



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**STRUKTURNÍ VLASTNOSTI PODPOVRCHOVÝCH
VRSTEV BROUŠENÝCH OZUBENÝCH KOL A JEJICH
VAZBA NA PARAMETRY STANOVENÉ
DIFRAKTOMETRICKOU METODOU**

STRUCTURAL PROPERTIES OF THE SUBSURFACE GROUNDGEARS AND THEIR RELATION TO THE
PARAMETERS SET BY DIFFRACTOMETER METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Červinka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Filip Červinka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry stanovené difraktometrickou metodou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při finálním broušení dochází ke změně podpovrchových partií tvrdého ocelového dílu. Cílem práce je srovnat parametry integrity povrchu získané semidestruktivní difraktometrickou metodou s charakteristikami metalografickými a zvládnutí odpovídající přístrojové techniky.

Cíle bakalářské práce:

Porovnat parametry integrity povrchu získané semidestruktivní difraktometrickou metodou s výsledky odpovídající metalografické analýzy.

Seznam literatury:

Clark, R. J. H., Hester, R. E.: Spectroscopy for Surface Science. Advances in Spectroscopy Volume 26. John Willey & Sons Ltd., 1998. 339 s.

Brandon, D., Kaplan, W. D.: Microstructural Charakterization of Materials. John Willey & Sons Ltd., 1999. 409 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 2. 11. 2015



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá hodnocením povrchových a podpovrchových vrstev broušených ozubených kol. Zkoumá možné ovlivnění povrchu boku ozubených kol procesem odvalovacího broušení. Pro hodnocení podpovrchových vrstev se využívá měření tvrdosti a pozorování mikrostruktury pomocí světelného mikroskopu. Tyto výsledky jsou dále porovnány s hodnotami zbytkových napětí, která byla naměřena pomocí rentgenového difraktometru.

Klíčová slova

Rentgenová difraktometrie, zbytkové napětí, hodnocení mikrotvrdosti, integrita povrchu.

Abstract

The bachelor's thesis deals with structural properties of the surface and subsurface ground gears. This thesis examines possibilities of affecting gear flank surface by continuous generating spur gear grinding process. There is used the measurement of hardness and microscopic observation of the structural properties for evaluating subsurface groundgears. This parameters are compared with values of residual stresses which was set by X-ray diffractometer method.

Key words

X-ray diffraction, residual stress, microhardness evaluating, surface integrity

Bibliografická citace

ČERVINKA, F. *Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry stanovené difraktometrickou metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zina Pavloušková, Ph.D.

Prohlášení

Já, Filip Červinka, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 25.5.2016

.....

Poděkování

Děkuji tímto vedoucí bakalářské práce, paní Ing. Zině Pavlouškové, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce

Děkuji firmě PCS s.r.o. za pomoc při plánování analýzy metodou rentgenové difraktometrie.

Děkuji panu Ing. Jaroslavu Novákovi, za pomoc při hodnocení tvrdosti a jednotlivých struktur zkoušených vzorků.

Děkuji firmě INA Kysuce a.s., za poskytnutí technologického zázemí při analýze zbytkového napětí.

Obsah

Abstrakt.....	1
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Obsah	5
Úvod	7
1 Broušení čelních ozubených kol	8
1.1 Profilové broušení.....	9
1.2 Odvalovací broušení.....	10
1.2.1 Diskontinuální odvalovací broušení.....	10
1.2.2 Kontinuální odvalovací broušení.....	11
2 Určující parametry pro hodnocení stavu a jakosti ozubených kol.....	12
2.1 Geometrická přesnost povrchu součástí	12
2.2 Hodnocení drsnost povrchu.....	12
2.3 Vlastnosti povrchové vrstvy	12
2.3.1 Tvrdost	12
2.3.2 Stanovení tvrdost při nízkém zatížení.....	13
2.3.3 Pozorování struktury.....	16
2.3.4 Zbytkové napětí	19
2.4 Rentgenová difraktometrická metoda.....	21
2.4.1 Princip rentgenové difraktometrie	21
2.4.2 Technika	23

2.4.3	Stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí.....	24
3	Experiment	26
3.1	Zkoumané vzorky	26
3.2	Difraktoметриcké měření.....	28
3.3	Výsledné hloubkové profily zbytkového napětí.....	29
3.3.1	Kolo A1-13-13.....	29
3.3.2	Kolo A2-4-5.....	29
3.3.3	Kolo A3-1-13.....	30
3.3.4	Kolo B1-1-13.....	30
3.4	Příprava vzorků pro metalografickou zkoušku a zkoušku tvrdosti	31
3.5	Stanovení tvrdosti	32
3.6	Vyhodnocení mikrostruktury analyzovaných vzorků.....	34
4	Závěr.....	38
	Seznam použitých zdrojů	39
	Seznam použitých zkratk a symbolů	41
	Seznam příloh.....	7
	Příloha č. 1 Snímky metalografického pozorování struktur.....	8

Úvod

Se zvyšujícími požadavky na kvalitu, přesnost a produktivitu výroby ozubení jsou kladeny čím dál větší nároky na obráběcí stroje a nástroje. Důraz je kladen na rychlost a efektivitu výroby stejně tak na cenu a výslednou životnost výrobku. Rychlost a efektivita výroby souvisí se zvolenou metodou broušení, například zda je kladen nárok na větší flexibilitu broušení a je zvolen odvalovací způsob broušení, nebo pro velké výrobní série například v automobilovém průmyslu je efektivnější zvolit kontinuální profilové broušení [1]. Dnes je možné díky rozšíření CNC strojů a obráběcích center vyrábět stále přesnější a různorodější ozubená kola s nižšími náklady a výrobními časy. Nyní je tedy kladen větší důraz na kvalitu a jakost výrobků. Zejména pak pokud se jedná o součásti používané v místech, kde je horší dostupnost a je požadována vysoká životnost a nízká poruchovost, například u větrných elektráren. Mezi takové díly můžeme zařadit převážně ozubená kola nebo ložiska, která jsou za provozu nejvíce zatěžována.

Kvalitu a z ní vycházející životnost podobných dílů lze kontrolovat na základě přesnosti geometrie ozubení, drsnosti povrchu a výsledných vlastností povrchové vrstvy, jako je tvrdost, struktura, chemické složení a zbytkové napětí po dokončovacích operacích, zejména pak broušení. Tyto určující parametry pro hodnocení kvality povrchu ozubených kol dává do souvislosti integrita povrchu, která se zabývá problematikou hodnocení jakosti z hlediska životnosti a správné funkčnosti dílu, zakládá se na myšlence počátku místa iniciace únavového lomu, který se zpravidla nachází na povrchu nebo v jeho těsné blízkosti, proto je sledování parametrů povrchové vrstvy zásadní. Za nejdůležitější a nejčastěji sledovanou veličinu lze považovat zbytková napětí, která významně ovlivňují stupeň možného zatížení a následné životnosti ozubených kol [2]. Pro stanovení zbytkového napětí se využívají metody fyzikální nebo mechanické. Dále se tyto metody dělí v závislosti na stupni poškození testovaného výrobku na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní. Pro průmyslové použití jsou nejvhodnější metody nedestruktivní, u kterých lze rychle a bez poškození stanovit sledované parametry.

V dnešní době se poměrně rozšířila metoda detekce Barkhausenova šumu, která poskytuje rychlou a spolehlivou kontrolu [3]. Určitou nevýhodou je, že na výstupu měření nelze přímo stanovit zbytkové napětí a naměřená data je nutné porovnat s referenčním vzorkem. Tuto nevýhodu řeší metoda měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce, která umožňuje naměřit zbytkové napětí přímo, ale v podstatně delším čase. Dále ji lze použít, s pomocí odleptávání vrstev, i pro stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí, jako metodu semidestruktivní. Nepřímo lze tyto metody použít pro porovnávání a zdokonalování procesu broušení či porovnání brusek. Tato práce si klade za cíl porovnat strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev po procesu broušení s metodami, jako je rentgenová difrakce nebo detekce Barkhausenova šumu, a to při různých podmínkách broušení ozubených kol.

1 Broušení čelních ozubených kol

Broušení ozubených kol je jedna z dokončovacích operací, které předchází hrubovací operace, jako je frézování, obrážení nebo protahování patřící do třískového obrábění. Po hrubování může následovat tepelné nebo chemicko-tepelné zpracování v podobě povrchového kalení, cementace nebo nitridace, které je nutné pro zvýšení tvrdosti povrchu zubu a s tím spojené životnosti u vysoce namáhaných součástí. To vše při zachování pevnosti a houževnatosti jádra.

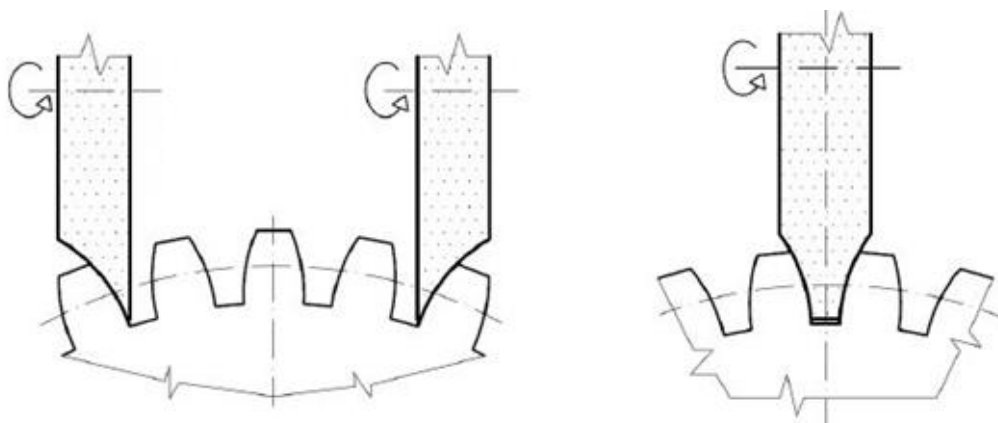
U vysoce namáhaného ozubení s požadavkem dlouhé životnosti se využívá chemicko-tepelného zpracování, které zajistí dobré mechanické vlastnosti jádra, jako je pevnost a houževnatost, zaručuje zvýšenou tvrdost na povrchu, která je důležitá z hlediska malého opotřebení a dlouhé životnosti součásti. Pro výrobu se používají oceli vhodné pro cementování nebo nitridaci, které mají malý obsah uhlíku, splňují tedy podmínku houževnatosti, a po nasycení povrchu uhlíkem, při chemicko-tepelném úpravě, mají dobrou kalitelnost. Pro větší zatížení se používá cementace, u které se dosahuje vyšší tvrdosti a otěruvzdornosti. Vlivem velkého tepelného ovlivnění dochází k deformaci rozměru ozubení a musí dojít k použití dokončovací operace. Nitridací se dosahuje stejné tvrdosti a nedochází zde k deformacím, proto nejsou nutné dokončovací operace. Na rozdíl od cementace není dosaženo takových hloubek nasycení pod povrchem, pohybuje se v řádu desetin milimetru, proto se hodí spíše k méně namáhaným součástem.

Proces broušení je jako poslední operace stěžejní a má za úkol upravit geometrii a povrch zubu po tepelném zpracování, při kterém dochází k objemovým a tvarovým změnám. Při broušení dochází k malému úběru materiálu v řádu desetin milimetru a také v důsledku nedostatečné míry ochlazování k tepelnému zatížení obrobku. Tyto vlivy mohou společně vést ke vzniku zbytkových tahových napětí, která jsou nežádoucí a vedou ke vzniku trhlin případně brusných spálenin, anebo ke snížené životnosti součásti. Tato práce se bude zabývat především výše zmíněným vlivem broušení ozubení na povrchovou vrstvu, proto uvedu základní způsoby výroby ozubených kol.

1.1 Profilové broušení

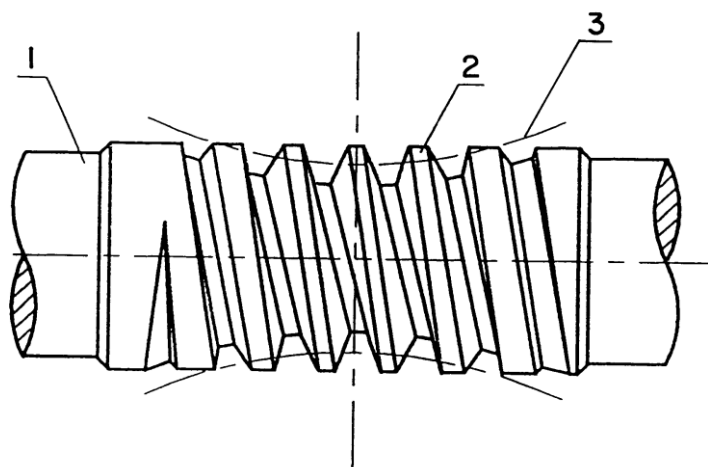
Profilové broušení je založené na čárovém dotyku mezi brusným kotoučem ve tvaru mezery mezi jednotlivými zuby a obrobkem. Tato metoda se dělí podle toho, zda se jedná o kontinuální, nebo diskontinuální broušení. Díky poměrně velké ploše dotyků je tento způsob oproti ostatním metodám efektivní a ozubení je vyrobeno v lepším technologickém čase [4].

Diskontinuální broušení se označuje jako broušení dělicím způsobem, kdy se brousí jedna zubová mezera (Obr. 1 vpravo), nebo levá a pravá strana zuby (Obr. 1 vlevo), na jeden nebo více zdvihů brousícího kotouče a poté se kolo otočí o úhel rozteče jednoho zuby.



Obr. 1 Broušení ozubení pomocí dvou (vlevo) a jednoho (vpravo) kotouče s profilem zuby [5]

Kontinuální profilové broušení se provádí pomocí globoidního šneku, je méně používané, ale hlavně výrobně složitější a dražší. Používá se tedy jen pro velkosériovou výrobu, kde lze využít i rychlejších obráběcích časů [1].



Obr. 2 Ukázka globoidního šneku [17]

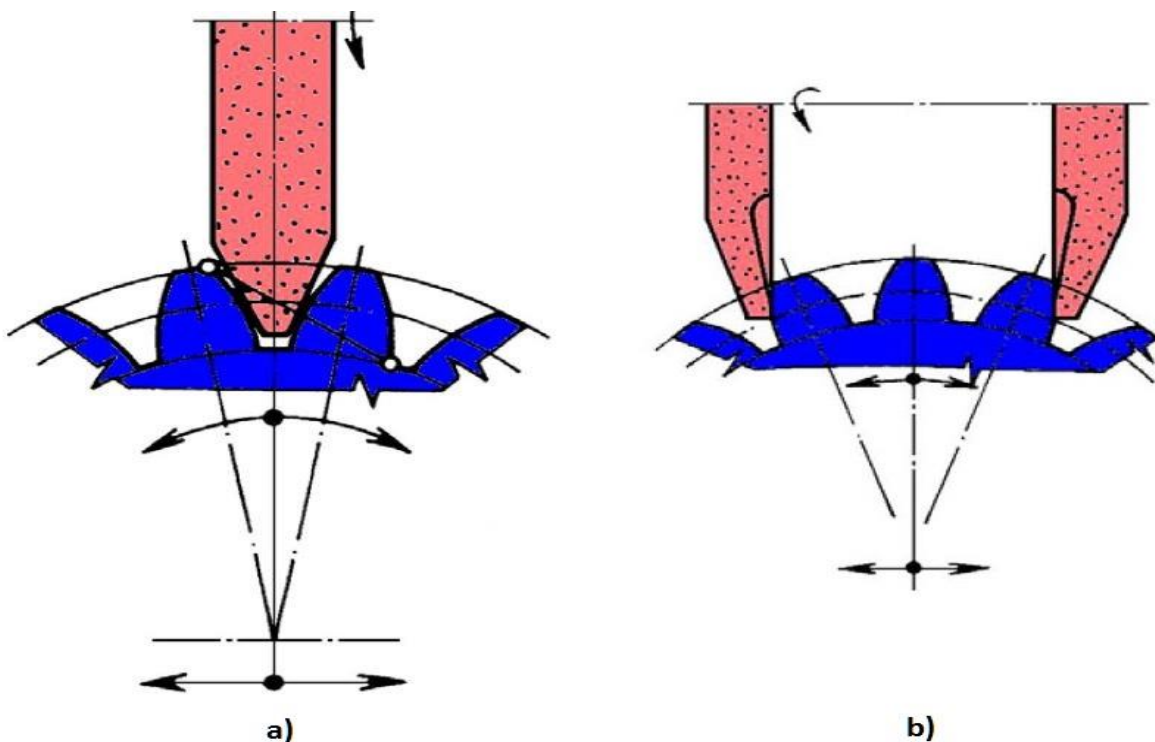
1.2 Odvalovací broušení

Odvalovací broušení spočívá v bodovém dotyku brusného kotouče a boku zubu, kdy obálky jednotlivých poloh geometrické plochy brousícího kotouče tvoří výsledný evolventní tvar boku zubu. Tato metoda je velice variabilní a dochází zde k menšímu tepelnému ovlivnění než u předchozí metody. Stejně jako u profilového broušení se dělí na diskontinuální a kontinuální odvalovací broušení [1].

1.2.1 Diskontinuální odvalovací broušení

Méně používaná metoda broušení ozubených kol spočívající v použití buď dvou talířových kotoučů, nebo jednoho kotouče lichoběžníkového osového profilu. První systém broušení s dvojicí kotoučů se nazývá MAAG.

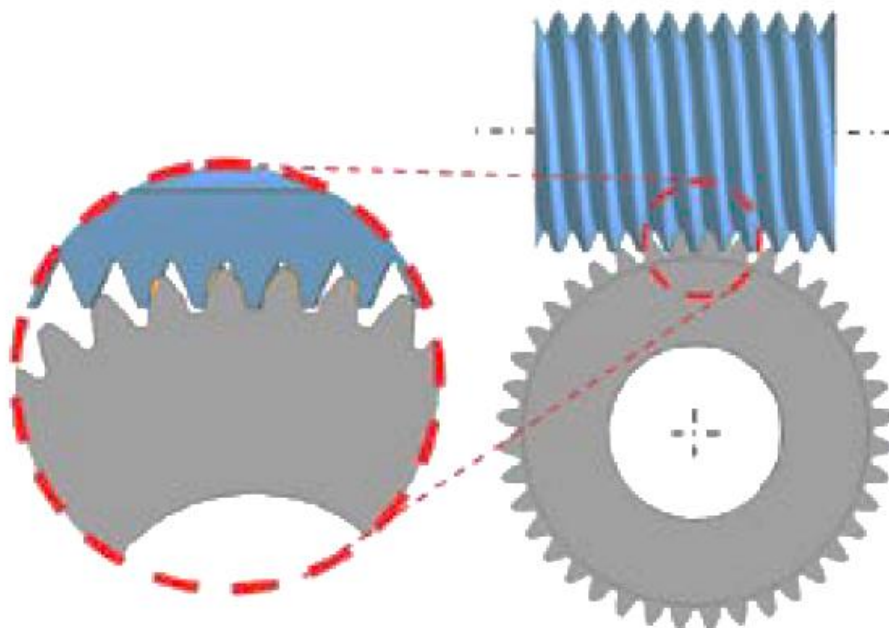
Druhý systém představuje broušení s jedním kotoučem lichoběžníkového osového profilu NILES. Průběh broušení je podobný jako u profilového broušení dělicím způsobem, tedy po obroušení jedné zubové mezery nebo dvou sousedních boků zubu se obrobek otočí o úhel odpovídající jedné zubové rozteči. Tento způsob je méně produktivní, a proto se používá v kusové a malosériové výrobě [6].



Obr. 3 Broušení systémem NILES (a) a MAAG (b) [18]

1.2.2 Kontinuální odvalovací broušení

Tento způsob broušení ozubených kol se nazývá systém Reishauer. Brusný kotouč je nahrazen broušícím šnekem, který rotuje okolo své osy, zároveň se pohybuje ve směru broušených zubů, a ozubené kolo se synchronně otáčí okolo své osy spolu s brusným šnekem.



Obr. 4 Detail kontaktu brusného šneku s broušeným kolem [19]

2 Určující parametry pro hodnocení stavu a jakosti ozubených kol

Soubor parametrů pro hodnocení stavu a jakosti součástí se často označuje jako integrita povrchu. Tento obor se blíže zabývá vztahem mezi geometrickými a fyzikálními vlastnostmi daného povrchu, které dává do souvislosti k funkčním požadavkům na celý výrobek [7]. Zkoumá jakost obrobeného povrchu na základě:

- přesnosti rozměru a tvaru součásti;
- drsnosti a mikrostruktury povrchu;
- vlastnostmi povrchové vrstvy.

2.1 Geometrická přesnost povrchu součásti

Zahrnuje soubor geometrických parametrů daných normami ČSN 01 4682 a nově ČSN ISO 1328–1 v budoucnu normou ČSN ISO 1328–2. Je závislý především na přesnosti stroje a tuhosti celého systému mezi strojem a obrobkem [4]. Tato problematika spadá do technologie výroby, není obsahem této práce, a proto nebude dále rozvedena.

2.2 Hodnocení drsnost povrchu

Toto téma není náplní této práce, uvedu tedy jen stručný přehled dané problematiky. Drsnost povrchu závisí především na způsobu obrábění, na řezné rychlosti a použitém nástroji. Hodnotí se pomocí parametrů drsnosti R_a a R_z . Lze ji stanovit kontaktním způsobem pomocí kontaktního profilometru nebo vhodnějším bezkontaktním způsobem pomocí konfokálního mikroskopu [8].

