



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství

# Vliv parametrů CHTZ na hlučnost ozubení

Bakalářská práce

Autor: Vojtěch Vastl  
Vedoucí práce: Ing. Jakub Horník, Ph.D  
Konzultant: Ing. Martin Klimeš, ŠKODA AUTO a.s.  
Rok: 2016



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	<b>Vojtěcha V A S T L A</b>
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	<b>Vliv parametrů CHTZ na hlučnost ozubení</b>
název anglicky:	Influence of Chemical heat treatment on noise of toothing

## Zásady pro vypracování:

### Cíl:

Zpracovat přehled příčin zvýšené hlučnosti ozubení. Zaměřit se na vliv materiálu, jeho TZ a CHTZ. Experimentálně prověřit vliv rozdílných podmínek CHTZ v rámci vsázky na hlučnost soukolí.

### Postup:

1. Literární rešerše v oblasti hlučnosti ozubení.
2. Materiály ozubených součástí, TZ a CHTZ, dosahované parametry.
3. Návrh experimentu ve výrobním závodě a jeho provedení.
4. Vyhodnocení výsledků.
5. Závěry a doporučení.

Rozsah průvodní zprávy: 30 – 40 stran  
Rozsah grafických prací: dle potřeby

### SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

- [1] Ptáček, L.: *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002, ISBN 80-720-4248-3
- [2] Macek, K., Zuna, P., Janovec, J.: *Tepelné úpravy kovových materiálů*, Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 1993
- [3] Daniel H. Herring: *Gear Heat Treatment: The Influence of Materials and Geometry*, dostupné z <http://www.geartechnology.com/issues/0304x/herring.pdf>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Horník, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Martin Klimeš,  
ŠKODA AUTO a.s.

Datum zadání bakalářské práce: 25. dubna 2016

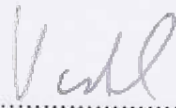
Datum odevzdání bakalářské práce: 15. července 2016


Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

*Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne:

25-04-2016

  
.....  
student

  
.....  
Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSC.  
vedoucí ústavu



  
.....  
Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.  
děkan fakulty

V Praze dne 20. dubna 2016

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D. za odborné vedení, panu Ing. Klimešovi za přístup k informacím a konzultace, panu Ing. Andělovi za poskytnutí potřebných informací a celému týmu metalografie za umožnění měření.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 30. 6. 2016

.....



# Abstract

This paper examines the influence of material characteristics on transmissions' noise level. Measurements were performed on the fourth gear of an automatic six-speed transmission, where based on statistical values of the measurement was found slight dependence of the hardness on the overall noise level of the gearing.

# Abstrakt

Tato práce zkoumá vliv materiálové charakteristiky na hlučnost převodovek. Měření bylo prováděno na čtvrtém rychlostním stupni automatické, šestistupňové převodovce, kde na základě statistických hodnot měření byla zjištěna mírná závislost tvrdosti materiálu na celkové hlučnosti daného soukolí.





# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>3</b>
2.1	Způsoby eliminování hlučnosti . . . . .	3
2.1.1	Přesnost . . . . .	3
2.1.2	Vhodná volba typu ozubeného kola . . . . .	3
2.1.3	Modifikace tvarů zubů . . . . .	4
2.2	Materiály ozubených součástí, TZ a CHTZ . . . . .	7
2.2.1	Oceli používané pro zhotovení ozubených kol . . . . .	7
2.2.2	Tepelné zpracování . . . . .	9
2.2.3	Chemicko-tepelné zpracování . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>15</b>
3.1	Úvod do problematiky . . . . .	15
3.2	Návrh experimentu . . . . .	16
3.2.1	Měření tvrdosti a hloubky nauhličené vrstvy . . . . .	16
3.2.2	Měření zbytkového napětí a zbytkového austenitu . . . . .	19
3.3	Vyhodnocení . . . . .	19
3.3.1	Tvrdost na povrchu a v jádře . . . . .	20
3.3.2	Vyhodnocení CHD . . . . .	24
3.3.3	Vyhodnocení zbytkového austenitu a zbytkového napětí v tlaku . . . . .	27
3.4	Porovnání mikrostruktury . . . . .	31
3.5	Prvková analýza EDS . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>43</b>
4.1	Zhodnocení splnění cílů . . . . .	43
4.2	Doporučení . . . . .	43
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>53</b>
<b>B</b>	<b>Obrázky</b>	<b>55</b>



# Kapitola 1

## Úvod

Toto téma vzniklo na podnět firmy ŠKODA AUTO a.s. ve Vrchlabí, která se zabývá výrobou automatických převodovek pro koncern VW. Při řešení problematiky celkové hlučnosti, kdy se vyloučily veškeré hlavní vlivy, podílející se na hlučnosti, jako jsou především geometrické nepřesnosti, nastával stále částečný rozptyl mezi hlučnými a tichými převodovkami. Jednou z možností, která by mohla mít částečný vliv na celkovou hlučnost se jevila materiálová vlastnost. Konkrétně se tato problematika týká čtvrtého rychlostního stupně šestistupňové, automatické převodovky.

Hlavním cílem této bakalářské práce je ověřit, zda lze vliv materiálu popsat na základě vybraných charakteristik a metodou porovnání (tiché/hlučné soukolí) vypočítat případnou materiálovou závislost.



# Kapitola 2

## Teoretická část

### 2.1 Způsoby eliminování hlučnosti

Vibrace, které vznikají především v záběru ozubených kol způsobují nežádoucí hluk. Na buzení vibrací se podílí geometrické parametry soukolí, tuhost zubů a jejich zatížení. Např. jen u evolventních boků zubů vznikají samobuzené vibrace, které vznikají i na ideálně přesných spoluzabírajících kolech v důsledku rozdílných tuhostí zubů během záběru, což způsobí rozdílnou deformaci zatíženého a nezatíženého zubu a dochází k vstupnímu rázu, kterému se v této práci věnuji v podsekcí výškové modifikace. [9]

Pokud se bavíme o převodové skříně, zde mohou být zdrojem nepravidelného buzení vibrací i další díly, jako jsou vibrace ložisek a hřídelů, provedení odlitku, svařence skříně a uložení skříně. [9]

#### 2.1.1 Přesnost

Soukolí vyrobená s vyšší geometrickou přesností mají samozřejmě lepší vlastnosti než soukolí s menší geometrickou přesností. Z tohoto důvodu je kladen stále větší důraz na zvyšování přesností. Čím vyšší přesnost, tím ovšem stoupají výrobní náklady. Proto se využívají i alternativní způsoby snižování hlučnosti, jako je např. systém. korekcí.

#### 2.1.2 Vhodná volba typu ozubeného kola

Pokud vezmeme dva hlavní zástupce ozubeného čelního kola, jako jsou čelní ozubená kola s přímými a šikmými zuby, tak můžeme na tomto příkladě jednoduše demonstrovat vliv typu ozubení na hlučnost. U šikmého ozubení dochází k delšímu a plynulejšímu záběru spoluzabírajících zubů, což způsobuje tišší chod daného soukolí.[5]

Typickým příkladem tohoto rozdílu, který bylo možné postřehnout u starších osobních automobilů, kde zpětný rychlostní stupeň v převodových skříních, na rozdíl od zbylých rychlostních stupňů, byl řešen pomocí soukolí s přímými zuby. Při jízdě na tento rychlostní stupeň byl rozeznatelný rozdíl v hlučnosti těchto dvou druhů ozubení.

