 g.



Obrázek 1 MS1- 490°C/6h- Kuličkování

U nitridovaných vzorků byla použita jiná metoda měření, jelikož nitridační vrstva nedosahovala do hloubky 0,1 mm, tak měření prvního vtisku bylo provedeno 0,03 mm od kraje a do 0,1 mm byly prováděny vtisky po 0,01 mm, od 0,1 mm byly standardně prováděny vtisky po 0,1 mm do hloubky 2 mm od kraje.



Obrázek 3MS1- 1- Výchozí stav- Nitridace

Metalografický mikroskop

Pro vyhodnocení výsledné struktury vzorku byl použit metalografický mikroskop se zvětšením 50-1000x.

4.3.1 Tvrdost u materiálu MS1

4.3.1.1 Tepelné zpracování

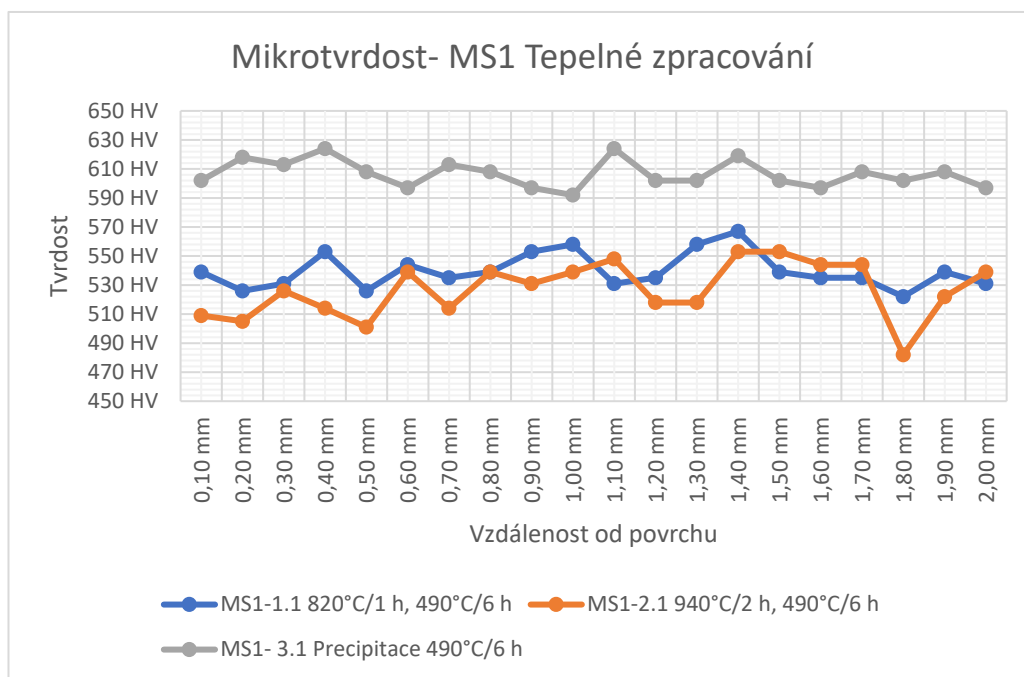
- Precipitace 490°C/6 hodin.
- 940°C/2 hodiny, 490°C/6 hodin.
- 820°C/1 hodiny, 490°C/6 hodin.

Tabulka naměřené mikrotvrdosti (HV)

Vtisk	Vzdálenost od kraje (mm)	Tvrdost (HV)			Zatížení (g)
		MS1-1.1 820°C/1 h, 490°C/6 h	MS1-2.1 940°C/2 h, 490°C/6 h	MS1- 3.1 Precipitace 490°C/6 h	
1	0,10 mm	539 HV	509 HV	602 HV	100 gf
2	0,20 mm	526 HV	505 HV	618 HV	100 gf
3	0,30 mm	531 HV	526 HV	613 HV	100 gf
4	0,40 mm	553 HV	514 HV	624 HV	100 gf
5	0,50 mm	526 HV	501 HV	608 HV	100 gf

6	0,60 mm	544 HV	539 HV	597 HV	100 gf
7	0,70 mm	535 HV	514 HV	613 HV	100 gf
8	0,80 mm	539 HV	539 HV	608 HV	100 gf
9	0,90 mm	553 HV	531 HV	597 HV	100 gf
10	1,00 mm	558 HV	539 HV	592 HV	100 gf
11	1,10 mm	531 HV	548 HV	624 HV	100 gf
12	1,20 mm	535 HV	518 HV	602 HV	100 gf
13	1,30 mm	558 HV	518 HV	602 HV	100 gf
14	1,40 mm	567 HV	553 HV	619 HV	100 gf
15	1,50 mm	539 HV	553 HV	602 HV	100 gf
16	1,60 mm	535 HV	544 HV	597 HV	100 gf
17	1,70 mm	535 HV	544 HV	608 HV	100 gf
18	1,80 mm	522 HV	482 HV	602 HV	100 gf
19	1,90 mm	539 HV	522 HV	608 HV	100 gf
20	2,00 mm	531 HV	539 HV	597 HV	100 gf
Průměr		540 HV	527 HV	607 HV	
Min.		522 HV	482 HV	592 HV	
Max.		567 HV	553 HV	624 HV	

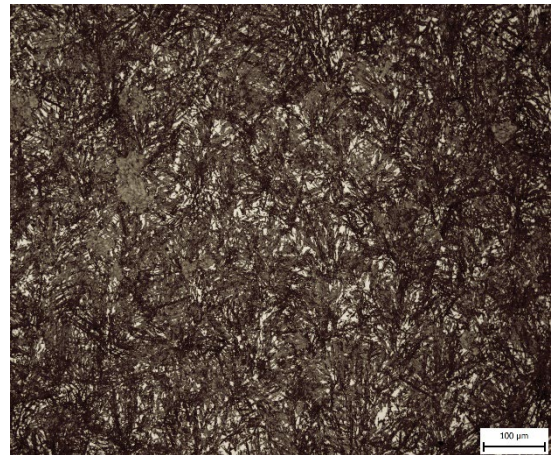
Graf naměřených mikrotvrdotí



Mikrostruktura tepelně zpracované oceli MS1



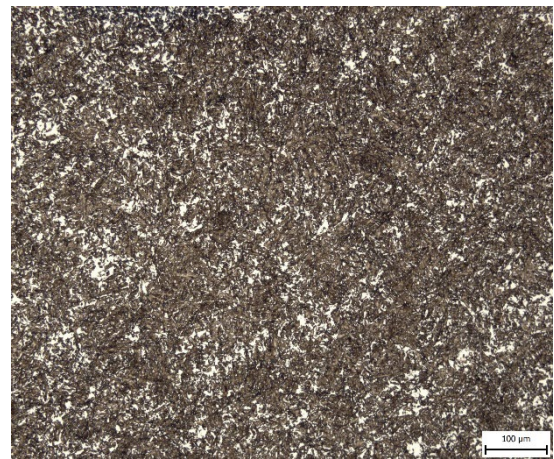
Obrázek 15MS1-1.1 820°C/1 h, 490°C/6 h - 50x



Obrázek 13MS1-1.1 820°C/1 h, 490°C/6 h - 200x



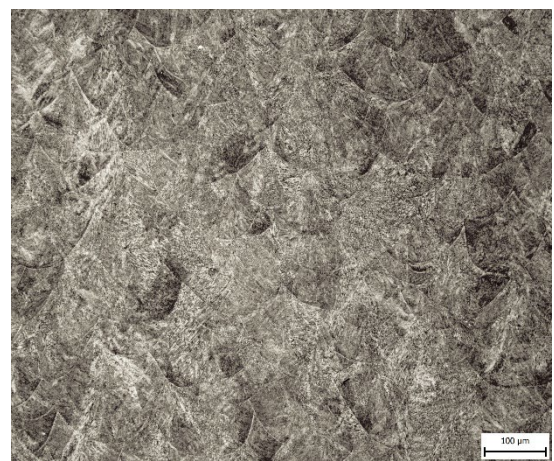
Obrázek 11MS1-2.1 940°C/2 h, 490°C/6 h - 50x



Obrázek 9MS1-2.1 940°C/2 h, 490°C/6 h - 200x



Obrázek 7MS1- 3.1 Precipitace 490°C/6 h - 50x



Obrázek 5 MS1- 3.1 Precipitace 490°C/6 h - 200x

4.3.1.2 Nitridování

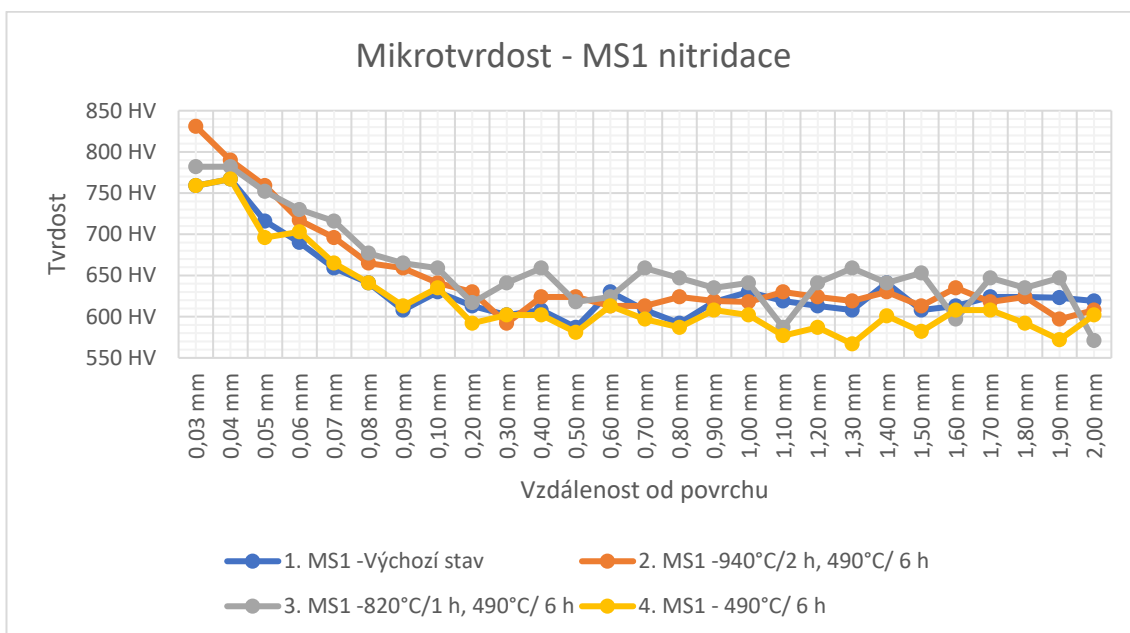
- 1. Výchozí stav
- 2. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
- 3. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin
- 4. 490°C/ 6 hodin

Tabulka naměřené mikrotvrlosti (HV) po nitridaci

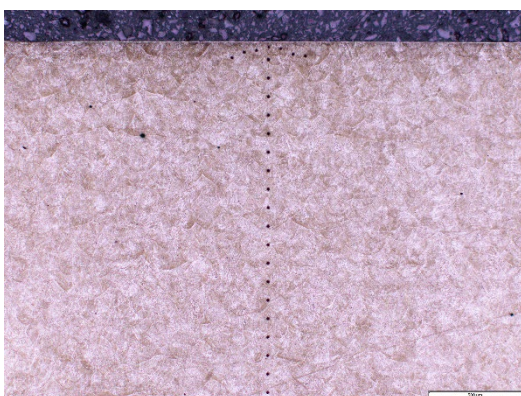
Vtisk	Vzdálenost od kraje (mm)	Tvrlost (HV)				Zatížení (g)
		1. MS1 - Výchozí stav	2. MS1 - 940°C/2 h, 490°C/ 6 h	3. MS1 - 820°C/1 h, 490°C/ 6 h	4. MS1 - 490°C/ 6 h	
1	0,03 mm	759 HV	831 HV	782 HV	759 HV	100 gf
2	0,04 mm	767 HV	790 HV	782 HV	767 HV	100 gf
3	0,05 mm	716 HV	759 HV	752 HV	696 HV	100 gf
4	0,06 mm	690 HV	717 HV	730 HV	703 HV	100 gf
5	0,07 mm	659 HV	696 HV	716 HV	665 HV	100 gf
6	0,08 mm	641 HV	665 HV	677 HV	641 HV	100 gf
7	0,09 mm	608 HV	659 HV	665 HV	613 HV	100 gf
8	0,10 mm	630 HV	641 HV	659 HV	635 HV	100 gf
9	0,20 mm	613 HV	630 HV	617 HV	592 HV	100 gf
10	0,30 mm	602 HV	592 HV	641 HV	602 HV	100 gf
11	0,40 mm	608 HV	624 HV	659 HV	602 HV	100 gf
12	0,50 mm	587 HV	624 HV	618 HV	581 HV	100 gf
13	0,60 mm	630 HV	613 HV	624 HV	613 HV	100 gf
14	0,70 mm	608 HV	613 HV	659 HV	597 HV	100 gf
15	0,80 mm	592 HV	624 HV	647 HV	587 HV	100 gf
16	0,90 mm	618 HV	619 HV	635 HV	608 HV	100 gf
17	1,00 mm	630 HV	618 HV	641 HV	602 HV	100 gf
18	1,10 mm	619 HV	630 HV	587 HV	577 HV	100 gf
19	1,20 mm	613 HV	624 HV	641 HV	587 HV	100 gf
20	1,30 mm	608 HV	619 HV	659 HV	567 HV	100 gf
21	1,40 mm	641 HV	630 HV	641 HV	601 HV	100 gf
22	1,50 mm	608 HV	613 HV	653 HV	582 HV	100 gf
23	1,60 mm	613 HV	635 HV	597 HV	608 HV	100 gf
24	1,70 mm	624 HV	618 HV	647 HV	608 HV	100 gf

25	1,80 mm	624 HV	624 HV	635 HV	592 HV	100 gf
26	1,90 mm	623 HV	597 HV	647 HV	572 HV	100 gf
27	2,00 mm	619 HV	608 HV	571 HV	602 HV	100 gf
Průměr		635 HV	649 HV	659 HV	621 HV	
Min.		587 HV	592 HV	571 HV	567 HV	
Max.		767 HV	831 HV	782 HV	767 HV	

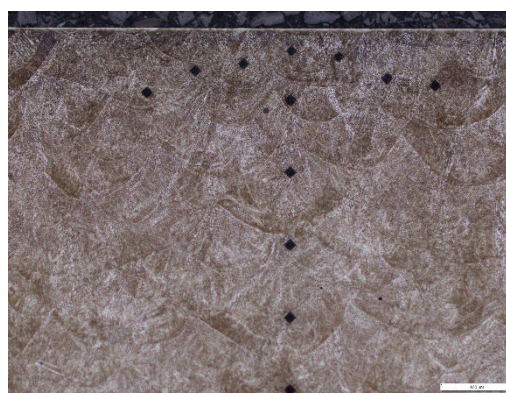
Graf naměřených mikrotvrdotí po nitridaci



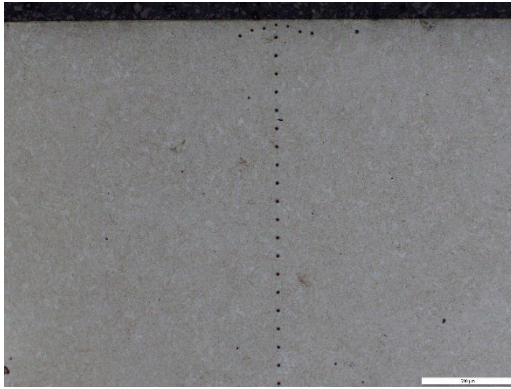
Mikrostruktura tepelně zpracované oceli MS1 po nitridaci



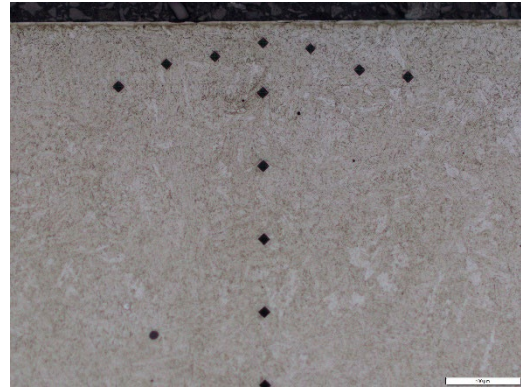
Obrázek 19 1. MS1 -Výchozí stav- Nitridace- 50x



Obrázek 17 1. MS1 -Výchozí stav- Nitridace- 200x



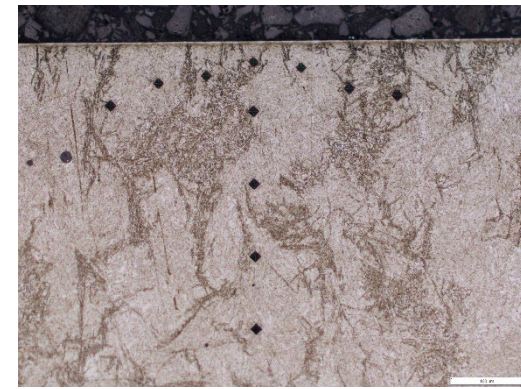
Obrázek 23 2. MSI -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace-50x



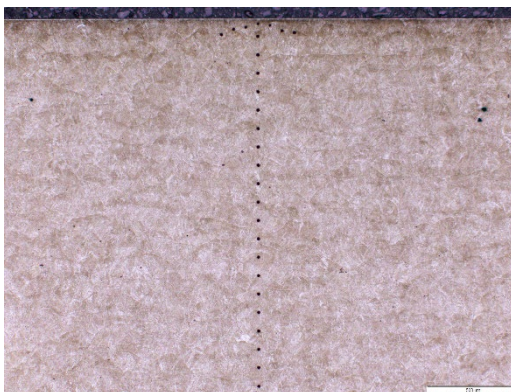
Obrázek 21 2. MSI -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace- 200x



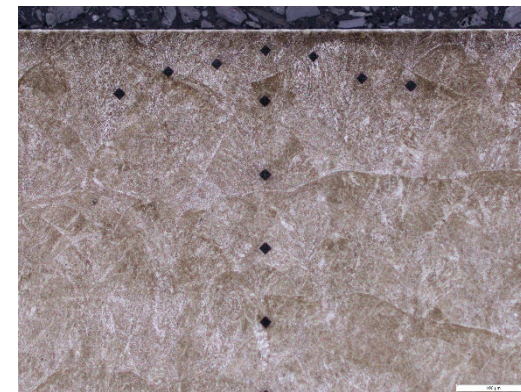
Obrázek 27 3. MSI -820°C/1 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace- 50x



Obrázek 25 3. MSI -820°C/1 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace- 200x



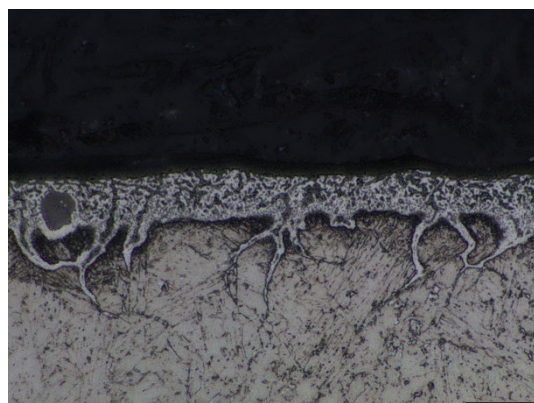
Obrázek 31 4. MSI - 490°C/ 6 h- Nitridace- 50x



Obrázek 29 4. MSI - 490°C/ 6 h- Nitridace- 200x



Obrázek 35 2. MS1 -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridování-1000x



Obrázek 332. MS1 -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridování-1000x-02

4.3.1.3 Kuličkování

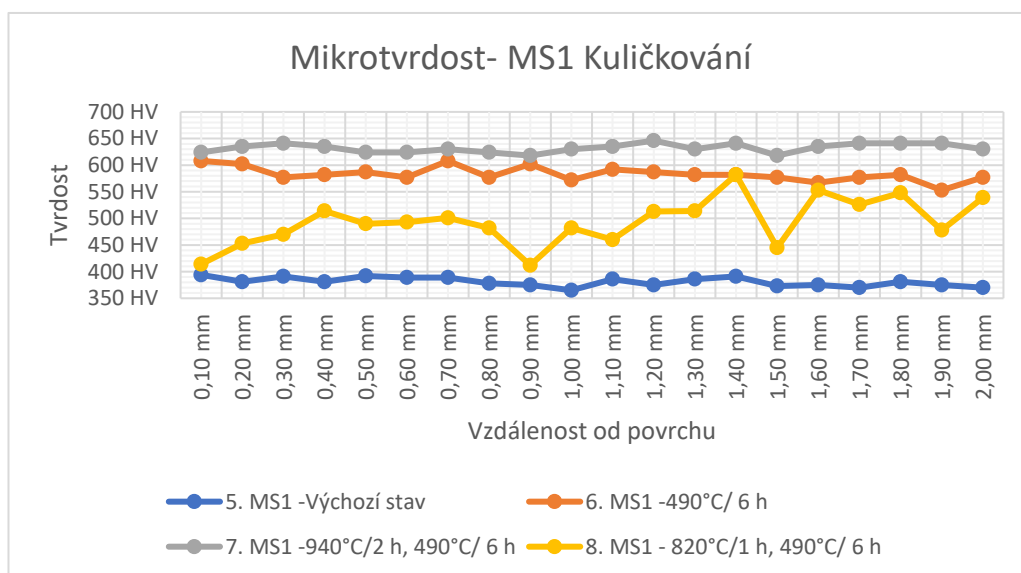
- 5. Výchozí stav
- 6. 490°C/ 6 hodin
- 7. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
- 8. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin

Tabulka naměřené mikrotvrlosti (HV) po kuličkování

Vtisk	Vzdálenost od kraje (mm)	Tvrдость (HV)				Zatížení (g)
		5. MS1 - Výchozí stav	6. MS1 - 490°C/ 6 h	7. MS1 - 940°C/2 h, 490°C/ 6 h	8. MS1 - 820°C/1 h, 490°C/ 6 h	
1	0,10 mm	394 HV	608 HV	624 HV	414 HV	100 gf
2	0,20 mm	381 HV	602 HV	635 HV	453 HV	100 gf
3	0,30 mm	391 HV	577 HV	641 HV	470 HV	100 gf
4	0,40 mm	381 HV	582 HV	635 HV	514 HV	100 gf
5	0,50 mm	392 HV	587 HV	624 HV	490 HV	100 gf
6	0,60 mm	389 HV	577 HV	624 HV	493 HV	100 gf
7	0,70 mm	389 HV	608 HV	630 HV	501 HV	100 gf
8	0,80 mm	378 HV	577 HV	624 HV	482 HV	100 gf
9	0,90 mm	375 HV	602 HV	618 HV	412 HV	100 gf
10	1,00 mm	365 HV	572 HV	630 HV	482 HV	100 gf
11	1,10 mm	386 HV	592 HV	635 HV	460 HV	100 gf
12	1,20 mm	375 HV	587 HV	646 HV	513 HV	100 gf