2.3 Vlastnosti povrchové vrstvy

2.3.1 Tvrdost

Tvrdost materiálu neboli odpor vůči vzniku místní deformace se určuje na základě charakteristické deformace způsobené přesně definovaným zatěžovacím tělesem při přesně definovaném zatížení. Zkoušky tvrdosti se dělí na vrypové, vnikající, nárazové a odrazové. Dále pak podle rychlosti zatěžování na zkoušky statické a dynamické. Podle velikosti zkoušené oblasti lze hodnotit makro- a mikrotvrdosti.

Mezi nejpoužívanější zkoušky tvrdosti patří zkoušky statické. Vnikající těleso tvrdoměru se vtlačuje do povrchu zkušební vzorku s monotónně se zvyšující silou až do předepsaného zatížení, které se udržuje na konstantní úrovni po určitou stanovenou dobu. Nejčastěji

používané metody měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopova.

V průběhu zkoušky vznikne na povrchu tělesa trvalý vtisk v důsledku rozvoje plastických deformací v okolí vnikajícího tělesa. Po odlehčení se geometrie vtisku proměňuje a jeho velikost je mírou odporu materiálu proti vnikání cizího tělesa. Hodnota tvrdosti se vypočte jako velikost trvalé deformace (plochy nebo hloubky vtisku) ve vztahu k působící zátěžné síle. Vnikající těleso přitom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat co nejvyšší tvrdost, modul a mez pružnosti.

a. Zkouška podle Brinella - HB

Podstatou je, že se do zkoušeného materiálu předepsanou rovnoměrně vzrůstající silou vtlačuje normalizovaná kulička z tvrdokovu. Tvrdost se vyjadřuje poměrem zatěžující síly k ploše výtisku vytlačené kuličkou

b. Zkouška podle Vickerse – HV

Základní princip spočívá ve vlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° při specifickém zatížení, které se zapisuje za jednotku tvrdosti (HV10 – pro zatížení 98,1 N). Dále měříme úhlopříčky vtisku, ze kterých se určí výsledná tvrdost.

c. Zkouška podle Rockwella – HRA, HRB, HRC

Podstatou zkoušky je, že do zkoušeného materiálu vtlačujeme diamantový kužel (HRA, HRC) s vrcholovým úhlem 120° , nebo pro měkčí materiály kalená kulička o průměru 1,587 mm. Mírou tvrdosti je velikost plastické deformace, která vznikne vlačováním zkušební tělíska. Zkušební tělísko se vtlačuje do materiálu nejdříve předzátěží $F_0=98,1$ N (100 N), aby se odstranil vliv nerovnosti povrchové vrstvy. Dále se zvyšuje zatížení na předepsanou hodnotu. Po ustálení ručičky úchylkoměru snížíme zátěž na hodnotu předzátěže (100 N) a na stupnici odečítáme tvrdost podle Rockwella [9].

2.3.2 Stanovení tvrdost při nízkém zatížení

Měření tvrdosti při nízkém zatížení probíhá obdobně jako konvenční měření tvrdosti a provádí se vlačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu při nižším zatížení.

Spolu s klesajícím zatížením se zároveň zmenšují velikosti vtisku a přesnost měření tvrdosti klesá. Navíc s klesající zátěžnou silou do oblasti mikrotvrdosti již není Vickersova tvrdost

(jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrlosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení.

Díky menší velikosti vtisku se toto hodnocení tvrdosti hodí pro měření:

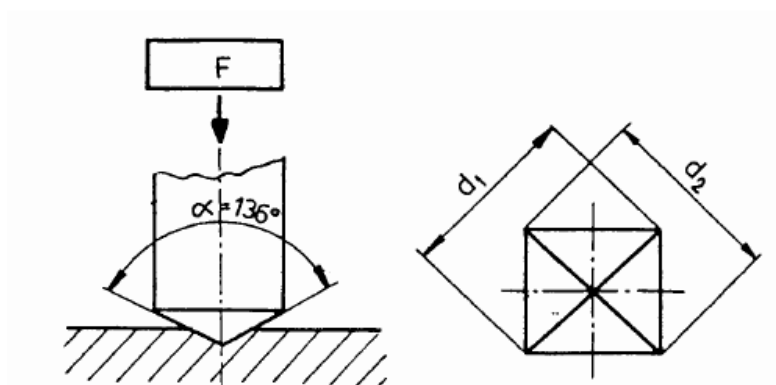
- malých nebo tenkých součástí;
- tenkých kovových nebo anorganických povlaků;
- křehkých materiálů;
- účinné hloubky povrchové vrstvy po chemicko-tepelném zpracování.

2.3.2.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je předepsána evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1, a to pro tři rozdílné velikosti zatížení F .

- Zkouška tvrdosti dle Vickerse ($F \geq 49,03$ N);
- Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení ($1,961$ N $\leq F < 49,0$ N)
- Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse ($0,09807$ N $\leq F < 1,961$ N).

Jako vnikající těleso je použit diamantový indentor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . Po vtlačování má vtisk tvar čtverce, u kterého jsou následně měřeny úhlopříčky vtisku d_1 a d_2 (viz Obr. 4).



Obr. 5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [9]

2.3.2.2 Zkouška tvrdosti dle Knoop

Zkouška tvrdosti dle Knoop pro kovové materiály je předepsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545, a zahrnuje zkušební zatížení do 9,807 N včetně.

Principem zkoušky je vtlačování diamantové indentoru ve tvaru jehlanu s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran do povrchu zkušebního tělesa. Výsledná tvrdost označovaná *KP* je určena na základě měření delší úhlopříčky vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení *F*

2.3.2.3 Stanovení a ověření hloubky cementace

Stanovení hloubky cementace měřením průběhu tvrdosti je nejpřesnější a zároveň nepoužívanější metodou. Hloubku cementace a specifikace metody stanovení této hloubky je uvedena v mezinárodní normě ČSN EN ISO 2639. Norma platí pro cementované a nitrocementované vrstvy a části, které po tepelném zpracování na konečnou tvrdost nedosahují ve vzdálenosti od povrchu rovné trojnásobku hloubky cementace tvrdost 450 HV1 [9].

Pokud tyto podmínky nejsou splněny, je hloubka cementace definována zvláštní dohodou. U ocelí, které ve zkoušené části a vzdálenosti od povrchu rovné trojnásobku hloubky cementace vykazují tvrdost převyšující 450 HV1, se toto kritérium může použít za předpokladu, že pro hloubku cementace se zvolí mezní hodnota tvrdosti převyšující 550 HV1.

Hloubka cementace se stanoví ze závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu na příčném výbrusu kolmém k povrchu. Měření se provádí na příčném výbrusu součásti v předepsaných podmínkách. Při přípravě vzorku nesmí dojít k deformačnímu a tepelnému ovlivnění hodnocené části. Vzorek se běžně připravuje broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektrolytickým leštěním. Při přípravě je třeba dbát na to, aby nedošlo k zaoblení hran povrchu.

Při měření průběhu mikrotvrdosti se vtisky provádí podél jedné nebo několika rovnoběžných přímek kolmých k povrchu, ležících v pásu o šířce $W = 1,5$ mm. Vzdálenost *S* mezi sousedními vtisky musí být nejméně 2,5 násobek jejich úhlopříčky. Rozdíl mezi vzdálenostmi jednotlivých vtisků od povrchu nesmí přesáhnout 0,1 mm.

Zkušební vtisky se provádí se zatížením od HV0,1 (0,9807 N) do HV10 (9,807 N) nebo vtisky dle Knoopu, u kterých se poté proměří úhlopříčka vtisku a to nejméně při 400 násobném zvětšení.

Měření se provádí ve dvou nebo více pásech a výsledky pro každý pás se zpracovávají graficky tak, aby se získaly křivky vyjadřující změny tvrdosti jako funkci vzdálenosti od povrchu.

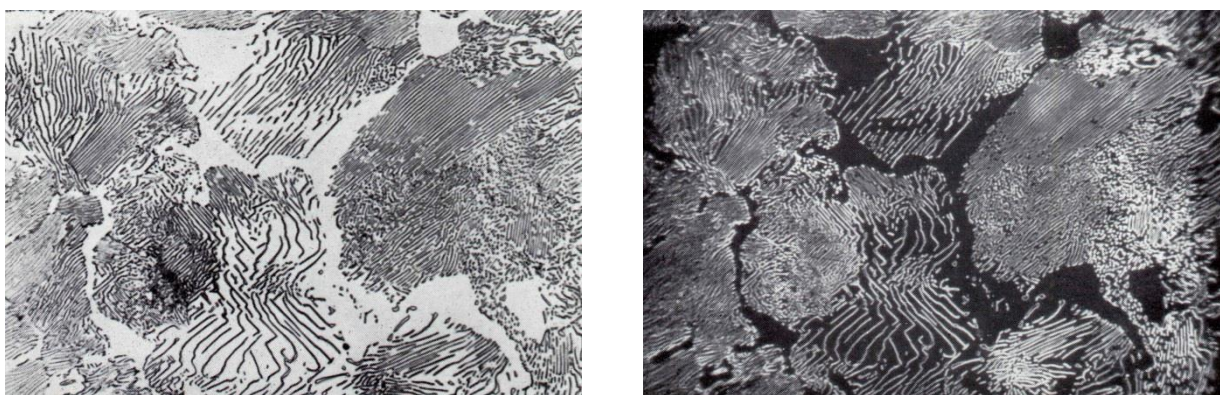
Ze dvou sestrojených křivek se pro každý pás stanoví vzdálenost od povrchu součásti, ve které je tvrdost rovna 550 HV nebo ekvivalentní hodnotě tvrdosti dle Knoopu. Tato vzdálenost reprezentuje hloubku cementace v pásu. Jestliže rozdíl mezi těmito dvěma

hodnotami nepřevyšší 0,1 mm, vyjádří se hloubka cementace jako průměr těchto dvou vzdáleností. Jestliže rozdíl zmíněných dvou hodnot překročí 0,1 mm, zkouška se opakuje.

2.3.3 Pozorování struktury

Ke zjišťování struktury kovů a jejich slitin se používají převážně metalografické mikroskopy, a to světelné nebo elektronové.

Na světelných mikroskopech je mikrostruktura daného vzorku pozorována na základě odrazu dopadajícího světla od povrchových nerovností. Část světelných paprsků se odráží do objektivu a vytváří obraz struktury, část se odráží mimo.



Obr. 6 Příklad pozorování ferito-cementické struktury ve světlém (vlevo) a tmavém poli (vpravo) [12]

Pozorování světelným mikroskopem je nejčastější a jeho rozlišení je dostačující pro většinu metalografických zkoušek. Pokud je nutné vyšší rozlišení, používá se elektronový mikroskop. Tato metoda pozorování využívá vzájemné reakce urychlených elektronů s kovovým vzorkem, při které dochází k celé řadě dějů [10]. Elektrony mohou projít přes materiál vzorku, aniž by se srazily s jinými elektrony za podmínky dostatečně slabého vzorku, nebo dojde pouze k malé srážce, při které se dráha elektronu změní, ale nedojde k výrazné změně energie elektronu. Tohoto se využívá v transmisní elektronové mikroskopii (TEM). Při výrazné změně dráhy, kdy se elektron odrazí zpět, se jedná o rastrovací elektronovou mikroskopii (REM). Pokud dojde k neelastické srážce, dochází ke vzniku spojitého nebo charakteristického rentgenového záření, kterého se využívá při mikroanalýze prvků v REM a také v TEM.

Rastrovací mikroskopie nevyžaduje dokonale rovný povrch vzorku, a je tedy vhodná pro pozorování hrubých a masivních vzorků (např. lomových ploch).

Při mikroskopickém pozorování lze zjistit strukturu a do jisté míry i přibližné chemické složení. Dále velikost, tvar i způsob rozložení jednotlivých strukturních součástí nebo také jakost

tepelného zpracování. Pro správné a objektivní pozorování metalografických vzorků je nutné zajistit správnou přípravu vzorků, tak aby byla dostatečně vyčerpána rozlišovací schopnost daného mikroskopu. Tato příprava vzorků se dělí na několik operací [11].

- odběr vzorku;
- preparace vzorku;
- broušení vzorku;
- leštění vzorku;
- vyvolání mikrostruktury.

2.3.3.1 Odběr vzorku

Při odběru vzorku je třeba zvolit místo, které nejlépe odpovídá charakteru zkoušené součásti. Pokud je součást nesterorodá, například u ozubeného kola je jiná struktura v jádře a jiná blíže k povrchu zubu, musí se pro pozorování zvolit takové místo, kde lze pozorovat obě struktury případně odebrat dva nebo více vzorků.

Při oddělování vzorku od součásti je nutné zachovat původní strukturu. U vzorků z měkkých a snadno obrobitelných materiálů dochází k oddělování pomocí řezání nebo odfrézování. Tvrdé a těžko obrobitelné materiály se odlamují, rozbrušují pod chladicí kapalinou nebo se použije elektrojiskrových řezaček. Tyto způsoby oddělování zajistí, že nedojde k výraznému mechanickému nebo tepelnému ovlivnění původní struktury materiálu a zaručují objektivnost pozorování [11]. Nakonec je důležité zvolit správnou velikost vzorku podle možností daného mikroskopu.

2.3.3.2 Preparace vzorků

Preparace spočívá v zalití vzorku za studena, anebo jeho zalisování za tepla. Tento krok je důležitý hlavně pro malé vzorky, u kterých by byla následná příprava na bruskách nepohodlná nebo nebezpečná. Další využití spočívá ve sjednocení tvaru různorodých vzorků pro poloautomatickou výrobu nebo pro dodržení ostrosti hran (měření mikrotvrdomosti) a zachování povrchových vrstev.

Zalévání za studena probíhá vložením vzorku do formy tak, aby strana určená k pozorování byla otočená směrem ke dnu formy. Poté se vzorek zalije zalévací hmotou, která se nechá vytvrdit.

Jako zalévací hmoty se používají tekuté epoxidové, práškové akrylátové nebo polyesterové pryskyřice, které jsou promíchané v předepsaném poměru s příslušným tvrdidlem. Volba vhodné pryskyřice záleží na tvrdosti materiálu vzorku. Vytvrzování záleží na složení

pryskyřice a velikosti zalévaného objemu vzorku. Může se proto pohybovat v rozmezí od několika minut až po desítky hodin. Pro rychlejší přípravu se hodí použít vakuové preparace, při které se vzorek zalévá ve vakuové komůrce, kdy vytvořený tlak zajistí dokonalé zalití vzorku a rychlejší vytvrzení pryskyřice.

Zalisování za tepla spočívá v umístění vzorku do teplotní komůrky lisu obdobně jako u zalévání za studena stranou určenou k pozorování směrem ke dnu lisu, kam se přidá pryskyřice ve formě sypkého prášku. Pryskyřice se následně zalisuje za vysokého tlaku (cca 2,5 MPa) a za teplot od 100 až 180 °C. Tento způsob preparace je velice rychlý a vhodný pro vzorky, u kterých nehrozí ovlivnění struktury výše zmíněným tlakem a teplotou [12].

2.3.3.3 Broušení vzorku

Broušení je důležité pro srovnání povrchu vzorku po řezání nebo jiném způsobu oddělování vzorku, dále také pro zarovnání pryskyřice se vzorkem po předchozí preparaci. Broušení se provádí ručně, nebo při velkém počtu vzorků automaticky s různým stupněm automatizace.

Brousí se na brusných papírech postupně od zrnitosti 60 až do zrnitosti 4000. Na brusný papír s vyšší zrnitostí se přechází, jakmile dojde k odstranění drážek způsobených předchozím broušením. Současně se také vzorek opláchne od zbytků zrněk předchozího broušení a pootočí se o 90°.

Pro mechanické broušení platí stejný postup. Vzorky jsou umístěny do držáku metalografické brusky a jsou přitlačovány k rotujícímu brusnému kotouči. Díky vysoké rychlosti brousícího kotouče je nutné vzorky chladit vodou nebo jiným vhodným médiem [12].

2.3.3.4 Leštění vzorku

Leštění se provádí za účelem zarovnání posledních nerovností a dochází zde k minimálnímu úbytku materiálu, kdy se pouze deformují vrcholky povrchové drsnosti. Nejčastěji se používá mechanické nebo elektrolytické leštění.

Proces leštění je podobný broušení. Vzorek se přitlačí na rotující leštící kotouč a za použití leštícího média dochází k požadované úpravě povrchu. Jako potah leštícího kotouče se používají textilie jako je satén nebo flanel. Brusivo má podobu prášku, pasty nebo suspenze, která obsahuje další potřebné složky. Vzorkem se pohybuje proti pohybu leštícího kotouče až do zrcadlového lesku.

Elektrolytické leštění je odlišné a dochází zde k rozpouštění nerovností na povrchu materiálu při působení elektrického proudu. Vzorek se zapojí jako anoda a ponoří se do vany s vhodným elektrolytem. Ve vaně je zapojena katoda z korozivzdorné oceli. Při průchodu

elektrického proudu mezi katodou a vzorkem se vytvoří na povrchu obroušeného vzorku anodický film, který má oproti samotnému elektrolytu vyšší elektrickou vodivost. Díky nerovnostem na povrchu se mění tloušťka tohoto filmu a v místech výstupků je větší elektrická vodivost. V těchto místech má film největší proudovou hustotu a tedy nejmenší odpor. Díky tomuto účinku dochází k rozpouštění výstupků a zarovnávaní výsledného povrchu vzorku. Tento způsob leštění je výhodný, protože zde nedochází k mechanickému namáhání a nedochází zde k vytvoření tzv. Beilbyho vrstvy. Tato vrstva vzniká při mechanickém ovlivňování povrchu vzorku, při kterém dochází ke ztrátě původní struktury a není tedy možné její pozorování [10].

Elektrolytické leštění je závislé na mnoha podmínkách, jako je složení elektrolytu, teplota, materiál vzorku, rychlost a způsob proudění elektrolytu nebo velikost proudu procházejícím mezi vzorkem a elektrolytem [13].

2.3.3.5 Vyvolání struktury

Po leštění je třeba vyvolat původní strukturu v závislosti na následných požadavcích pozorování. Toho se docílí pomocí naleptání povrchu vzorku. Pomocí různých druhů leptání lze pozorovat různé reliéfy struktury. Vzorky se nejčastěji leptají chemicky, na hranice zrn, selektivně, plošně nebo elektrolyticky.

Při chemického leptání lze zviditelnit jednotlivé strukturní součásti díky jejich rozdílné rozpustnosti v leptaadle. Leptání na hranice zrn spočívá v rozdílné rozpustnosti u hranic zrn a uvnitř zrna, a tím se hranice zviditelní. U plošného leptání se docílí rozlišení jednotlivých zrn pomocí rozdílné leptatelnosti různě natočených krystalických mřížek, které tvoří jednotlivá zrna. Tato zrna se tímto barevně odliší. Elektrolytické leptání je podobné elektrolytickému leštění a používá se pro korozivzdorné oceli, které je obtížné leptat chemicky [11].

2.3.4 Zbytkové napětí

Zbytková napětí jsou napětí, která se vyskytují v materiálu při odstranění působení vnějších sil, a to i po určité době. Jsou jedním z parametrů hodnotících stav materiálu. Vznikají v důsledku technologických postupů výroby materiálu a mají vliv na jeho pevnostní, únavové nebo korozní charakteristiky. Ke vzniku zbytkových napětí dochází díky mnoha mechanismům, které mohou nastat současně. Například při různých způsobech obrábění jako soustružení, frézování nebo broušení, dochází k plastickým deformacím na povrchu součásti. Tyto vlivy se mohou projevit jako napětí v tlaku. Dalším způsobem je tepelné ovlivnění při chemicko-tepelném zpracování, kde dochází k nerovnoměrnému ochlazení součásti. Povrch dílu se při tom zahřívá více a rychleji, než je tomu uvnitř. Po vychladnutí dochází ke stahování povrchové vrstvy a následné plastické deformaci za vzniku tahových napětí [3].

Při vyšších teplotách, které jsou blízké transformačním teplotám, dochází k fázovým transformacím, například rozpadu zbytkového austenitu na martenzit, při kterém dojde ke změně měrných objemů a vzniku zbytkových napětí.

Zbytková napětí se dělí podle velikosti oblastí, ve kterých dosahují rovnováhy, na:

- makroskopická (I. druhu) v celém objemu součásti;
- mikroskopická (II. druhu) v úrovni několika zrn;
- submikroskopická (III. druhu) na atomové úrovni.

Zbytková napětí se zjišťují především pomocí experimentálních metod, které umožňují jejich přímé nebo nepřímé měření. Základní rozdělení metod pro měření zbytkových napětí je na destruktivní a nedestruktivní. Princip destruktivního měření spočívá v uvolnění původních zbytkových napětí porušením materiálu a vyhodnocení odezvy, většinou deformací. Princip nedestruktivních technik je v nalezení vztahů mezi fyzikálními nebo krystalografickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím [2].

Mechanické metody jsou založeny na měření změny napětí při uvolnění stávajících zbytkových napětí nebo při vnášení zbytkových napětí v průběhu daného technologického procesu. Používají se průhybové metody, odvrtávací metoda, metody dělení a indentační metody.

Difrakční metody se využívají pro měření zbytkového napětí u krystalických materiálů, které využívají specifických vlastností rozptylu záření na krystalové mřížce. Používá se rentgenové záření, synchrotronové záření, neutronové záření a elektronový svazek [11].