### 2.1.3 Modifikace tvarů zubů

Skutečný tvar evolventních ozubených kol se od teoretického tvaru liší. Je to dáno především technologickými a provozními důvody. Mezi technologické důvody lze zařadit např. způsob výroby a s tím spojená přesnost, mezi provozní důvody lze zařadit např. funkční poloha spoluzabírajících ozubených kol, čemuž odpovídá lícování, kterým se rozumí předepsání rozměrů a vzájemné polohy dvou zabírajících kol. Při hodnocení hluku převodovky je více než poloviční podíl zdrojů hluku dán zubovým záběrem. Zbytek tvoří zvuk na pozadí, především hluk způsobený ložisky. Z tohoto důvodu je zapotřebí soustředit se na správný záběr zubů. [9]

#### Výšková modifikace

Důvodem realizace výškové (příčné) modifikace je vznikající tzv. vstupní ráz, který vzniká při vstupu zubu do záběru. Důvodem je proměnná tuhost zubu v průběhu záběru, kde v důsledku deformací ( $f'$ ) dojde při vstupu nezatíženého zubu k tzv. „interferenci“ a dojde k vstupnímu rázu. Vznik vstupního rázu je schematicky znázorněn na obr. 2.1

Podobný vliv může zapříčinit i úchylna rozteče, která může být způsobena nepřesností výroby.

Z tohoto důvodu se doporučuje (především u přímých zubů) zúžit zub od hlavy a plynule odlehčit evolventu. Pro výpočet velikosti výškové modifikace platí následující teoretický vztah:

$$c_a \doteq c_{a\Sigma} = \frac{F_n}{b_w \cdot c'} = \frac{w}{c'} [\mu m] \quad (2.1)$$

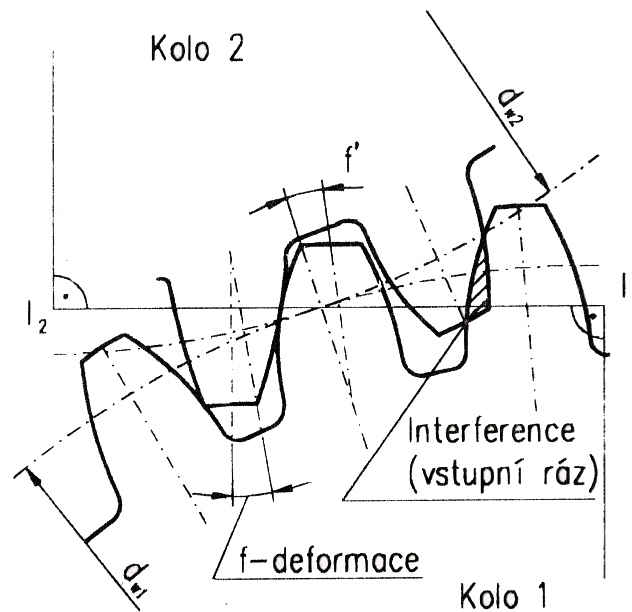
$F_n$  - normální síla mezi zuby [N]

$b_w$  - společná šířka zubů [mm]

$c'$  - tuhost zubů [N/mm]

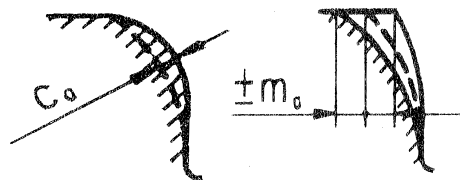
$w$  - šířkové zatížení zubů [N/mm]

$c_{a\Sigma}$  - součet deformací spoluzabírajících zubů



Obrázek 2.1: Schéma záběru zatížených zubů [9]

Výškovou modifikaci můžeme rozdělit ještě na dva druhy, lišící se rozdílnou modifikací výšky zubu. Na obr. 2.2 vlevo je znázorněna výšková modifikace se změnou tvaru evolventy a vpravo je naznačena modifikace se změnou úhlu záběru. Čárkovaná čára znázorňuje teoretický tvar zubu, plná čára symbolizuje následnou modifikaci tvaru zubu.

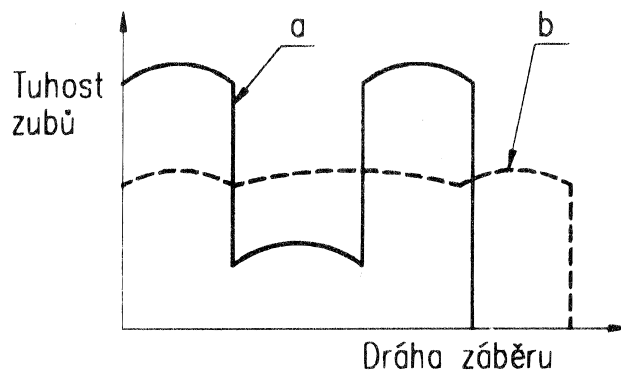


Obrázek 2.2: Vlevo: modifikace tvaru evolventy, vpravo: změna úhlu záběru [9]

Výšková modifikace závisí především na tuhosti zubů, která je na rozdíl od šířkového zatížení zubů dosti proměnná a závisí na modulu, geometrii ozubení a především na trvání záběru.

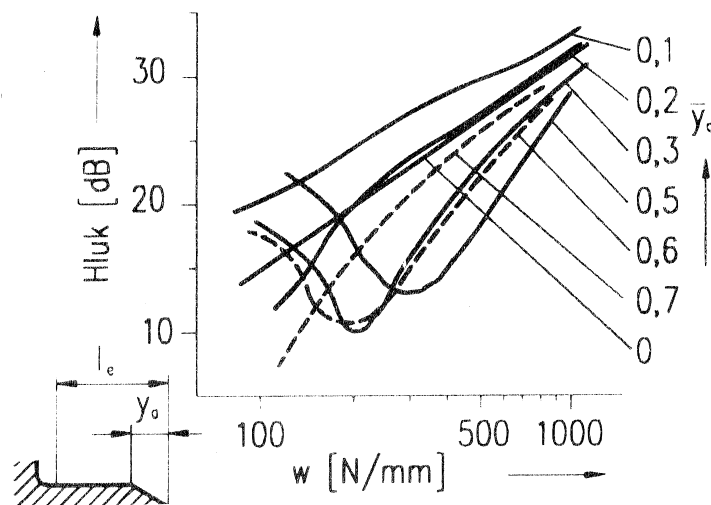
Na obr. 2.3 jsou schématicky znázorněny dva extrémní případy průběhu tuhosti během dráhy záběrů. Průběh  $a$  reprezentuje přímé zuby a poměr maximální a minimální tuhosti je roven přibližně 2. Průběh  $b$  znázorňuje průběh tuhosti šikmého ozubení a poměr mezi maximální a minimální tuhostí se blíží k 1.