13	1,30 mm	386 HV	582 HV	630 HV	514 HV	100 gf
14	1,40 mm	391 HV	582 HV	641 HV	582 HV	100 gf
15	1,50 mm	373 HV	577 HV	618 HV	445 HV	100 gf
16	1,60 mm	375 HV	567 HV	635 HV	553 HV	100 gf
17	1,70 mm	370 HV	577 HV	641 HV	526 HV	100 gf
18	1,80 mm	381 HV	582 HV	641 HV	548 HV	100 gf
19	1,90 mm	375 HV	553 HV	641 HV	478 HV	100 gf
20	2,00 mm	370 HV	577 HV	630 HV	539 HV	100 gf
Průměr		381 HV	583 HV	632 HV	494 HV	
Min.		365 HV	553 HV	618 HV	412 HV	
Max.		394 HV	608 HV	646 HV	582 HV	

Graf naměřených mikrotvrdotí po kuličkování



Mikrostruktura tepelně zpracované oceli MS1 po kuličkování



Obrázek 39 MS1-6- 490°C/6h - Kuličkování- 50x



Obrázek 37 MS1-6- 490°C/6h - Kuličkování- 200x

4.3.2 Tvrdość u materiálu HO

4.3.2.1 Kalení a popouštění

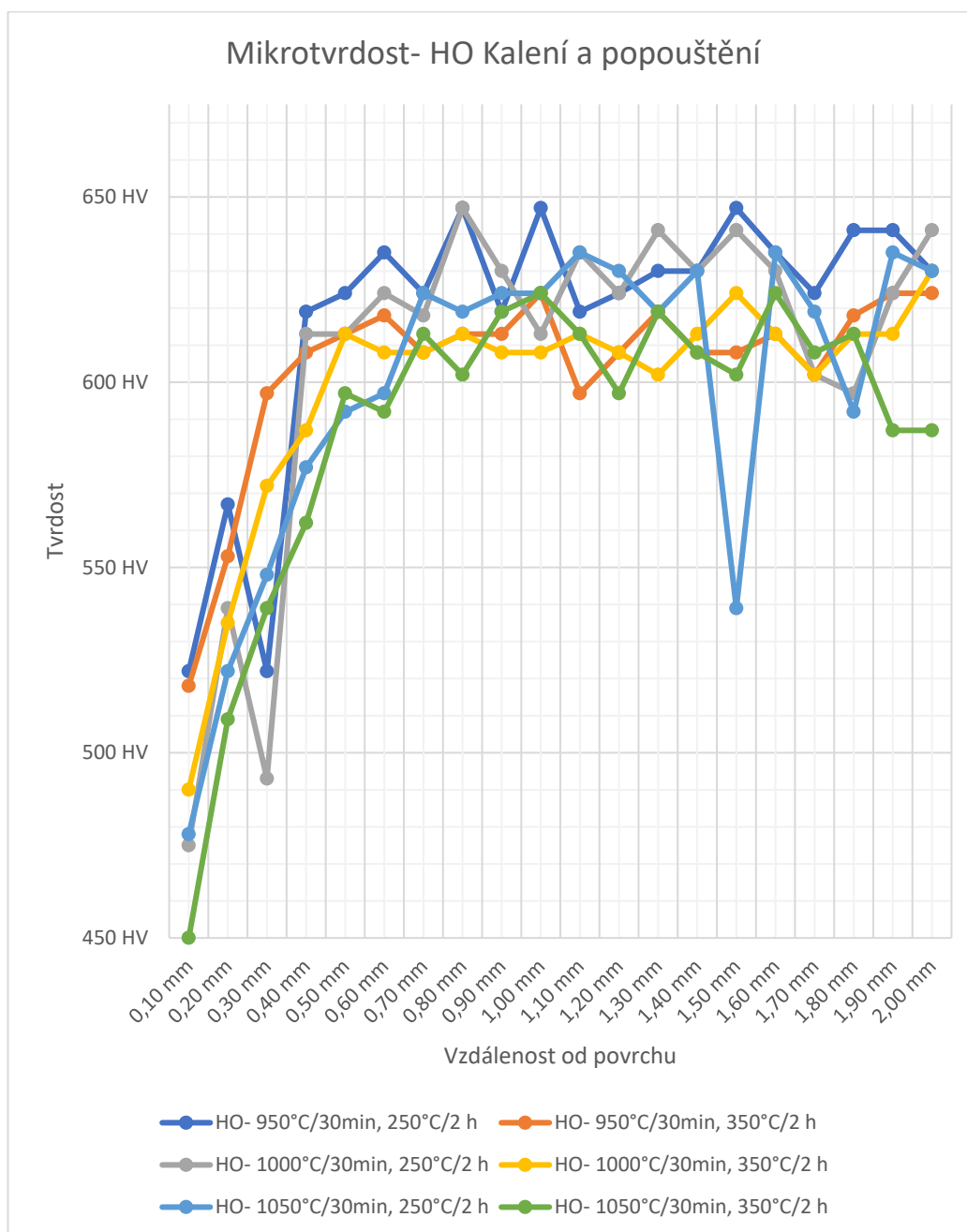
- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny

Tabulka naměřené mikrotvrdości (HV)

Vtisk	Vzdáleno st od kraje (mm)	Tvrdość (HV)						Zatížení (g)
		HO- 950°C/ 30min, 250°C/ 2 h	HO- 950°C/ 30min, 350°C/ 2 h	HO- 1000°C/ 30min, 250°C/ 2 h	HO- 1000°C/ 30min, 350°C/ 2 h	HO- 1050°C/ 30min, 250°C/ 2 h	HO- 1050°C/ 30min, 350°C/ 2 h	
1	0,10 mm	522 HV	518 HV	475 HV	490 HV	478 HV	450 HV	100 gf
2	0,20 mm	567 HV	553 HV	539 HV	535 HV	522 HV	509 HV	100 gf
3	0,30 mm	522 HV	597 HV	493 HV	572 HV	548 HV	539 HV	100 gf
4	0,40 mm	619 HV	608 HV	613 HV	587 HV	577 HV	562 HV	100 gf
5	0,50 mm	624 HV	613 HV	613 HV	613 HV	592 HV	597 HV	100 gf
6	0,60 mm	635 HV	618 HV	624 HV	608 HV	597 HV	592 HV	100 gf
7	0,70 mm	624 HV	608 HV	618 HV	608 HV	624 HV	613 HV	100 gf
8	0,80 mm	647 HV	613 HV	647 HV	613 HV	619 HV	602 HV	100 gf
9	0,90 mm	619 HV	613 HV	630 HV	608 HV	624 HV	619 HV	100 gf
10	1,00 mm	647 HV	624 HV	613 HV	608 HV	624 HV	624 HV	100 gf
11	1,10 mm	619 HV	597 HV	635 HV	613 HV	635 HV	613 HV	100 gf
12	1,20 mm	624 HV	608 HV	624 HV	608 HV	630 HV	597 HV	100 gf
13	1,30 mm	630 HV	619 HV	641 HV	602 HV	619 HV	619 HV	100 gf
14	1,40 mm	630 HV	608 HV	630 HV	613 HV	630 HV	608 HV	100 gf
15	1,50 mm	647 HV	608 HV	641 HV	624 HV	539 HV	602 HV	100 gf
16	1,60 mm	635 HV	613 HV	630 HV	613 HV	635 HV	624 HV	100 gf
17	1,70 mm	624 HV	602 HV	602 HV	602 HV	619 HV	608 HV	100 gf
18	1,80 mm	641 HV	618 HV	597 HV	613 HV	592 HV	613 HV	100 gf
19	1,90 mm	641 HV	624 HV	624 HV	613 HV	635 HV	587 HV	100 gf

20	2,00 mm	630 HV	624 HV	641 HV	630 HV	630 HV	587 HV	100 gf
Průměr		617 HV	604 HV	607 HV	599 HV	598 HV	588 HV	
Min.		522 HV	518 HV	475 HV	490 HV	478 HV	450 HV	
Max.		647 HV	624 HV	647 HV	630 HV	635 HV	624 HV	

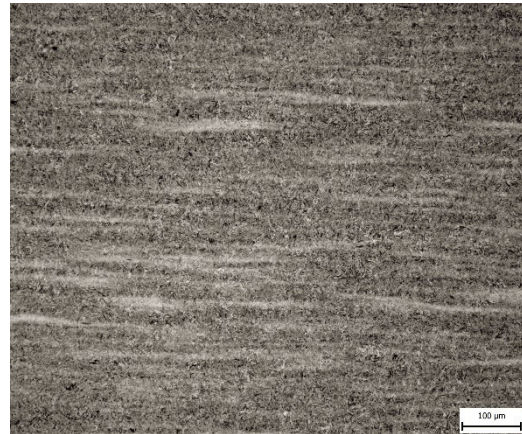
Graf naměřených mikrotvrdotí



Mikrostruktura tepelně zpracované oceli H0



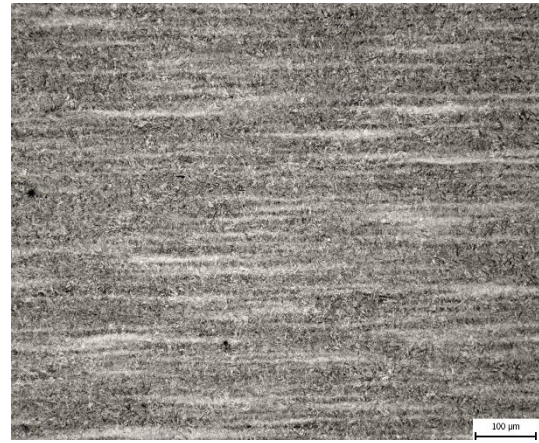
Obrázek 47 HO- 950°C/30min, 250°C/2h-50x



Obrázek 45HO- 950°C/30min, 250°C/2h-200x



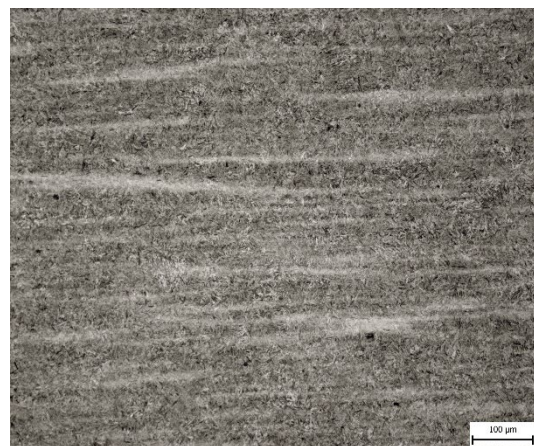
Obrázek 43HO- 950°C/30min, 350°C/2h-50x



Obrázek 41HO- 950°C/30min, 350°C/2h-200x



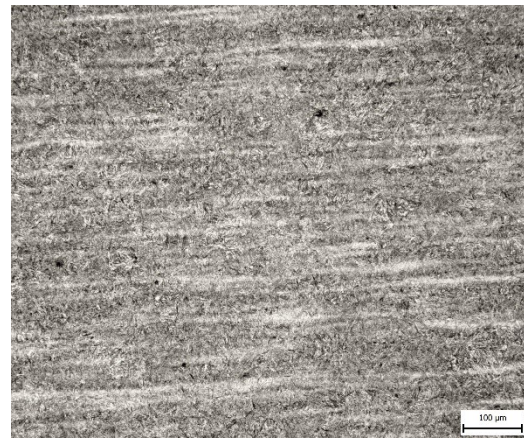
Obrázek 51HO- 1000°C/30min, 250°C/2h-50x



Obrázek 49HO- 1000°C/30min, 250°C/2h-200x



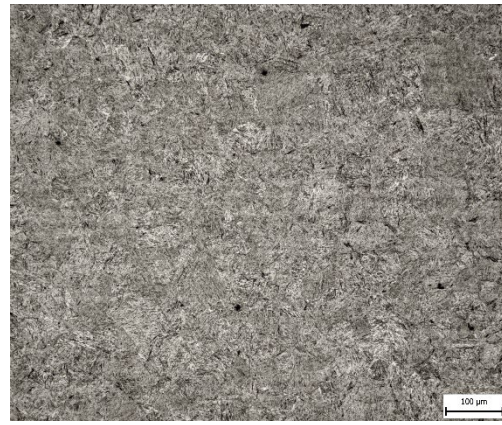
Obrázek 55HO- 1000°C/30min, 350°C/2h-50x



Obrázek 53HO- 1000°C/30min, 350°C/2h-200x



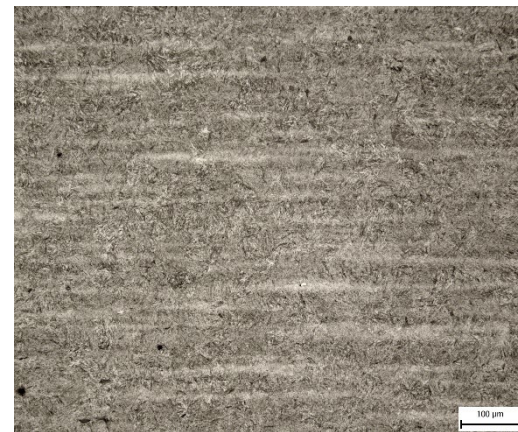
Obrázek 59HO- 1050°C/30min, 250°C/2h-50x



Obrázek 57HO- 1050°C/30min, 250°C/2h-200x



Obrázek 63 24HO- 1050°C/30min, 350°C/2h-50x



Obrázek 61HO- 1050°C/30min, 350°C/2h-200x

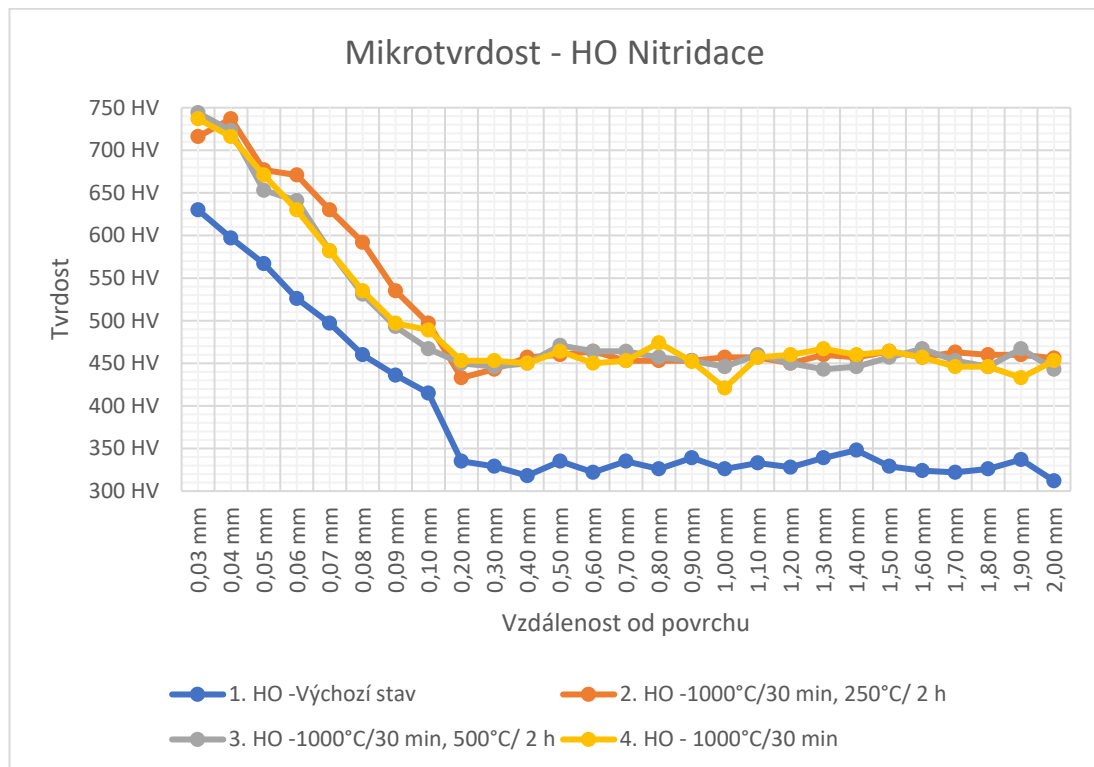
4.3.2.2 Nitridování

- 1. Výchozí stav
- 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
- 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 500°C/ 30 min
- 4. Kaleno 1000°C/30 min

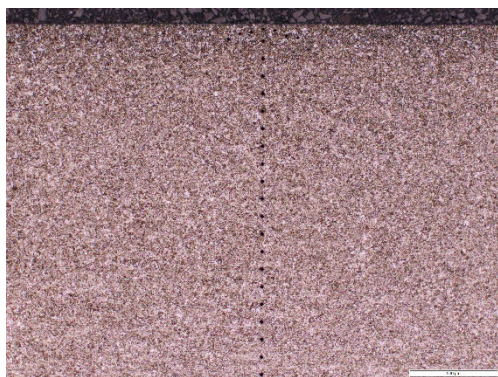
Tabulka naměřené mikrotvrdości (HV) po nitridaci

Vtisk	Vzdálenost od kraje (mm)	Tvrdość (HV)				Zatížení (g)
		1. HO - Výchozí stav	2. HO - 1000°C/30 min, 250°C/ 2 h	3. HO - 1000°C/30 min, 500°C/ 2 h	4. HO - 1000°C/30 min	
1	0,03 mm	630 HV	716 HV	744 HV	737 HV	100 gf
2	0,04 mm	597 HV	737 HV	723 HV	716 HV	100 gf
3	0,05 mm	567 HV	677 HV	653 HV	671 HV	100 gf
4	0,06 mm	526 HV	671 HV	641 HV	630 HV	100 gf
5	0,07 mm	497 HV	630 HV	582 HV	582 HV	100 gf
6	0,08 mm	460 HV	592 HV	531 HV	535 HV	100 gf
7	0,09 mm	436 HV	535 HV	493 HV	497 HV	100 gf
8	0,10 mm	415 HV	497 HV	467 HV	489 HV	100 gf
9	0,20 mm	335 HV	433 HV	450 HV	453 HV	100 gf
10	0,30 mm	329 HV	443 HV	446 HV	453 HV	100 gf
11	0,40 mm	318 HV	457 HV	450 HV	450 HV	100 gf
12	0,50 mm	335 HV	460 HV	471 HV	464 HV	100 gf
13	0,60 mm	322 HV	464 HV	464 HV	450 HV	100 gf
14	0,70 mm	335 HV	453 HV	464 HV	453 HV	100 gf
15	0,80 mm	326 HV	453 HV	457 HV	474 HV	100 gf
16	0,90 mm	339 HV	453 HV	453 HV	452 HV	100 gf
17	1,00 mm	326 HV	457 HV	446 HV	421 HV	100 gf
18	1,10 mm	333 HV	457 HV	460 HV	457 HV	100 gf
19	1,20 mm	328 HV	450 HV	450 HV	460 HV	100 gf
20	1,30 mm	339 HV	460 HV	443 HV	467 HV	100 gf
21	1,40 mm	348 HV	457 HV	446 HV	460 HV	100 gf
22	1,50 mm	329 HV	464 HV	457 HV	464 HV	100 gf
23	1,60 mm	324 HV	457 HV	467 HV	457 HV	100 gf
24	1,70 mm	322 HV	463 HV	453 HV	446 HV	100 gf
25	1,80 mm	326 HV	460 HV	446 HV	446 HV	100 gf
26	1,90 mm	337 HV	460 HV	467 HV	433 HV	100 gf
27	2,00 mm	312 HV	456 HV	443 HV	453 HV	100 gf
Průměr		385 HV	508 HV	499 HV	499 HV	
Min.		312 HV	433 HV	443 HV	421 HV	
Max.		630 HV	737 HV	744 HV	737 HV	

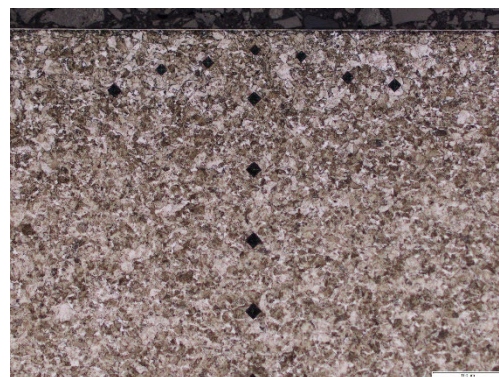
Graf naměřených mikrotvrdoostí po nitridaci



Mikrostruktura tepelně zpracované oceli H0 po nitridaci



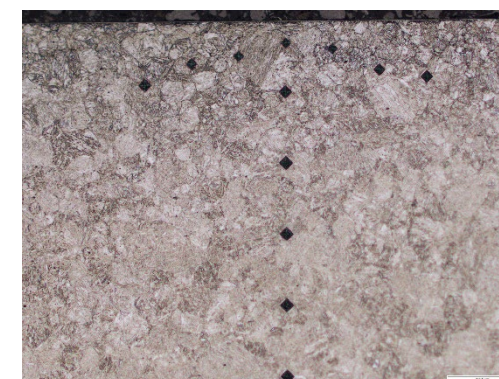
Obrázek 67 1. HO -Výchozí stav- Nitridace-50x



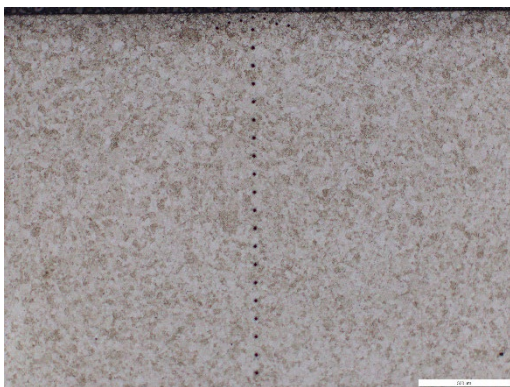
Obrázek 65 1. HO -Výchozí stav- Nitridace-200x



Obrázek 71 4. HO - 1000°C/30 min- Nitridace- 50x



Obrázek 694. HO - 1000°C/30 min- Nitridace-200x



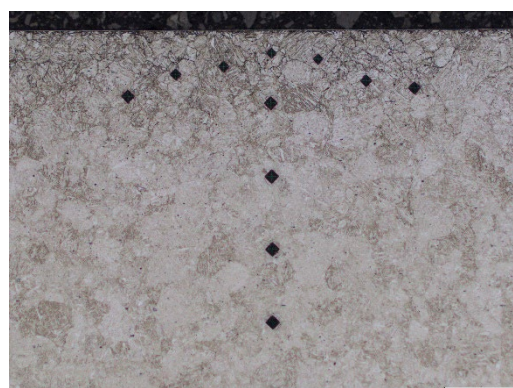
Obrázek 75 2. HO -1000°C/30 min, 250°C/ 2 h-
Nitridace- 50x



Obrázek 732. HO -1000°C/30 min, 250°C/ 2 h-
Nitridace- 200x



Obrázek 79 3. HO -1000°C/30 min, 500°C/ 2 h-
Nitridace- 50x



Obrázek 773. HO -1000°C/30 min, 500°C/ 2 h-
Nitridace- 200x

Na povrchu můžeme vidět nitridační vrstvu, kde dusík vnikal do materiálu po hranicích zrn. V oblasti nitridační vrstvy byly vtisky rozmístěny hustěji, aby byl změřen průběh poklesu tvrdosti nitridační vrstvou co nejpřesněji.