Metody využívající fyzikálních vlastností materiálu jsou založené na změně některých specifických vlastností materiálu v závislosti na napětí, kterému je vystaven. Používají se elektromagnetické, ultrazvukové, piezospektroskopické, termomechanické nebo fotoelastické techniky. Jednotlivé měřicí techniky lze vzájemně kombinovat. Nejčastěji používané z uvedených metod jsou odvrtávací metoda, difrakční metody a průhybové metody.

2.3.4.1 Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda měří makroskopická zbytková napětí v blízkosti povrchu materiálu. Její princip spočívá v odvrtání malého otvoru do povrchu materiálu, který způsobí uvolnění zbytkových napětí a s tím spojené deformace v okolí otvoru. Deformace v okolí otvoru se měří, nejčastěji pomocí odporových tenzometrů nebo pomocí optometrické metody. Na základě měření deformace se pomocí tzv. kalibračních koeficientů určených pomocí metody konečných prvku zpětně vyhodnotí zbytkové napětí v materiálu [14].

2.4 Rentgenová difraktometrická metoda

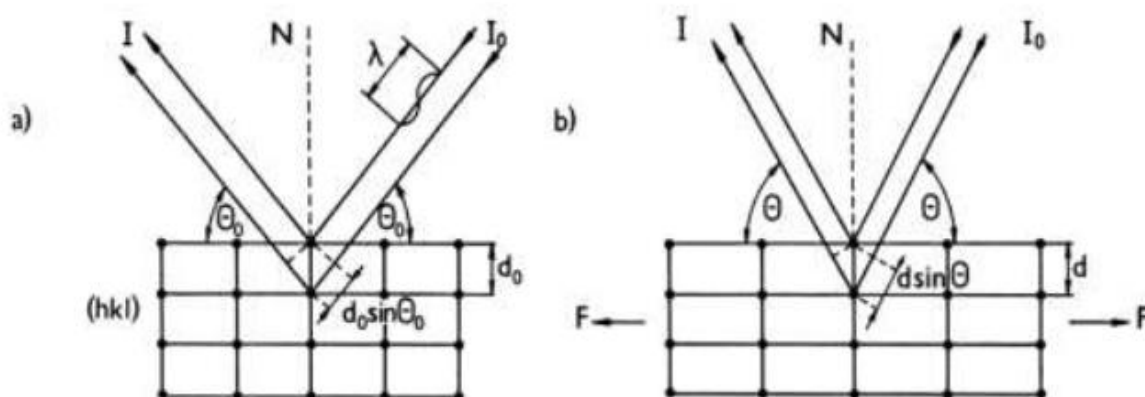
Tato metoda spočívá v interakci rentgenového záření s krystalickou mřížkou daného materiálu, kovu nebo keramiky. Následně se podle změny meziatomové vzdálenosti v charakteristické rovině a Youngova modulu pružnosti E určí, za předpokladu lineární elastické deformace, vnitřní napětí.

2.4.1 Princip rentgenové difraktometrie

Základní princip spočívá ve vzájemném působení rentgenového paprsku a krystalické mřížky, při kterém dochází ke konstruktivní, nebo destruktivní interferenci rozptýleného rentgenového záření. Využívá se zde Braggova zákona [13]:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta), \quad (1)$$

kdy Braggův úhel θ , ve kterém dopadají paprsky na charakteristický systém rovin určeným pomocí Millerových indexů (hkl) je závislý na vlnové délce záření λ , na řádu reflexe n a na



Obr. 7 Změna Braggova úhlu při zatížení krystalické mřížky silou F [20]

mezirovinné vzdálenosti d . Na Obr. 6 je vidět, jak se mění úhel θ u nezatížené a zatížené krystalické mřížky silou F .

U nezatížené mřížky, viz Obr. 6a, je úhel dopadajícího svazku paprsků θ_0 , intenzitě I_0 a vlnové délce λ odpovídající mezi-rovinné vzdálenosti d_0 . V případě zatížení silou F , viz Obr. 6b, se mřížka zdeformuje a v daném směru se mezirovinná vzdálenost d zvětší, přičemž zde dochází zároveň ke změně Braggova úhlu θ [13].

2.4.2 Technika

2.4.2.1 Laboratorní difraktometry:

Laboratorní systémy jsou velice výkonné, jsou ovšem nepřenosné, používají se pouze v laboratořích a jejich využití v terénu je tedy nemožné. Na druhou stranu jsou schopny hodnotit jak zbytkové napětí, tak mřížkové parametry krystalických materiálů.



Obr. 9 Ukázka laboratorního difraktometru [13]

2.4.2.2 Mobilní difraktometry

Mobilní difraktometry jsou navrženy jen pro měření zbytkového napětí, a proto jsou o mnoho menší a lehčí. Je možné je poměrně snadno přenášet do terénu například k mostním konstrukcím a bez nutnosti oddělování vzorku stanovit zbytkové napětí. Dále jsou navrženy pro měření malých a hůře dostupných zakřivených míst, jako jsou například paty zubů ozubených kol.

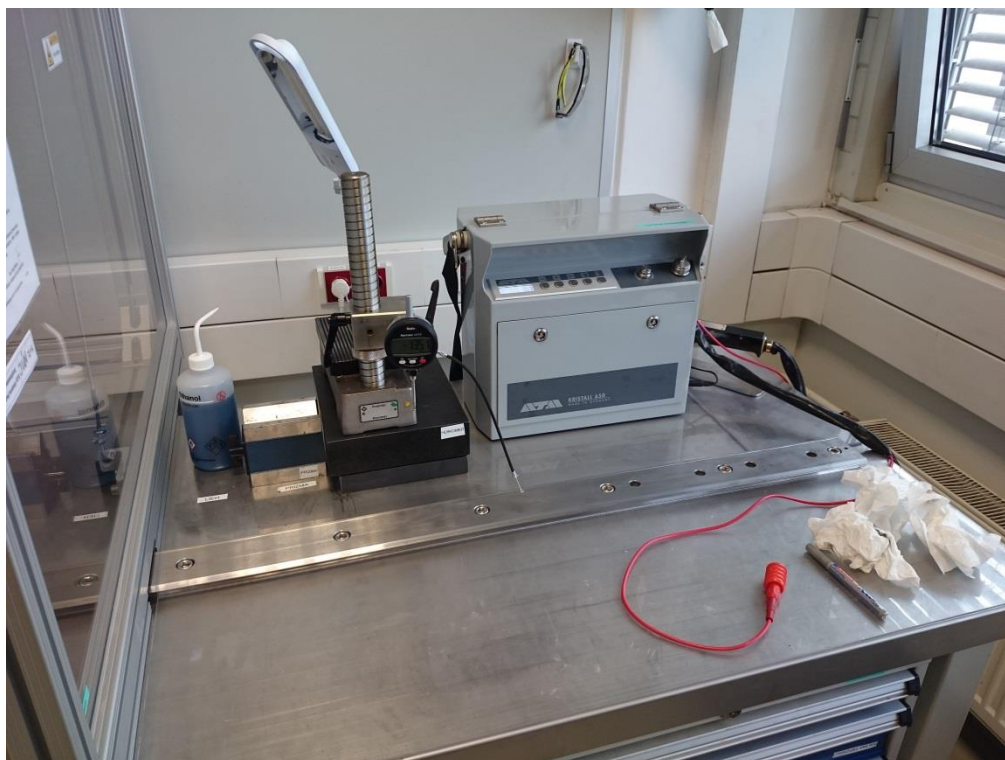


Obr. 10 Příklad mobilního difraktometru od fy Stresstech [14]

2.4.3 Stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí

Princip spočívá v hodnocení zbytkového napětí pomocí rentgenového difraktometru v různých hloubkách pod povrchem vzorku. Toho se docílí střídavým odleptáváním a měřením zbytkového napětí dané vrstvy materiálu za předpokladu dostatečně masivního vzorku. Tedy nejdříve dochází k měření zbytkové napětí v požadovaném místě vzorku a poté se odleptá požadovaná vrstva materiálu, která se následně změří pomocí mikrometru.

Takto se opakovaně postupuje až do požadované hloubky. Následně dostáváme závislost zbytkového napětí na hloubce pod povrchem měřeného vzorku. Ukázku leptacího stanoviště lze vidět na obr. 11. Leptáním dochází k částečnému porušení vzorku v místě pozorování, ale při vhodné volbě tohoto místa nemusí dojít k poškození dílu a tuto metodu je možné použít jako semidestruktivní.



Obr. 11 Ukázka leptacího pracovného priestoru

2.4.3.1 Leptání

Způsob odstraňování vrstev materiálu na povrchu vzorku je dán normou ISO EN 15305-2008. Tato norma dovoluje používat pouze chemické nebo elektrolytické leptání/leštění, které neovlivňuje zbytkové napětí vzorku měřeného pomocí rentgenové difraktometrie.

Zkoumané místo, na které dopadá rentgenový paprsek při měření, je závislé na použitém kolimátoru, tedy je to oblast v řádu milimetrů, není tedy třeba leptat celý povrch vzorku, ale jen malou část. Proto se pro tato měření používají mobilní elektrolytické leptací přístroje, které leptají pouze dále měřenou oblast o průměru 5-10 mm v závislosti na použitém adaptéru.

3 Experiment

Experimentální část této práce je součástí projektu, který se zabýval použitím Barhausenova šumu pro porovnání integrity povrchu broušených ozubených kol na různých bruskách, za různých brusných podmínek.

Výsledkem tohoto projektu bylo úspěšné ověření analýzy Barhausenova šumu s difraktometrickým měřením hloubkových profilů při uvážení rozdílné hloubky vniku jednotlivých metod [15]. Tato práce dále tyto výsledky porovnává s běžnými a dostupnými mechanickými zkouškami. Měření probíhalo na ozubených kolech z cementační oceli. Výroba ozubení proběhla na bruskách od různých výrobců s různými parametry broušení. Na všech kolech bylo provedeno měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce, hodnoty tvrdosti pro ověření hloubky cementační vrstvy a následně byla vyhodnocena struktura materiálu pomocí světelného mikroskopu.

3.1 Zkoumané vzorky

Jako vzorky byla v tomto případě měřena ozubená kola s přímým ozubením z cementační oceli 21MnCr5. Materiál byl před měřením všech parametrů ověřen pomocí optického emisního spektrometru na přesné chemické složení. Výsledky emisní zkoušky jsou v tabulce 2. Složení odpovídá danému chemickému složení podle normy ČSN EN ISO 4957/42 0949, viz tabulka 1. Je třeba zmínit, že materiál obsahuje velice málo nečistot.

Tabulka 1 Chemické složení předepsané podle daných norem

Značka oceli	Chemické složení v %										
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni	Co	P max	S max.
DIN 21MnCr5	0,18-0,24	1,10-1,40	0,15-0,35	1,00-1,30	-	-	-	-	-	0,030	0,030
ČSN 19 487	0,17-0,22	1,00-1,30	0,17-0,37	1,00-1,30	-	-	-	-	-	0,030	0,030

Tabulka 2 Naměřené chemické složení

Značka oceli	Chemické složení v %										
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni	Co	P	S
21MnCr5	0,20	1,30	0,26	1,32	-	0,01	-	0,01	0,002	0,011	0,013

Všechna kola pocházela z jedné výrobní dávky, kde byla cementována a kalena, teprve poté byla broušena pomocí metody odvalovacího broušení. Broušení celkem čtyř kol probíhalo na dvou rozdílných bruskách. První tři kola A1, A2 a A3 byla broušena na brusce A, každé při jiných parametrech broušení. Čtvrté kolo B1 bylo broušeno pouze při jednom nastavení na brusce B.

Získané parametry broušení:

- kolo A1-13-13 bylo vyrobeno při 1900 ot./min. na 7 třísk;
- kolo A2-4-5 bylo vyrobeno při 3000 ot./min. na 5 třísk;
- kolo A3-1-13 bylo vyrobeno při 3100 ot./min. na 7 třísk;
- kolo B1-1-13 bylo vyrobeno při srovnatelném nastavení a obráběcím čase jako kolo A1-13-13.

Dále bylo použito analýzy Barhausenova šumu k nalezení nejhorších zubů z pohledu stavu povrchové vrstvy [16]. Zub s nejhoršími hodnotami byl následně z důvodu následujících měření oddělen a označen. Analýza všech parametrů proběhla na obou bočních stranách zubů. Pro odlišení se strany pojmenovaly následovně: při pohledu na čelní stranu s identifikačním číselným označením je Levá strana zubu (L) vlevo a Práva strana zubu (P) vpravo. Následně bylo provedeno měření zbytkového napětí.



Obr. 12 Ukázka analyzovaného kola

3.2 Difraktometrické měření zbytkového napětí

Hodnocení zbytkového napětí proběhlo na rentgenovém difraktometru Stresstech Xstress 3000 G2R. Hodnocení zbytkového napětí probíhalo ve směru broušení boku zubu, uprostřed a z obou stran pomocí metody $\sin\psi^2$. Měření bylo provedeno při 7 expozicích. Čas expozice rentgenového paprsku 12 s.

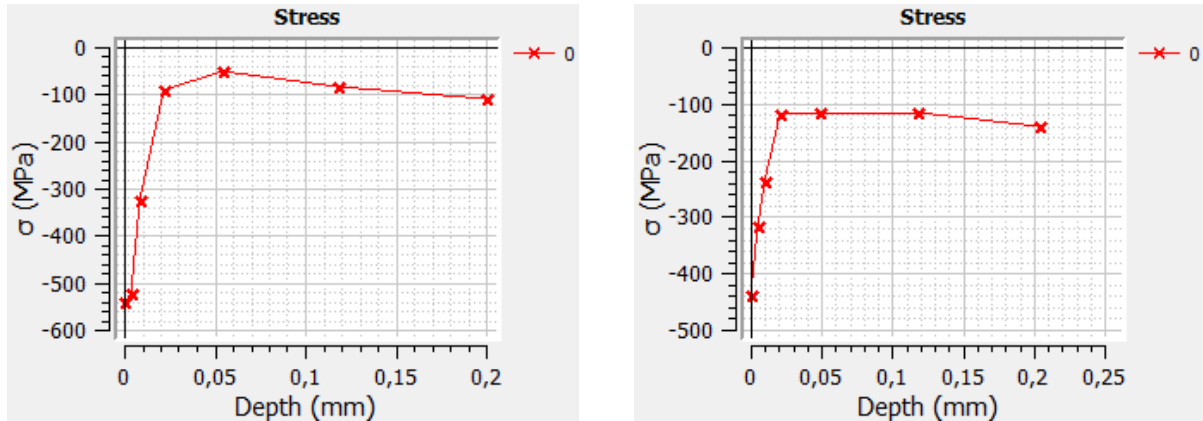


Obr. 13 Detail Goniometru G2R od fy Stresstech

Pro stanovení hloubkového profilu byla použita teoretická řada vzdáleností pod povrchem: 5, 10, 20, 50, 100, 200 μm . Tato řada má zachytit průběh zbytkových napětí po broušení ozubení, kde nejvyšší hodnoty se nejčastěji nacházejí okolo 20 μm pod broušeným povrchem [15]. Tato řada je pouze orientační, protože s ohledem na způsob provedení hloubkového profilu zbytkového napětí nelze zajistit přesnost v řádu μm . Leptání je elektrochemický proces, který je ovlivněn chemickým složením, ale i například vnitřním napětím, proto nelze předem odhadnout přesnou hloubku leptání.

3.3 Výsledné hloubkové profily zbytkového napětí

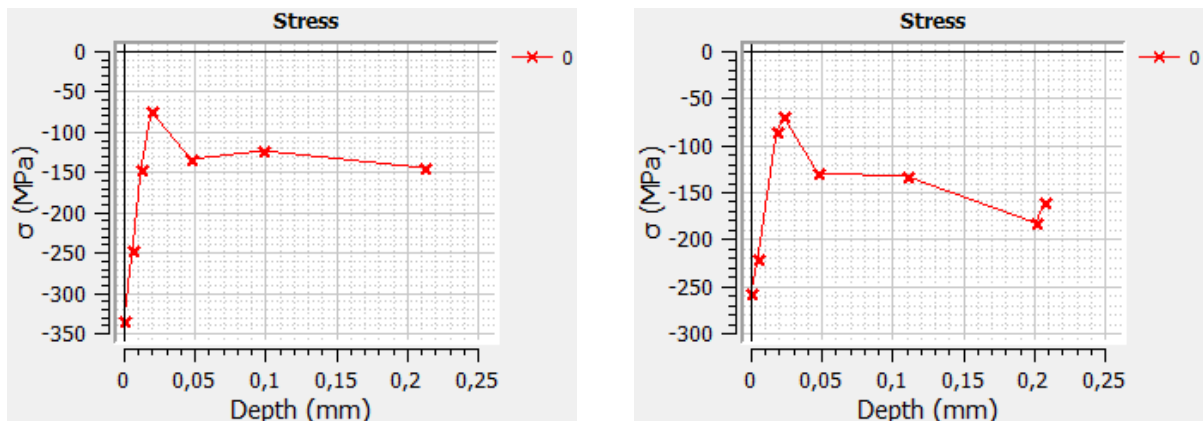
3.3.1 Kolo A1-13-13



Obr. 14 Kolo A1-13-13 Levá strana (vlevo) Pravá strana (vpravo)

Na obr. 14 je vidět, že zbytkové napětí na povrchu vzorku je okolo -550 MPa. Napětí se tedy pohybuje v poměrně vysokých hodnotách tlaku, ze kterých se rychle blíží ustálené hodnotě -100 MPa. Této hodnoty dosahuje přibližně v hloubce odpovídající $20 \mu\text{m}$. Při srovnání levé a pravé strany zubu je vidět, že průběhy sobě odpovídají, liší se pouze v hodnotě zbytkového napětí na povrchu o 100 MPa. Tento průběh odpovídá běžnému hloubkovému profilu kola vyrobeného odvalovacím broušením.

3.3.2 Kolo A2-4-5

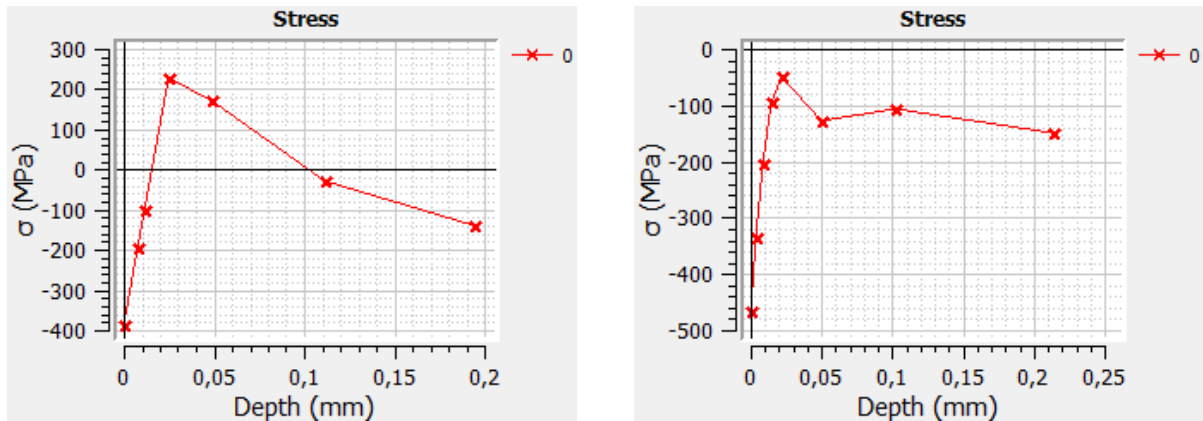


Obr. 15 Kolo A2-4-5 Levá strana (vlevo) Pravá strana (vpravo)

U tohoto kola je vidět v hloubce $20 \mu\text{m}$ vrchol zbytkového napětí, který je charakteristický pro brusné poškození povrchu ozubeného kola. Je také vidět, že oproti předchozímu vzorku

dosahuje napětí na povrchu vyšších hodnot (-350; -250 MPa). Kolo A2 je tedy z hlediska broušení v horším stavu.

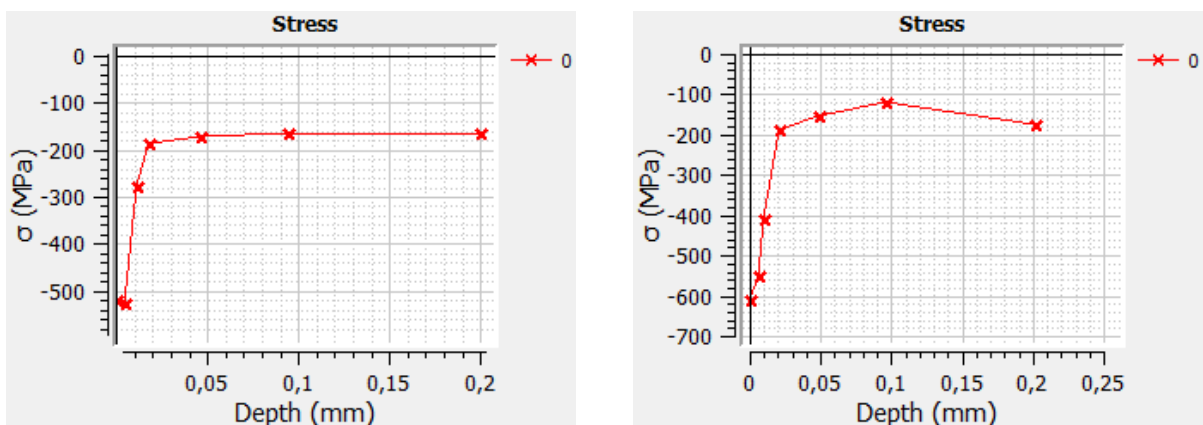
3.3.3 Kolo A3-1-13



Obr. 16 Kolo A3-1-13 Levá strana (vlevo) Pravá strana (vpravo)

Třetí kolo vyrobené na brusce A má stejný průběh jako kolo A2-4-5. V porovnání levé a pravé strany je vidět, že charakteristický vrchol značící brusné poškození na levé straně zubu je výrazně posunut do tahových hodnot napětí. Tento vzorek tedy vykazuje vážné poškození povrchu součásti, a to i přes poměrně nízkou hodnotu napětí na povrchu.