Obrázek 2.3: Průběhy tuhosti během záběru ozubení [9]

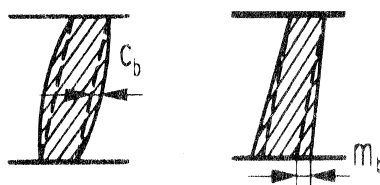
Vliv výškové modifikace na buzení vibrací (hluku) se dá schématicky vyjádřit dle obr. 2.4. Na ose x je šířkové zatížení zubu [N/mm], na ose y hluk [dB]. Základní parametr pro výškovou modifikaci je délka modifikace  $y_a$ . V grafu je délková modifikace vyjádřena poměrnou hodnotou  $\bar{y} = \frac{y_a}{l_e}$ , kde  $l_e$  je délka evolventy a  $y_a$  je délka modifikace. Z grafu je patrné, že nejlepší výsledky dosahuje modifikace  $\bar{y} \doteq 0,5$ .



Obrázek 2.4: Vliv modifikace na hlučnosti [9]

### Podélná modifikace

Touto modifikací se rozumí eliminace deformací způsobených zatížením hřídelů, ložisek, skříněmi. Někdy se tato modifikace také nazývá modifikace boční křivky. V zásadě rozdělujeme dva základní druhy a to případ, kdy změním tvar boční křivky a případ, kdy provedeme změnu úhlu šroubovice. Tyto dva druhy jsou schématicky znázorněny na obr. 2.5, kde čárkovaně je vyznačen teoretický tvar a plnou čarou je vyznačen tvar po modifikaci.



Obrázek 2.5: Vlevo: Změna tvaru boční křivky, vpravo: změna úhlu šroubovice [9]

Změna tvaru boční křivky se využívá pro eliminaci úchylek sklonu zubů vzniklých při výrobě, deformací hřídelů u kol, kde dochází k velkým změnám zatížení.[9]

Druhá varianta podélné modifikace eliminuje deformace hřídelů a kol při záběru a brzdění. [9]

## 2.2 Materiály ozubených součástí, TZ a CHTZ

### 2.2.1 Oceli používané pro zhotovení ozubených kol

#### Neušlechtilé konstrukční oceli dle evropské normy ČSN EN 10027-1

Tam, kde nejsou kladeny vyšší nároky na mechanické vlastnosti, ale je zapotřebí materiál odolávající statickému i dynamickému zatížení, se použije například ocel E295 dle evropského značení. (0,3 %C, 0,045 %P, 0,045 %S, 0,009 %N, dosahuje po normalizačním žhání minimální pevnosti v tahu 500 MPa a po zušlechtnění lze dosáhnout až 700 MPa pevnosti v tahu.) [1]

#### Oceli pro povrchové kalení

Pro povrchové kalení se používají shodné oceli jako pro klasické kalení, tzn. oceli s větším obsahem uhlíku než 0,2 %. Běžně se obsah uhlíku pohybuje v rozmezí 0,2-0,5 %. Jako legující prvky se volí Mn, Cr a V, které se pozitivně podílejí na celém procesu povrchového kalení. Mezi zástupce oceli pro povrchové kalení lze zmínit např. ocel 30CrMoV9 dle evropského značení. Chemické složení je názorně zobrazeno v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Chemické složení oceli 30CrMoV9 [10]

Chemický prvek	C	Si	Mn	$P_{max}$	$S_{max}$	Cr	Mo	Ni	V
hm.% C	0,26-0,34	0,40	0,40-0,70	0,035	0,035	2,30-2,70	0,15-0,25	0,60	0,10-0,20
Příp. odch.	$\pm 0,02$	$+0,03$	$+0,04$	$+0,005$	$+0,004$	$+0,12$	$\pm 0,03$	$+0,05$	$\pm 0,02$

#### Cementační oceli

Obecně se oceli vhodné pro cementování vyznačují relativně nízkým obsahem uhlíku. Konkrétněji vše blíže specifikuje evropská norma ČSN EN 10084, kde se přibližně horní hranice obsahu uhlíku udává hm. 0,25 %C. Zároveň tyto oceli nesmí být před cementací

tepelně zpracovány, pouze se válcují za tepla. Celkem norma předepisuje 35 značek ocelí, které jsou následně rozděleny do šesti skupin. [10]

Oceli:

1. nelegované ušlechtilé
2. chrómové
3. chrómmanganové
4. chrómmolybdenové
5. chrómniklové
6. chróm-molybden-niklové

Tabulka 2.2: Vybraní představitelé cementačních ocelí [10]

Značka	Č. mat.	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
17Cr3	1.7016	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,70 – 1,00		
28Cr4	1.7030	0,24 – 0,31	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		
16MnCr5	1.7131	0,14 – 0,19	1,00 – 1,30	0,80 – 1,10		
20MnCr5	1.7147	0,17 – 0,22	1,10 – 1,40	1,00 – 1,30		
18CrMo4	1.7243	0,15 – 0,21	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20	0,15 – 0,25	
20MoCr3	1.7320	0,17 – 0,23	0,60 – 0,90	0,40 – 0,70	0,30 – 0,50	
16NiCr4	1.5714	0,13 – 0,19	0,70 – 1,00	0,60 – 1,70		0,80 – 1,10
10NiCr5-4	1.5805	0,07 – 0,12	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		1,20 – 1,50
15NiCr13	1.5752	0,14 – 0,20	0,40 – 0,70	0,60 – 0,90		3,00 – 3,50
20NiCrMo2-2	1.6523	0,17 – 0,23	0,65 – 0,95	0,35 – 0,70	0,15 – 0,25	0,40 – 0,70
17NiCrMo6-4	1.6566	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25	1,20 – 1,50
18CrNiMo7-6	1.6587	0,15 – 0,21	0,50 – 0,90	1,50 – 1,80	0,25 – 0,35	1,40 – 1,70
14NiCrMo13-4	1.6657	0,11 – 0,17	0,30 – 0,60	0,80 – 1,10	0,10 – 0,25	3,00 – 3,50

Legující prvky mají vliv na obsah uhlíku v cementované vrstvě, tloušťku a tvrdost vrstvy. Ni a Mn zvyšují houževnatost jádra. Obsah Si a P má nežádoucí vlastnosti, proto se ocel vyrábí s maximálním obsahem Si do 0,04 % a P do 0,034 %. Dále je normou stanovena velikost austenitického zrna na 5-8 dle EN 10103. [10]

První skupina ocelí k cementování, nelegovaná ušlechtilá ocel, má obsah uhlíku 0,07-0,13 %. Nevýhodou této oceli je malá prokalitelnost, proto se také používá na méně namáhané součástky s menší tloušťkou stěny. [10]

U chrómové a chrómmolybdenové oceli je již prokalitelnost vyšší, je to způsobeno chromem, který má negativní vliv na rychlost difuze od povrchu do středu, což je spojeno se vznikem nadeutektoidní vrstvy. Tyto oceli se vyznačují dobrou odolností povrchu, nicméně jsou křehké.