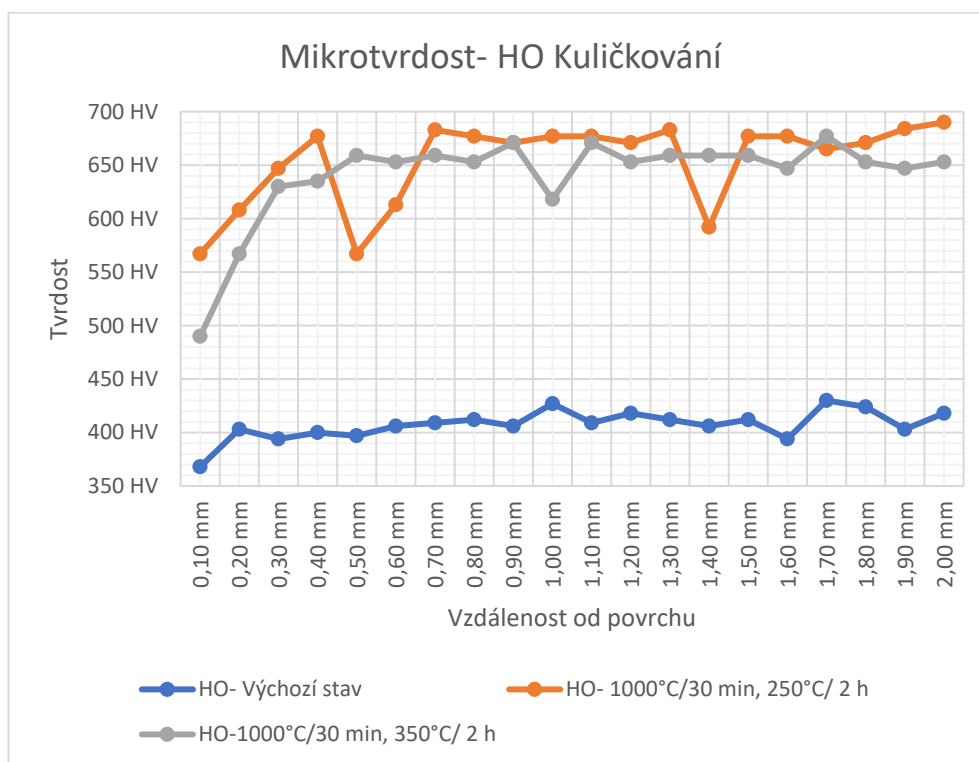
4.3.2.3 Kuličkování

- 1. Výchozí stav
- 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
- 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 350°C/ 2 hodin

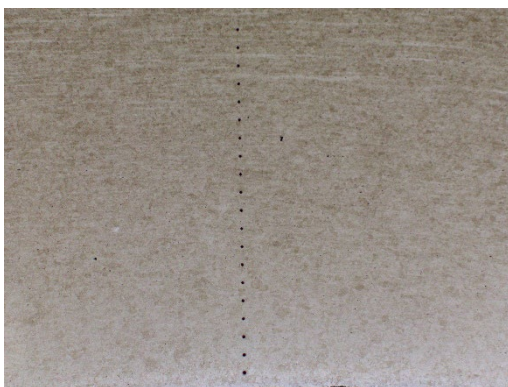
Tabulka naměřené mikrotvrdosti (HV) po kuličkování

Vtisk	Vzdálenost od kraje (mm)	Tvrdost (HV)			Zatížení (g)
		HO- Výchozí stav	HO- 1000°C/30 min, 250°C/ 2 h	HO-1000°C/30 min, 350°C/ 2 h	
1	0,10 mm	368 HV	567 HV	490 HV	100 gf
2	0,20 mm	403 HV	608 HV	567 HV	100 gf
3	0,30 mm	394 HV	647 HV	630 HV	100 gf
4	0,40 mm	400 HV	677 HV	635 HV	100 gf
5	0,50 mm	397 HV	567 HV	659 HV	100 gf
6	0,60 mm	406 HV	613 HV	653 HV	100 gf
7	0,70 mm	409 HV	683 HV	659 HV	100 gf
8	0,80 mm	412 HV	677 HV	653 HV	100 gf
9	0,90 mm	406 HV	671 HV	671 HV	100 gf
10	1,00 mm	427 HV	677 HV	618 HV	100 gf
11	1,10 mm	409 HV	677 HV	671 HV	100 gf
12	1,20 mm	418 HV	671 HV	653 HV	100 gf
13	1,30 mm	412 HV	683 HV	659 HV	100 gf
14	1,40 mm	406 HV	592 HV	659 HV	100 gf
15	1,50 mm	412 HV	677 HV	659 HV	100 gf
16	1,60 mm	394 HV	677 HV	647 HV	100 gf
17	1,70 mm	430 HV	665 HV	677 HV	100 gf
18	1,80 mm	424 HV	671 HV	653 HV	100 gf
19	1,90 mm	403 HV	684 HV	647 HV	100 gf
20	2,00 mm	418 HV	690 HV	653 HV	100 gf
Průměr		407 HV	654 HV	641 HV	
Min.		368 HV	567 HV	490 HV	
Max.		430 HV	690 HV	677 HV	

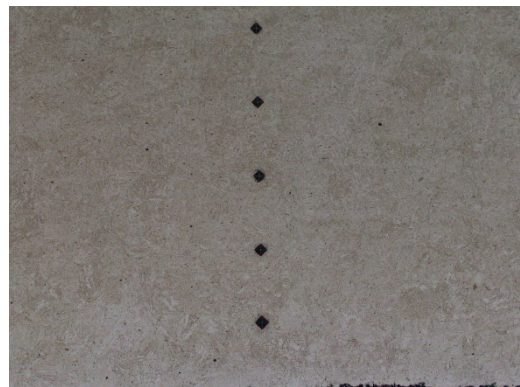
Graf naměřených mikrotvrdoostí po kuličkování



Mikrostruktura tepelně zpracované oceli H0 po kuličkování



Obrázek 83 2. HO -1000°C/30 min, 350°C/ 2 h-
Kuličkování- 50x



Obrázek 81 2. HO -1000°C/30 min, 350°C/ 2 h-
Kuličkování- 200x

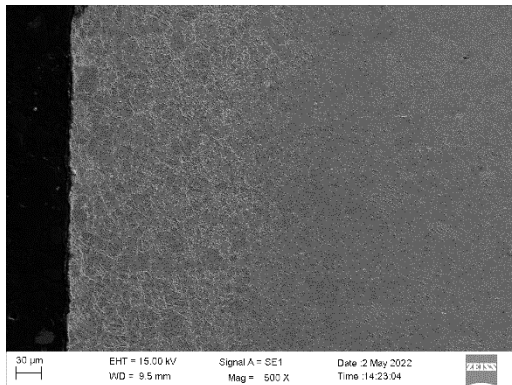
4.3.3 Elektronová mikroskopie

Vzorky byly analyzovány na řádkovacím mikroskopu s ultra-vysokým rozlišením s integrovaným iontovým svazkem. Mikroskop je vybaven rovněž BSE, EBSD, EDX a STEM detektory a může dělat 2D i 3D mapy chemického složení. Iontovým svazkem lze připravit ze zvolených oblastí struktury mikro-vzorky, které mohou být následně podrobeny tahové, tlakové a ohybové zkoušce in-situ.

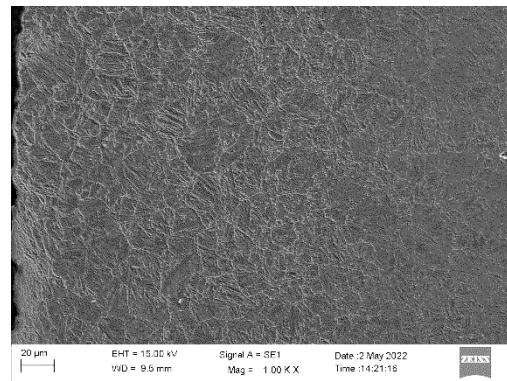
Řádkovací elektronovou mikroskopií byly zkoumány vybrané nitridované vzorky.

4.3.3.1 HO-1000-250-Nitridace

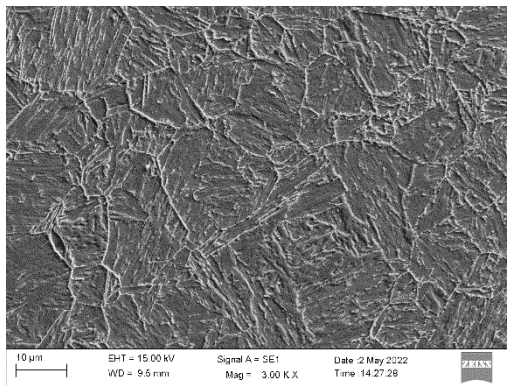
Na povrchu je vidět nitridační vrstva, ve které dusík přednostně difunduje po hranicích zrn.



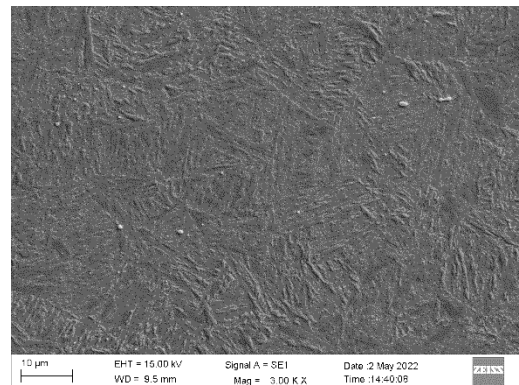
Obrázek 87 HO-N-1000-250- 500x povrch



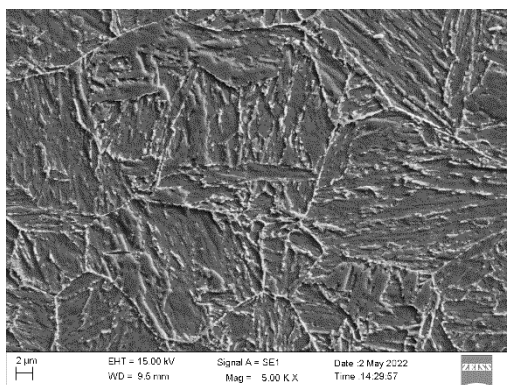
Obrázek 85 HO-N-1000-250- 1000x povrch



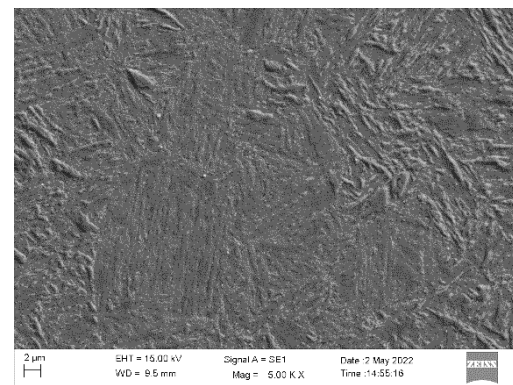
Obrázek 91 HO-N-1000-250- 3000x povrch



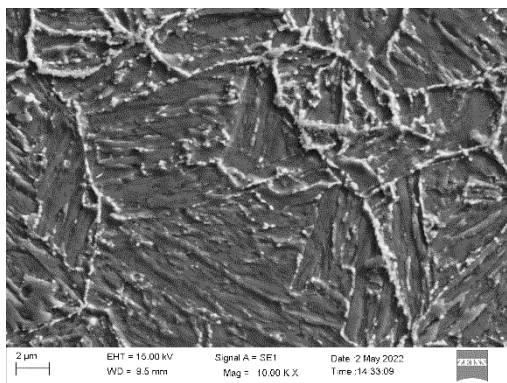
Obrázek 89 HO-N-1000-250- 3000x střed



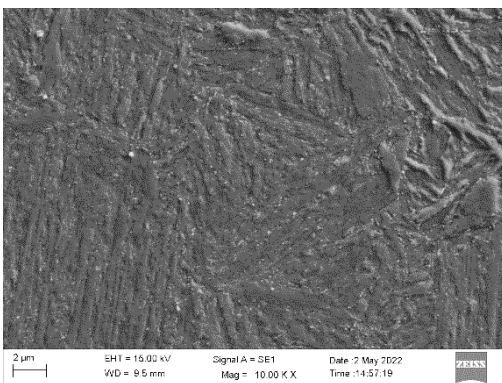
Obrázek 95 HO-N-1000-250- 5000x povrch



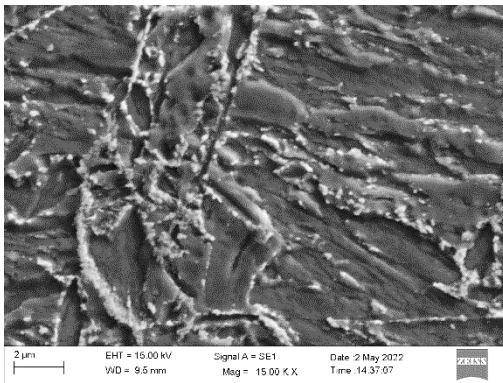
Obrázek 93 HO-N-1000-250- 5000x střed



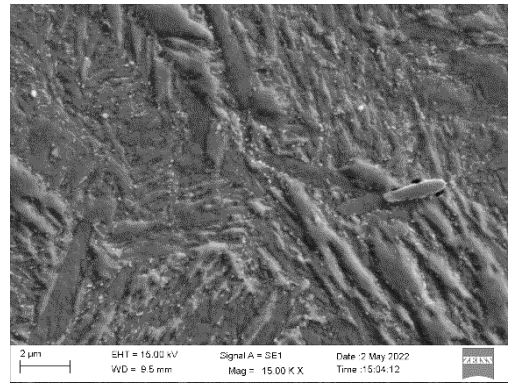
Obrázek 97 HO-N-1000-250- 10000x povrch



Obrázek 99 HO-N-1000-250- 10000x střed



Obrázek 103 HO-N-1000-250- 15000x povrch

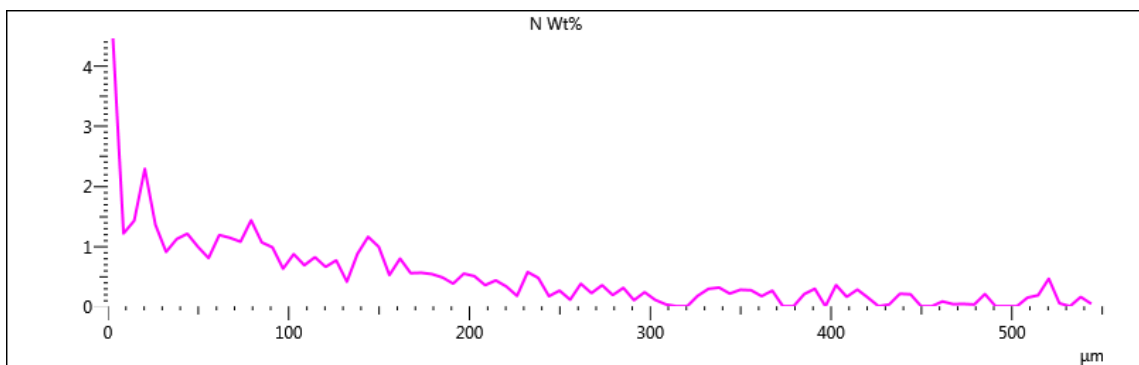


Obrázek 101 HO-N-1000-250- 15000x střed

Electron Image 1

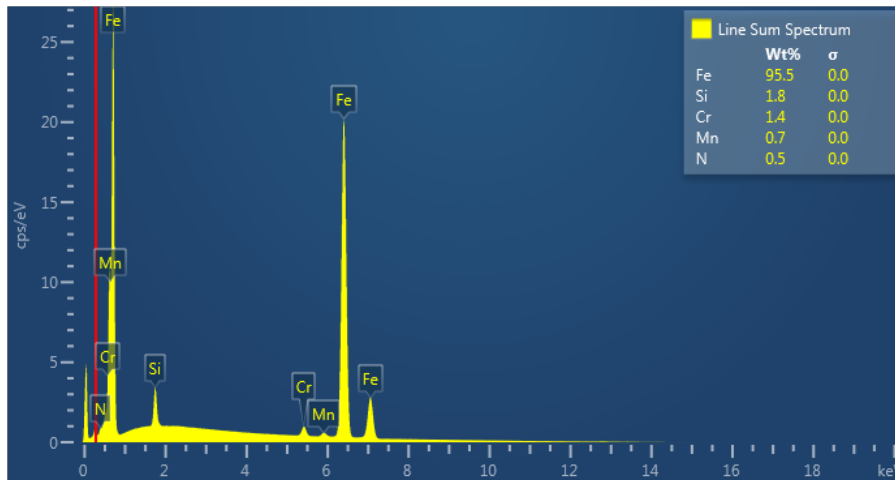


Obrázek 106 HO-N-1000-250- 500x -linie1

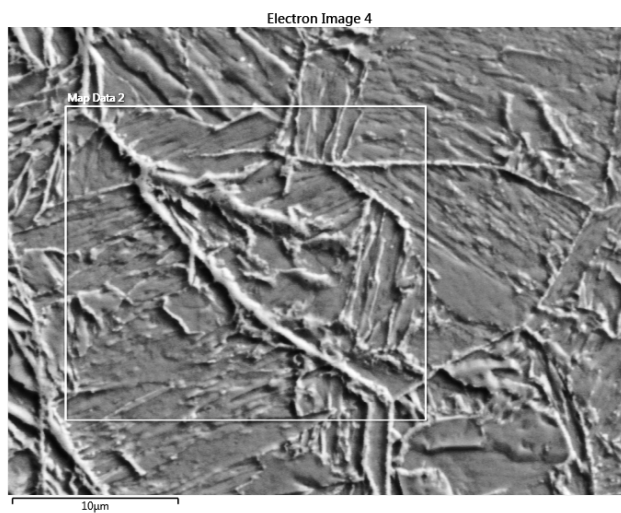


Obrázek 105 HO-N-1000-250- 500x -linie-Dusík N

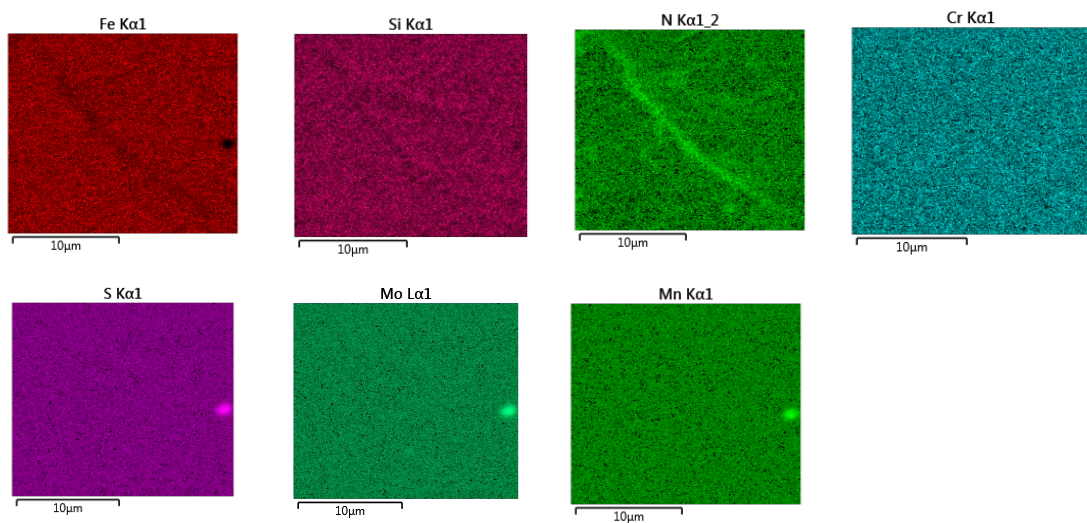
Na povrchu je obsah dusíku kolem 4-5%, s rostoucí vzdáleností od povrchu vzorku obsah dusíku rychle klesá a v hloubce 0,25 mm už není skoro žádný.



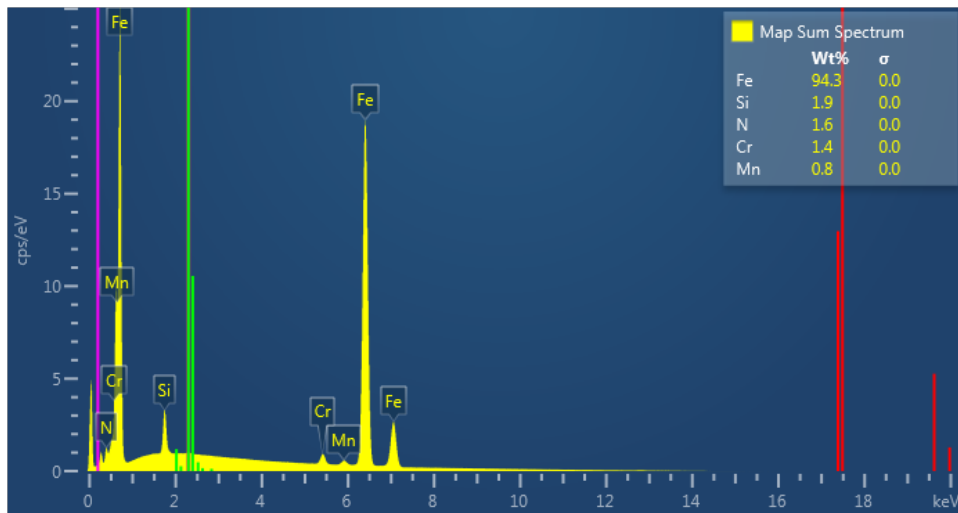
Obrázek 107HO-N-1000-250-500x- EDS Spektrum



Obrázek 108HO-N-1000-250- 8000x povrch

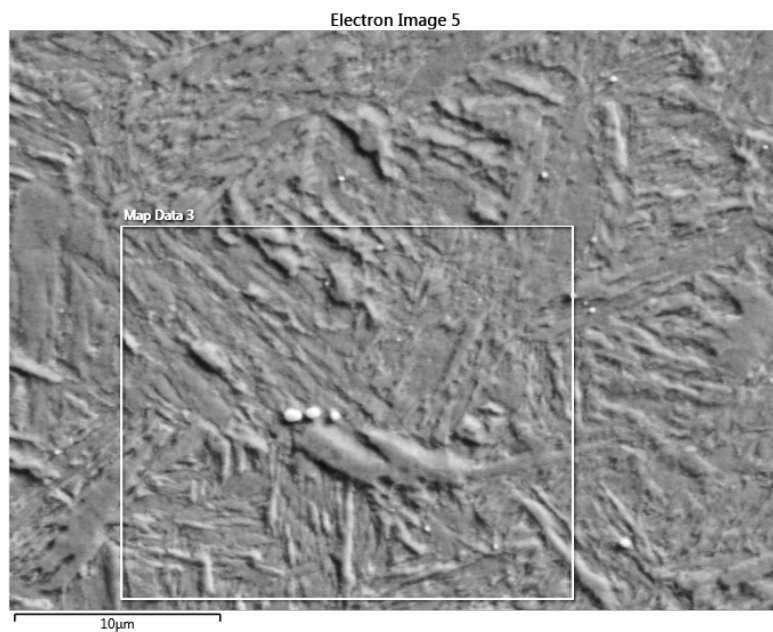


Obrázek 109HO-N-1000-250- 8000x povrch- EDS mapy prvků

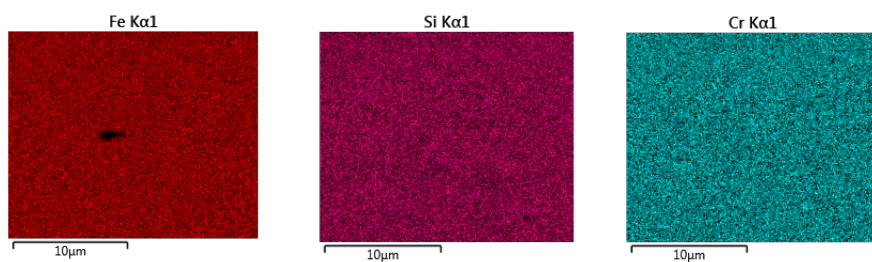


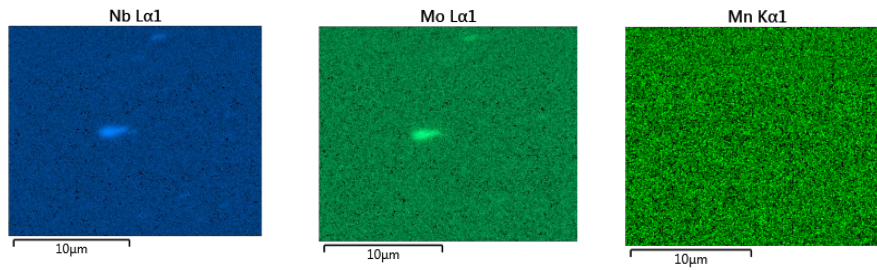
Obrázek 110HO-N-1000-250-8000x povrch- EDS Spektrum

EDS Spektrum ukazuje obsah prvků v nitridační vrstvě vzorku.