3.3.4 Kolo B1-1-13



Obr. 17 Kolo B1-1-13 Levá strana (vlevo) Pravá strana (vpravo)

Hlubkový profil posledního kola odpovídá průběhu kola A1-13-13 a dosahuje ještě lepších hodnot zbytkových napětí. Hodnoty na povrchu jsou mezi 500 – 600 MPa v tlaku a ustálená hodnota napětí se pohybuje okolo -200 MPa. Kolo B1 tedy nevykazuje žádné známky brusného poškození z hlediska zbytkových napětí.

3.4 Příprava vzorků pro metalografickou zkoušku a zkoušku tvrdosti

Pro ověření hloubky cementační vrstvy a pozorování struktury materiálu jádra a povrchové vrstvy po chemicko-tepelném zpracování bylo nutné měřené zuby oddělit napříč, tedy v rovině kolmé k povrchu zubu pomocí metalografické rozbrušovací pily. Oddělování vzorku probíhalo na rozbrušovací metalografické pile s účinným vodním chlazením a malou posuvovou rychlostí pro minimální ovlivnění struktury a vnitřní napjatosti vzorku.



Obr. 18 Ukázka zubu po řezání

Dále byly vzorky preparovány zalitím za tepla do pryskyřice, pro následnou snadnější manipulaci při úpravě broušením a leštěním.



Obr. 19 Automatický metalografický lis od fy Struers

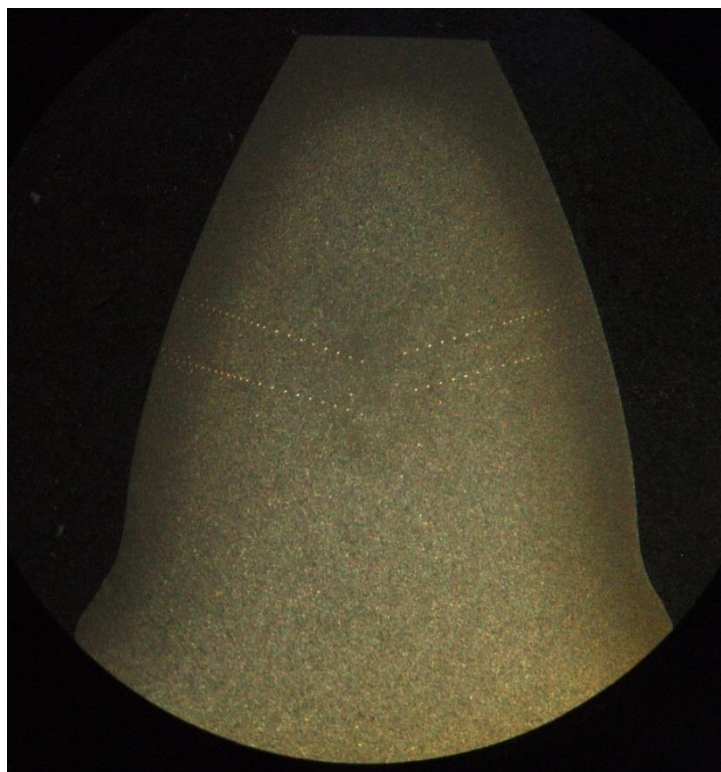
Broušení bylo provedeno řadou brusných papírů o zrnitosti 80, 120, 240, 400. Nakonec byly vzorky leštěny na leštících kotoučích pomocí diamantové pasty s velikostí zrn 2 μ m a poté 1 μ m.



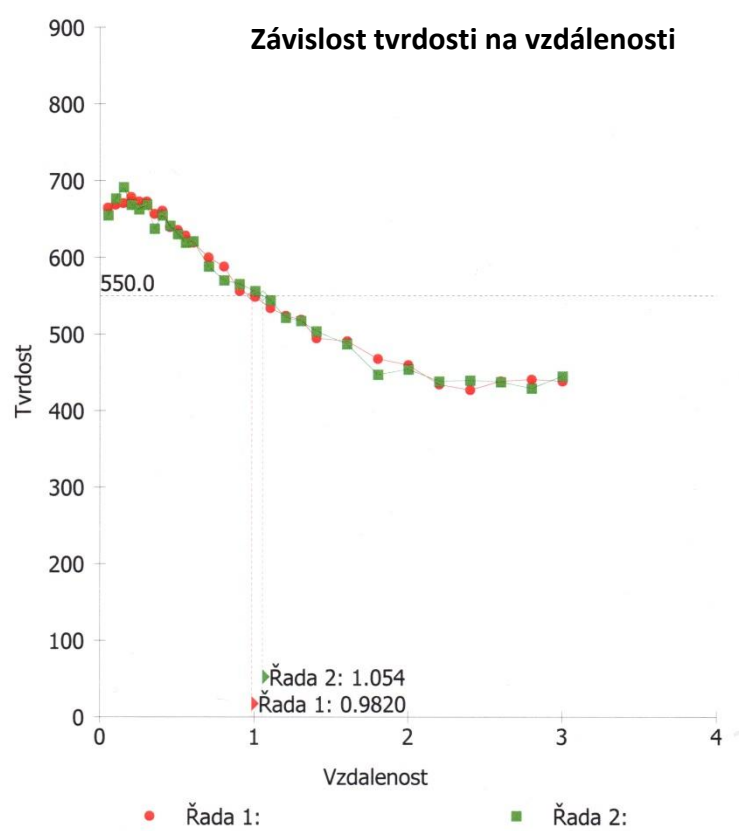
Obr. 20 Ukázka vyleštěného vzorku

3.5 Stanovení tvrdosti

Měření bylo provedeno na automatickém tvrdoměru LECO AMH43 zatížením 0,5 kg po dobu 10 s. Na každé straně byly provedeny dvě řady vtisků, kde jedna řada byla umístěna směrem k hlavě zubu a druhá k patě. Dále bylo provedeno zjemnění vtisků od 0,05 mm po 0,6 mm s krokem 0,05 mm u vrstev blízko k povrchu zubu. Toto zjemnění bylo provedeno pro lepší přehled o tvrdostech těsně pod povrchem. Jednotlivé řady vtisků lze vidět na obrázku obr. 17, kde je možné pozorovat nahličenou vrstvu zkoumaného vzorku.



Obr. 21 Ukázka jednotlivých vtisků při stanovení hloubkového profilu tvrdosti



Obr. 22 Závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu Kolo A3-1-13

Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 2639. Tedy hloubka cementační vrstvy je při měření tvrdosti v dané hloubce pod povrchem vzorku stanovena po překročení mezní hodnoty tvrdosti odpovídající 550 HV0,5. Výsledky hloubky cementační vrstvy jsou určeny jako průměr výsledků obou měřených řad. Tvrdost pod povrchem v hloubce odpovídající nejbližší povrchu, tedy v 0,05 mm, je maximální hodnota z obou řad vtisků.

Tabulka 3 Výsledky zkoušky stanovení hloubky cementace

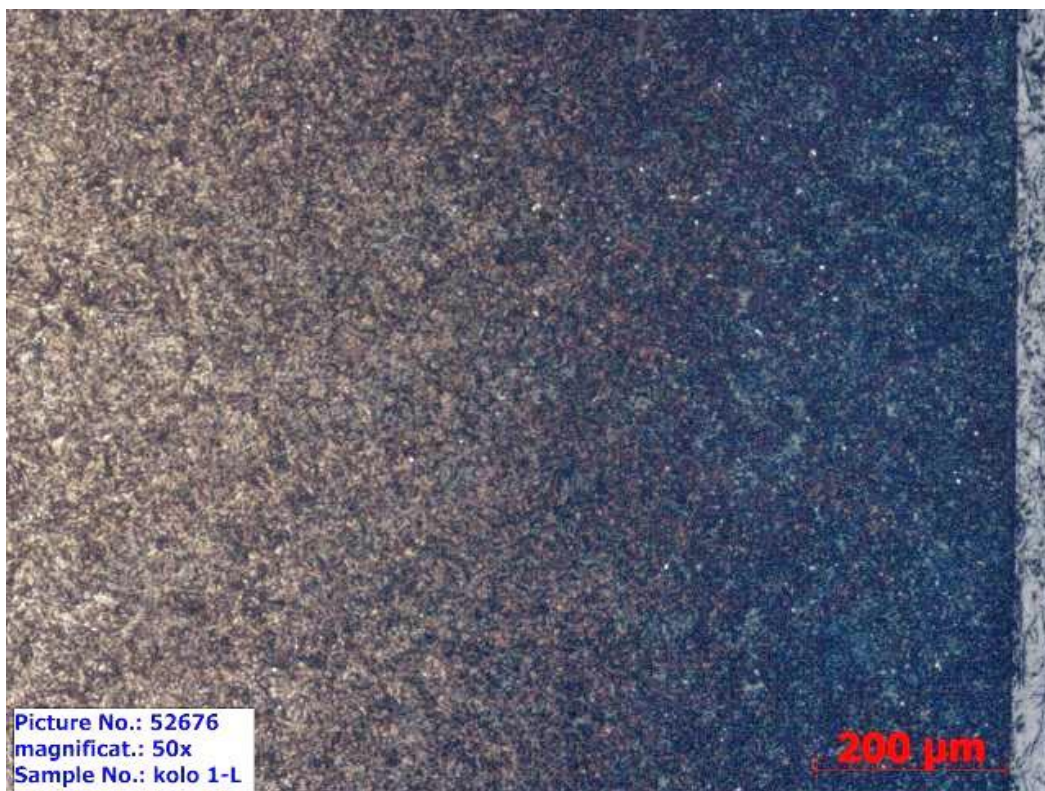
Kolo	Tvrdost HV0,5 (50 µm)	Hloubka cementace [mm]
A1-13-13L	679	1,04
A1-13-13P	673	1,03
A2-4-5L	665	1,09
A2-4-5P	669	1,02
A3-1-13L	665	1,02
A3-1-13P	685	1,02
B1-1-13L	681	1,01
B1-1-13P	665	0,95

Při srovnání jednotlivých výsledků je vidět, že hodnoty se pohybují okolo 1 mm hloubky pod povrchem. Tento výsledek odpovídá běžným hodnotám cementace a všechna kola jsou tedy z hlediska nauhličení bez větších rozdílů.

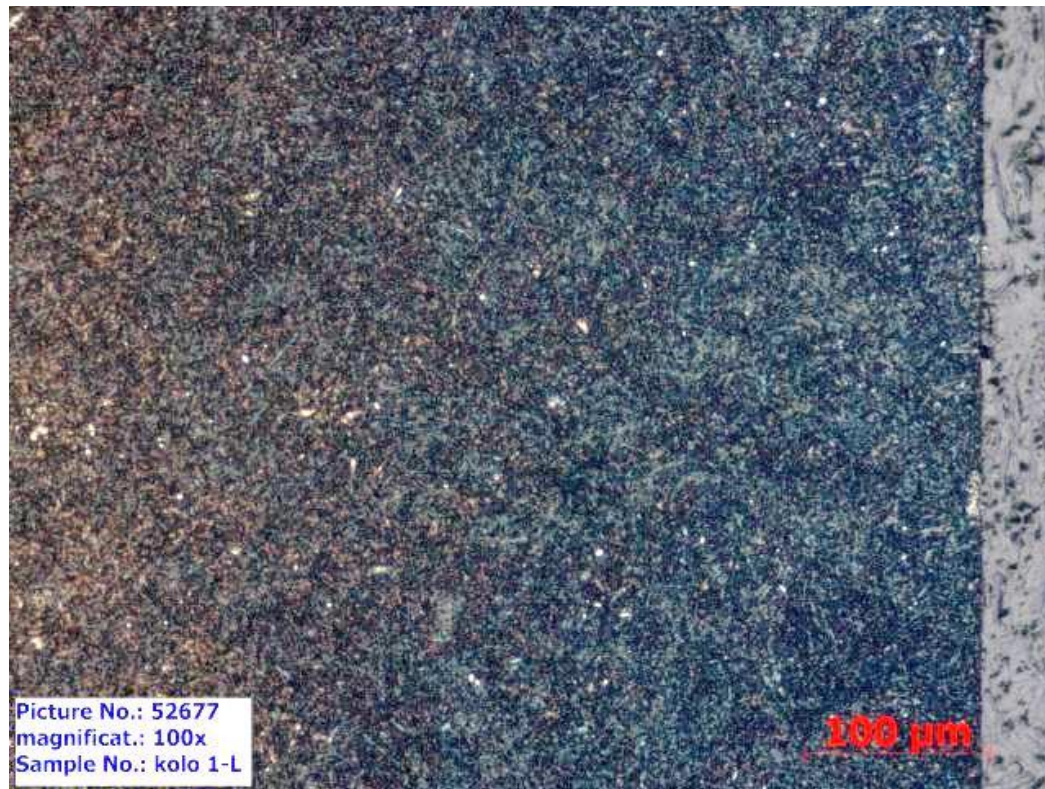
3.6 Vyhodnocení mikrostruktury analyzovaných vzorků

Mikroskopické pozorování struktury se provádělo na mikroskopu NEOPHOT 32 při zvětšeních 50x, 100x a 500x. Mikrostruktura byla vyvolána leptáním pomocí činidla NITAL 3 (97% lihu + 3% HNO₃).

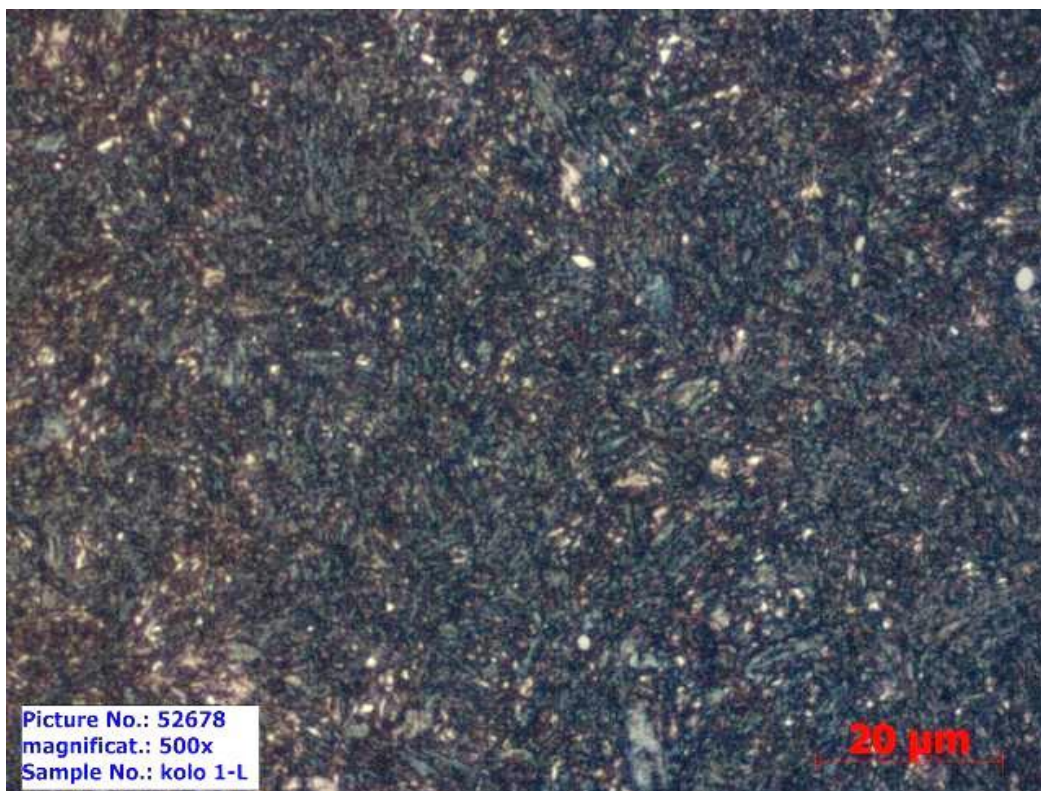
Mikrostruktura všech vzorků se velice podobala, a to z pohledu na cementovanou vrstvu, nebo zvolenou stranu zubu. Jako referenční vzorek byly vybrány snímky kola A3-1-13 levé strany zubu. Ostatní snímky jsou přiloženy v příloze č. 1



Obr. 23 Snímek mikrostruktury; Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 50x



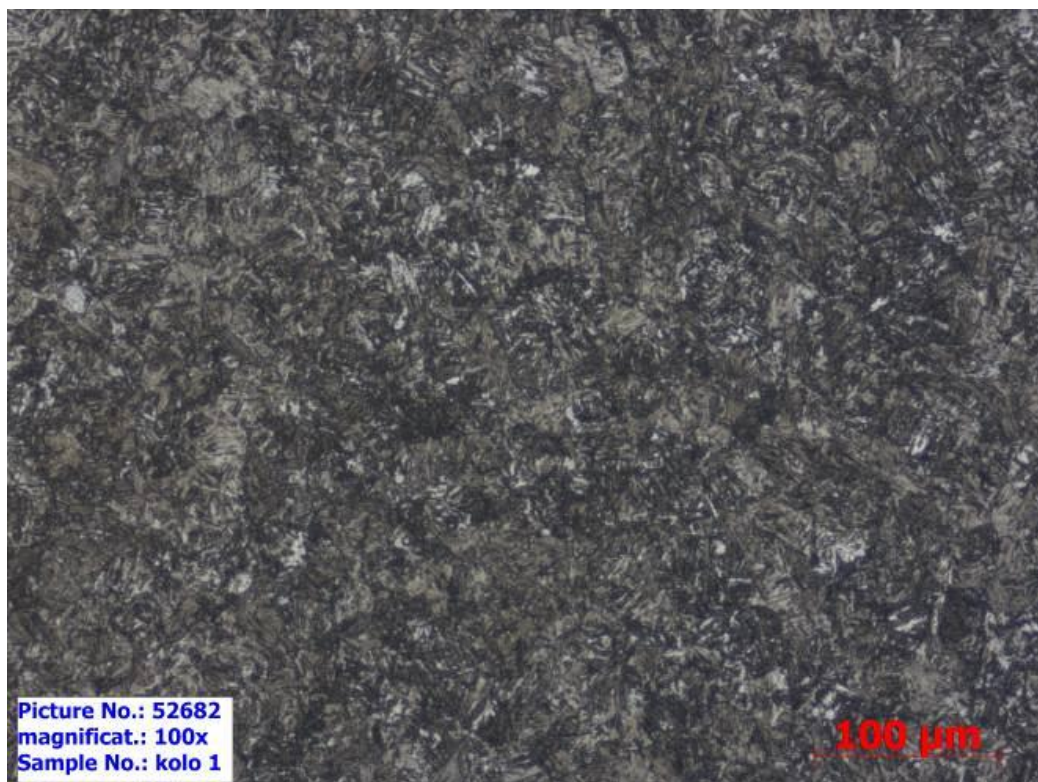
Obr. 24 Snímek mikrostruktury; Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 100x



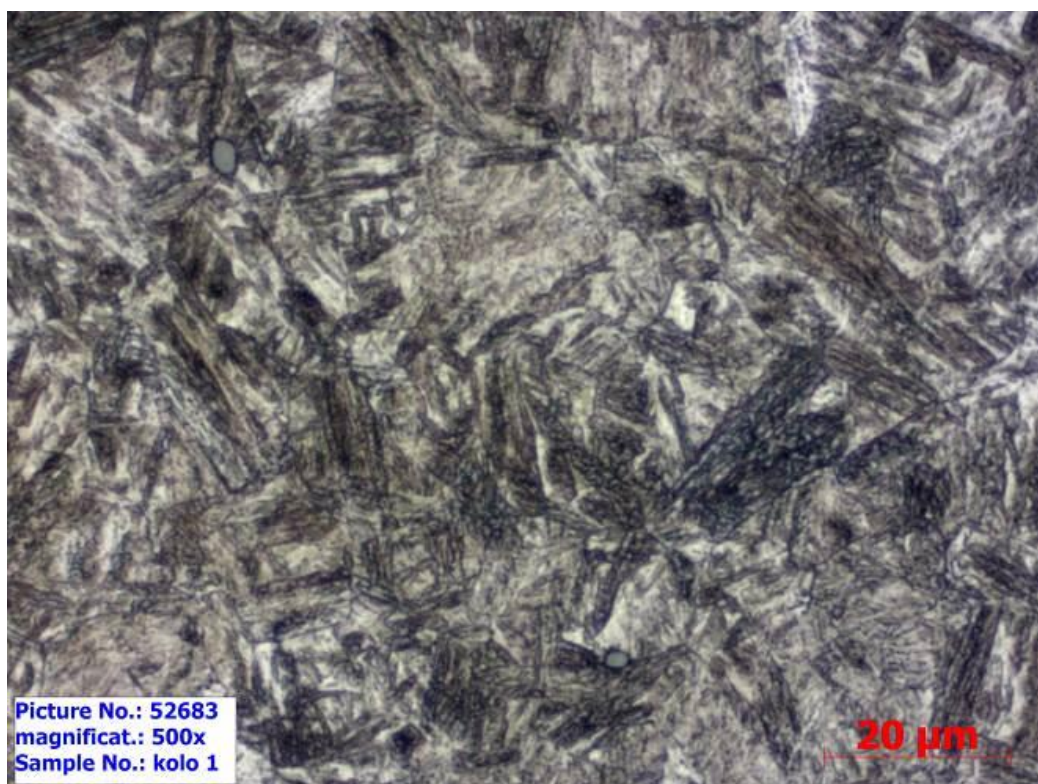
Obr. 25 Snímek mikrostruktury; Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 500x

Mikrostruktura cementovaného povrch zubu je tvořena jemným jehlicovitým popuštěným martenzitem a sekundárními karbidy. Na povrchu nejsou pozorovatelné žádné strukturní změny po odvalovacím broušení. U některých snímků je vidět výrazné naleptání struktury na povrchu zubu, které je zapříčiněno vzlínáním leptadla zatečeného ve volném prostoru mezi vzorkem a zalévací hmotou.