K předejití křehkosti je vhodné použít oceli chrómniklové a chróm-molybden-niklové. Legováním niklem se zajistí pevné a houževnaté jádro. Využívají se tam, kde jsou nejvíce namáhané součásti, jako jsou například ozubená kola. [10]

### Nitridační oceli

Vhodné oceli pro nitridaci specifikuje např. evropská norma ČSN EN 10085. Nejběžněji se používají oceli s obsahem uhlíku 0,3 až 0,4 hm. %, které jsou legovány prvky jako jsou Al, Cr, V a Mo. Hliník a vanad tvoří velmi jemné nitridy na povrchu materiálu a molybden snižuje náchylnost k tzv. popouštěcí křehkosti. Před nitridováním se používá zušlechťování, čímž se dosáhnou optimální vlastnosti jádra. Po nitridaci se materiál již jen brousí. [10]

Tabulka 2.3: Vybraní představitelé ocelí k nitridování [10]

Značka	Č. mat.	Chemické složení v [hm. %]				$R_m$ min. [MPa]	$R_e$ min. [MPa]	A min. [%]	KV min. [J]
		C	Cr	Mo	V				
34CrAlNi7	1.8550	0,30 – 0,37	1,50 – 1,80	0,15 – 0,25	–	900 – 1 000	680	10	30
41CrAlMo7	1.8509	0,38 – 0,45	1,50 – 1,80	0,20 – 0,35	–	950 – 1 150	750	11	25
39CrMoV13-9	1.8523	0,36 – 0,43	3,00 – 3,50	0,70 – 1,00	0,15 – 0,25	950 – 1 100	750	11	25
34CrAlMo5	1.8507	0,30 – 0,37	1,00 – 1,30	0,15 – 0,25	–	800 – 1 000	600	14	35
23CrMo13-6	–	0,20 – 0,27	3,00 – 3,50	0,50 – 0,70	–	1 000 – 1 200	800	10	25
31CrMo12	1.8515	0,20 – 0,35	2,80 – 3,30	0,30 – 0,50	–	1 030 – 1 230	835	10	25
31CrAlMo7-1	–	0,28 – 0,35	1,50 – 1,80	0,20 – 0,40	*0,80 1,20	1 030 – 1 230	835	10	25
31CrMoV9	1.8519	0,27 – 0,34	2,30 – 2,70	0,15 – 0,25	0,10 – 0,20	1 100 – 1 300	900	9	25
32CrMoV12-9	–	0,29 – 0,36	2,80 – 3,30	0,70 – 1,00	0,15 – 0,25	1 150 – 1 350	950	11	30

\*) obsah hliníku

### 2.2.2 Tepelné zpracování

Jedná se o způsob, kterým získáváme požadované mechanické či technologické vlastnosti. Využívá se zde řízených fázových a strukturních přeměn.

#### Povrchové kalení

V mnoha případech vyžadujeme od strojní součásti houževnaté jádro s odolným a pevným povrchem. Toho lze dosáhnout například chemicko-tepelným zpracováním, nebo povrchovým kalením. Pro povrchové kalení se používají dobře kalitelné oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,35 %. Základní princip spočívá v rychlém ohřevu povrchu materiálu do požadované hloubky a v rychlém zakalení. Tím vznikne na povrchu tvrdá martenzitická struktura. Běžné tloušťky zakalených vrstev bývají okolo 2-3 mm. Povrchové kalení se provádí u velkých ozubených kol. [2]

V současné době je velice oblíbené laserové povrchové kalení, především pro své výhodné vlastnosti. Principem této technologie je rychlé nahřátí povrchu materiálu pomocí výkonného laseru na teplotu 800-1500 °C (teplota závisí na době ohřevu), udržení dosažené teploty a následné prudké ochlazení, které je zapříčiněno tepelnou vodivostí materiálu. Hlavní výhodou této technologie je její snadná automatizace, přesné zakalení požadovaného místa, nízké teplotní ovlivnění okolního materiálu, minimální vznik povrchových trhlin...

Dalším způsobem, jak docílit vzniku pevné martenzitické struktury na povrchu materiálu, je indukční kalení. Pomocí induktoru (který má tvar přizpůsobený kalenému předmětu), do kterého je přivede střídavý proud, který indukuje střídavé magnetické pole. Na základě

tohoto střídavého magnetického pole vznikají vířivé proudy, které velice rychle zahřejí povrch materiálu na kalící teplotu. Z této kalící teploty je povrch materiálu zakalen díky rychlému odvodu tepla způsobeného tepelnou vodivostí materiálu. Při povrchovém kalení je nutné zohlednit typ materiálu a objem kaleného a nekaleného materiálu.

### 2.2.3 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelným zpracováním se rozumí především difuzní sycení povrchu prvky, jako jsou např. C, N. Zde je opět cílem dosáhnout tvrdý a odolný povrch s houževnatým jádrem. Při chemicko-tepelném zpracování se objevují z pravidla tři typy pochodů disociace (rozpad, štěpení molekul), adsorpce (hromadění látky na povrchu materiálu vlivem mezi povrchových sil), difuze (rozptylování částic). Při vysoké teplotě a dostatečné energii jsou vlivem disociace rozštěpeny molekuly na námi požadované prvky, které jsou vlivem chemických sil (adsorpce) přitahovány na povrchu zpracovávané oceli a vlivem difuzního mechanismu se pohybují mřížkou železa. [10]

### Cementace

Cementování, neboli sycení povrchu oceli uhlíkem, je proces, kdy se sytí povrch oceli na koncentraci kolem 0,85 hm. % C. Dosahovaná tvrdost je až 800 HV, té se ovšem dosahuje až po následném kalení. V důsledku vzniku vysokých deformací se provádí následné nízkoteplotní popouštění. Platí zde také zásada, že čím je ocel více legována, tím má menší náchylnost k deformacím. Teploty cementování se pohybují v rozmezí 850 - 950 °C, kde se pohybujeme nad teplotou  $A_{e3}$  v oblasti austenitu. Zde je rozpustnost uhlíku vyšší než v oblasti feritu. Tento způsob sycení povrchu uhlíkem se provádí u středně velkých ozubených kol. [7]

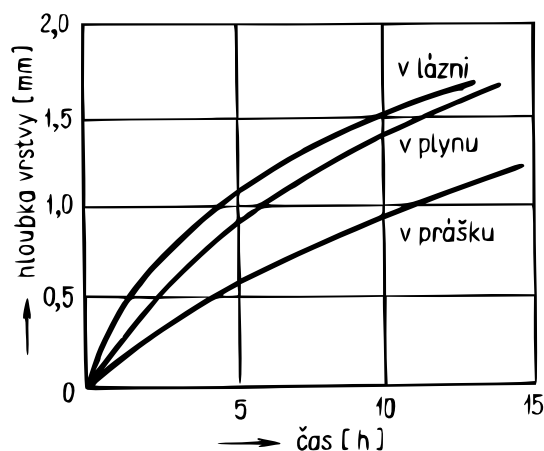
Cementování lze rozdělit dle použitého prostředí na plynné, kapalně a sypké (tuhé).

Sypké prostředí bylo hojně využíváno v předchozích letech, dnes se tato technologie používá již jen v omezeném rozsahu, a to především z důvodu špatné kontroly a regulace cementační atmosféry.