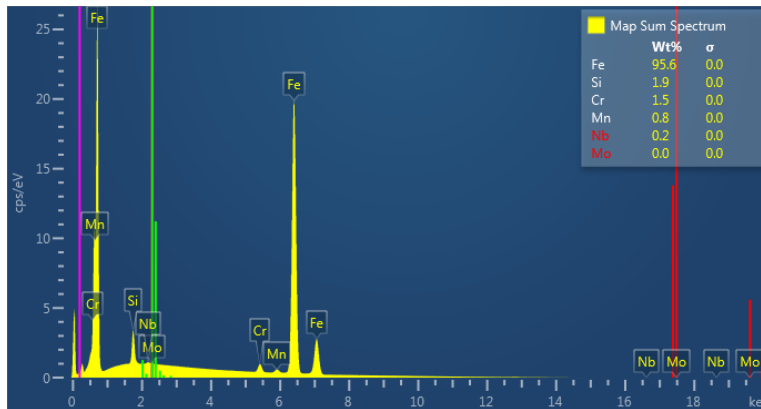


Obrázek 111HO-N-1000-250- 8000x střed





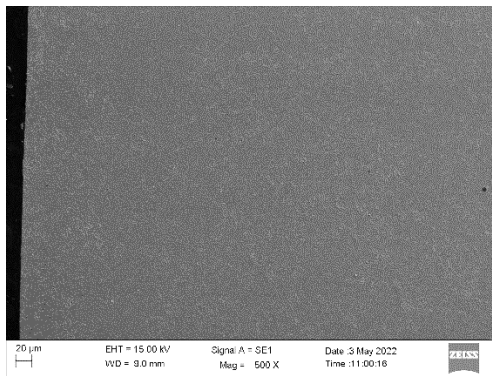
Obrázek 112HO-N-1000-250- 8000x střed- EDS mapy prvků



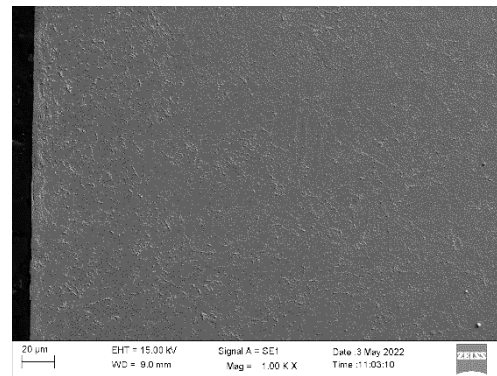
Obrázek 113HO-N-1000-250-8000x střed- EDS Spektrum

Při porovnání EDS Spektra v nitridační vrstvě a ve středu materiálu, je patrné, že ve středu materiálu se dusík už vůbec nevyskytuje.

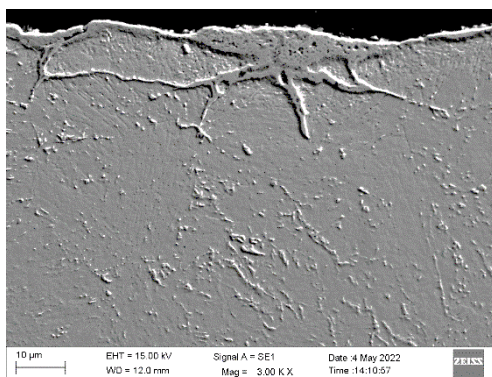
4.3.3.2 MS1-940-490-N



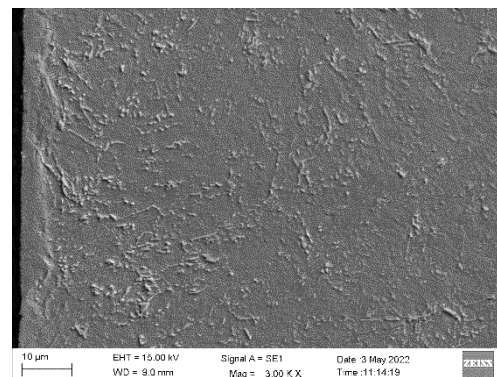
Obrázek 115MS1-N-940-490- 500x povrch



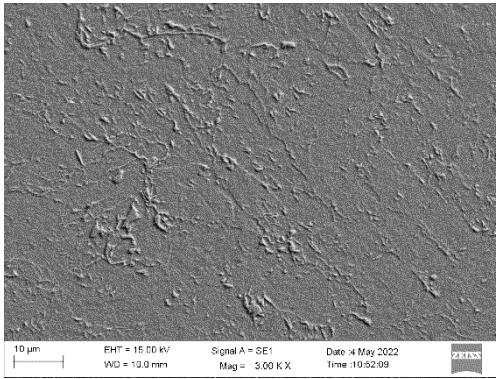
Obrázek 114MS1-N-940-490- 1000x povrch



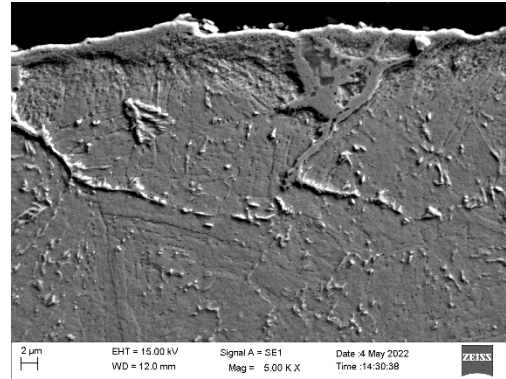
Obrázek 117MS1-N-940-490- 3000x vrstva



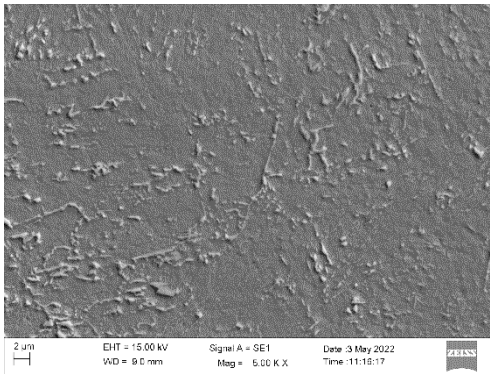
Obrázek 116MS1-N-940-490- 3000x povrch



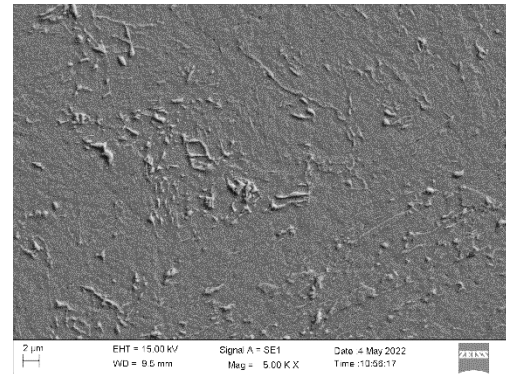
Obrázek 119MSI-N-940-490- 3000x střed



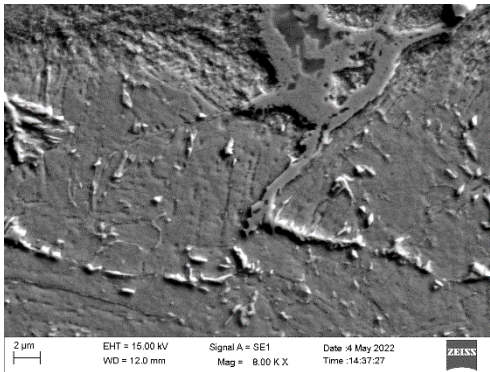
Obrázek 118MSI-N-940-490- 5000x vrstva



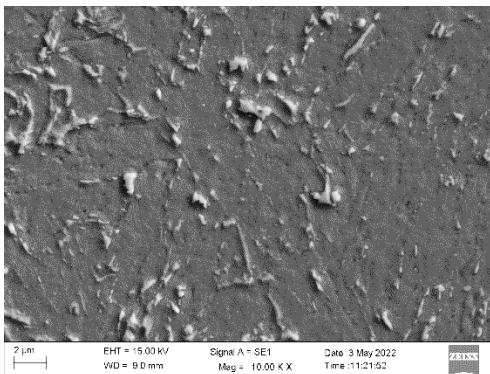
Obrázek 121MSI-N-940-490- 5000x povrch



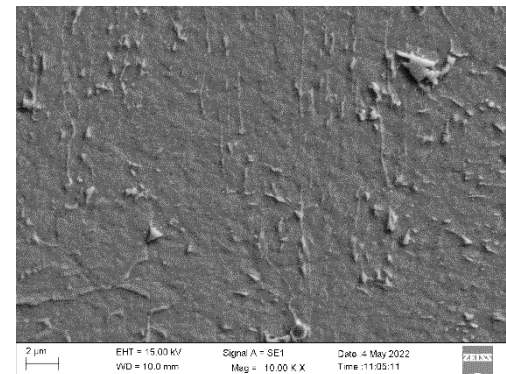
Obrázek 120MSI-N-940-490- 5000x střed



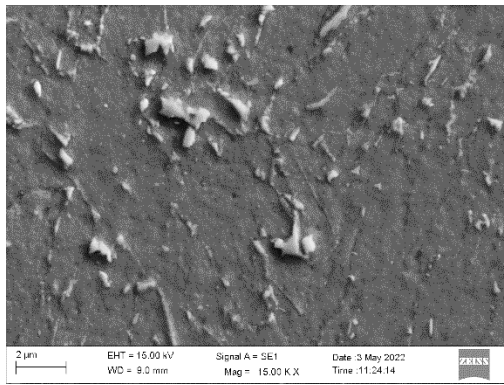
Obrázek 122MSI-N-940-490- 8000x vrstva



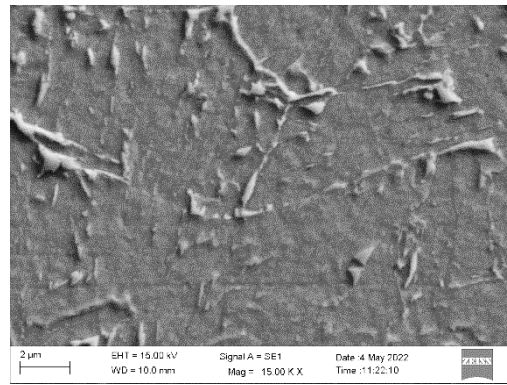
Obrázek 124MSI-N-940-490- 10000x povrch



Obrázek 123MSI-N-940-490- 10000x střed

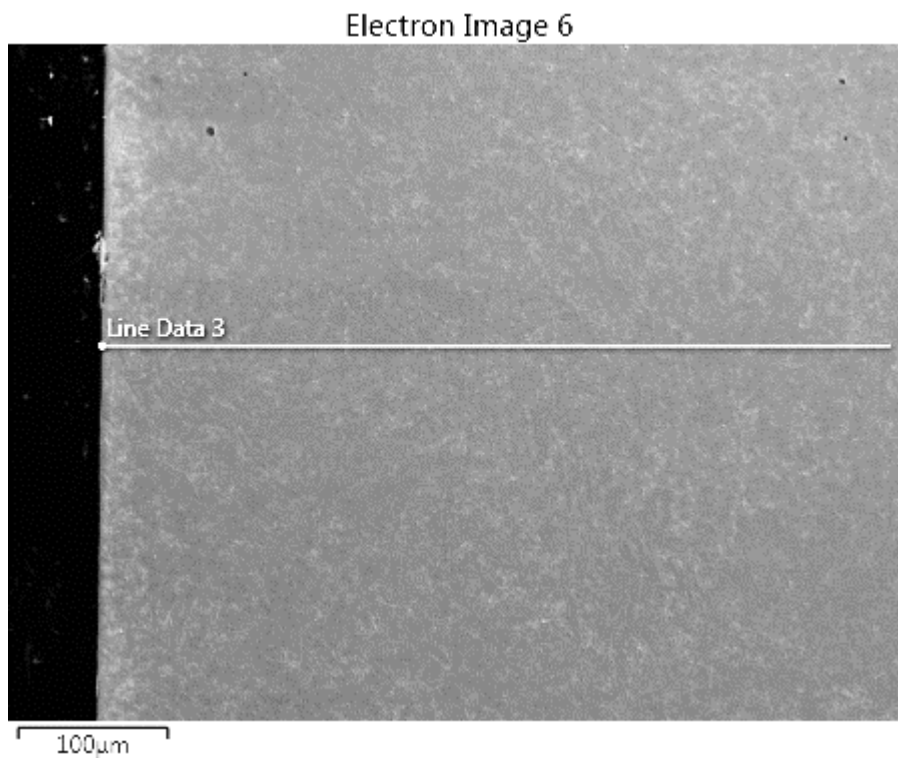


Obrázek 126MS1-N-940-490- 15000x povrch

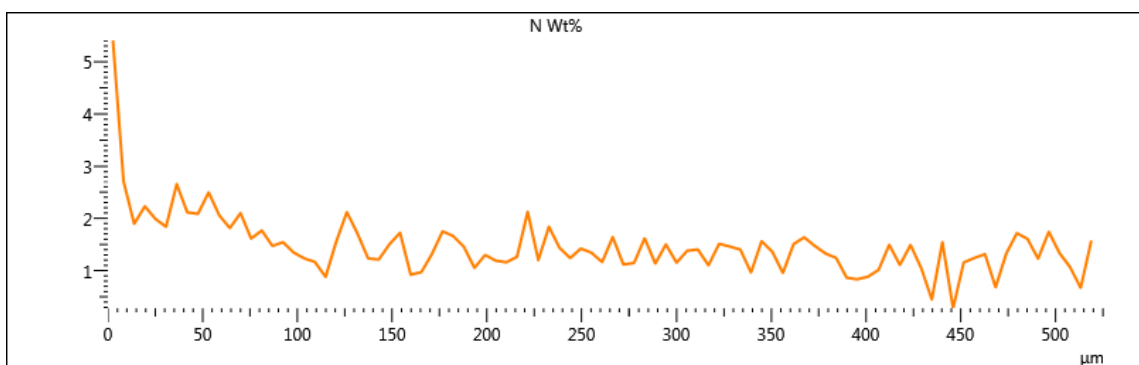


Obrázek 125MS1-N-940-490- 15000x střed

U MS1 lze pozorovat tenkou vrstvu (5-10) mikrometrů, která je tvořena intermetalickou sloučeninou železa a dusíku.

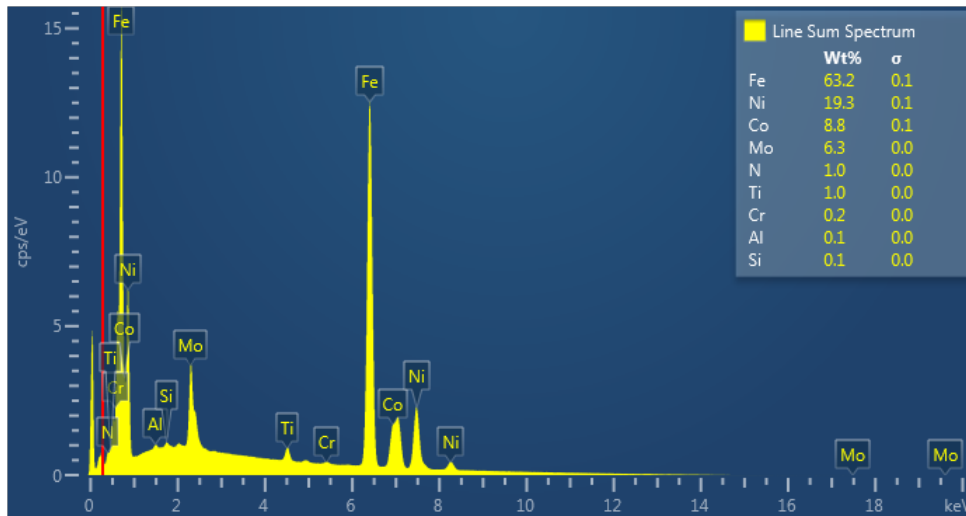


Obrázek 127MS1-N-940-490- 500x -linie3



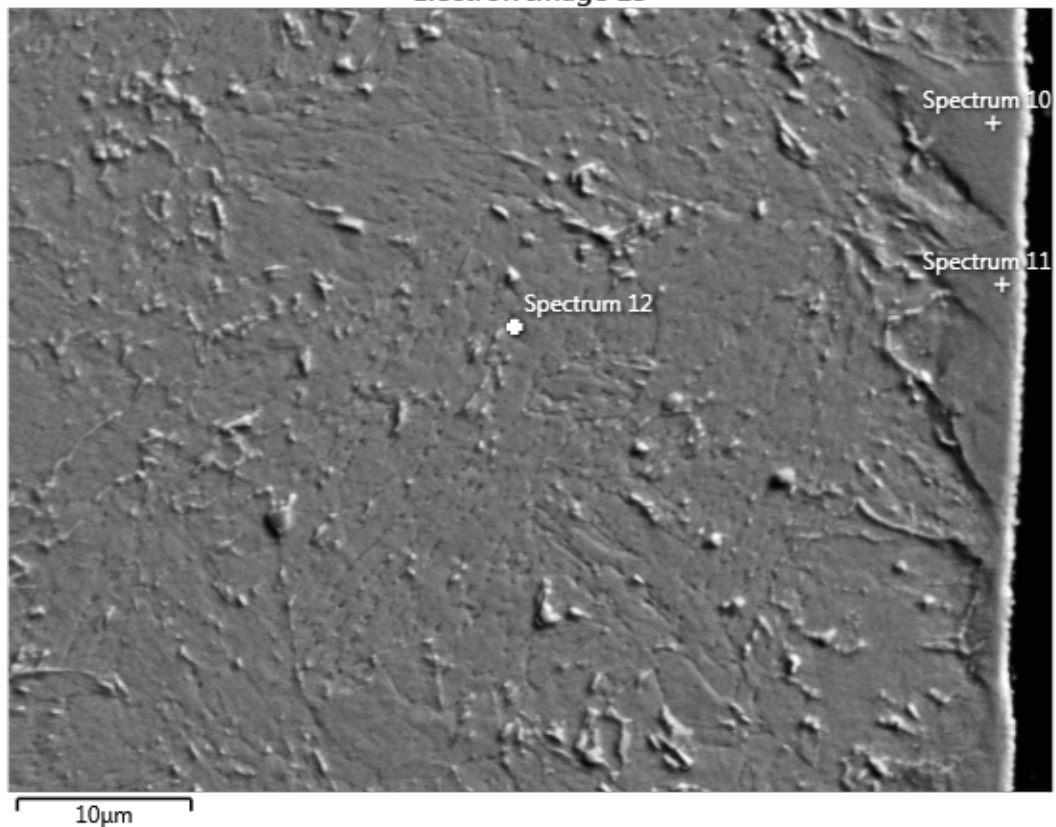
Obrázek 128MS1-N-940-490- 500x -linie- Dusík N

Obsah dusíku na povrchu se vyskytuje v řádech 5%, směrem do vrstvy rapidně klesá. Ve srovnání s materiálem HO, u materiálu MS1 byla zjištěna větší hloubka nitridační vrstvy.