Mikrostruktura jádra zubu je tvořena nízkouhlíkovým martenzitem (popuštěným) a dolním bainitem. Dále lze pozorovat síťové jemných karbidických částic po hranici původního austenitického zrna. Pozorovaná struktura byla pro všechny vzorky téměř stejná, proto je uveden reprezentativní vzorek kola A3-1-13 obr. 26. – 27., zbytek je v příloze č. 1.



Obr. 26 Snímek mikrostruktury; Kolo A3-1-13; jádro zubu; zvětšení 100x



Obr. 27 Snímek mikrostruktury; Kolo A3-1-13; jádro zubu; zvětšení 500x

4 Závěr

Tato práce je věnovaná problematice integrity povrchu broušených kol. Ozubená kola z cementační oceli 21MnCr5 bylo podrobena hodnocením mikrostruktury, které ukázalo, že mezi pozorovanými vzorky nejsou žádné strukturní rozdíly a to z pohledu jádra zubu nebo podpovrchových vrstev. Při ověřování hloubky cementační vrstvy bylo dokázáno, že kola prošla stejným chemicko-tepelným zpracováním a cementační hloubka dosahuje běžných hodnot okolo 1 mm. Z hlediska materiálu a struktur vzorků tedy nejsou patrné žádné rozdíly v těsně podpovrchových vrstvách.

Na druhé straně jsou vidět značné rozdíly mezi naměřenými hodnotami zbytkového napětí různě vyrobených ozubených kol. Rozdíly jsou patrné jak na povrchu vzorku, tak v podpovrchových vrstvách. Rozdíly jsou také patrné při porovnání jednotlivých stran zubů. Tyto rozdíly byly také ověřeny metodou analýzy Barhausenova šumu [16] a jsou pravděpodobně způsobeny v průběhu broušení. Dále se ukázalo, že difraktometrická metoda odhalí poškození obrobeného povrchu ještě před tím, než se objeví při metalografickém pozorování.

Seznam použitých zdrojů

- [1] JERMOLAJEV, Štěpán. *Kontinuální odvalovací broušení čelního ozubení*. Vysoké učení učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2013, 106 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Prokop, Csc.
- [2] KOČMAN, K. a B. BUMBÁLEK *Vliv zbytkových napětí na únavu zatěžovaných součástí*. VUT Brno: VZ UST-FSI, 2002.
- [3] SCHMIDOVÁ, Lucie. *Hodnocení parametrů integrity povrchu a využití poznatků pro zefektivnění obrábění ozubených kol*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 116 s. Disertační práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [4] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [5] Výroba ozubených kol a řemenic. *Učíme v prostoru* [online]. Uherský Brod, b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=3092
- [6] DRDLA, A. *Pohony ventilového rozvodu ozubenými koly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 43 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Novotný, Ph.D.
- [7] DÖMÉNY, T. *Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobené plochy se zaměřením na zbytková napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 65 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Ildikó Putzová, Ph.D.
- [8] *Integrita povrchu* [online]. b.r. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: http://integrita.zcu.cz/download/skola2/plzen_prez1.pdf
- [9] DOLEŽAL, P. a B. PACAL *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. In: . Vysoké učení technické v Brně, b.r., s. 41 [cit. 2016-05-22].
- [10] *Volume 9: Metallography and Microstructures*. In: . Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 978-0-87170-706-2.
- [11] PÍŠEK, František, Aleš VETIŠKA a Jiří ŠKAREK. *Nauka o materiálu. II., 2. svazek*. 1. vyd. Praha: Československá akademie věd, 1959, 658 s.
- [12] *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [13] FITZPATRICK, M.E., A.T. FRY, P. HOLDWAY, F.A. KANDIL, J. SHACKLETON a L. SUOMINEN *Determination of residual stresses by X-ray diffraction..* In: *Measurement Good Practice Guide No. 52* [online]. Teddington, 2005, s. 77 [cit. 2016-05-22]. ISSN 1368-6550.

- [14] *Stresstech group* [online]. b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.stresstechgroup.com/content/en/1034/74659/Xstress%203000%20G2%20%20%20G2R.html>
- [15] MALEC, J., F. ČERVINKA, D. BLAŽÍČEK a J. SUOKNUUTI The Attempt of New Approach to Evaluate Surface Integrity. In: *12th Conference on Local Mechanical Properties 2015* [online]. Liberec: Trans Tech Publications, 2015, s. 4 [cit. 2016-05-22]. ISBN 978-3-03835-720-9. ISSN 1662-9507.
- [16] BLAŽÍČEK, Dominik. *Strukturní vlastnosti podpovrchových vrstev broušených ozubených kol a jejich vazba na parametry z analýzy Barkhausenova šumu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016, 56 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Zina Pavlouškové, Ph.d.
- [17] *Variable tooth worm* [online]. b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.google.com.ar/patents/US6176148>
- [18] *Dokončovací operace ozubení* [online]. b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/dokoncovaci-operace-ozubeni>
- [19] Prediction of Surface Zone Changes in Generating Gear Grinding. *Gear technology* [online]. b.r. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.geartechnology.com/articles/0315/Prediction_of_Surface_Zone_Changes_in_Generating_Gear_Grinding
- [20] GANEV, Nikolaj. *Difrakční analýza mechanických napětí*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1366-9.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
(hkl)	Millerovo označení systému atomových rovin
HB	tvrdost podle Brinella
HRA	tvrdost podle Rockwella určená diamantovým kuželem
HRB	tvrdost podle Rockwella určená ocelovou kuličkou
HRC	tvrdost podle Rockwella určená diamantovým kuželem
HV	tvrdost podle Vickerse
KP	tvrdost podle Knoop
REM	rastrovací elektronové mikroskopie
TEM	transmisní elektronová mikroskopie

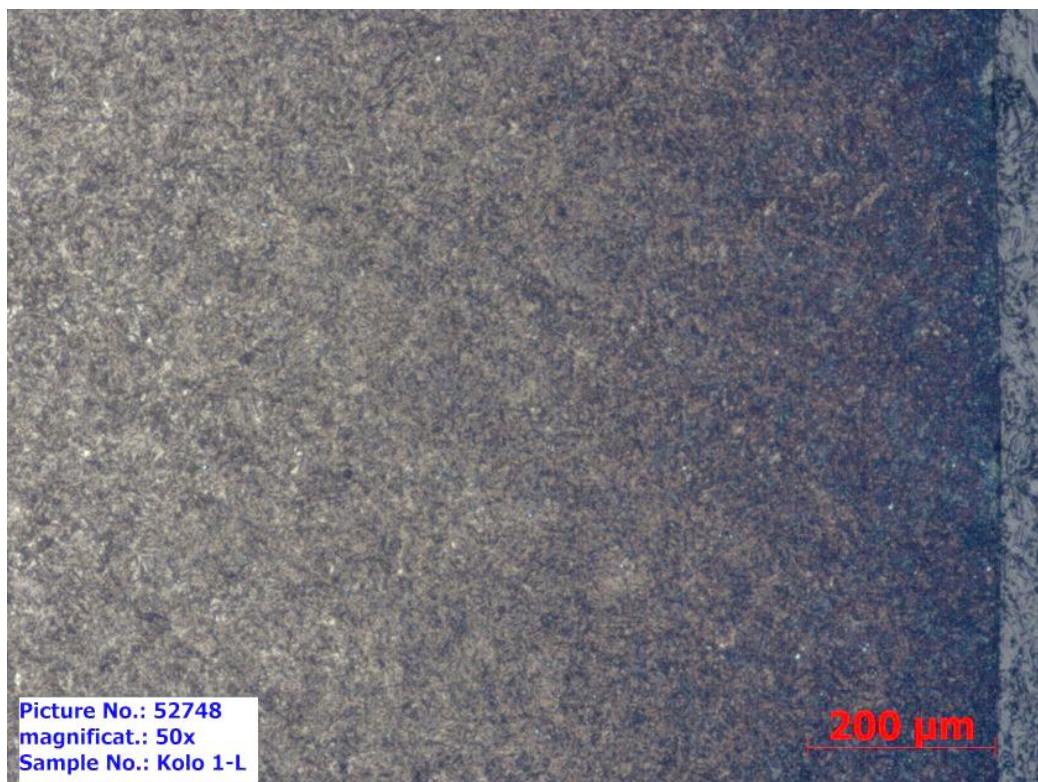
Symbol	Rozměr	Veličina
d	nm	mezirovinná vzdálenost jednotlivých atomových rovin
d_0	nm	mezirovinná vzdálenost nezatíženého vzorku
d_1	mm	úhlopříčka vtisku při měření tvrdosti podle Vickerse
d_ψ	nm	mezirovinná vzdálenost ve směru kolmém na směr měření
E	MPa	Youngův modul pružnosti
I_0	-	intenzita rentgenového záření nezatíženého vzorku
n	-	řád reflexe záření
R_a	μm	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_z	μm	střední hloubka drsnosti
S	mm	vzdálenost mezi sousedními vtisky
W	mm	šířka pásu měření mikrotvrdosti
ε	-	relativní prodloužení
θ	$^\circ$	Braggův úhel
θ_0	$^\circ$	Braggův úhel při nezatížené stavu
λ	nm	vlnová délka rentgenová záření
ψ	$^\circ$	úhel natočení vzorku vzhledem k rentgenovému záření

Seznam příloh

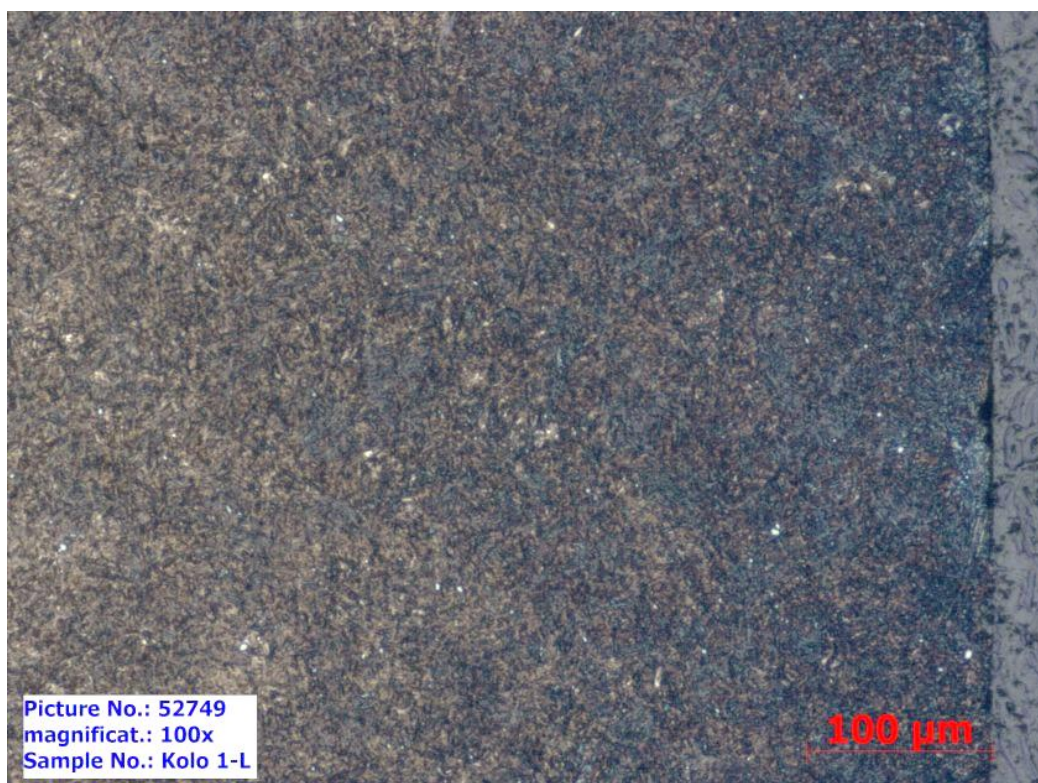
Příloha č.1

Snímky metalografického pozorování struktur

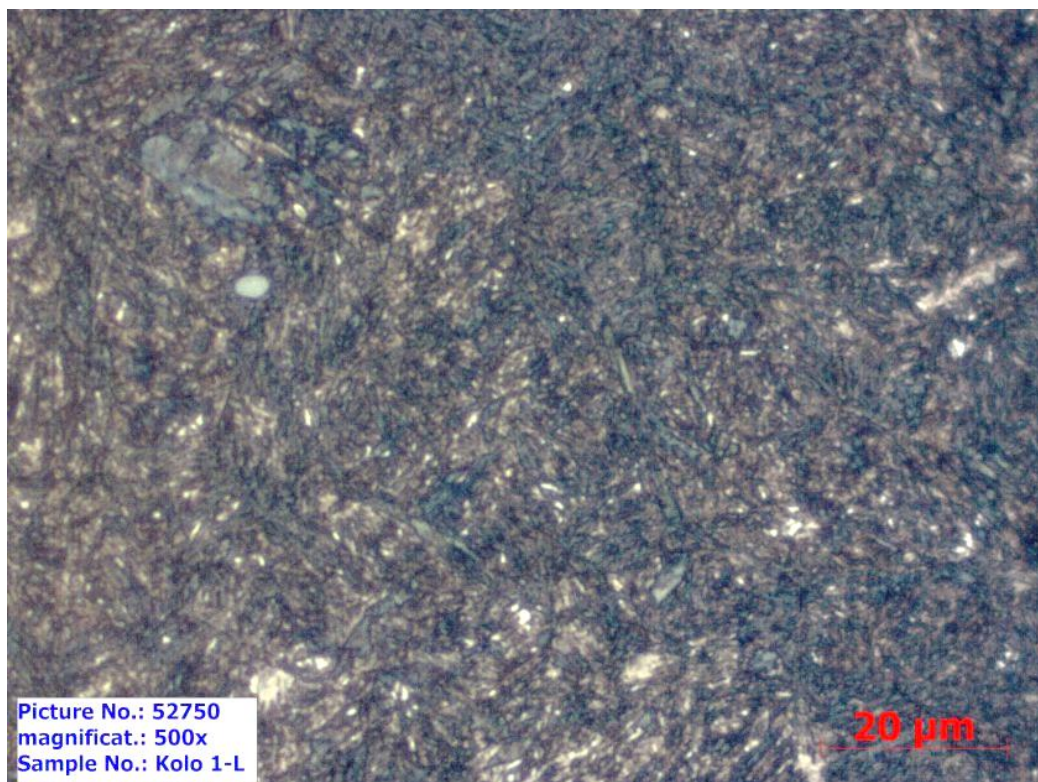
Příloha č. 1 Snímky metalografického pozorování struktur



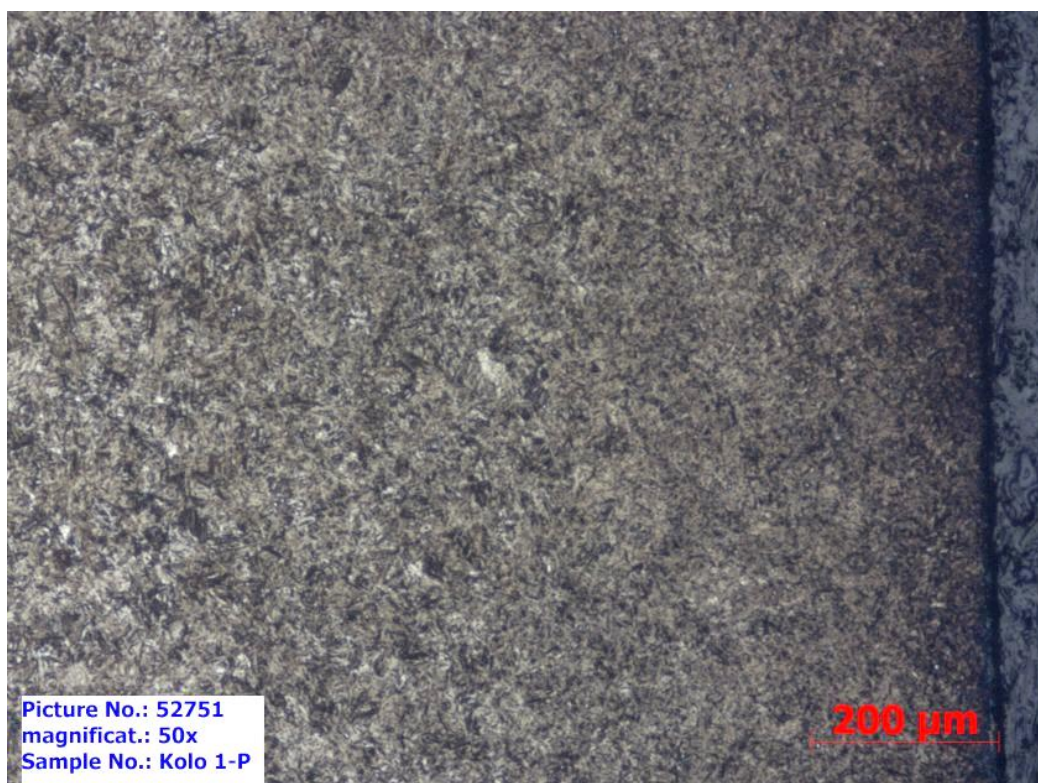
Snímek č. 1 Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 50x



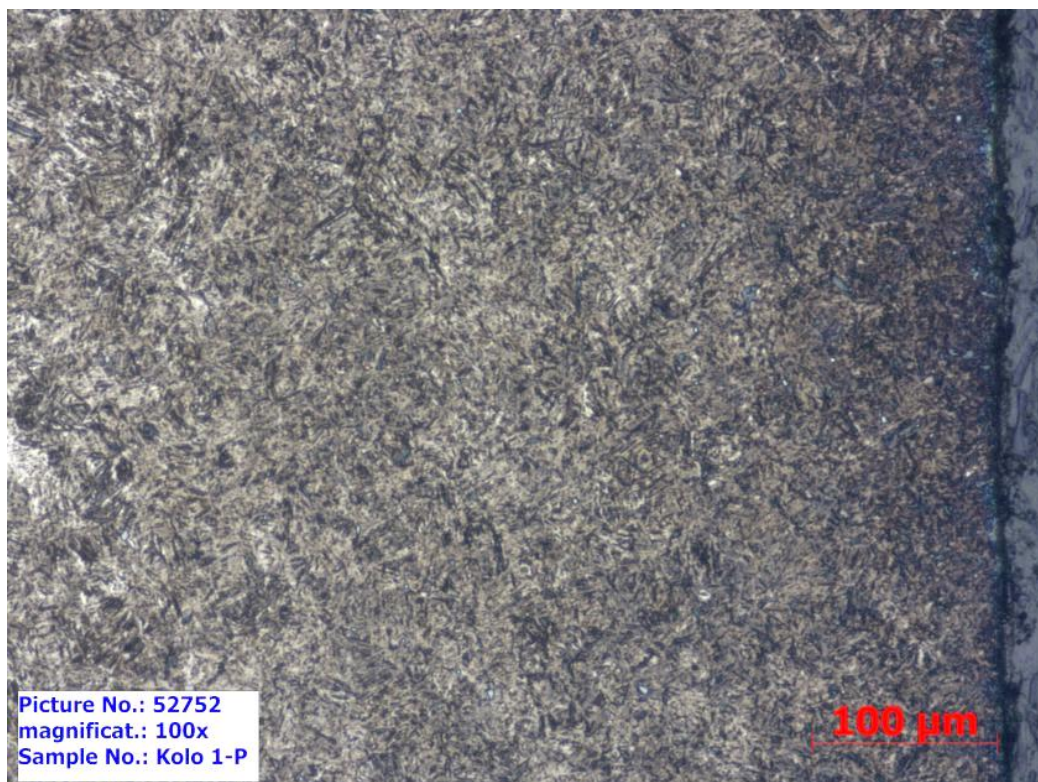
Snímek č. 2 Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 100x