Pro cementování v plynném prostředí se využívají směsi plynů CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Výhodou v porovnání s pevným prostředím je snadná regulovatelnost procesu a větší nauhličovací schopnost.

I přesto, že rychlost nauhličování v kapalném prostředí je v porovnání s předchozími metodami nejrychlejší, nejedná se o nejpoužívanější metodu. V minulosti byl velice nepříjemný problém s jedovatostí kyanidů, které sloužily jako aktivní složka lázně. Dnes se již jako „zdroj“ uhlíku používá Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a SiC.

Na následující obrázku 2.6 je patrná závislost hloubky cementační vrstvy a doby cementace v uvedených prostředích.



Obrázek 2.6: Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [10]

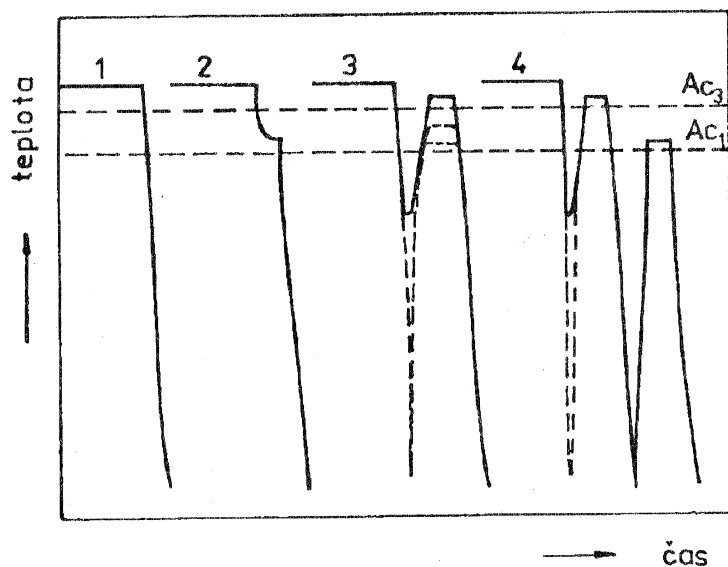
Až pomocí tepelného zpracování dosáhneme požadovaných tvrdostí a vlastností materiálu. Existuje několik druhů kalení, které balancují především mezi optimální strukturou nauhličené vrstvy a jádra součásti. Druh kalení (obr. 2.7) se volí především dle typu cementační oceli, použité technologie cementování a podle požadavků na výslednou součást. [10]

Nezákladnějším způsobem kalení je kalení přímé (1). Značnou nevýhodou tohoto kalení je vznik hrubé martenzitické struktury v cementované vrstvě a přítomnost vysokých vnitřních pnutí v jádře materiálu a tomu odpovídající materiálové deformace.

Částečným vyřešením problému je kalení s přichlazením (2). Do určité míry se předejde nežádoucím deformacím materiálu, ke zjemnění austenitického zrna však nedojde. Nejčastěji se takto kalí jemnozrné oceli.

Z ekonomického i funkčního hlediska je výhodné kalit podle schematického znázornění (3). Princip spočívá v ochlazení z cementační teploty na teplotu přibližně 600 °C. Ochlazením pod teplotu  $A_{c1}$  dojde k překrytalizaci a následným ohřevem na kalící teplotu se zjemní struktura austenitického zrna. Zde následují dvě možnosti z hlediska teplot kalení. V první možnosti se kalí z teploty nad  $A_{c3}$  (kalení na jádro), v druhé možnosti se kalí z teploty těsně nad  $A_{c1}$  (kalení na povrch).

Poslední zmiňovanou možností je dvojitě kalení (4), které je kombinací výhod předešlé metody kalení. Nevýhodou je její náročnost. Při prvním kalení z teploty nad  $A_{c3}$  dojde ke zjemnění austenitického zrna a k rozpuštění sekundárního cementitu v povrchové vrstvě. Následným druhým kalením z teploty těsně nad teplotou  $A_{c1}$  vznikne v cementační vrstvě jemný martenzit. [10]



Obrázek 2.7: Schéma postupů kalení po cementování [10]

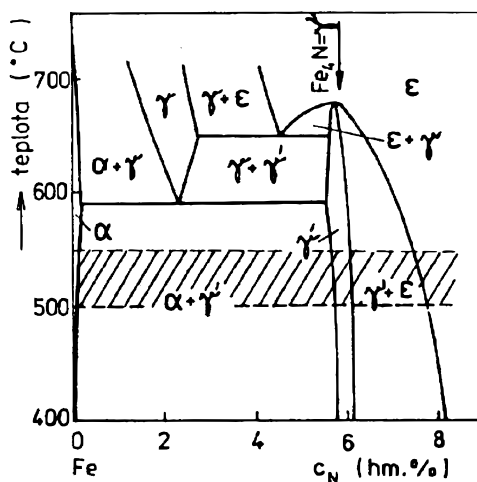
### Nitrocementování

Při nitrocementování dochází k sycení povrchu uhlíkem i dusíkem, kde dominantní je v tomto případě cementování. Dochází k tomu při teplotách kolem  $A_3$  tedy v rozmezí 820-840 °C. Hloubka vrstvy bývá okolo 0,3-0,4 mm a dosahovaná tvrdost je až 800 HV. Tento proces probíhá v plynném, nebo kapalném prostředí. Jako plynná atmosféra se používají různé směsi uhlovodíků a po 1-2 hod. se dosahuje hloubky 0,3 - 0,4 mm. Kapalně prostředí je složeno ze solné lázně, kam se následně přidávají kyanidy a další neutrální složky. V tomto prostředí se dosahuje hloubky kolem 0,2 mm a celý proces trvá přibližně hodinu. Obdobně jako u cementování se musejí oceli po nitrocementování dále tepelně zpracovávat. Tzv. je zapotřebí oceli kalit a následně nízkoteplotně popouštět. Nejčastěji se kalí do oleje nebo do solné lázně.

### Nitridace

Nitridování je proces, kde dochází k sycení povrchu oceli až na 12 hm. % N při teplotách 500 - 550 °C. Difúzní proces probíhá pod teplotou  $A_{c1}$ , proto zde nedochází k významným deformacím, nicméně dochází k znatelnému nárůstu objemu. Výsledná tvrdost, která může být až 1000 HV (ve výjimečných případech až 1200 HV), je dána vznikem nitridů, které vzniknou díky legujícím prvkům na povrchu nitridační oceli. Mezi hlavní představitele legur lze zařadit Al, Cr, V, které následně tvoří nitridy CrN, Cr<sub>2</sub>N, AlN, VN.[10]

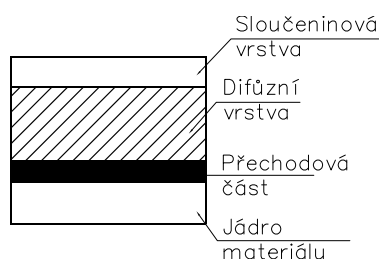
Pro lepší představu o jednotlivých strukturách nitridované vrstvy poslouží fázový diagram Fe-N na obr. 2.8 Směrem od povrchu se postupně formují následující fáze:  $\varepsilon$ ,  $\gamma' + \varepsilon$ ,  $\alpha + \gamma'$ , kde zhruba při obsahu asi 6 hm. % N vzniká nitrid železa, neboli fáze  $\gamma'$ . V porovnání s nitridy legujících prvků je tento nitrid železa ovšem méně stálý za vysokých teplot a tvrdost je také o něco nižší. Dále z grafu je možné vyčíst teplotní rozmezí pro nitridování, (vyznačeno šrafy).