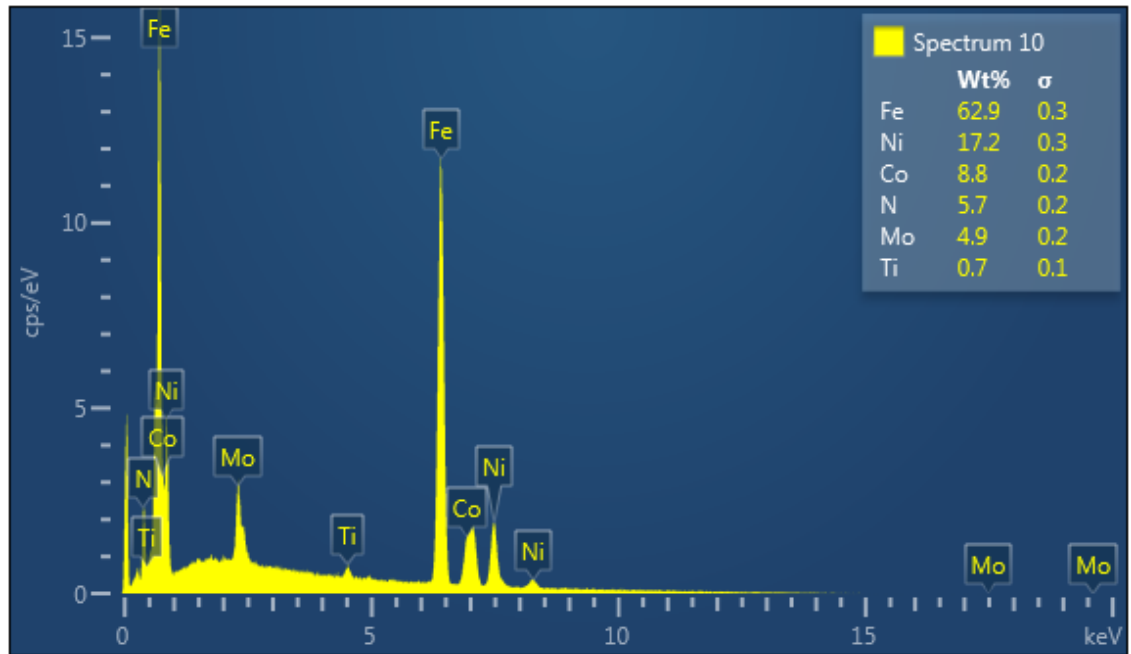
Obrázek 129MS1-N-940-490- 100x -EDS Spektrum

Electron Image 15



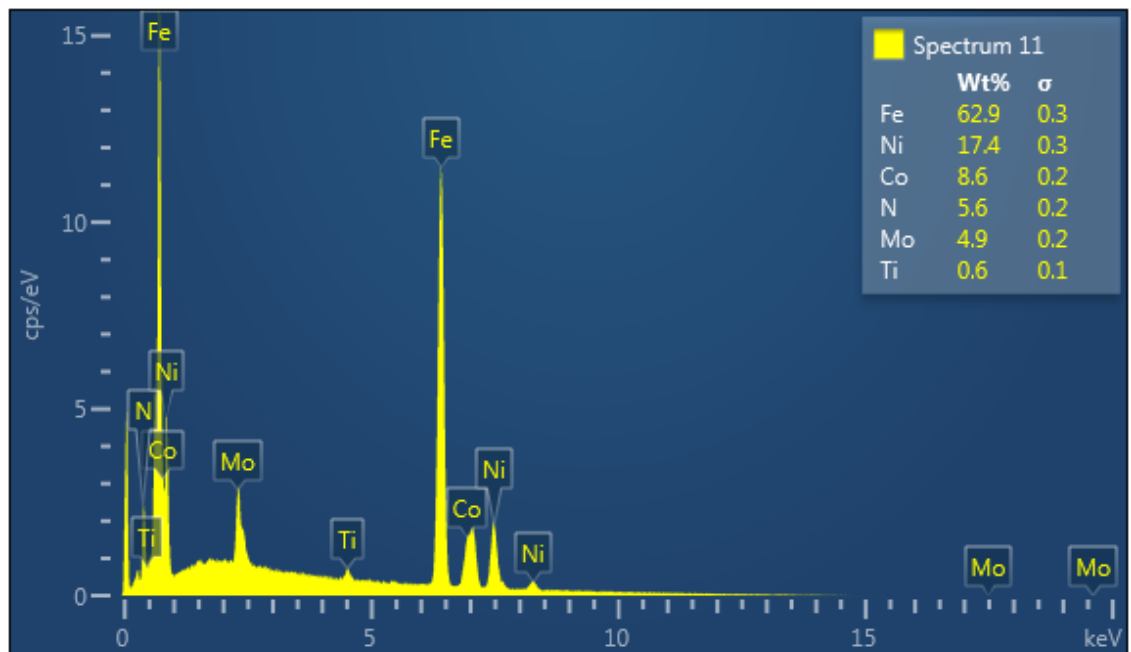
Obrázek 130MS1-N-940-490- 5000x body

Následující Spektra ukazují jaké zastoupení prvků je v určitých oblastech vzorku.



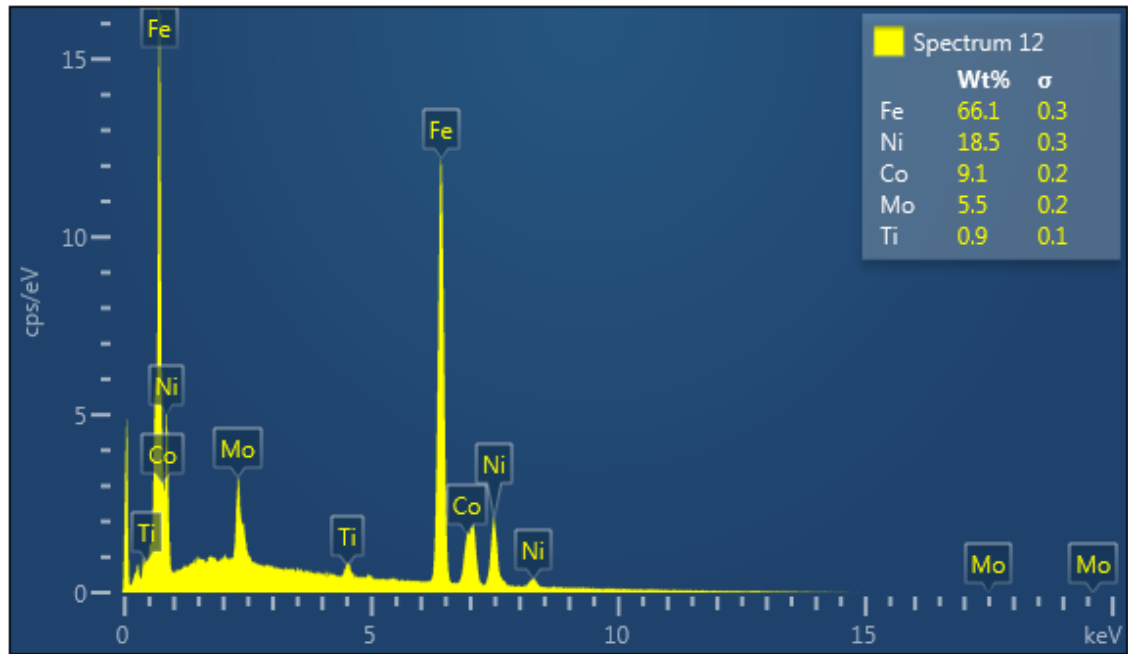
Obrázek 132MS1-N-940-490- 5000x Spektrum 10

Spektrum 10 ukazuje zastoupení prvků na povrchu nitridační vrstvy.



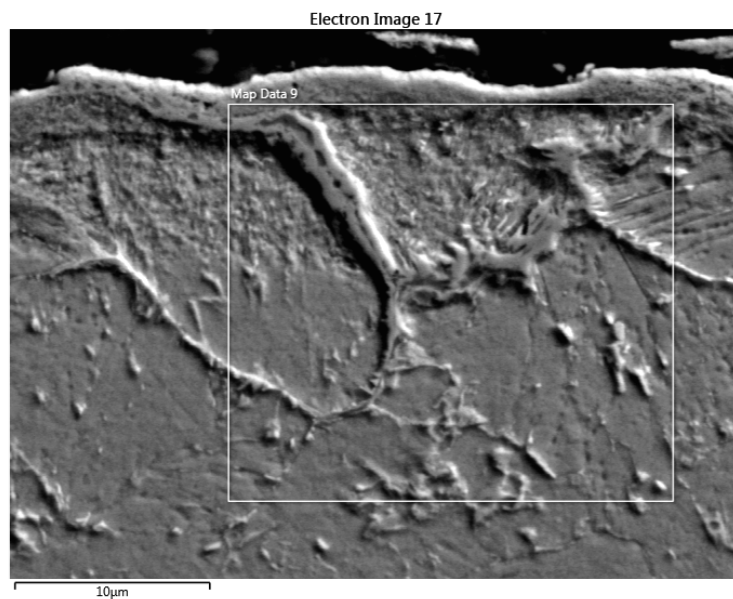
Obrázek 131MS1-N-940-490- 5000x Spektrum 11

Spektrum 11 ukazuje zastoupení prvků na povrchu nitridační vrstvy.



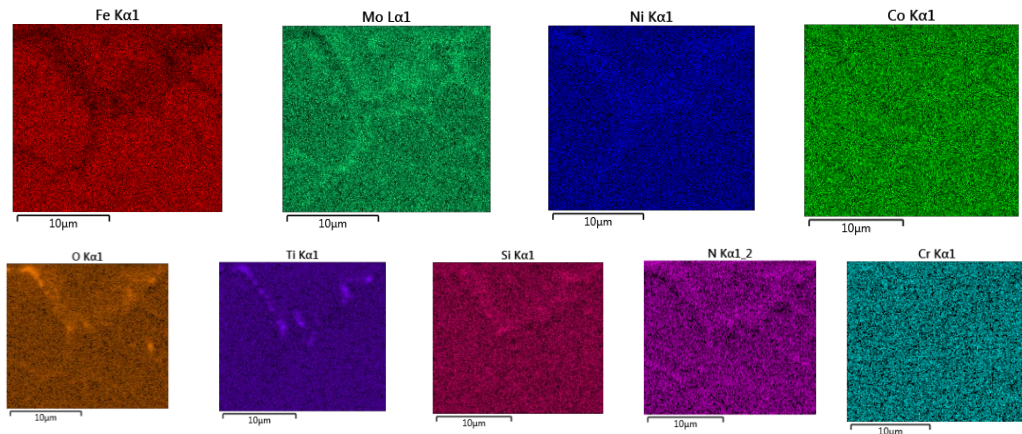
Obrázek 133MSI-N-940-490- 5000x Spektrum 12

Spektrum 12 ukazuje zastoupení prvků v centrální oblasti vzorku, kde se už nevyskytuje žádný dusík.

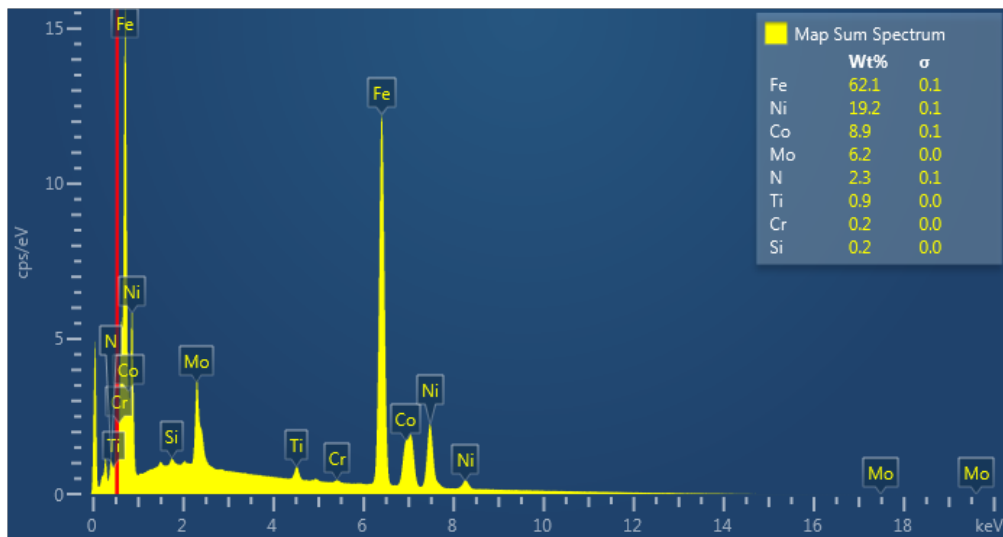


Obrázek 134MSI-N-940-490- 8000x-vrstva

EDS mapa prvků ukazuje zastoupení prvků ve vybrané povrchové oblasti vzorku.

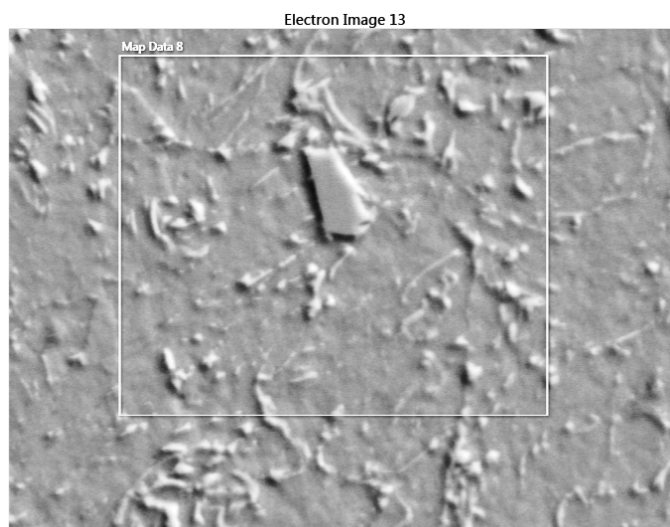


Obrázek 136MS1-N-940-490- 8000x-vrstva- EDS mapy prvků

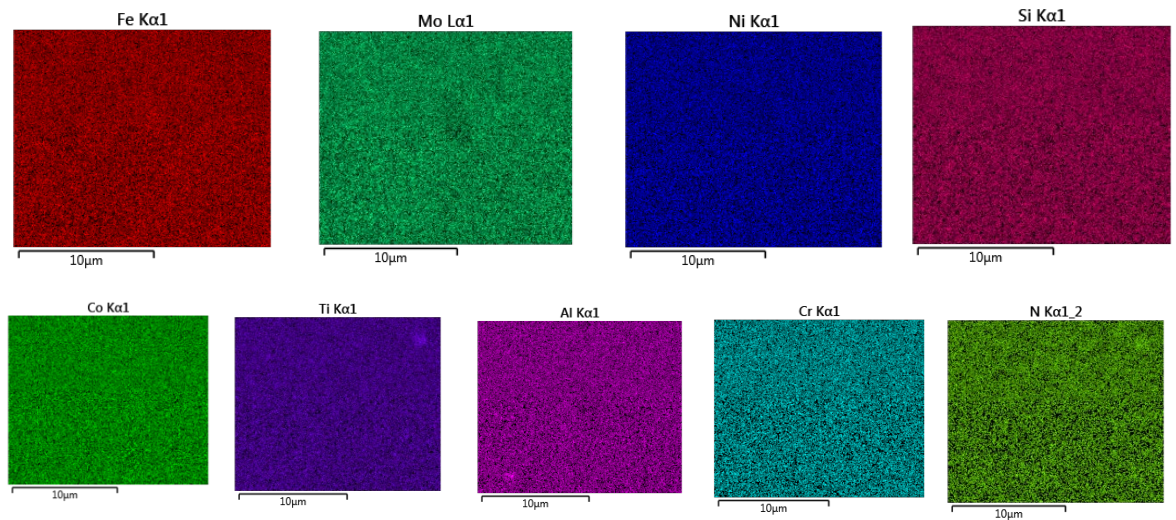


Obrázek 135MS1-N-940-490- 8000x-vrstva- EDS Spektrum

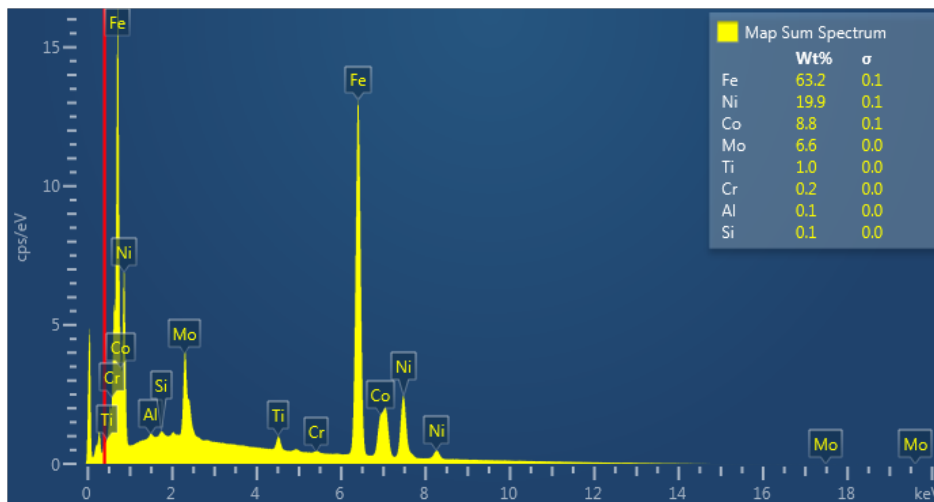
Vrstva obsahuje v analyzované oblasti 2,3% dusíku.



Obrázek 137MS1-N-940-490- 10000x-střed



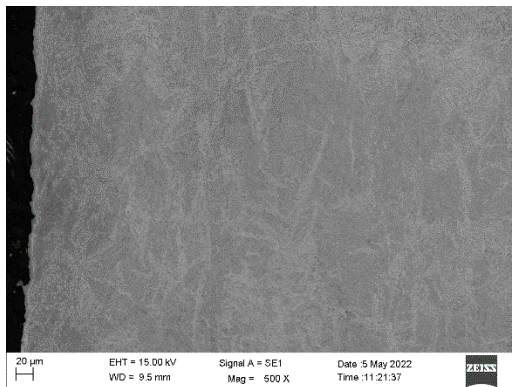
Obrázek 138MS1-N-940-490- 10000x-střed- EDS mapy prvků



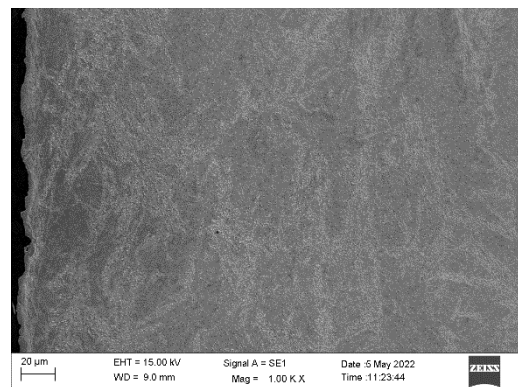
Obrázek 139MS1-N-940-490- 10000x-střed- EDS Spektrum

EDS Spektrum ukazuje, že ve středu vzorku se žádný dusík nevyskytuje.

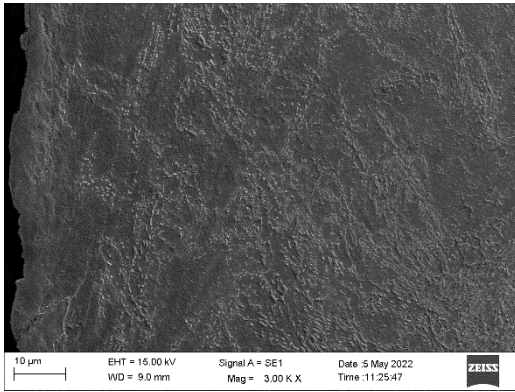
4.3.3.3 MS1-820-480-N



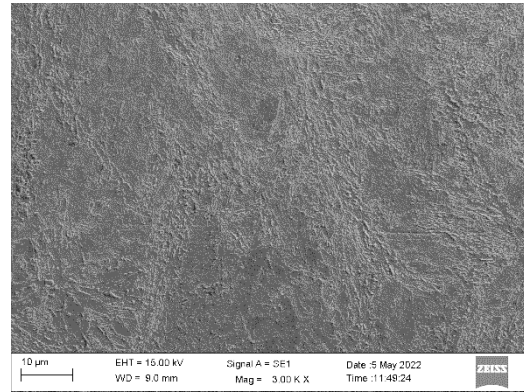
Obrázek 141MS1-N-820-490- 500x povrch



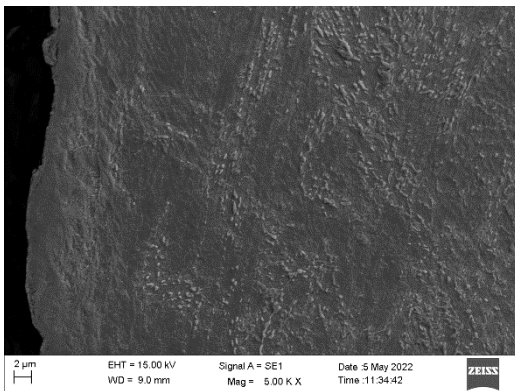
Obrázek 140MS1-N-820-490- 1000x povrch



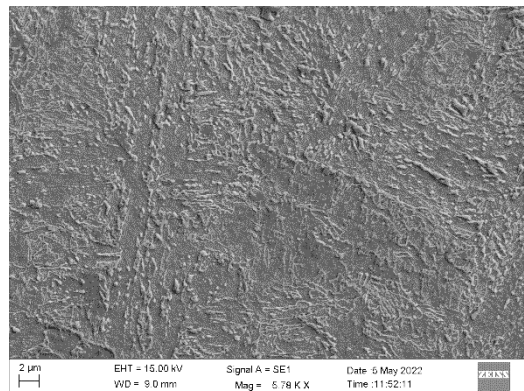
Obrázek 143MSI-N-820-490- 3000x povrch



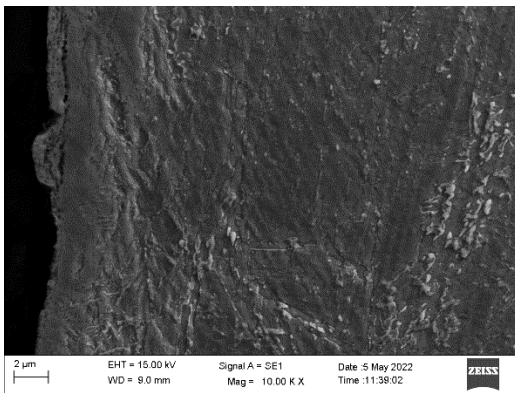
Obrázek 142MSI-N-820-490- 3000x střed



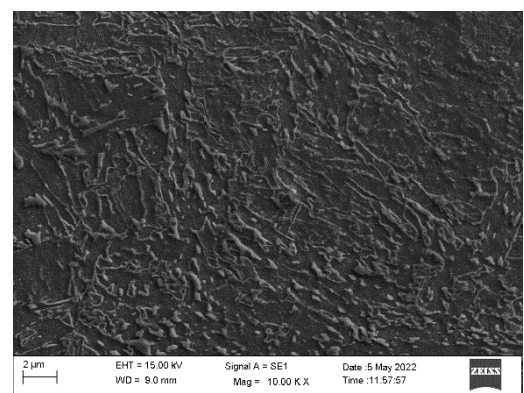
Obrázek 145MSI-N-820-490- 5000x povrch



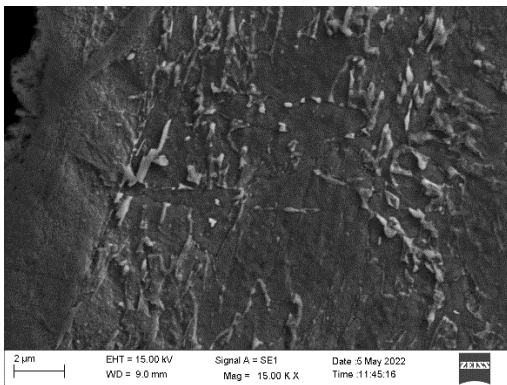
Obrázek 144MSI-N-820-490- 5000x střed



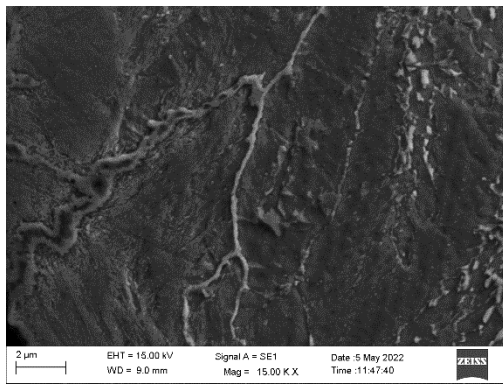
Obrázek 147MSI-N-820-490- 10000x povrch



Obrázek 146MSI-N-820-490- 10000x střed

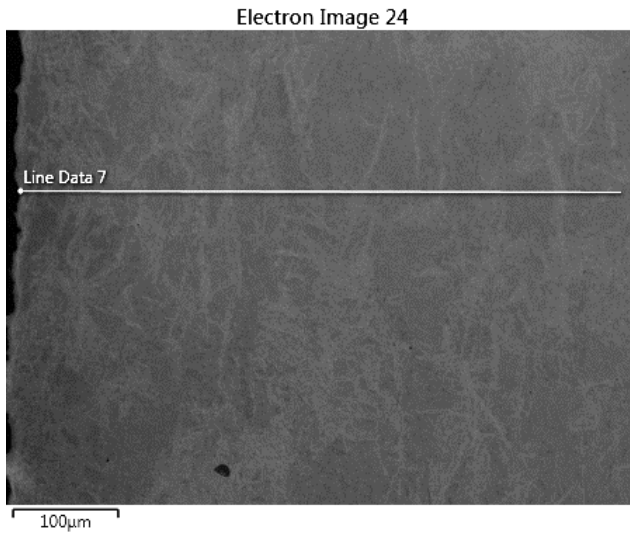


Obrázek 149MSI-N-820-490- 15000x povrch

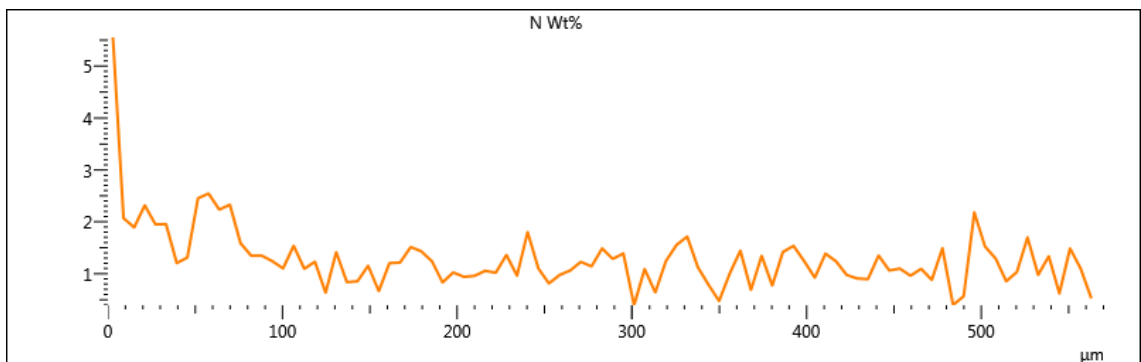


Obrázek 148MSI-N-820-490- 15000x povrch

U MS1 můžeme pozorovat tenkou vrstvu (5-10) mikrometrů, s výrazným zastoupením intermetalické sloučeniny železa a dusíku.