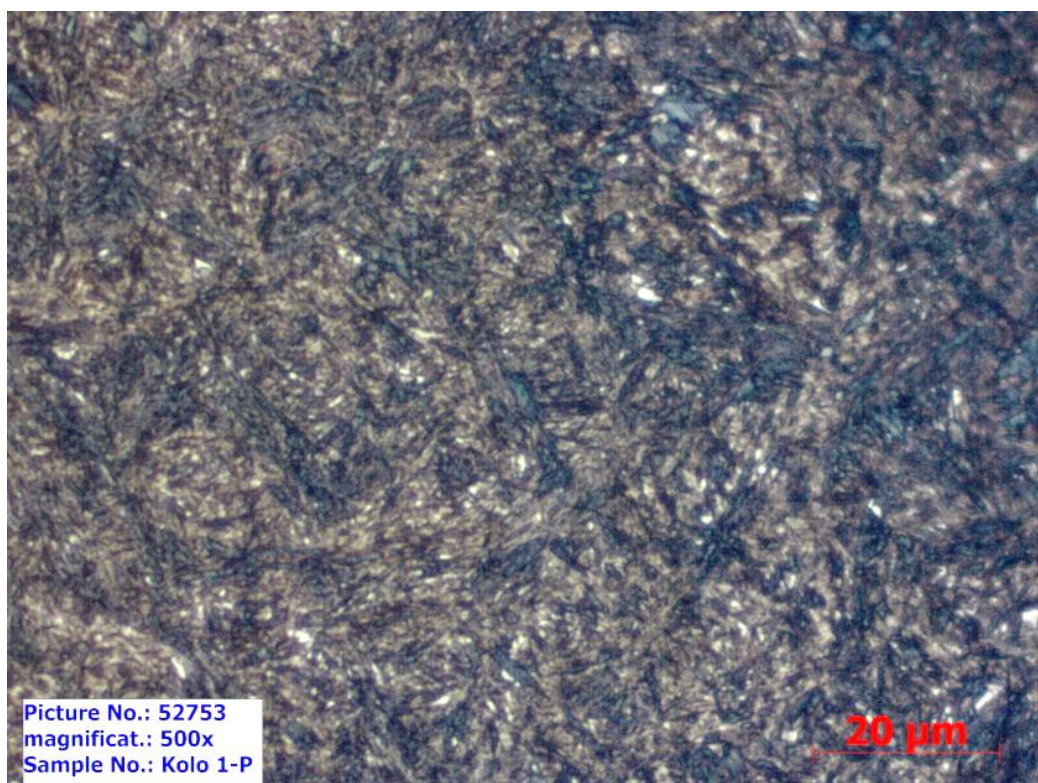
Snímek č. 3 Kolo A3-1-13L; Levá strana; zvětšení 500x



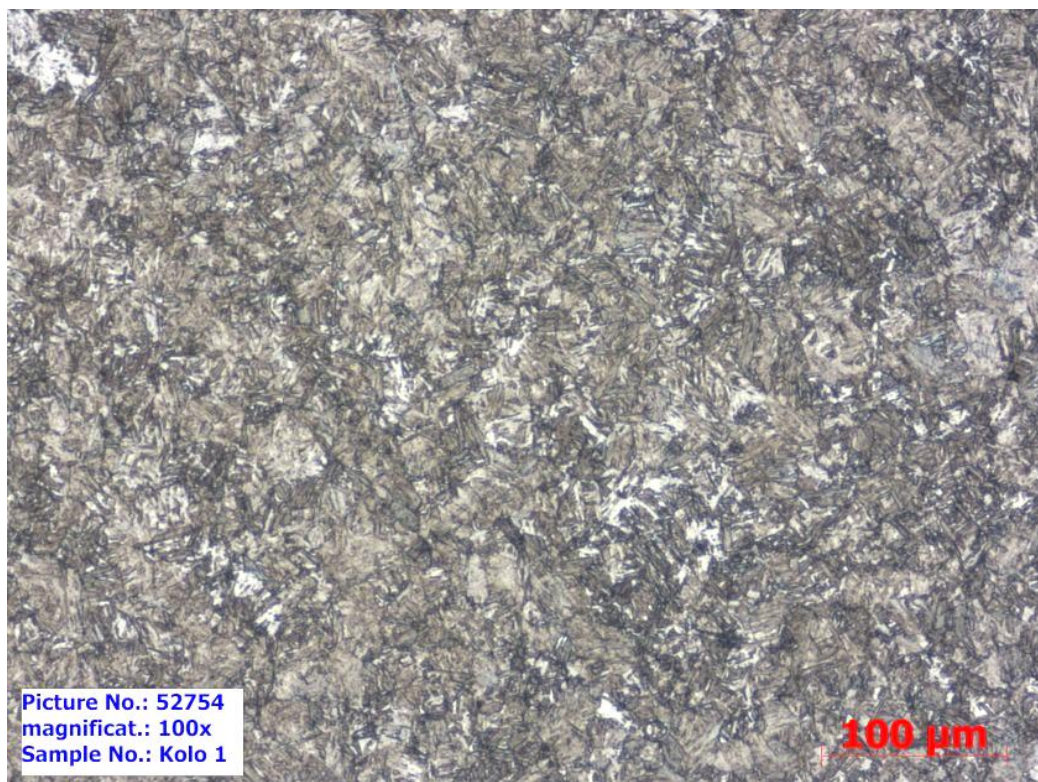
Snímek č. 4 Kolo A3-1-13P; Pravá strana; zvětšení 50x



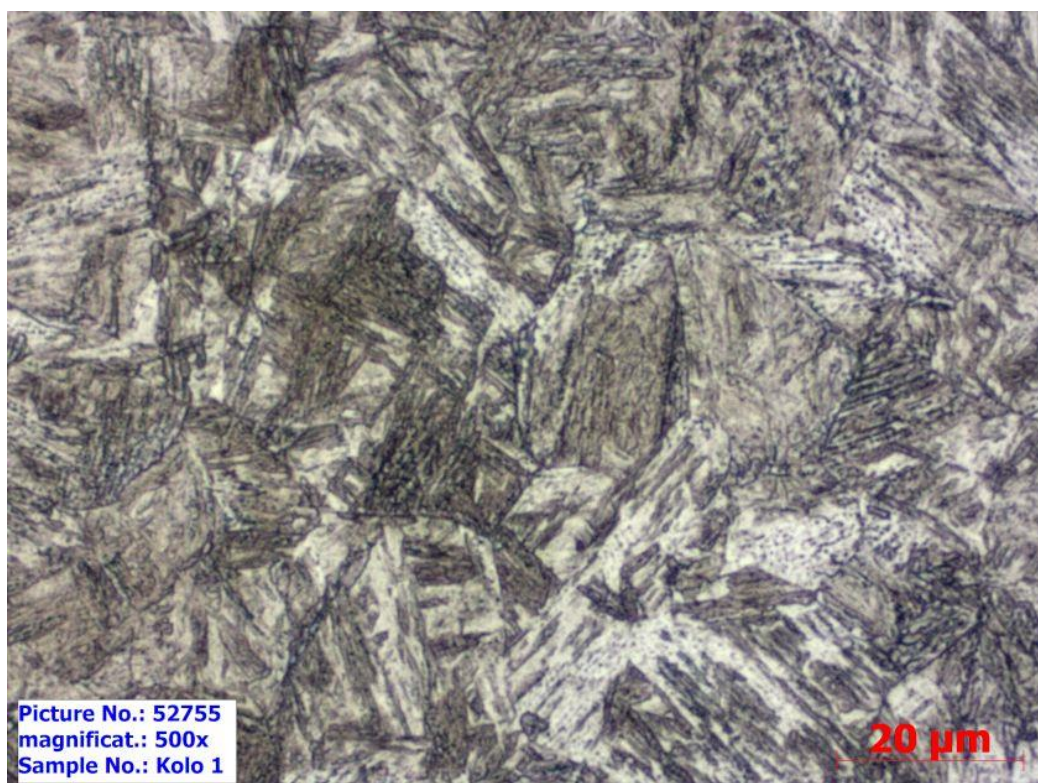
Snímek č. 5 Kolo A3-1-13P; Pravá strana; zvětšení 100x



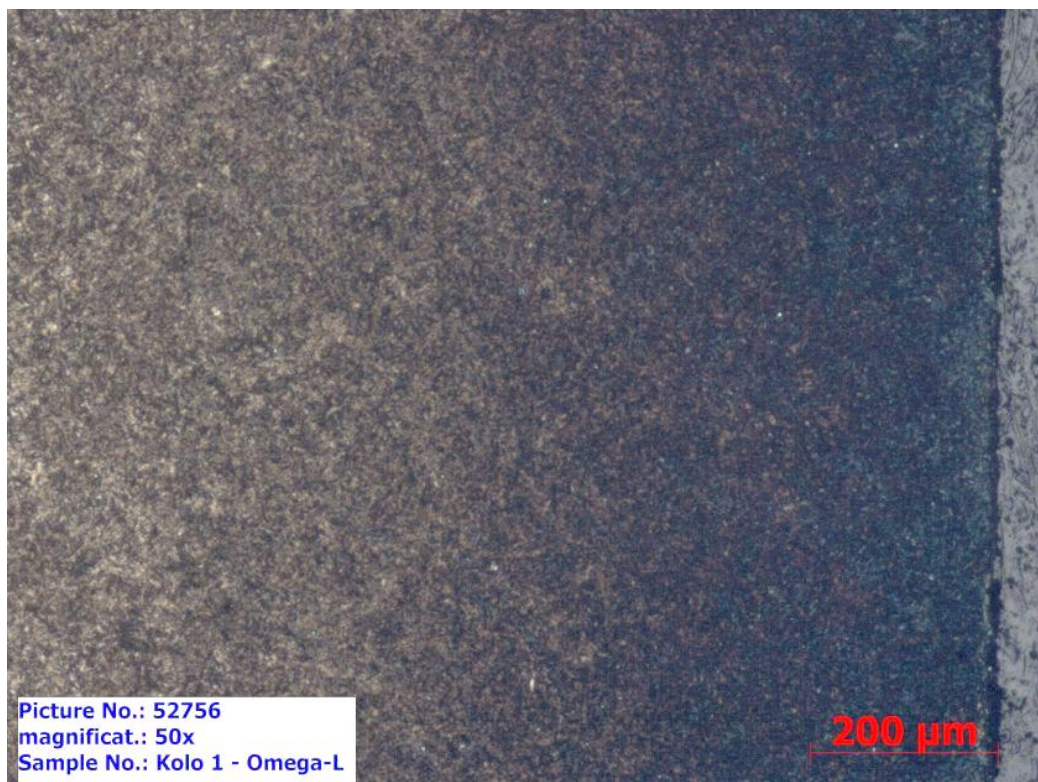
Snímek č. 6 Kolo A3-1-13P; Pravá strana; zvětšení 500x



Snímek č. 7 Kolo A3-1-13P; jádro zubu; zvětšení 100x



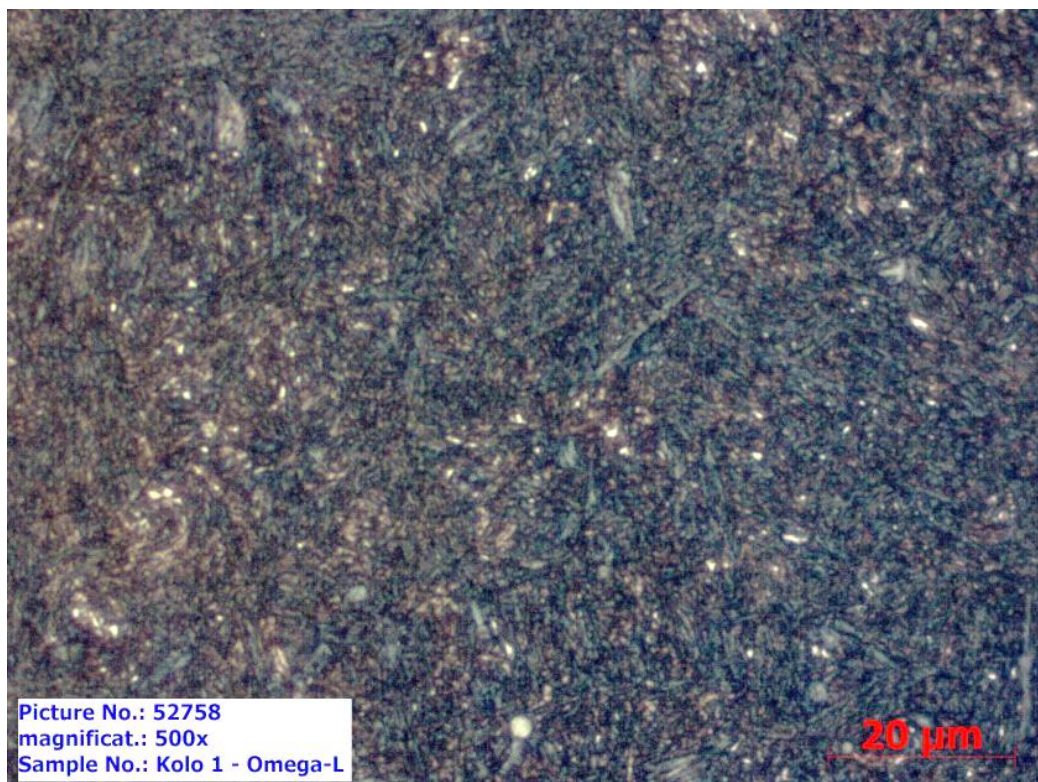
Snímek č. 8 Kolo A3-1-13P; jádro zubu; zvětšení 500x



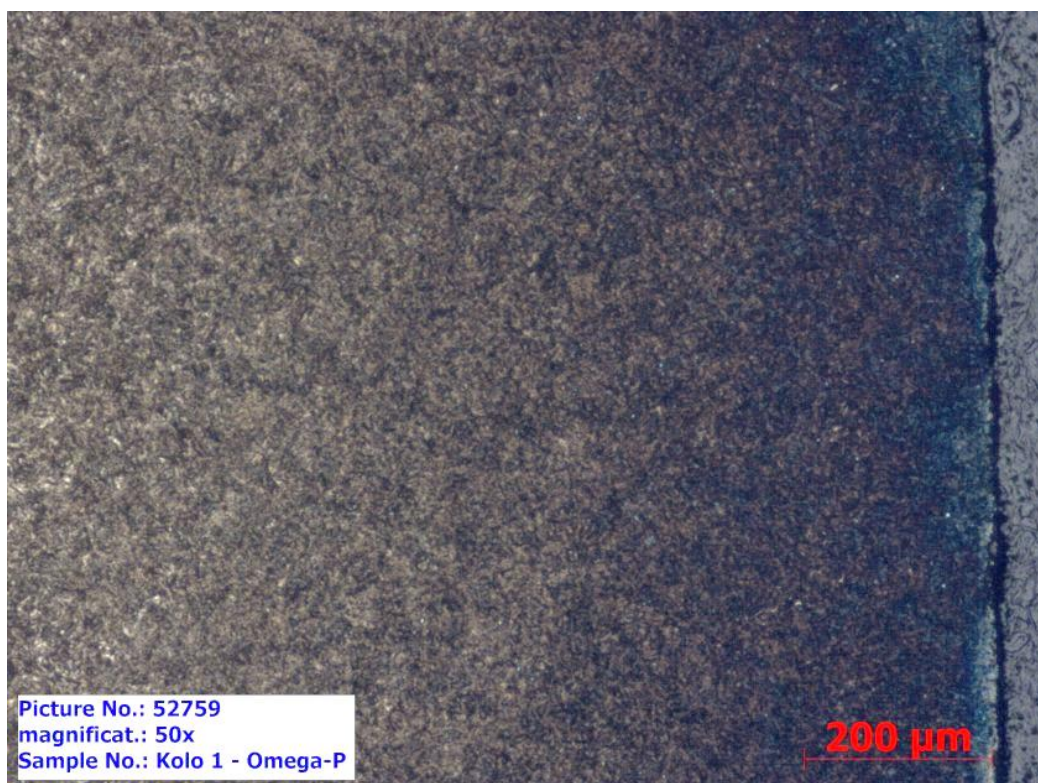
Snímek č. 9 Kolo B1-1-13L; Levá strana; zvětšení 50x



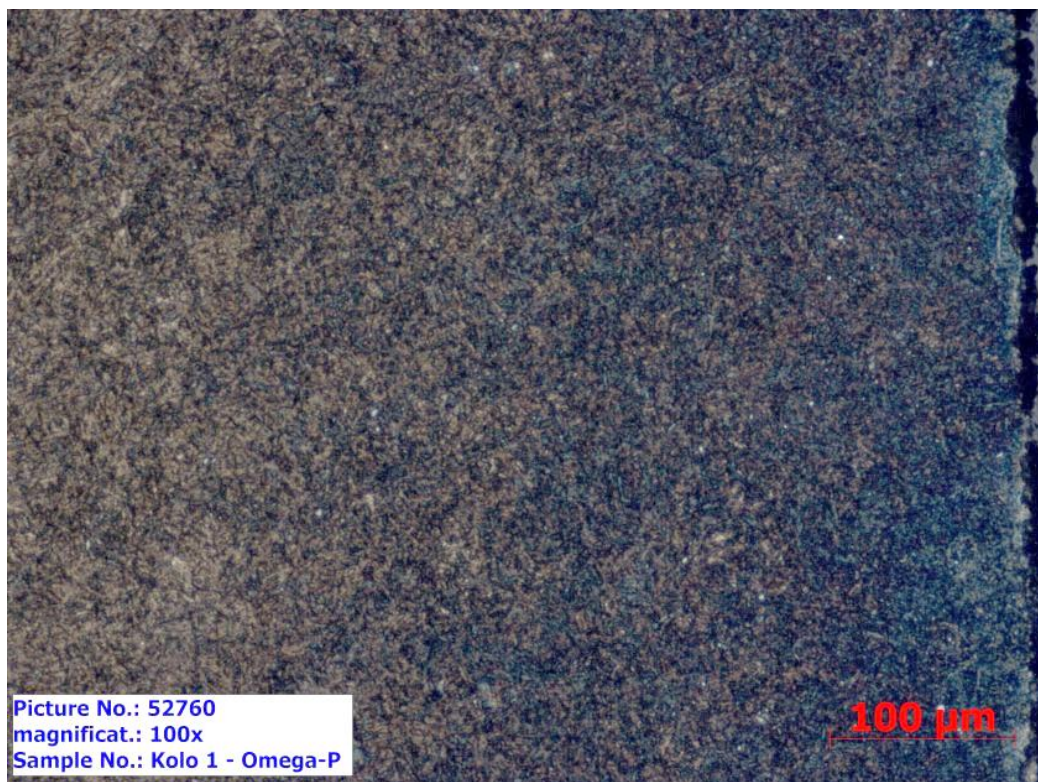
Snímek č. 10 Kolo B1-1-13L; Levá strana; zvětšení 100x



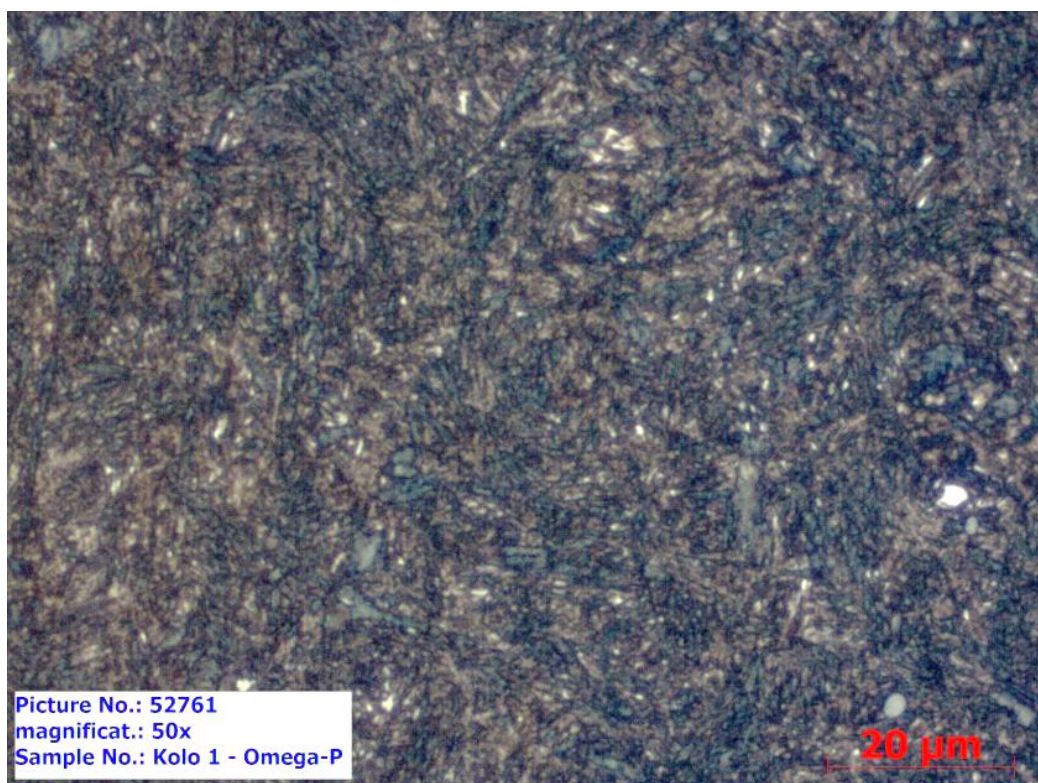
Snímek č. 11 Kolo B1-1-13L; Levá strana; zvětšení 500x