Obrázek 2.8: Část diagramu Fe-N [10]

Výsledná povrchová vrstva se skládá ze dvou vrstev (obr.3.9). První vrstva tzv. bílá, neboli sloučeninová vrstva, která je hluboká jen několik mikrometrů pod povrchem, je tvořena intermetalickou sloučeninou železa a dusíku. Obecně lze říci, že povrchová vrstva je fáze  $\epsilon$ . Tato vrstva se vyznačuje velmi dobrými kluznými vlastnostmi a dobrou odolností vůči korozi v různých specifických prostředích, jako je voda, vzduch, benzín... Aby daná vrstva vznikala, je zapotřebí při nitridování použít nitridační atmosféru s kyslíkem, kde kyslíku bývá okolo 0,5 %. V případě absence kyslíku v této nitridační atmosféře se začne na povrchu vylučovat nitrid železa ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) neboli fáze  $\gamma'$ . Tato již zmiňovaná fáze se vyznačuje docela dobrou tvrdostí a odolností proti opotřebení a bývá odolná až do 680 °C.[8, 10]

Pod touto vrstvou se nachází difúzní vrstva, která je obvykle tlustá až do 0,1 mm a je odolná do teploty 600 °C. Tato vrstva je tvořena fází  $\alpha$ , kde tato intersticiální tuhá fáze je tvořena nitridy legujících prvků. Tato vrstva má vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. V praxi se dle požadovaných vlastností „balancuje“ mezi poměrnými zastoupeními těchto vrstev. [8, 10]



Obrázek 2.9: Schématické znázornění nitridačních vrstev

Nezanedbatelným faktorem výsledných vlastností bývá růst objemu součásti v důsledku nitridace. Tyto deformace vyvolávají v součásti tlakové pnutí, které se kladně podílí na zvýšené



odolnosti vrstvy. Vzhledem k tloušťkám dosahovaných tímto chemicko-tepelným zpracováním se nitridování provádí především u malých ozubených kol, případně pastorků. [10]

### Karbonitridování

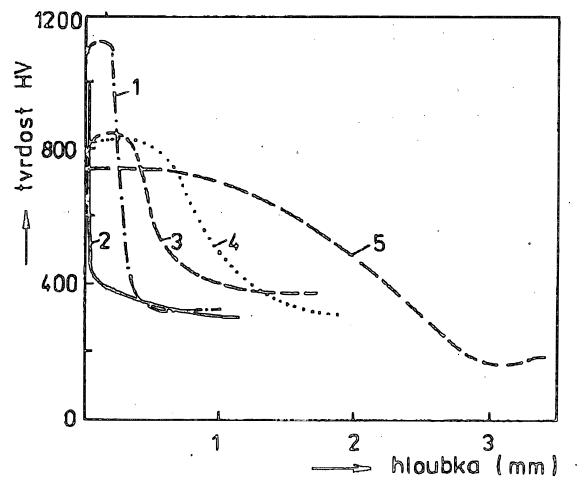
Jedná se o zpracování, které slučuje jak nitridování, tak cementování, kde dominantním zpracováním je nitridování. Karbonitridování se provádí při teplotách pod  $A_1$  v teplotním rozmezí 600-630 °C. Důvodem tohoto chemicko-tepelného zpracování je vznik vrstvy karbonitridů, která je odolná vůči některým mechanismům opotřebení a také je odolná vůči zadírání. Vrstva karbonitridů je tvořena fází  $\epsilon$ , jejíž tloušťka je přibližně 0,05 mm. Dosahovaná tvrdost bývá okolo 1000 HV.

### Srovnání metod chemicko-tepelného zpracování

Vhodnost jednotlivých metod je možné vypořádat z následujícího obrázku 2.10. Je zřejmé, že nejvyšší tvrdosti dosáhneme nitridací, ale hloubka této vrstvy není v porovnání s ostatními metodami dostatečná. V opačném případě největší hloubky je možné dosáhnout povrchoým kalením, kde ovšem dosahovaná tvrdost je nižší.

Vysvětlivky k obrázku:

(1) nitridace, (2) karbonitridace, (3) nitrocementace, (4) cementace (5) povrchoým kalení



Obrázek 2.10: Závislost tvrdosti HV na vzdálenosti od povrchu [10]

## Kapitola 3

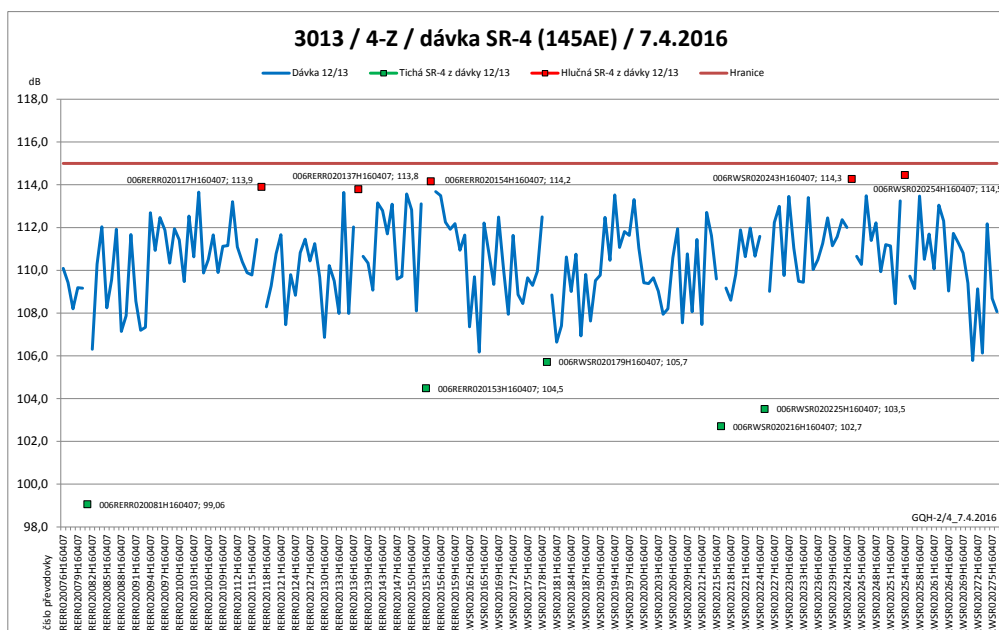
# Experimentální část

### 3.1 Úvod do problematiky

Aspektů podílejících se na hlučnosti převodovek je mnoho. Po eliminování veškerých hlavních vlivů, které jsou blíže popsány v teoretické části této bakalářské práce, vzniká rozptyl mezi hlučnými a tichými převodovkami viz graf 3.1. Na tomto grafu je patrná celková problematika. Jedná se o měření akustiky u čtvrtého rychlostního stupně automatické převodovky, které se provádí v měrovém středisku, kde dochází dle interních norem k simulování jízdných podmínek a hlučnost požadovaného rychlostního stupně je následně pomocí akustických snímačů zaznamenána.