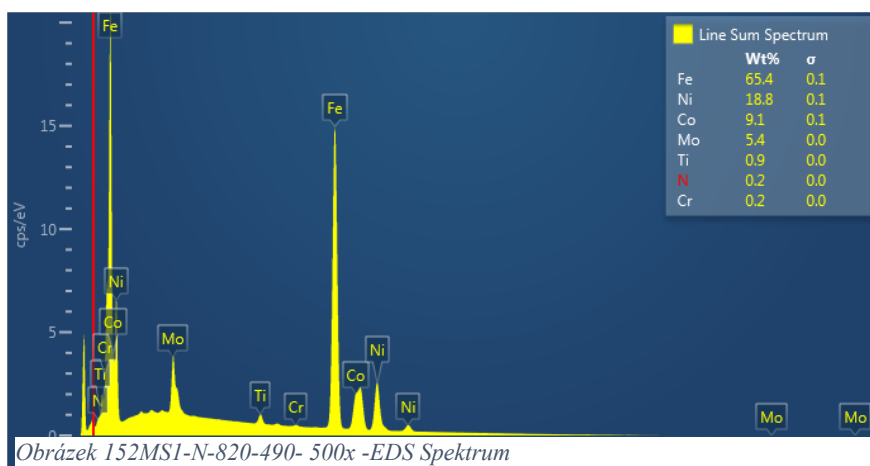


Obrázek 151MS1-N-820-490- 500x linie 7

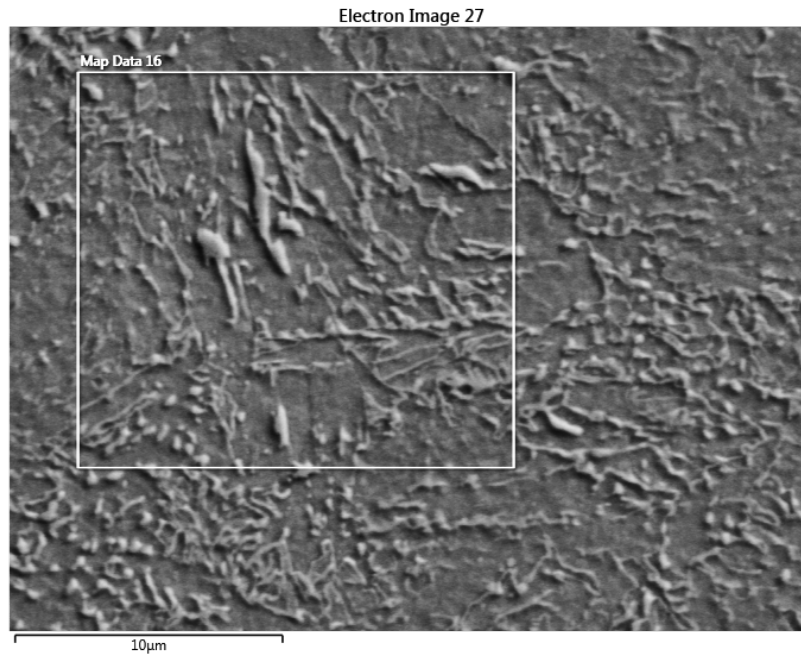


Obrázek 150MS1-N-820-490- 500x linie- Dusík N

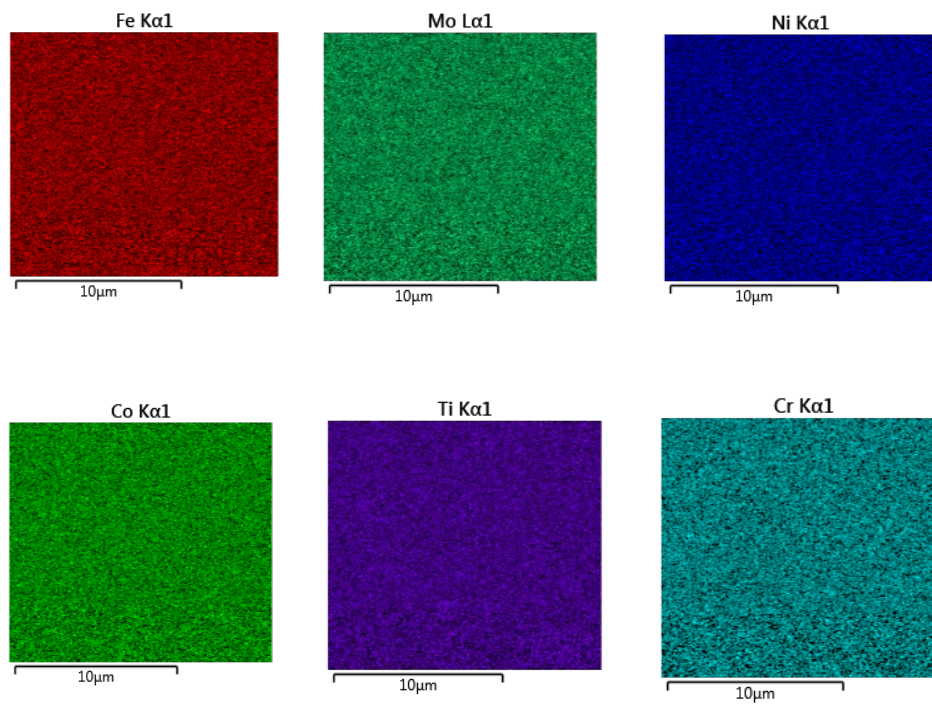
U materiálu MS1 je obsah dusíku na povrchu kolem 5%, s rostoucí hloubkou rychle klesá.



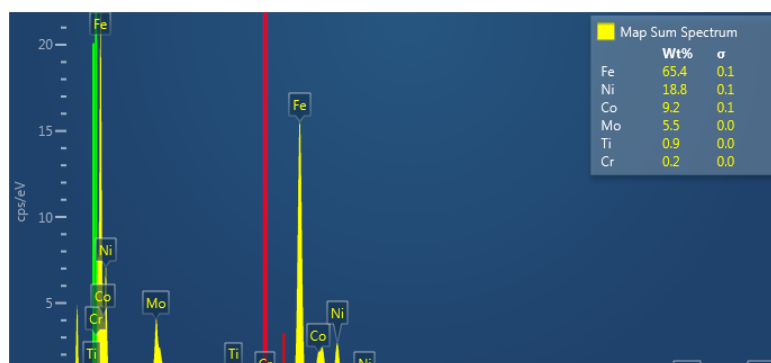
Obrázek 152MS1-N-820-490- 500x -EDS Spektrum



Obrázek 153MS1-N-490- 10000x-střed

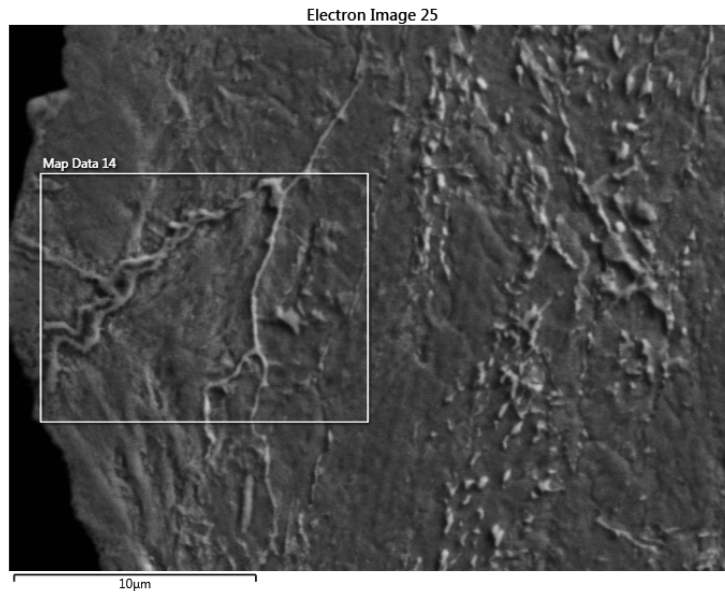


Obrázek 154MS1-N-490- 10000x-střed- EDS mapy prvků

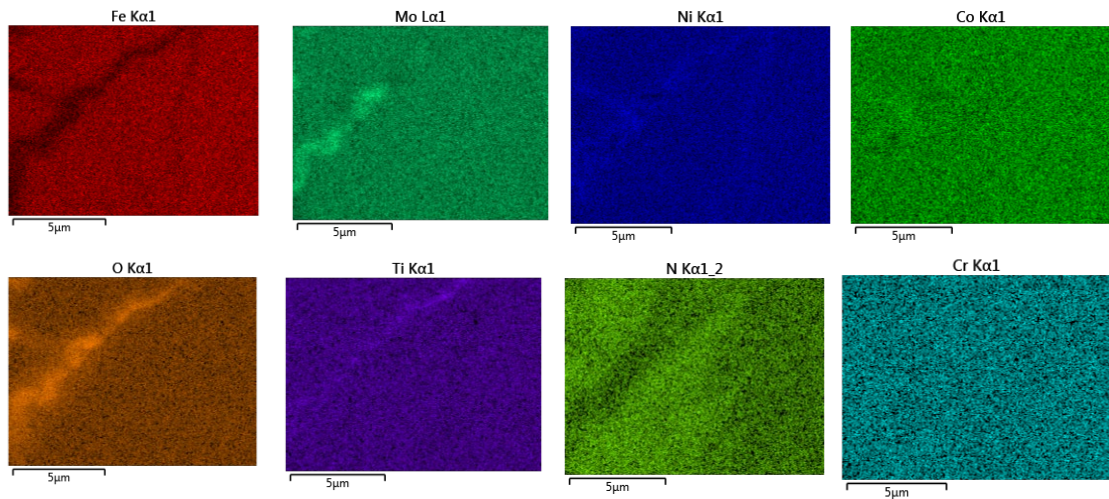


Obrázek 155MS1-N-490- 10000x-střed- EDS Spektrum

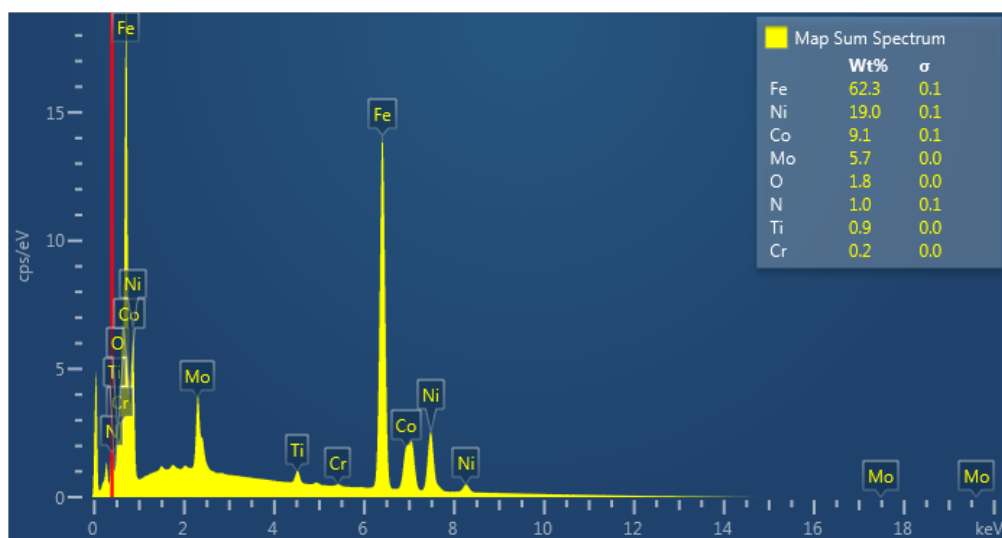
Ve středu vzorku se
nevyskytuje žádný dusík.



Obrázek 156MS1-N-490- 10000x-povrch



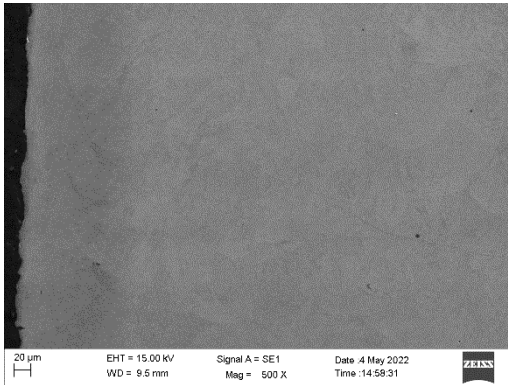
Obrázek 157MS1-N-490- 10000x-povrch- EDS mapy prvků



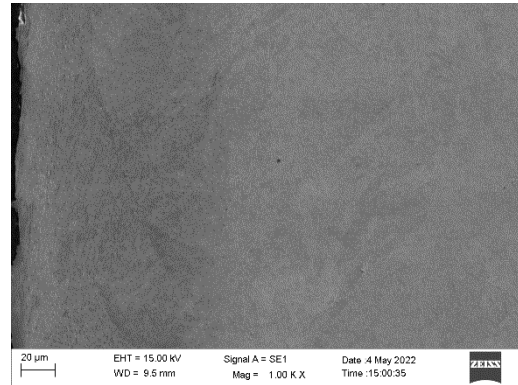
Obrázek 158MS1-N-490- 10000x-povrch- EDS Spektrum

Na povrchu vzorku bylo naměřeno 1% dusíku.

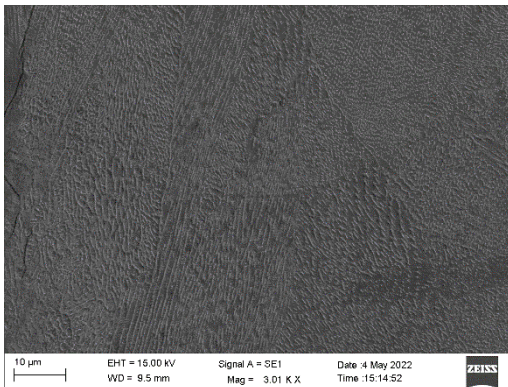
4.3.3.4 MS1-490-N



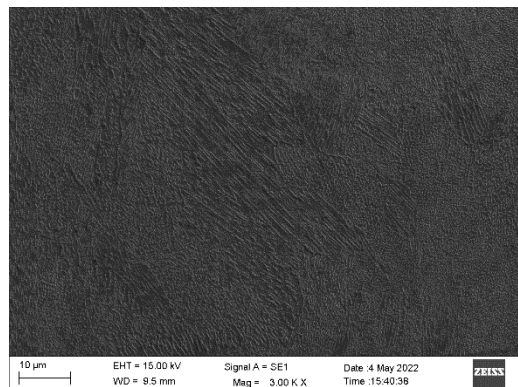
Obrázek 160MS1-N-490- 500x povrch



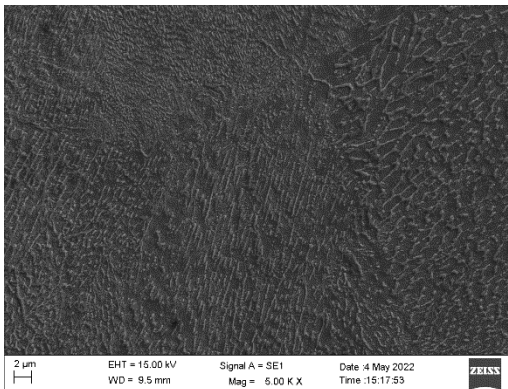
Obrázek 159MS1-N-490- 1000x povrch



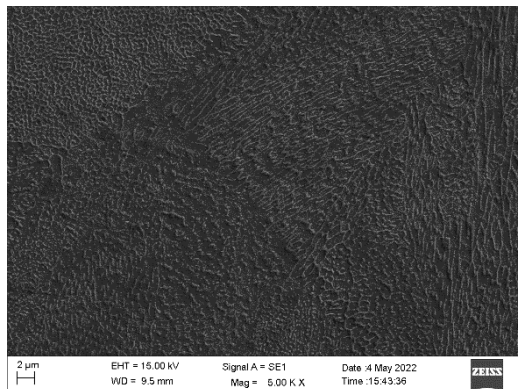
Obrázek 162MS1-N-490- 3000x povrch



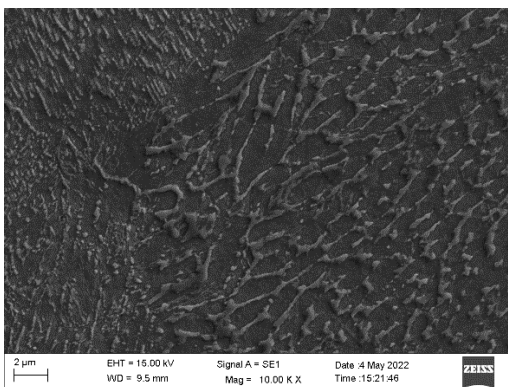
Obrázek 161MS1-N-490- 3000x střed



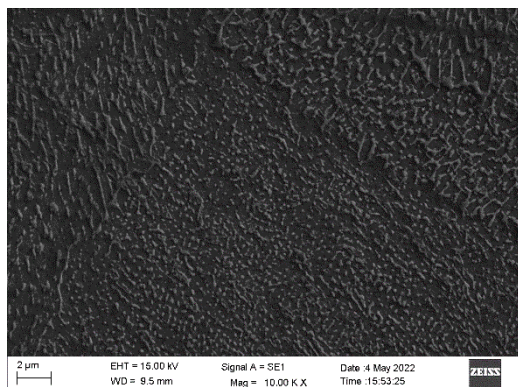
Obrázek 164MS1-N-490- 5000x povrch



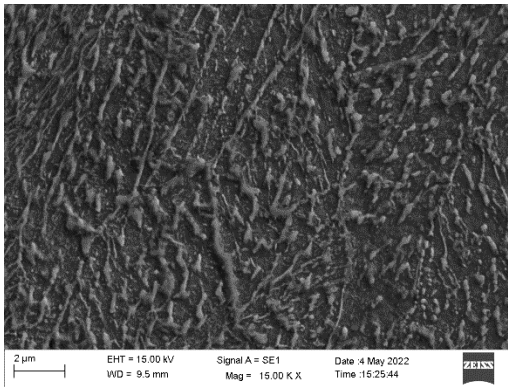
Obrázek 163MS1-N-490- 5000x střed



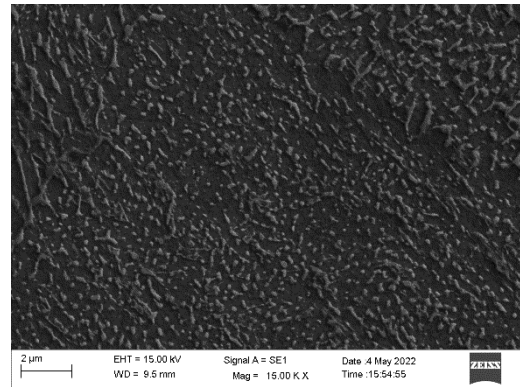
Obrázek 166MS1-N-490- 10000x povrch



Obrázek 165MS1-N-490- 10000x střed

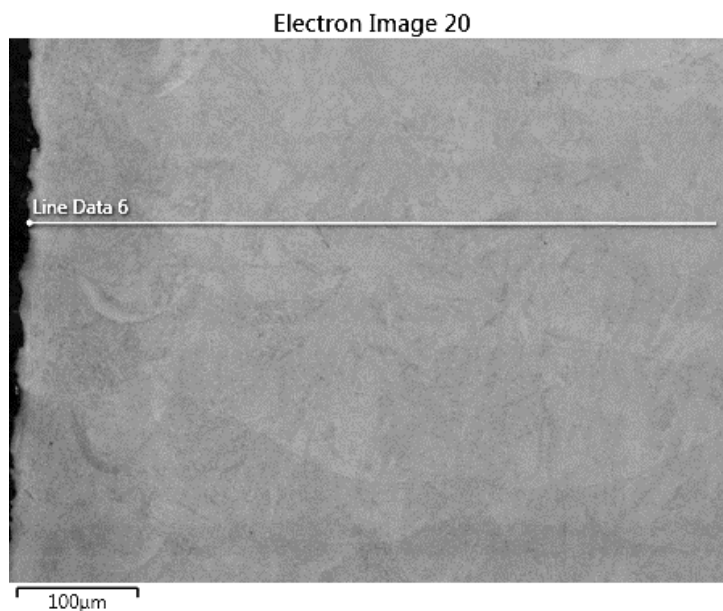


Obrázek 168MS1-N-490- 15000x povrch

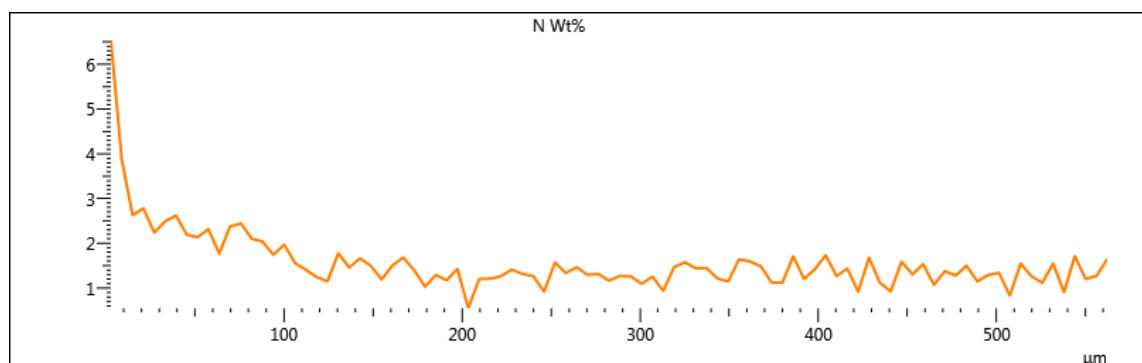


Obrázek 167MS1-N-490- 15000x střed

U materiálu MS1, který byl precipitačně vytvrzen, můžeme vidět nitridační vrstvu na povrchu, vyznačenou tmavší oblastí než střed materiálu.