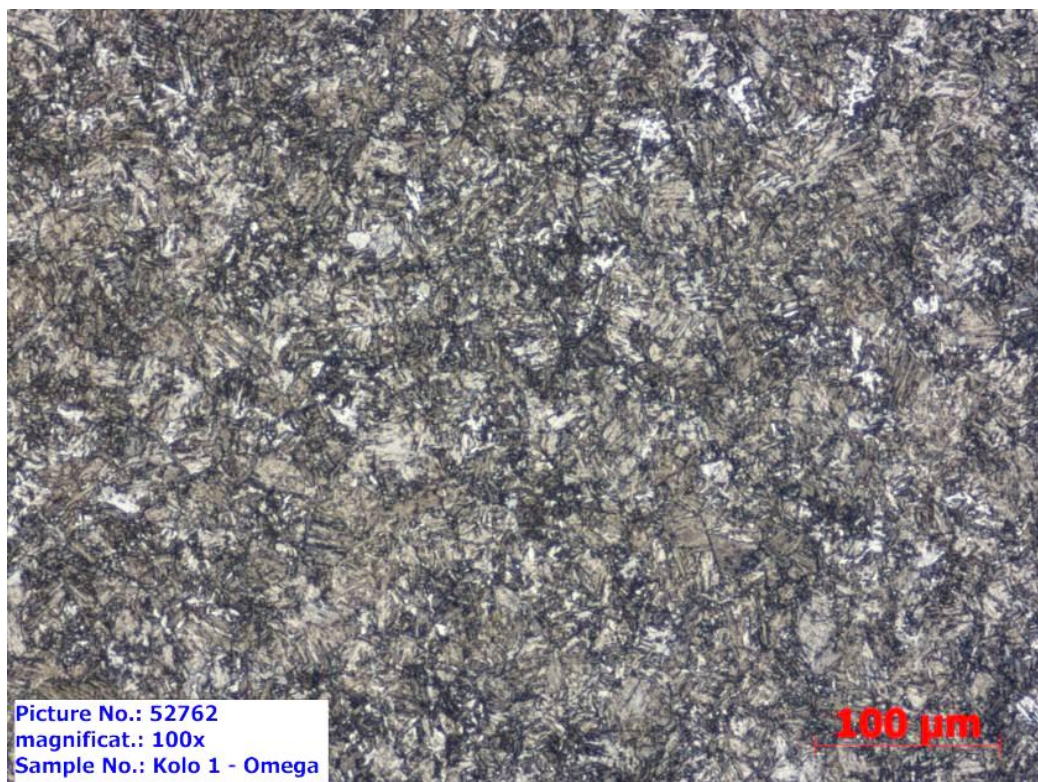
Snímek č. 12 Kolo B1-1-13P; Pravá strana; zvětšení 50x



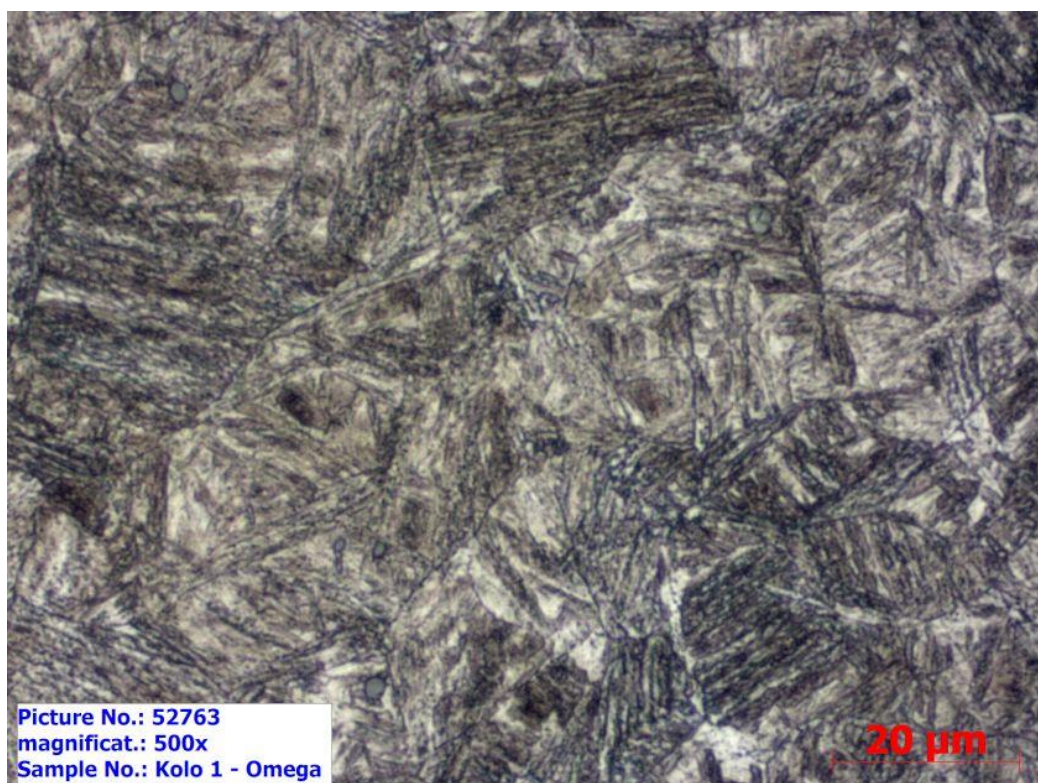
Snímek č. 13 Kolo B1-1-13P; Pravá strana; zvětšení 100x



Snímek č. 14 Kolo B1-1-13P; Pravá strana; zvětšení 500x



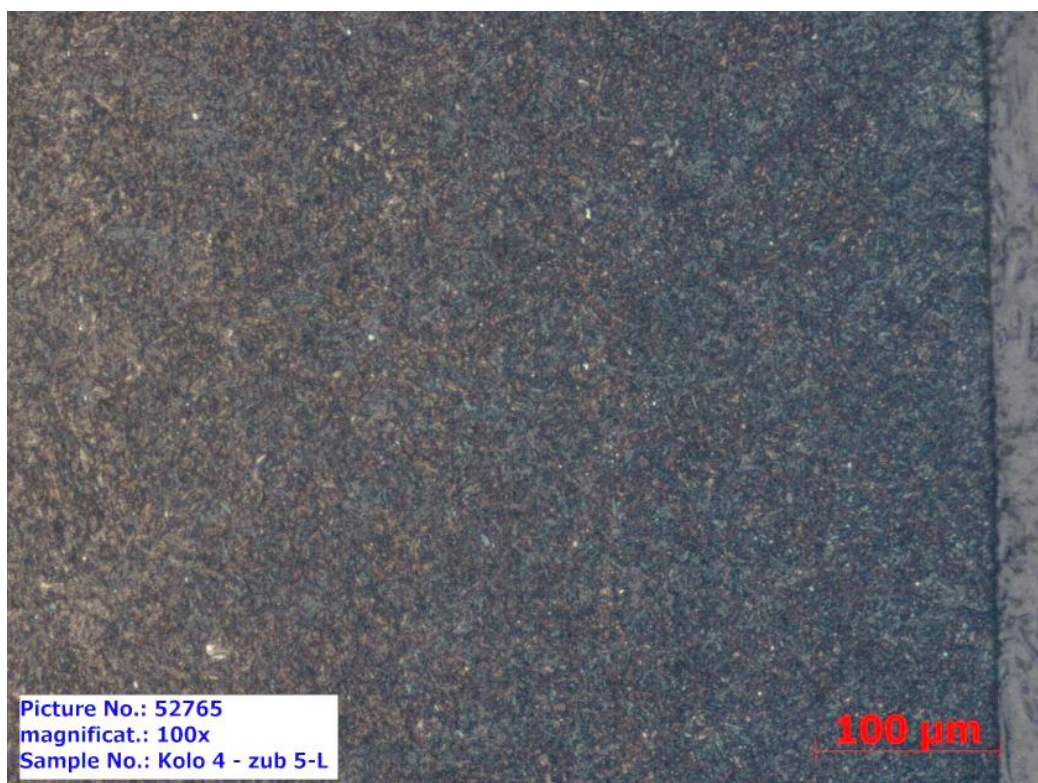
Snímek č. 15 Kolo B1-1-13; jádro zubu; zvětšení 100x



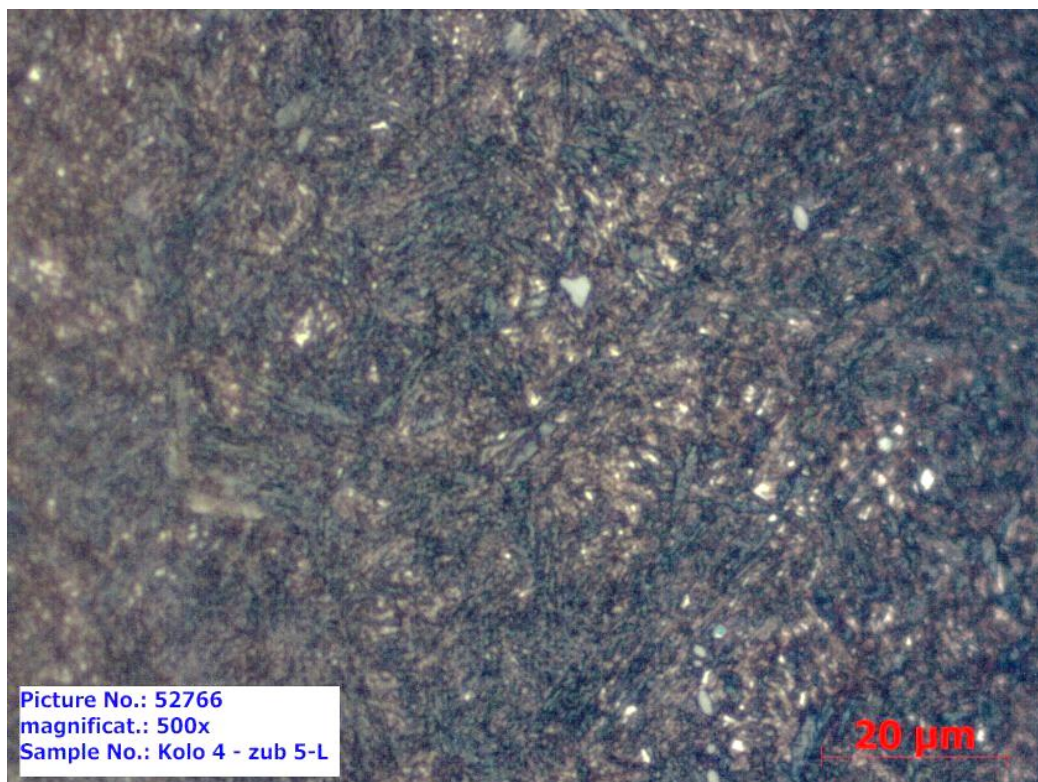
Snímek č. 16 Kolo B1-1-13; jádro zubu; zvětšení 500x



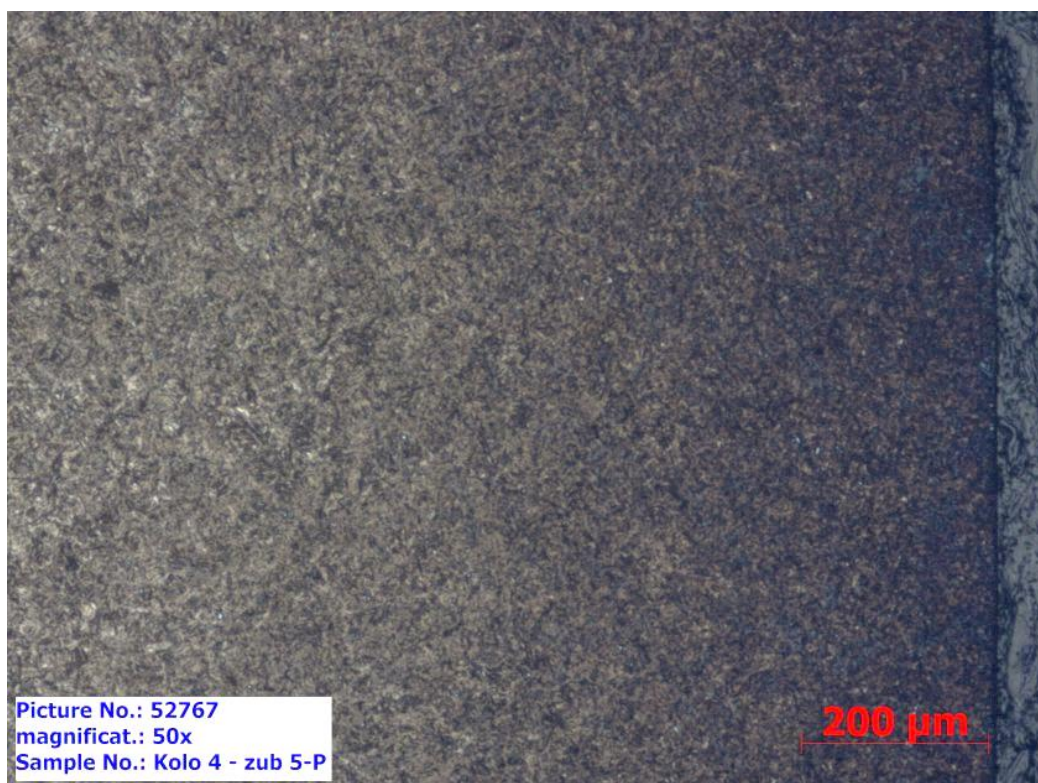
Snímek č. Kolo 17 A2-4-5L; Levá strana; zvětšení 50x



Snímek č. 18 Kolo 17 A2-4-5L; Levá strana; zvětšení 100x



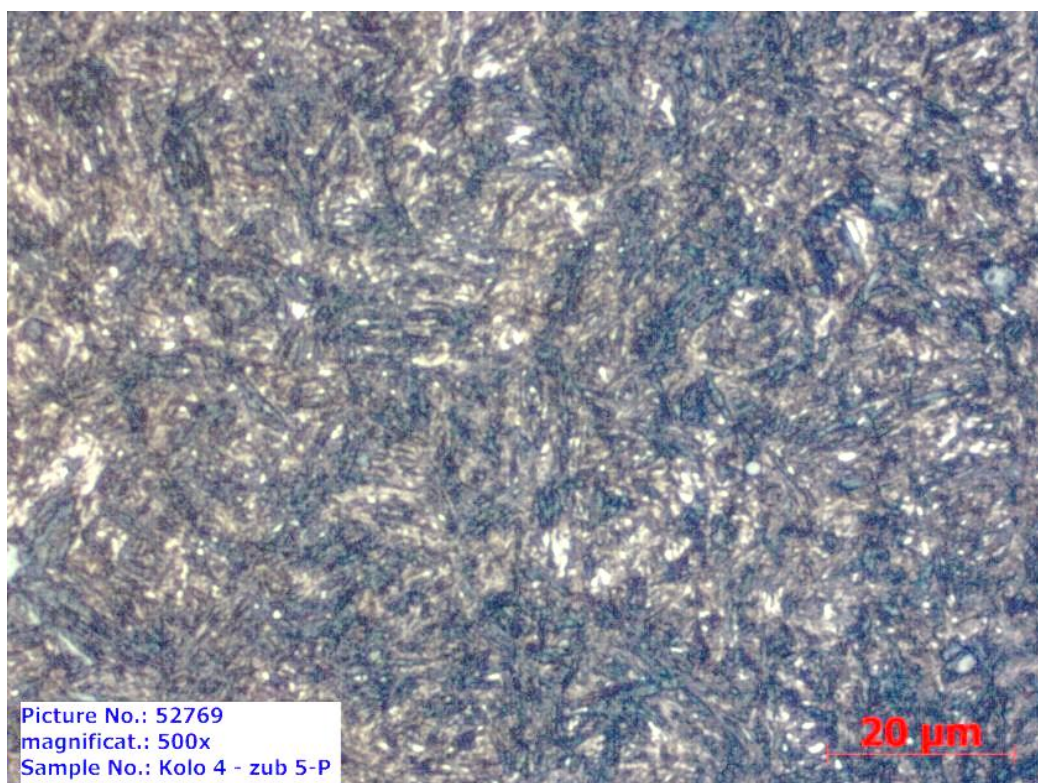
Snímek č. 19 Kolo 17 A2-4-5L; Levá strana; zvětšení 500x



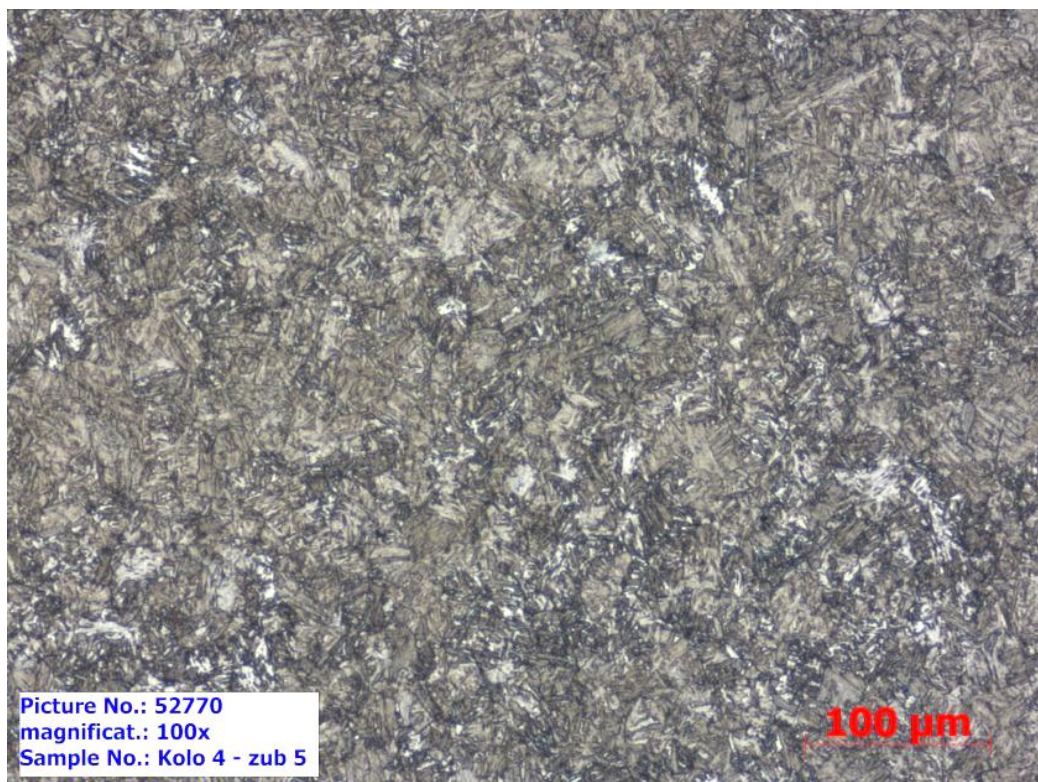
Snímek č. 20 Kolo 17 A2-4-5P; Pravá strana; zvětšení 50x



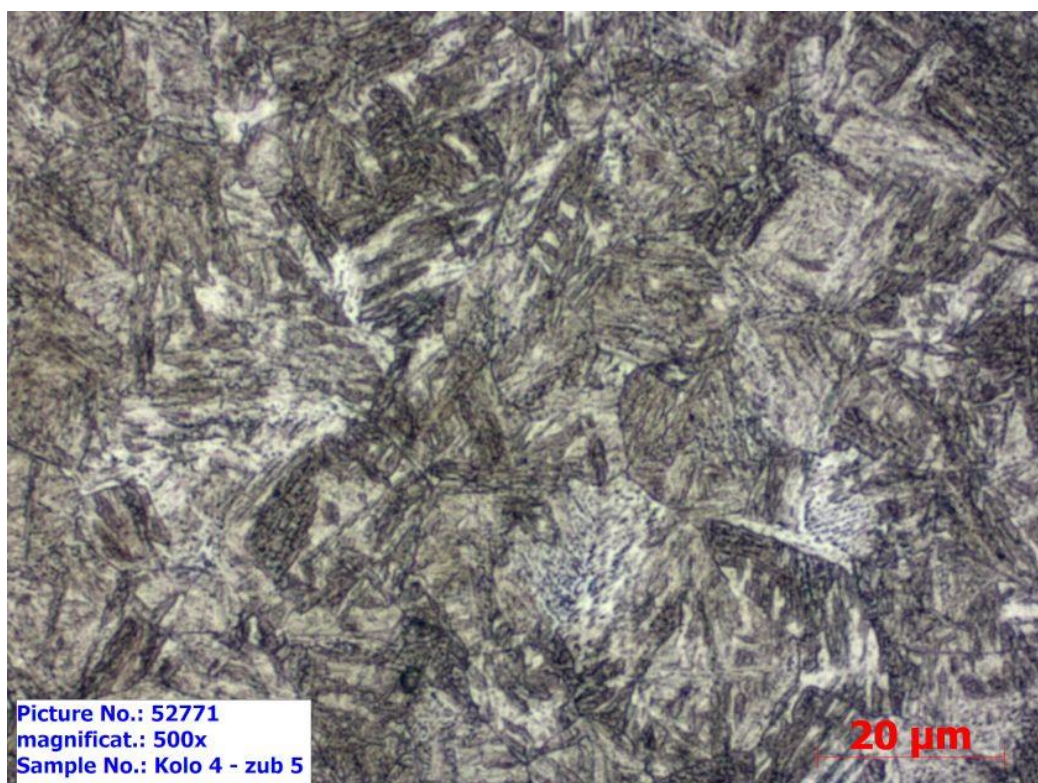
Snímek č. 21 Kolo 17 A2-4-5P; Pravá strana; zvětšení 100x