Červená čára u grafu 3.1 znamená maximální přípustnou hranici hlučnosti, která nesmí být překročena. Červené čtverečky znamenají extrémně hlučné převodovky a zelené čtverečky znamenají extrémně tiché převodovky měřené v rámci jedné vsázky, která byla sledována. Příčinou vzniklého rozptylu mohou být materiálové charakteristiky. Tyto charakteristiky je potřeba změřit a následně porovnat rozdíly mezi hlučnými a tichými díly.

Používaný materiál pro výrobu ozubených kol a dutých hřídelí je ocel TL 4227, kterou je dle evropského značení možné nahradit ekvivalentem 16MnCr5, případně 20MnCr5. Díly zhotovené z tohoto materiálu se cementují ve vakuu, kde cementačním plynem je acetylen a následné kalení probíhá v přetlaku plynu, kde mediem je helium.



Obrázek 3.1: Měření hlučností převodovek

## 3.2 Návrh experimentu

Základem experimentu je selekce pěti hlučných a pěti tichých ozubených soukolí, dle našeho značení je tiché soukolí značeno T1,T2,..T5 a hlučné H1,H2,..H5. Tyto díly by měly být shodné (v toleranci) v ostatních hlavních parametrech, které mají vliv na hlučnost, čímž by měl být vyloučen jejich vliv na rozptyl. Protokol z měření geometrie dílu SR4-H3 je pro představu k nahlédnutí v příloze B.3. Tato část protokolu, která v našem případě slouží pouze pro vytvoření představy, je výstupem měrového střediska, ve kterém jsou zaznamenány odchylky profilů a sklonů zubů.

Tyto dvě sady soukolí se podrobí následujícímu materiálovému zkoušení pro získání statistických dat. Provede se měření povrchové tvrdosti metodou HV 0,5 a tvrdosti v jádře dle HV 10. Dále se vzorky podrobí měření hloubky nauhličené vrstvy, která se bude měřit dle metody 550 HV 1. V poslední řadě se změří zbytkové napětí v povrchové vrstvě a zbytkový austenit. Tato data budou následně podrobena statistické analýze. Dále se provede rozbor struktury a prvková analýza EDS.

### 3.2.1 Měření tvrdosti a hloubky nauhličené vrstvy

#### Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse

Základní princip zkoušky spočívá ve vtláčování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu do povrchu tělesa silou F. Následně se měří délky úhlopříček, ze kterých se vypočte

aritmetický průměr. Doba vtisku bývá v rozmezí 10-15 s. Výpočet je patrný z následujícího vztahu. [13]

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

Kde  $F$ [N] je zatížení a  $d$  [mm] značí aritmetický průměr úhlopříček.

Systém doporučeného zkušebního zatížení  $F$ [N] a značení tvrdosti podle Vickerse je patrný z tabulky 3.1

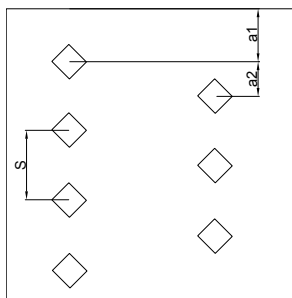
Tabulka 3.1: Rozsahy zkušebního zatížení při zkoušce dle Vickerse [13]

Rozsahy zkušebního zatížení $F$ [N]	Značka tvrdosti	Název
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2$ až $< HV 5$	Zk. tvrd. podle Vic. při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	$HV 0,01$ až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

### Princip stanovení hloubky cementované vrstvy

Pro vyhodnocení cementační vrstvy se využívá metoda 550 HV1, která definuje, v jaké kolmé vzdálenosti od povrchu je tvrdost 550 HV1.

Při použití této metody je nutné, aby byly provedeny alespoň dva pásy vtisků viz následující schéma 3.2 a zároveň, aby pás měření nebyl širší než 1,5 mm. Vzájemná vzdálenost vtisků  $S$  v jedné řadě pod sebou musí být alespoň 2,5 násobek úhlopříčky vtisku, krok měření, neboli vzdálenost  $a_1$  od  $a_2$  nesmí být větší než 0,1 mm. [12]



Obrázek 3.2: Schématické znázornění pásu vtisku [12]

### Průběh přípravy vzorků

Z každého dílu jsou na metalografické pile odebrány tři vzorky po  $120^\circ$  a následně je každým vzorkem proveden jeden řez. Ten je proveden kolmo na bok zubu. Oba tyto řezy jsou provedeny na pile s automatickým posuvem, s přesně stanovenými reznými podmínkami a s chlazením, čímž je zamezeno tepelnému ovlivnění vzorků. Vzorky se po řezání začisťují na brusce. Tímto způsobem bylo připraveno celkem 60 vzorků.



(a) Dutá hřídel

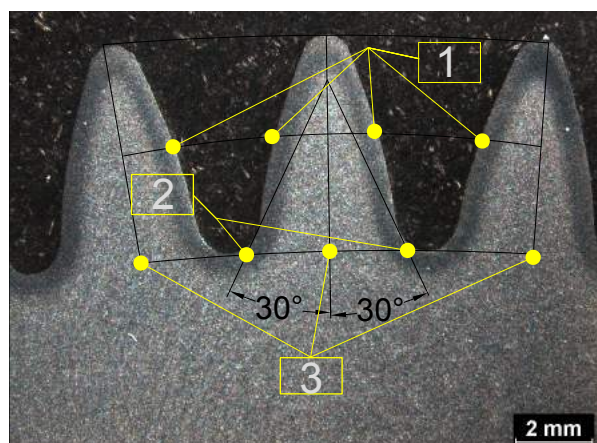


(b) Ozubená kola

Obrázek 3.3: Soubor pěti hlučných a pěti tichých soukolí (po částečném oddělení vzorků)

Jednotlivé vzorky jsou popsány technologií jiskření dle předem připraveného systému značení. Dále jsou pak vzorky dle interních norem připravovány nejprve na vakuovém zalévacím lisu, kde dojde k zalití vzorku do pryskyřice. Následuje opětovné značení vzorků, poté vzorek putuje na brusku a leštičku, kde dojde k finální přípravě povrchu vzorku pro měření tvrdosti a případně zkoumání mikrostruktury.

Na obr. 3.4 je znázorněno, kde se vzhledem k orientaci vzorků provádějí jednotlivá měření. Číslo 1 značí střed boku zubu, který se nachází v  $\frac{1}{2}$  výšky boku zubu. Celkem se tedy měří čtyři hodnoty povrchové tvrdosti dle metody HV 0,5 ve vzdálenosti 0,05 mm od okraje. Dále číslo 3 představuje pozice měření tvrdosti v jádře, která je měřena metodou HV 10. Z časových důvodů je pouze na jednom vzorku ze tří měřena hloubka cementované vrstvy, která se měří metodou 550 HV 1. Toto měření značí číslo 1,2. Jen pro ilustraci, u měření CHD<sup>1</sup> se jedná celkově o 40 vpichů metodou HV 1, kde 20 vpichů se provádí na dvou bocích zubů a zbylých dvacet vpichů se provádí na patách zubů. Celkem se tedy CHD měří na dvou bocích a dvou patách zubů.