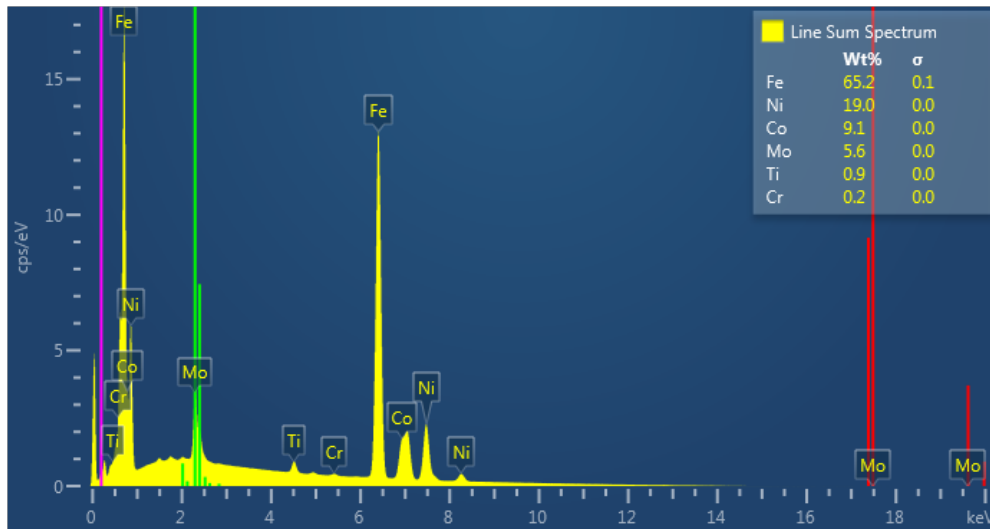


Obrázek 170MS1-N-490- 500x povrch-linie6

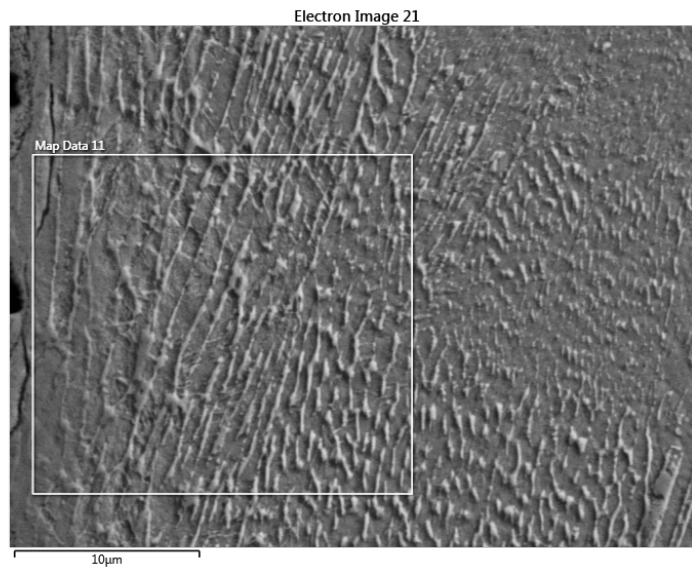


Obrázek 169MS1-N-490- 500x povrch-linie- Dusik N

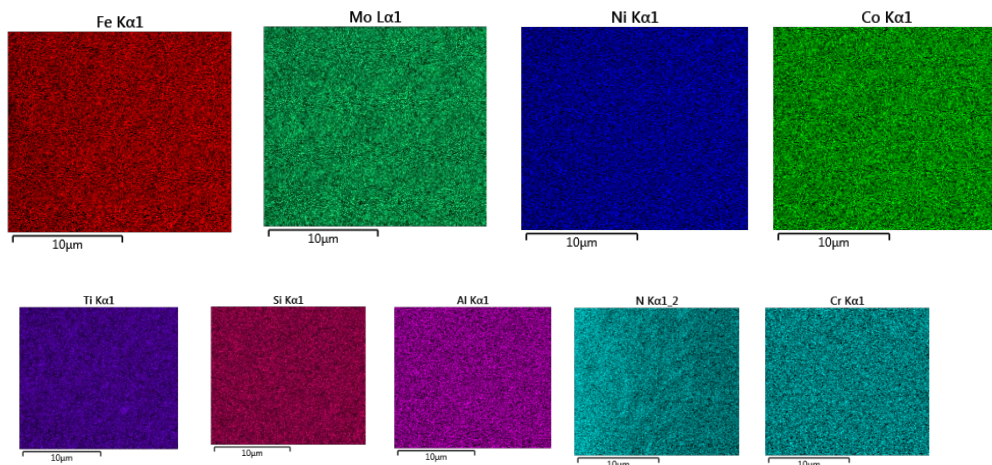
Na povrchu je dusík obsažen 6,5-6%, kdy rapidně klesá a ustaluje se ve hloubce 0,2mm.



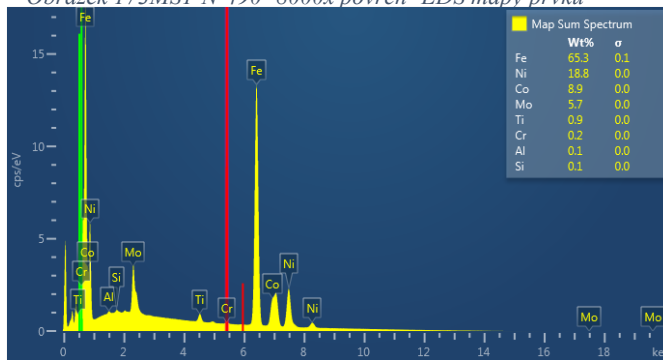
Obrázek 171MS1-N-490- 500x povrch-linie- EDS Spektrum



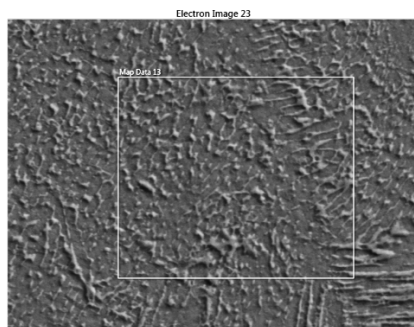
Obrázek 172MS1-N-490- 8000x povrch



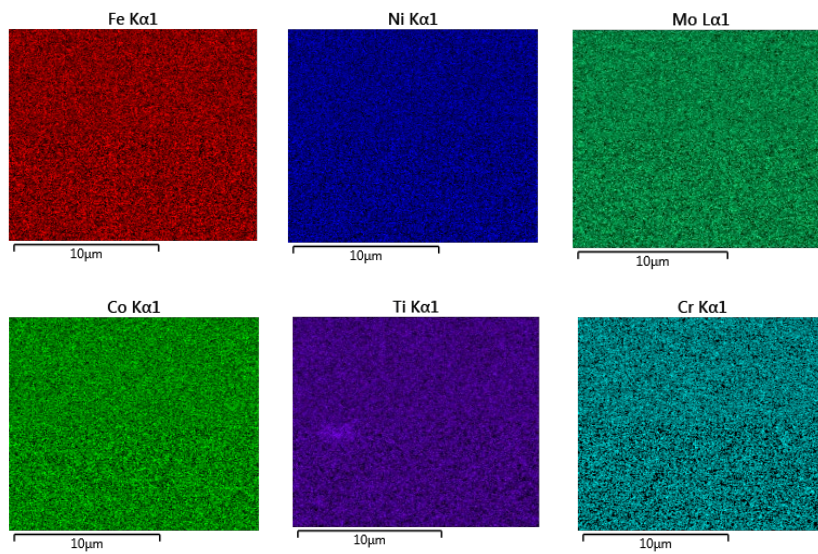
Obrázek 173MS1-N-490- 8000x povrch- EDS mapy prvků



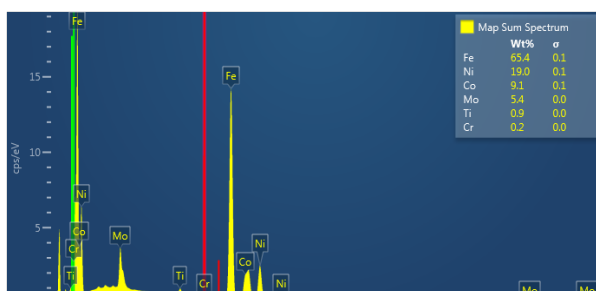
Obrázek 174MS1-N-490- 8000x povrch- EDS Spektrum



Obrázek 175MS1-N-490- 10000x střed



Obrázek 176MS1-N-490- 10000x střed- EDS mapy prvků



Obrázek 177MS1-N-490- 10000x střed- EDS Spektrum

4.4 Zkouška opotřebení

Pro zkoušku opotřebení byl použit Tribometr Anton Paar TBR3.

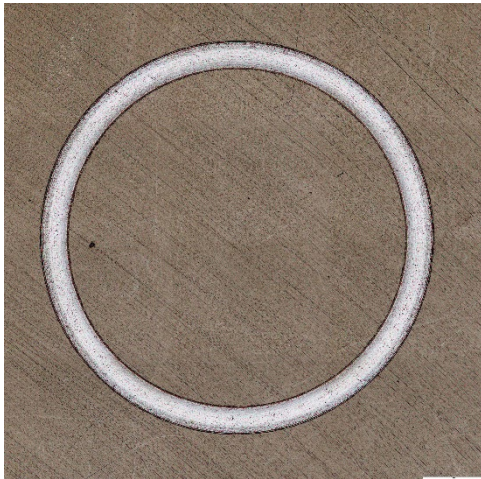
Testy opotřebení využívající metodu pin/ball-on-disk s možností měření koeficientu tření a následného hodnocení opotřebení v souladu s ASTM G99, ASTM G133, and DIN 50324.

Opotřebení lze hodnotit metodou hmotnostních úbytků nebo objemem odstraněného materiálu (z tvaru drážky), a to za sucha nebo v mazivu.

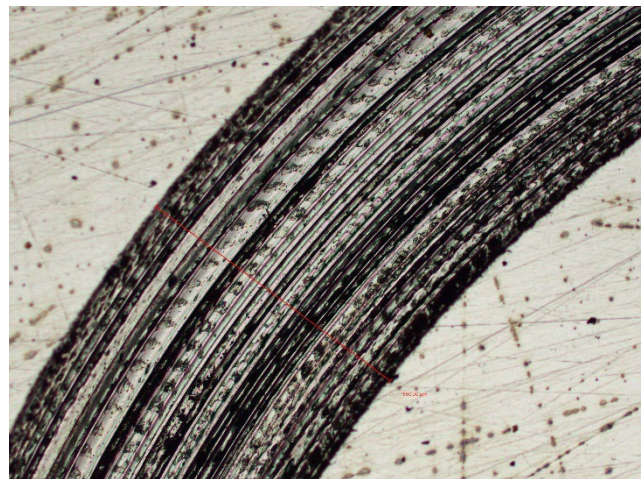
U tribometru byly použity následující pracovní parametry:

- Kulička o průměru 6 mm, z materiálu Al_2O_3
- Zátěž 10 N
- Počet cyklů 10 000
- Otáčky motoru 300 rpm
- Rádus 3 mm

Vzniklá drážka ve tvaru mezikruží se proměří v 8 místech po 45° a zprůměruje, z následující vzdálenosti můžeme určit odebraný objem.



Obrázek 179 Drážka po tribologii



Obrázek 178 Drážka po tribologii 2

$$V = \frac{\pi * (\text{poloměr rotace, mm}) * (\text{šířka drážky, mm})}{6 * (\text{poloměr kuličky, mm})}$$

Z vypočteného objemu můžeme vypočítat Wear rate (míru opotřebení).

$$W = \text{Wear rate} = \frac{V}{F * (\text{Třecí dráha, mm})}$$

4.4.1 MS1

4.4.1.1 Tepelné zpracování

- Precipitace 490°C/6 hodin.
- 940°C/2 hodiny, 490°C/6 hodin.
- 820°C/1 hodiny, 490°C/6 hodin.

Tabulka váhového úbytku

Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek (g)
MS1- 820°C/1 hodiny, 490°C/6 hodin	1.1	24,8000	24,7974	0,0026
	1.2	21,8341	21,8314	0,0027
	1.3	24,4509	24,4478	0,0031
MS1-940°C/2 hodiny, 490°C/6 hodin	2.1	25,2166	25,2117	0,0051
	2.2	25,6833	25,6791	0,0058
	2.3	22,6750	22,6720	0,003
MS1- Precipitace 490°C/6 hodin	3.1	19,1317	19,1299	0,0018
	3.2	23,5290	23,5271	0,0019
	3.3	24,4173	24,4148	0,0025

Tabulka míry opotřebení

Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
MS1	Výchozí stav	1,75049 *10 ⁻⁷
	490°C/ 6 hodin	1,823603333 *10 ⁻⁷
	940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	1,918596667 *10 ⁻⁷
	820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,78249 *10 ⁻⁷

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

4.4.1.2 Nitridování

- 1. Výchozí stav
- 2. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
- 3. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin
- 4. 490°C/ 6 hodin

Tabulka váhového úbytku

Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek(g)
MS1- Výchozí stav	1.1	28,3068	28,3060	0,0008
	1.2	28,3060	28,3057	0,0003
MS1- 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	2.1	30,5130	30,5120	0,001
	2.2	30,5120	30,5117	0,0003
MS1- 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	3.1	20,7716	20,7708	0,0008
	3.2	20,7708	20,7705	0,0003
MS1- 490°C/ 6 hodin	4.1	22,8409	22,8404	0,0005
	4.2	22,8404	22,8401	0,0003

Tabulka míry opotřebení

Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
MS1	N- Výchozí stav	9,02359 * 10 ⁻⁸
	N-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	9,116685 * 10 ⁻⁸
	N-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,161844 * 10 ⁻⁷
	N-490°C/ 6 hodin	9,333885 * 10 ⁻⁸

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

Fotodokumentace drážek po zkoušce opotřebení



Obrázek 181 1.1 MS1 -Výchozí stav- Nitridace



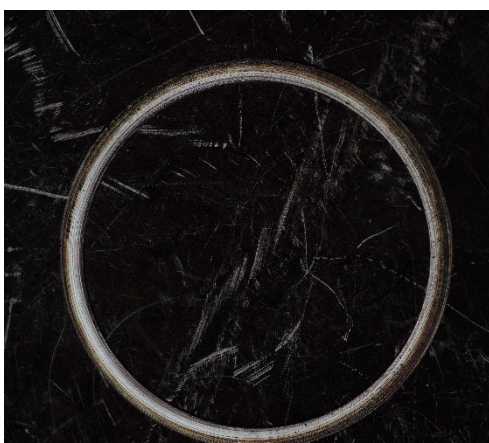
Obrázek 180 1.2 MS1 -Výchozí stav- Nitridace



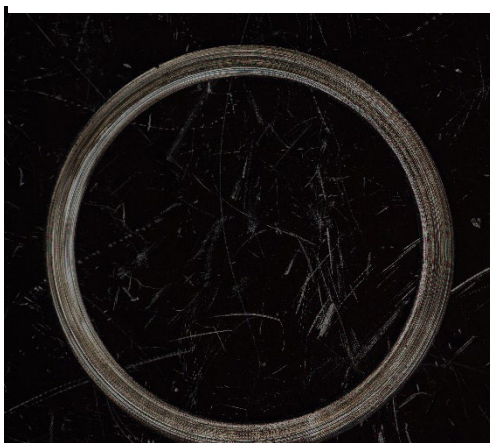
Obrázek 183 2.1 MS1 -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace



Obrázek 182 2.2 MS1 -940°C/2 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace



Obrázek 185 3.1 MS1 -820°C/1 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace



Obrázek 184 3.2 MS1 -820°C/1 h, 490°C/ 6 h-
Nitridace



Obrázek 187 4.1 MS1 - 490°C/ 6 h- Nitridace



Obrázek 186 4.2 MS1 - 490°C/ 6 h- Nitridace

4.4.1.3 Kuličkování

- 5. Výchozí stav
- 6. 490°C/ 6 hodin
- 7. 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin
- 8. 820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin

Tabulka váhového úbytku

Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek(g)
MS1- Výchozí stav	5.1	57,0466	57,0450	0,0016
	5.2	57,0450	57,0433	0,0017
MS1-490°C/ 6 hodin	6.1	52,1753	52,1739	0,0014
	6.2	52,1739	52,1729	0,001
MS1-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	7.1	53,2799	53,2759	0,004
	7.2	53,2759	53,2742	0,0017
MS1-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	8.1	50,5842	50,5786	0,0056
	8.2	50,5786	50,5769	0,0017

Tabulka míry opotřebení

Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
MS1	K- Výchozí stav	1,979585 *10 ⁻⁷
	K-490°C/ 6 hodin	1,63236 *10 ⁻⁷
	K-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	1,736195 *10 ⁻⁷
	K-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,86893 *10 ⁻⁷

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

4.4.2 HO

4.4.2.1 Kalení a popouštění

- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 950°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1000°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 250°C/2 hodiny
- 1050°C/30min, chladicí medium voda, popouštění 350°C/2 hodiny

Tabulka váhového úbytku

Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek (g)
950°C/30min - 250°C/2 hodiny	V	68,5968	68,5927	0,0041
	S	68,5927	68,5894	0,0033
950°C/30min - 350°C/2 hodiny	V	68,7659	68,7647	0,0012
	S	68,7647	68,7634	0,0013
1000°C/30min - 250°C/2 hodiny	V	68,6188	68,6162	0,0026
	S	68,6162	68,6145	0,0017
1000°C/30min - 350°C/2 hodiny	V	68,8745	68,8727	0,0018
	S	68,8727	68,8711	0,0016
1050°C/30min - 250°C/2 hodiny	V	68,2672	68,2654	0,0018
	S	68,2654	68,2640	0,0014
1050°C/30min - 350°C/2 hodiny	V	68,8984	68,8955	0,0029
	S	68,8955	68,8934	0,0021

Tabulka míry opotřebení

Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
HO	Výchozí stav	1,79471 *10 ⁻⁷
	950°C/30min - 250°C/2 hodiny	1,50856 *10 ⁻⁷
	950°C/30min - 350°C/2 hodiny	1,666585 *10 ⁻⁷
	1000°C/30min - 250°C/2 hodiny	1,73552 *10 ⁻⁷
	1000°C/30min - 350°C/2 hodiny	1,78939 *10 ⁻⁷
	1050°C/30min - 250°C/2 hodiny	1,741035 *10 ⁻⁷

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

4.4.2.2 Nitridování

- 1. Výchozí stav
- 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
- 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 500°C/ 30 min
- 4. Kaleno 1000°C/30 min

Tabulka váhového úbytku

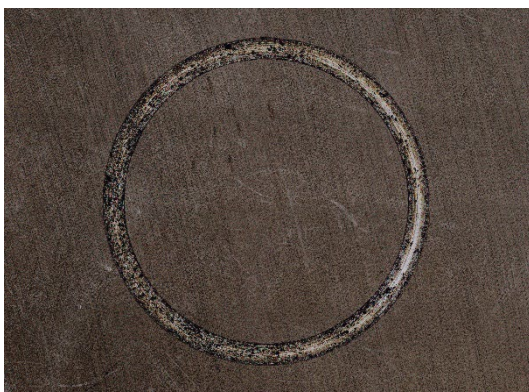
Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek (g)
HO- Výchozí stav	V	65,5929	65,5923	0,0007
	S	65,5923	65,5920	0,0003
HO- 1000°C/30 min- 250°C/ 2 hodin	V	66,5138	66,5127	0,0011
	S	66,5127	66,5123	0,0004
HO- 1000°C/30 min- 500°C/ 30 minut	V	66,8755	66,8743	0,0012
	S	66,8743	66,8739	0,0004
HO- 1000°C/30 min	V	65,3839	65,3829	0,001
	S	65,3829	65,3824	0,0005

Tabulka míry opotřebení

Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
HO	N-Výchozí stav	1,228845 *10 ⁻⁷
	N-1000°C/30 min-250°C/ 2 hodin	1,160035 *10 ⁻⁷
	N-1000°C/30 min-500°C/ 30 minut	1,246115 *10 ⁻⁷
	N-1000°C/30 min	1,1628 *10 ⁻⁷

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

Fotodokumentace drážek po zkoušce opotřebení nitrídaných vzorků



Obrázek 189 2. HO -1000°C/30 min, 250°C/ 2 h-
Nitridace -V



Obrázek 188 2. HO -1000°C/30 min,
250°C/ 2 h- Nitridace-S



Obrázek 1933. HO -1000°C/30 min, 500°C/ 2 h-
Nitridace-V



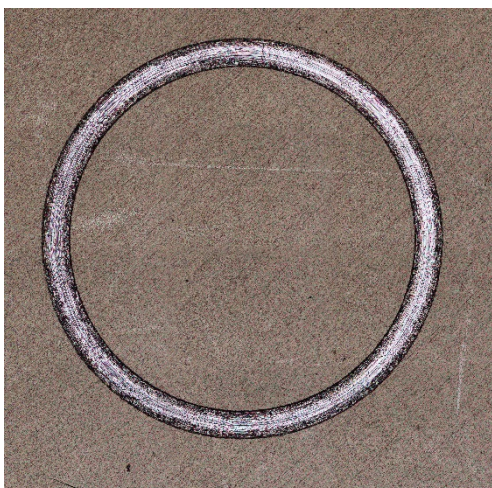
Obrázek 1903. HO -1000°C/30 min, 500°C/ 2 h-
Nitridace-S