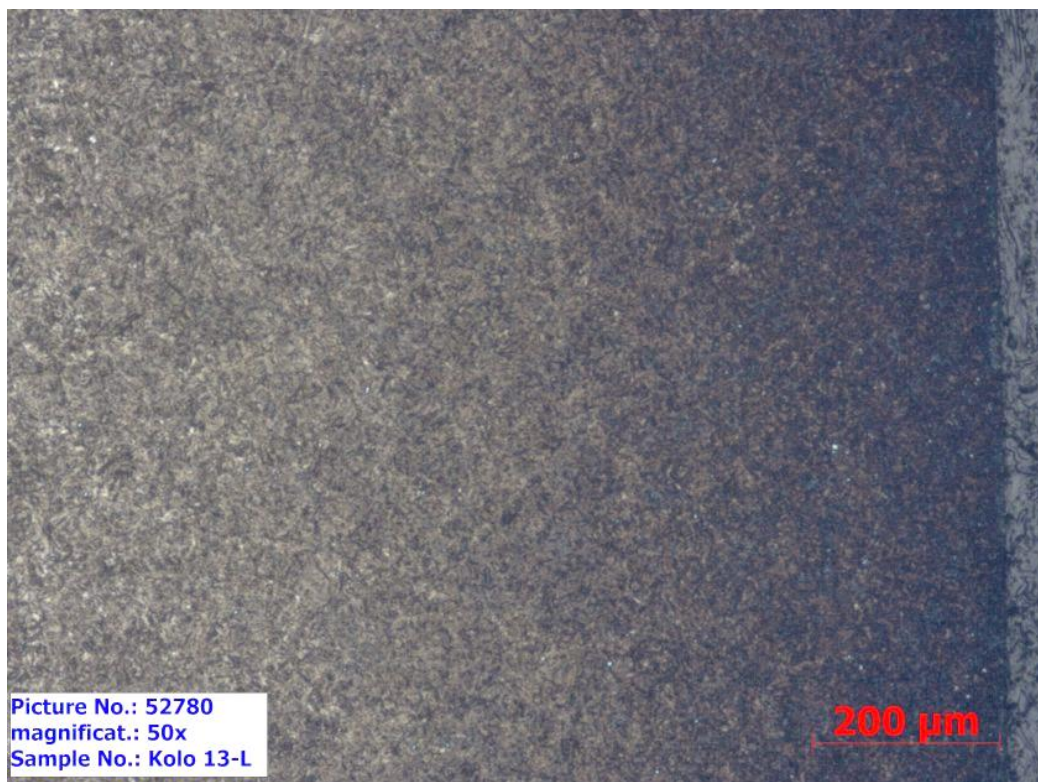
Snímek č. 22 Kolo 17 A2-4-5P; Pravá strana; zvětšení 500x



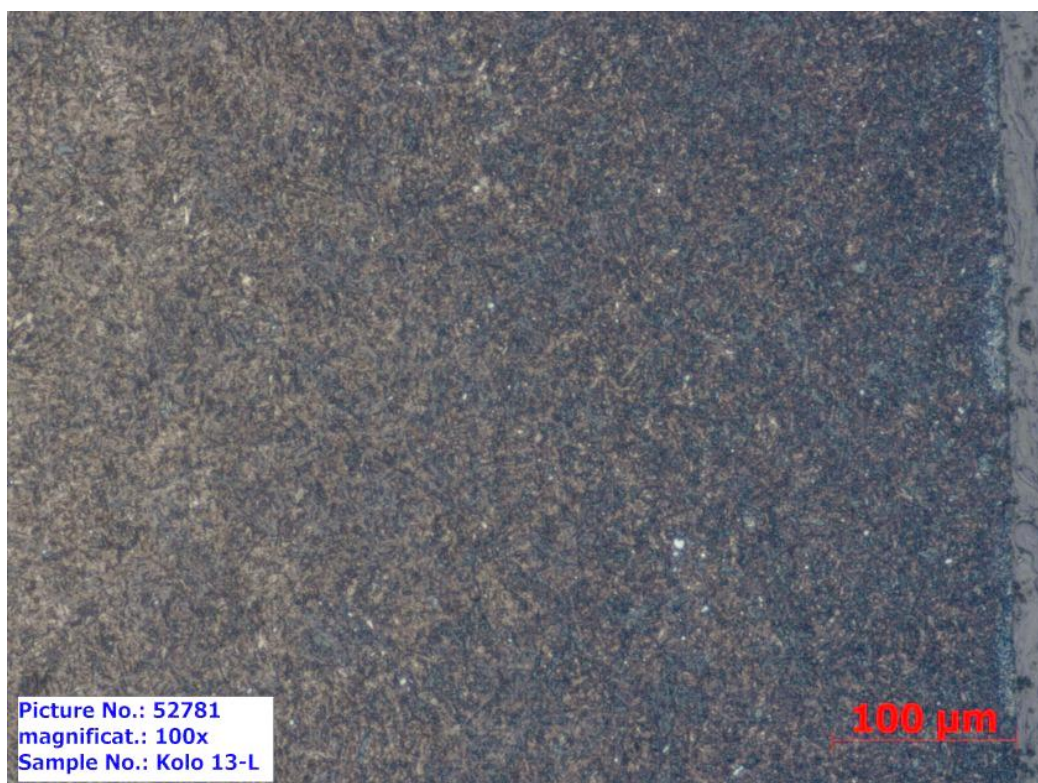
Snímek č. 23 Kolo 17 A2-4-5; jádro zubu; zvětšení 100x



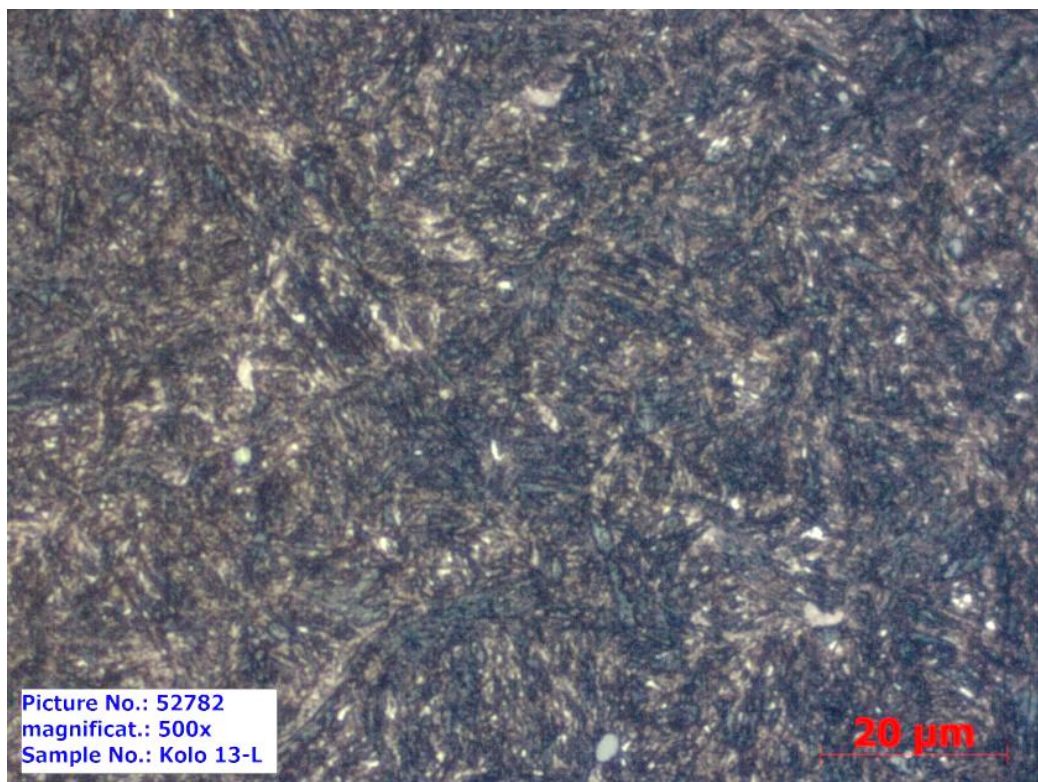
Snímek č. 24 Kolo 17 A2-4-5; jádro zubu; zvětšení 500x



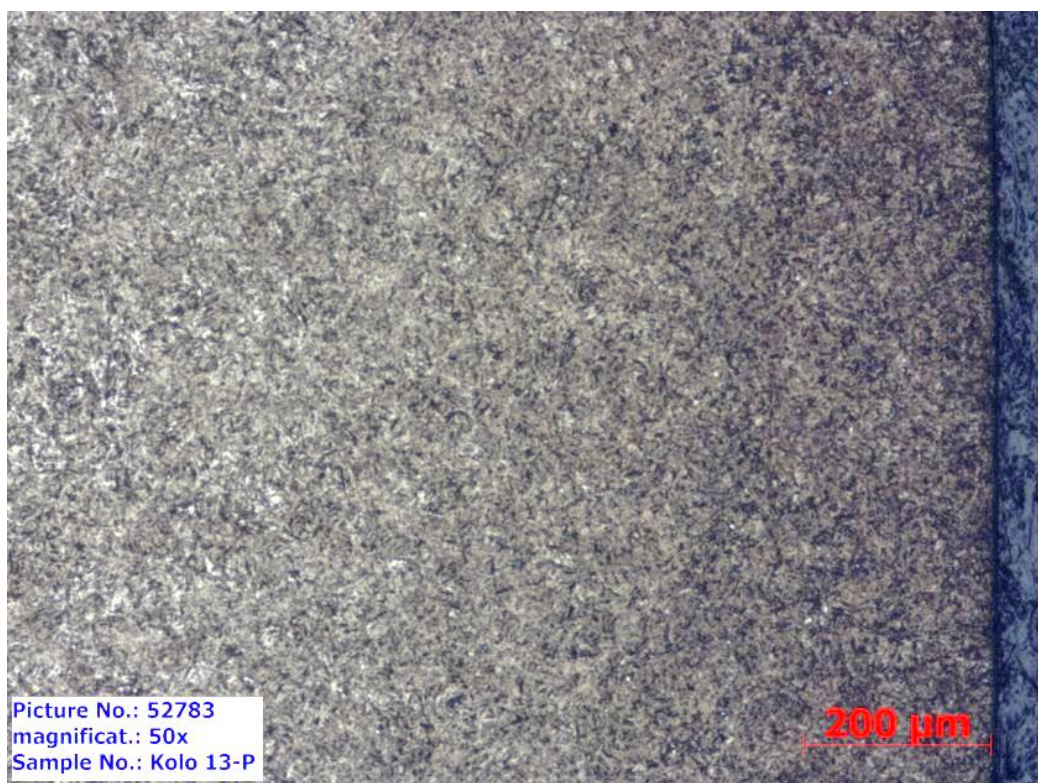
Snímek č. 25 Kolo A1-13-13L; Levá strana; zvětšení 50x



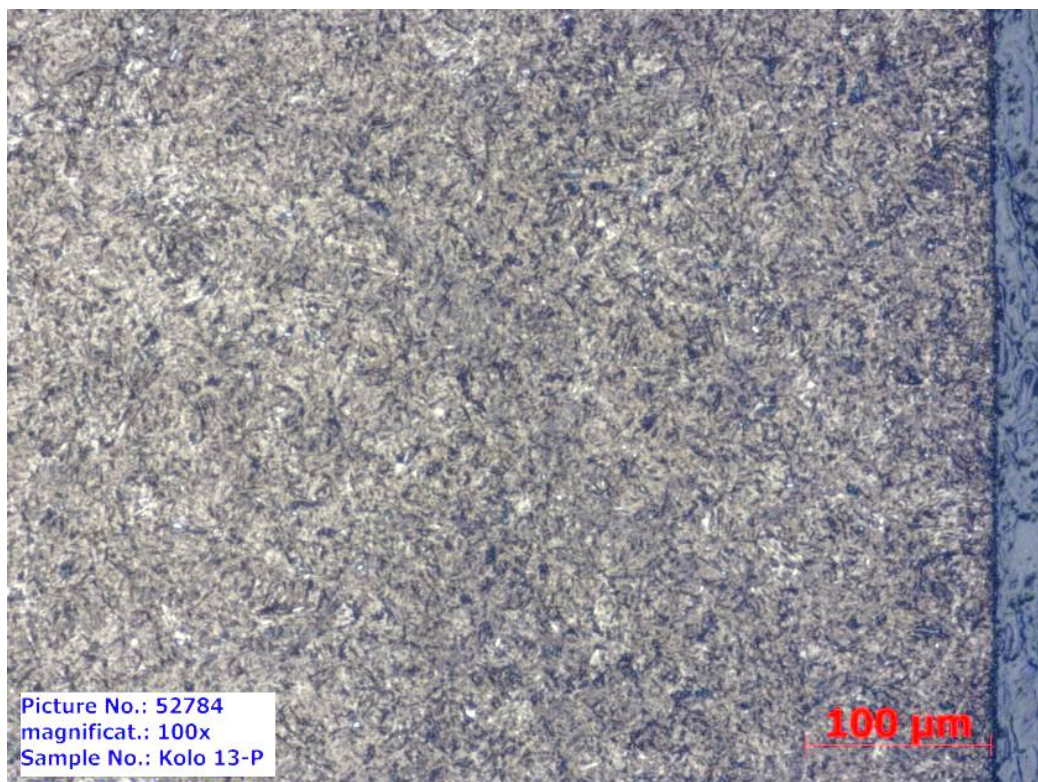
Snímek č. 26 Kolo A1-13-13L; Levá strana; zvětšení 100x



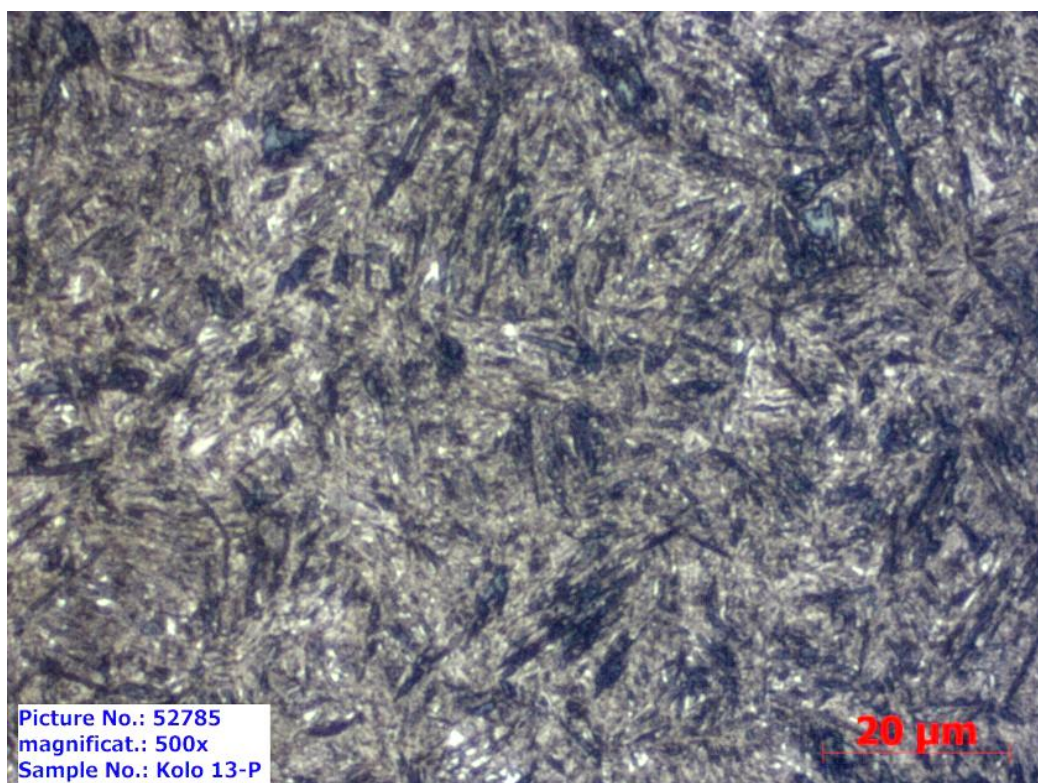
Snímek č. 27 Kolo A1-13-13L; Levá strana; zvětšení 500x



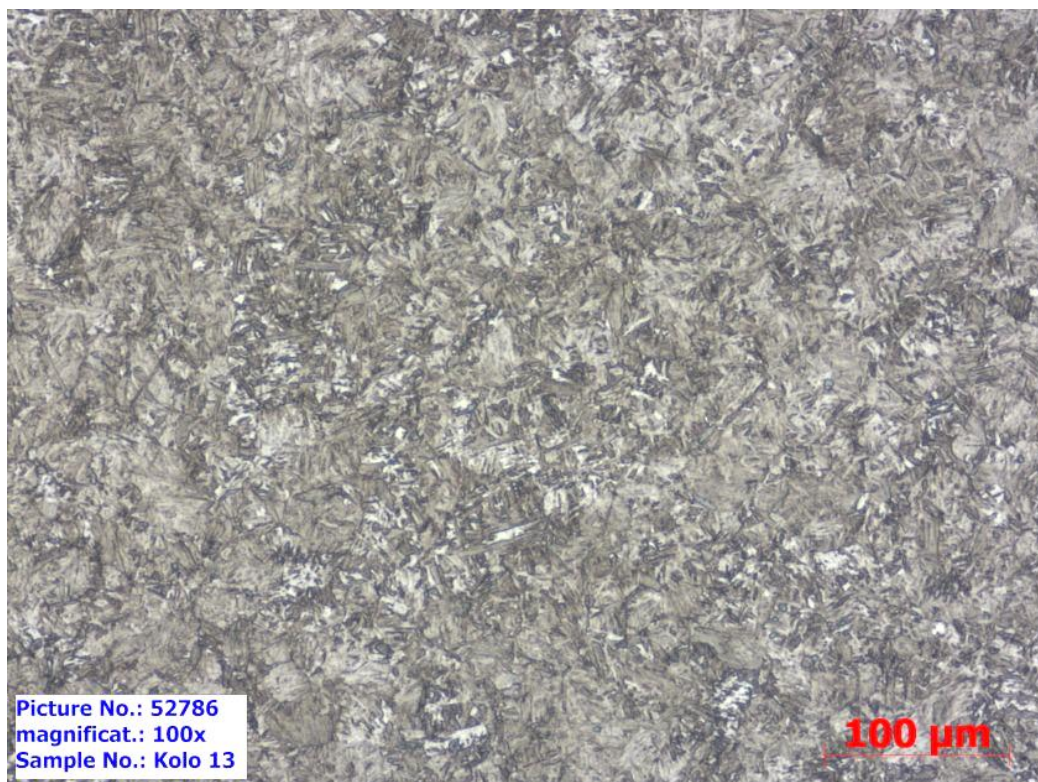
Snímek č. 28 Kolo A1-13-13P; Pravá strana; zvětšení 50x



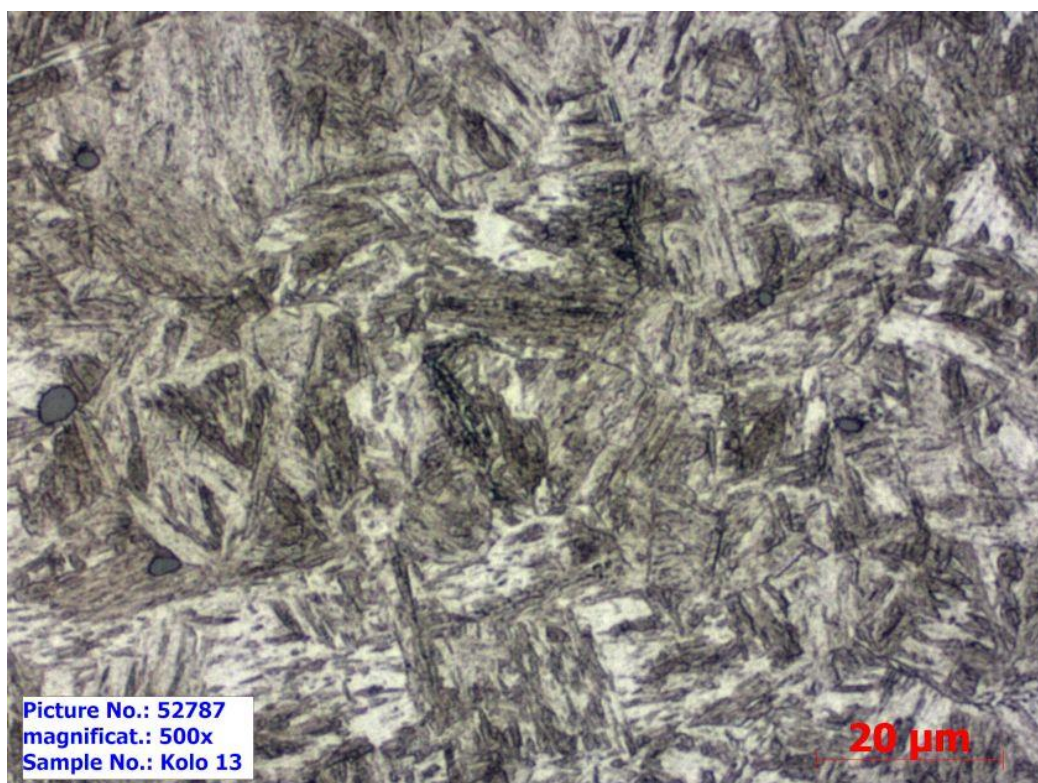
Snímek č. 29 Kolo A1-13-13P; Pravá strana; zvětšení 100x



Snímek č. 30 Kolo A1-13-13P; Pravá strana; zvětšení 500x



Snímek č. 31 Kolo A1-13-13; jádro zubu; zvětšení 100x



Snímek č. 32 Kolo A1-13-13L; jádro zubu; zvětšení 500x