Obrázek 192 4. HO - 1000°C/30 min- Nitridace-V



Obrázek 191 4. HO - 1000°C/30 min- Nitridace-S



Obrázek 194 1. HO -Výchozí stav- Nitridace-V



Obrázek 195 1. HO -Výchozí stav- Nitridace-S

4.4.2.3 Kuličkování

- 1. Výchozí stav
- 2. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 250°C/ 2 hodin
- 3. Kaleno 1000°C/30 min, popouštěno 350°C/ 2 hodin

Tabulka váhového úbytku

Název vzorku	č.vzorku	Váha před (g)	Váha po (g)	Váhový úbytek(g)
HO-K-VS	1	67,5556	675518	0,0038
HO-K-1000°C/30 min - 250°C/ 2 hodin	2	68,0369	68,0338	0,0031
HO-K-1000°C/30 min - 350°C/ 2 hodin	3	67,9677	67,9633	0,0044

Tabulka míry opotřebení

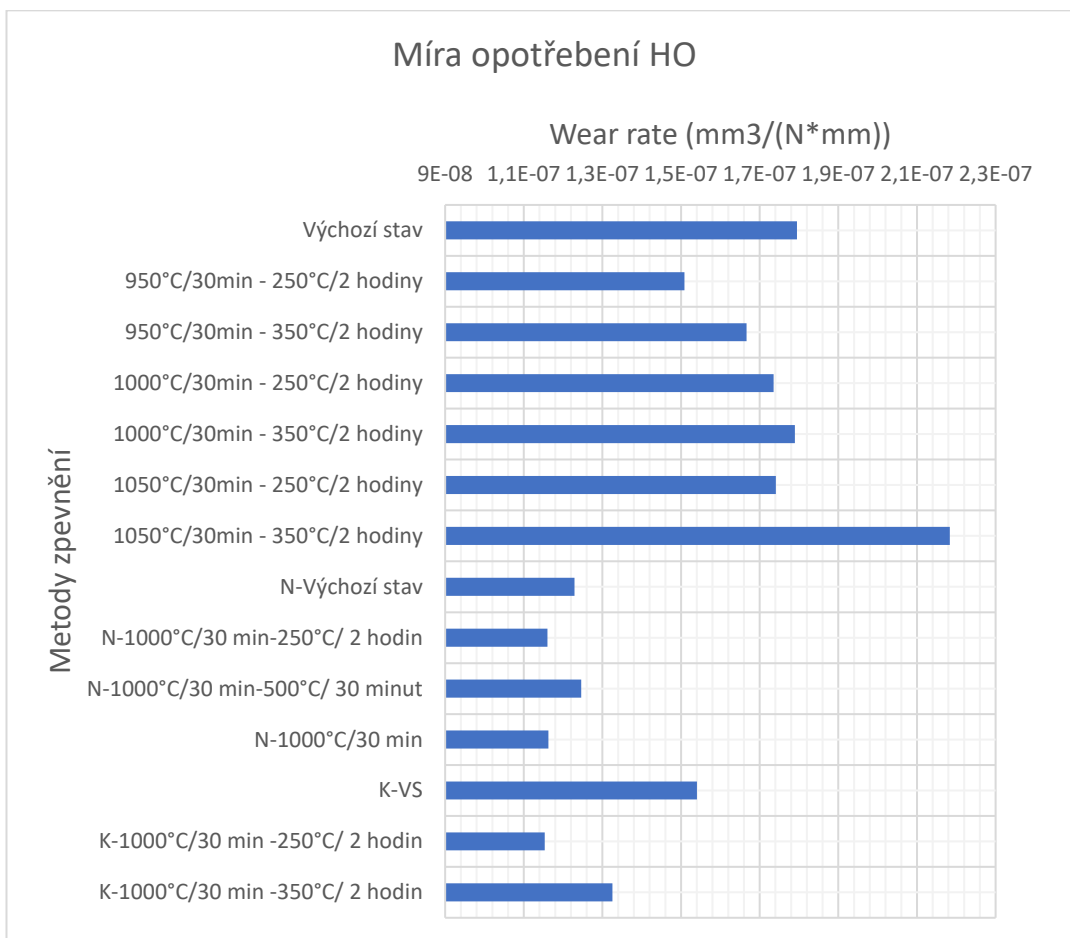
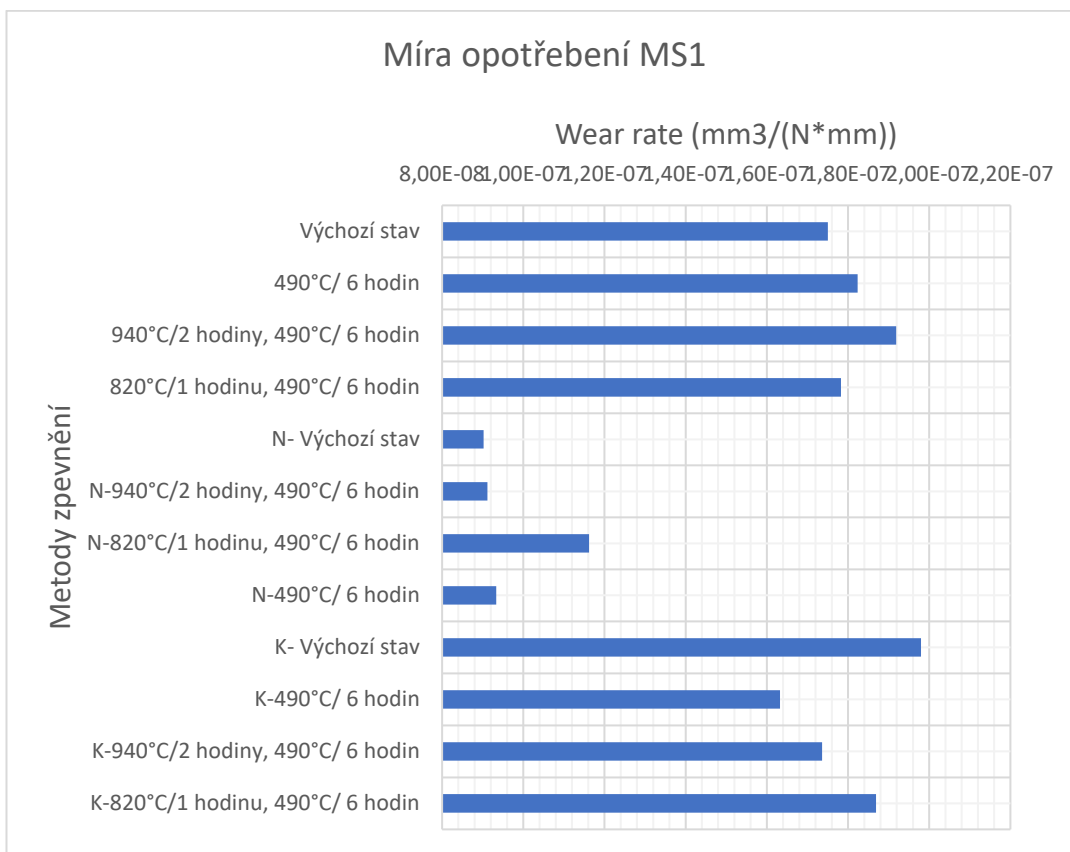
Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
HO	K-VS	1,5403*10 ⁻⁷
	K-1000°C/30 min -250°C/ 2 hodin	1,15315*10 ⁻⁷
	K-1000°C/30 min -350°C/ 2 hodin	1,32537*10 ⁻⁷

Přesné hodnoty měření a výpočtu v příloze 1

5 Diskuze výsledků

Tabulka srovnání míry opotřebení

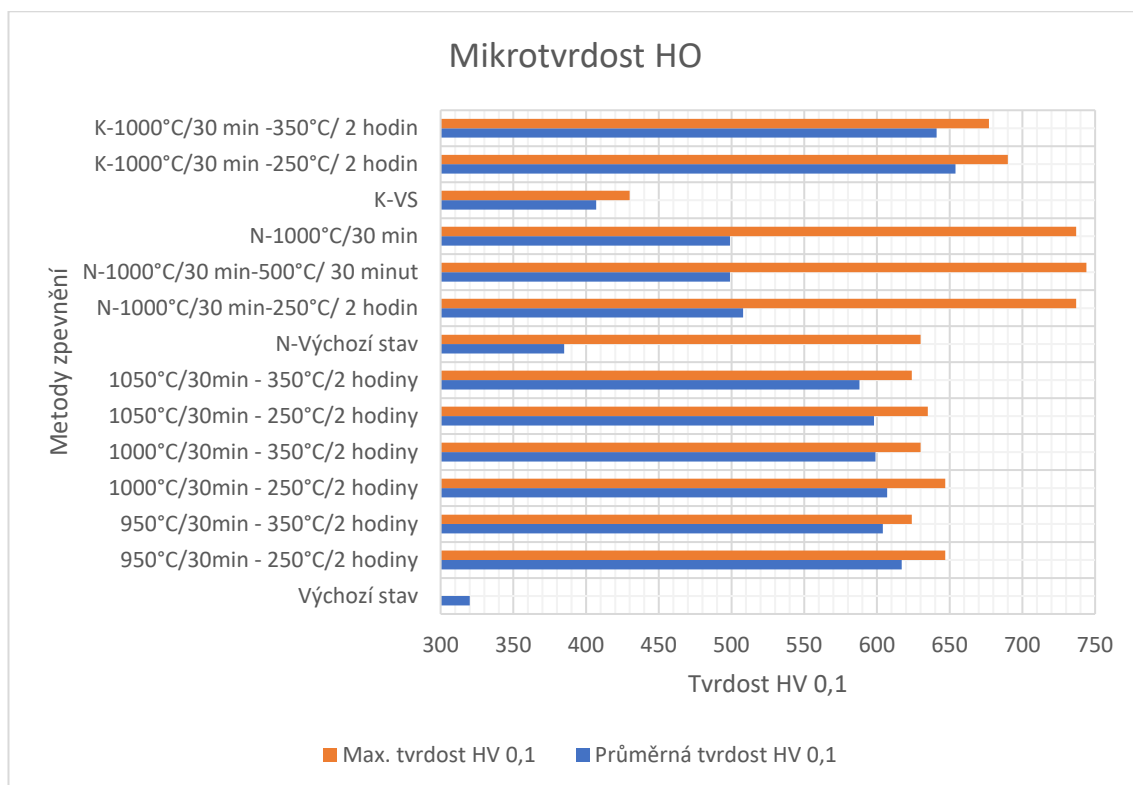
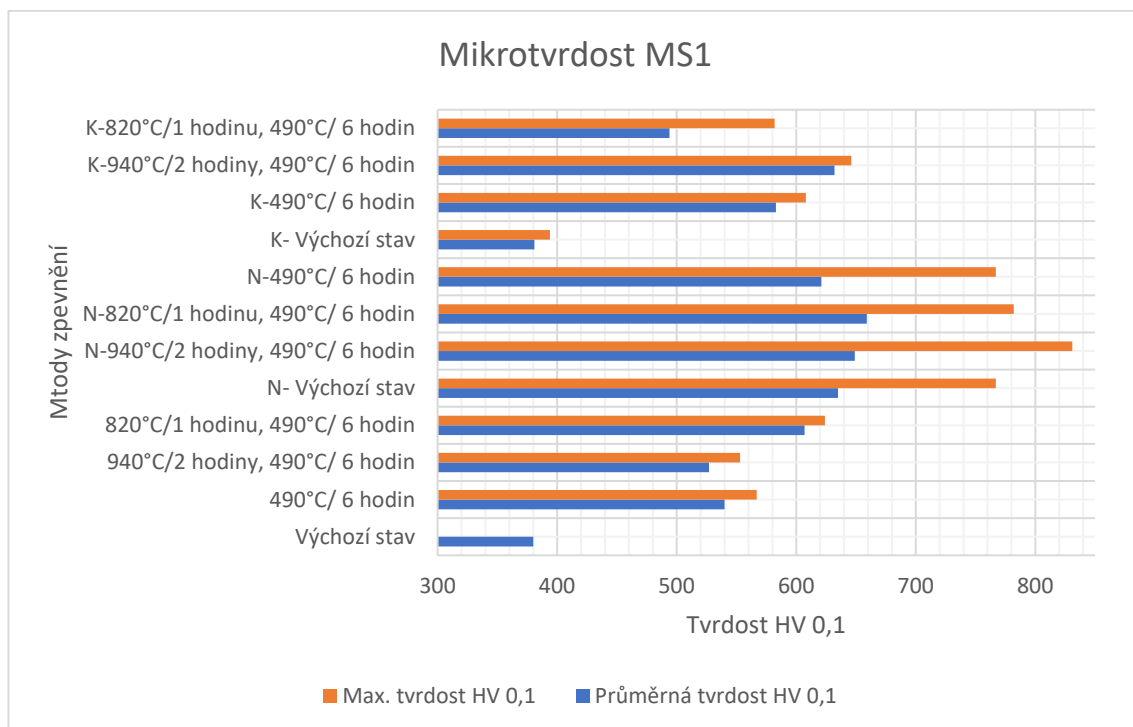
Materiál	Provedené metody zpevnění	Wear rate (mm ³ /(N*mm))
MS1	Výchozí stav	1,75049 *10 ⁻⁷
	490°C/ 6 hodin	1,823603333 *10 ⁻⁷
	940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	1,918596667 *10 ⁻⁷
	820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,78249 *10 ⁻⁷
	N- Výchozí stav	9,02359 *10 ⁻⁸
	N-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	9,116685 *10 ⁻⁸
	N-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,161844 *10 ⁻⁷
	N-490°C/ 6 hodin	9,333885 *10 ⁻⁸
	K- Výchozí stav	1,979585 *10 ⁻⁷
	K-490°C/ 6 hodin	1,63236 *10 ⁻⁷
	K-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	1,736195 *10 ⁻⁷
	K-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	1,86893 *10 ⁻⁷
	HO	Výchozí stav
950°C/30min - 250°C/2 hodiny		1,50856 *10 ⁻⁷
950°C/30min - 350°C/2 hodiny		1,666585 *10 ⁻⁷
1000°C/30min - 250°C/2 hodiny		1,73552 *10 ⁻⁷
1000°C/30min - 350°C/2 hodiny		1,78939 *10 ⁻⁷
1050°C/30min - 250°C/2 hodiny		1,741035 *10 ⁻⁷
1050°C/30min - 350°C/2 hodiny		2,18342 *10 ⁻⁷
N-Výchozí stav		1,228845 *10 ⁻⁷
N-1000°C/30 min-250°C/ 2 hodin		1,160035 *10 ⁻⁷
N-1000°C/30 min-500°C/ 30 minut		1,246115 *10 ⁻⁷
N-1000°C/30 min		1,1628 *10 ⁻⁷
K-VS		1,5403*10 ⁻⁷
K-1000°C/30 min -250°C/ 2 hodin		1,15315*10 ⁻⁷
K-1000°C/30 min -350°C/ 2 hodin		1,32537*10 ⁻⁷



Nejlepší odolnost proti opotřebení vykazovaly materiály, které byly nitridovány. MS1 je vhodnější materiál na nitridaci oproti HO. Druhá nejlepší metoda ke zvýšení odolnosti proti opotřebení bylo kuličkování, kde vzorky před kuličkováním byly tepelně zpracovány, následovalo samotné tepelné zpracování, kde u některých vzorků vyšla odolnost proti opotřebení horší než u výchozího materiálu. Nitridované a kuličkované vzorky ve výchozím stavu měly lepší míru opotřebení než samotný výchozí stav.

Tabulka výsledných tvrdostí HV 0,1

Materiál	Provedené metody zpevnění	Průměrná tvrdost HV	Max. tvrdost HV
		0,1	0,1
MS1	Výchozí stav	380	
	490°C/ 6 hodin	540	567
	940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	527	553
	820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	607	624
	N- Výchozí stav	635	767
	N-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	649	831
	N-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	659	782
	N-490°C/ 6 hodin	621	767
	K- Výchozí stav	381	394
	K-490°C/ 6 hodin	583	608
	K-940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin	632	646
	K-820°C/1 hodinu, 490°C/ 6 hodin	494	582
	HO	Výchozí stav	320
950°C/30min - 250°C/2 hodiny		617	647
950°C/30min - 350°C/2 hodiny		604	624
1000°C/30min - 250°C/2 hodiny		607	647
1000°C/30min - 350°C/2 hodiny		599	630
1050°C/30min - 250°C/2 hodiny		598	635
1050°C/30min - 350°C/2 hodiny		588	624
N-Výchozí stav		385	630
N-1000°C/30 min-250°C/ 2 hodin		508	737
N-1000°C/30 min-500°C/ 30 minut		499	744
N-1000°C/30 min		499	737
K-VS		407	430
K-1000°C/30 min -250°C/ 2 hodin		654	690
K-1000°C/30 min -350°C/ 2 hodin		641	677



Povrchová tvrdost byla naměřena nejvyšší u vzorků, které byly nitridovány. Tvrdost u nitridovaných vzorků se začala ustalovat ve hloubce 0,1mm pod povrchem. Tepelně zpracované vzorky měly menší povrchovou tvrdost než tepelně zpracované a následně kuličkované. Tepelně zpracované vzorky byly zpracovány tepelně v celém objemu, a proto se tvrdost na povrchu k jádru neliší.

6 Závěr

Všechny metody pro zvýšení odolnosti vůči opotřebení měly příznivý vliv. Nejlépe si vedly vzorky, které byly nitridovány. Nitridovaný vzorek materiálu MS1 ve výchozím stavu nejlépe odolával proti opotřebení. Zato nejhorší odolnost proti opotřebení byla zjištěna u materiálu HO, který byl kalen z 1050°C do vody, následně byl popuštěn na teplotě 350 °C. Materiál MS1 je vhodnější k nitridaci než materiál HO.

Z hlediska tvrdosti vyšly nejlépe materiály, které byly nitridovány. Tvrdost se pohybuje kolem 700-800 HV v hloubce 0,03 mm pod povrchem, pak následně klesá a ustaluje se na hodnotě 500-600 HV v hloubce 0,08 – 0,1 mm pod povrchem. Materiál MS1 vykazuje lepší vhodnost k nitridaci než HO. Nejlepší výsledek byl naměřen u materiálu MS1, který byl následně tepelně zpracován 940°C/2 hodiny, 490°C/ 6 hodin. Zde byla naměřena tvrdost 831 HV v hloubce 0,03 mm pod povrchem. Kuličkované vzorky, které byly tepelně zpracované měly také zvýšenou povrchovou tvrdost oproti vzorkům, které byly pouze tepelně zpracované

U nitridovaných materiálů HO a MS1 v základním stavu došlo u obou k vytvoření zpevněné vrstvy na povrchu, ale lišily se tvrdostí jádra. U materiálu HO byla naměřena po nitridaci tvrdost jádra stejná jako tvrdost výchozího materiálu, ale u materiálu MS1 došlo i k nárůstu tvrdosti jádra na hodnoty kolem 600 HV_{0,1}, což odpovídá tvrdosti po precipitačním vytvrzení. Z toho vyplývá, že materiál MS1 se během nitridace, která probíhala při teplotě 490°C po dobu 20 hodin, precipitačně vytvrdil, zatímco materiál HO zůstal ve výchozím stavu.

Výsledky z řádkovacího elektronového mikroskopu ukazují, že u nitridovaných vzorků je obsah dusíku na povrchu v řádu 4-6 %, směrem od povrchu vzorku do středu obsah dusíku rapidně klesá. Dusík v materiálu přednostně difunduje po hranicích zrn. Při porovnání okrajové vrstvy a středu vzorku bylo zjištěno, že na povrchu může obsah uhlíku dosahovat až 6%, ale ve středu zcela vymizí. Na povrchu součásti je vidět nitridační vrstva, která se skládá z tenké povrchové vrstvy (5-10 mikrometrů), která je tvořena převážně intermetalickou sloučeninou železa a dusíku, po této vrstvě následuje difuzní vrstva, která je o dost tlustší než předchozí a sahá do hloubky několik setin milimetru.

Použitá literatura

- [1] PLUHAŘ, J.; KORITTA, J.: Strojírenské materiály, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1966.
- [2] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. Nauka o materiálech. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-244-0
- [3] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. Strojnické tabulky: pro školu a praxi. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [4] FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. Brno: Dům techniky, 1994.
- [5] ČEP, R., BRYCHTA, J., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. Technologie II - 1. díl [online]. [cit. 2021-11-12] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [6] KRŽÍŽ, R., VÁVRA, P. Strojírenská příručka. 7. svazek, 1. vydání Praha: Scientia, 1996. 212s. ISBN 80-7183-024-0.
- [7] AB SANDVIK COROMAT-SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – kniha pro praktiky. KUDELA, M. 1.vyd. Praha: Scientia 1997 ISBN 91-972299-4-6
- [8] MÁDL, J. Teorie obrábění. Ediční středisko ČVUT. 1990
- [9] Zdroj obrázků: studijní materiál – Opotřebenění nástroje. [online]. [cit. 2021-11-16] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>
- [10] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, c2001. ISBN 80-720-4193-2.
- [11] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 1. vyd. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720- 4130- 4
- [12] ASKELAND, Donald R a Pradeep P FULAY. The science and engineering of materials. 4th ed. Pacific Grove, CA: Thomson Brooks/Cole, c2003. ISBN 05-349-5373-5
- [13] MM průmyslové spektrum: technický měsíčník. Praha: Vogel Publishing, [1997]-. ISSN 1212-2572. Vydání 4. Duben 2003. Kod článku 30421.
- [14] MM průmyslové spektrum: technický měsíčník. Praha: Vogel Publishing, [1997]-. ISSN 1212-2572. Vydání 11. Listopad 2014. Kod článku 141156
- [15] MM průmyslové spektrum: technický měsíčník. Praha: Vogel Publishing, [1997]-. ISSN 1212-2572. Vydání 6. Červen 2013. Kod článku 130658

- [16] ZPS-FN, Divize kalírna. [online]. [cit. 2022-18-05] Dostupné z: [Výrobce a dodavatel nástrojů. | ZPS-FN a.s.](#)
- [17] Bodycote, Tepelné zpracování. [online]. [cit. 2022-18-05] Dostupné z: [Přední světový poskytovatel služeb tepelného zpracování – Bodycote plc](#)
- [18] Tumlikovo, Chemicko-tepelné zpracování. [online]. [cit. 2022-18-05] Dostupné z: [Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů \(tumlikovo.cz\)](#)
- [19] Wheelabrator, Kuličkování. [online]. [cit. 2022-18-05] Dostupné z: [Wheelabrator Domů \(wheelabratorgroup.com\)](#)