Obrázek 3.4: Grafické znázornění pozic měření tvrdosti/CHD

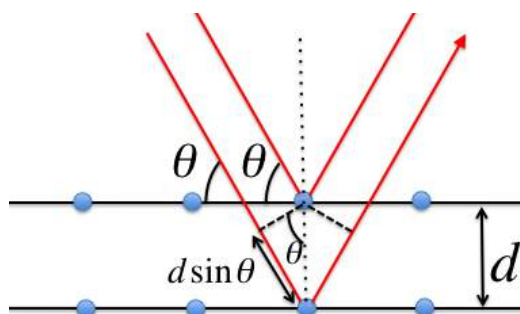
<sup>1</sup>„Case Hardness Depth“ - hloubka nauhličení

### 3.2.2 Měření zbytkového napětí a zbytkového austenitu

Po cementování a následném zakalení vznikají v povrchové vrstvě vnitřní pnutí s charakteristickým průběhem. V důsledku tryskání dojde po dopadu částice na povrch k plastickému přetvoření povrchu, čímž dojde k mechanickému zpevnění, neboli ke změně zbytkového napětí. [6]

#### Princip rentgenová difrakce

Princip je patrný z obrázku 3.5, kde je schematicky znázorněn materiál s krystalickou strukturou. Pod úhlem  $\Theta$  dopadá na krystalickou strukturu rentgenové záření o známé vlnové délce. Na základě fázového posuvu paprsků rentgenového záření lze stanovit mezivzrostnou vzdálenost měřeného materiálu, kdy je nejprve zapotřebí změřit mezivzrostnou vzdálenost na neovlivněném materiálu a tuto vzdálenost porovnat s materiálem, do kterého byla vnesena napjatost. Na základě těchto údajů dopočítáme zbytkové napětí. [4]



Obrázek 3.5: Princip rentgenové difraktometrie [11]

Vzorky pro měření (porovnání) zbytkového austenitu a difrakce jsou shodné a mohou se použít jedny a ty samé vzorky. Zde z časových důvodů bylo měření prováděno pouze na jednom náhodně vybraném tichém a na jednom náhodně vybraném hlučném soukolí. To znamená, že celkem tedy máme 4 díly. Z každého dílu jsou potřeba 4 vzorky. Zde je na rozdíl od vzorků pro měření tvrdosti zapotřebí vzorek s nepoškozenými boky zubu a zároveň je třeba dle výkresu řádně označit pracovní stranu a odvrácenou stranu, kde v našem případě probíhá experiment pouze na straně pracovní.

### 3.3 Vyhodnocení

Zajímavý postřeh při rozboru grafu zobrazujícího hlučnost jednotlivých převodovek je, že u hlučných převodovek není velký rozdíl hlučností, naopak u tichých převodovek je značný rozdíl mezi jednotlivými kusy. V našem číslování je nejtišší soukolí T1 a nejhlučnější je označeno H3. Pokud se na tyto díly podíváme z dlouhodobého hlediska (graf B.1), tak se nejedná o absolutní extrémy, ale spíše o extrémy lokálního charakteru. V žádném měření, které jsme provedli, nevykazují ovšem tyto díly dominantní hodnoty nad ostatními díly příslušné kategorie. To částečně poukazuje na jiný vliv způsobující absolutní extrémy dané vsázky.

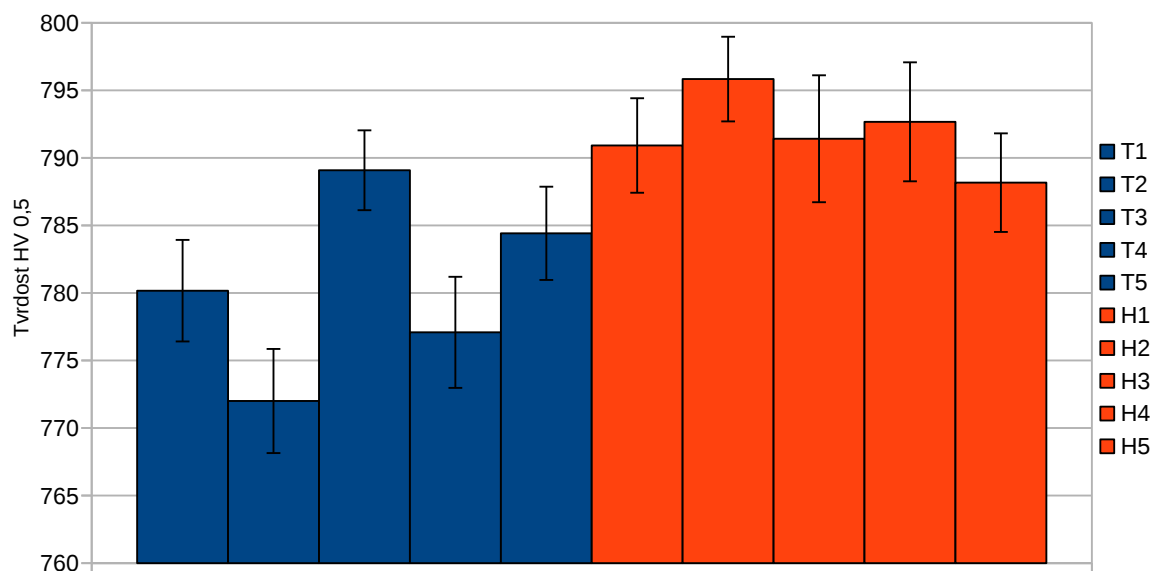
Na grafu B.2 lze vidět jednotlivé dávky v rámci jedné vsázky, které by se také mohly částečně podílet na nerovnoměrném rozprostření hlučnosti. Jednotlivé dávky jsou výrobního charakteru a v jedné vsázce se jednotlivé dávky vzájemně překrývají. Na tomto grafu je patrné, že hlučné díly se v rámci jedné dávky, pokud se jedná o akustiku, nemění. Jinak je tomu u tichých dílů, kde v dávce AWa 13/12 je nejtišší díl zhruba o 4 dB pod ostatními díly.

Při vyhodnocování a hledání závislostí mezi tichými a hlučnými soukolími převodovek je zapotřebí brát v potaz počet měřených kusů, který neumožňuje provést podrobnější analýzu dat a pro vyvození spolehlivých závěrů není dostačující.

### 3.3.1 Tvrдост na povrchu a v jádře

#### Dutá hřídel

Největší rozdíly mezi hlučným a tichým soukolím lze zpozorovat u povrchové tvrdosti povrchu hřídel (AWA <sup>2</sup>), kde na grafu 3.6 lze vidět menší povrchovou tvrdost u hřídelí, které vykazují tišší záběr. Rozdíl průměrných hodnot povrchové tvrdosti tichých a hlučných hřídelí je 11 HV.

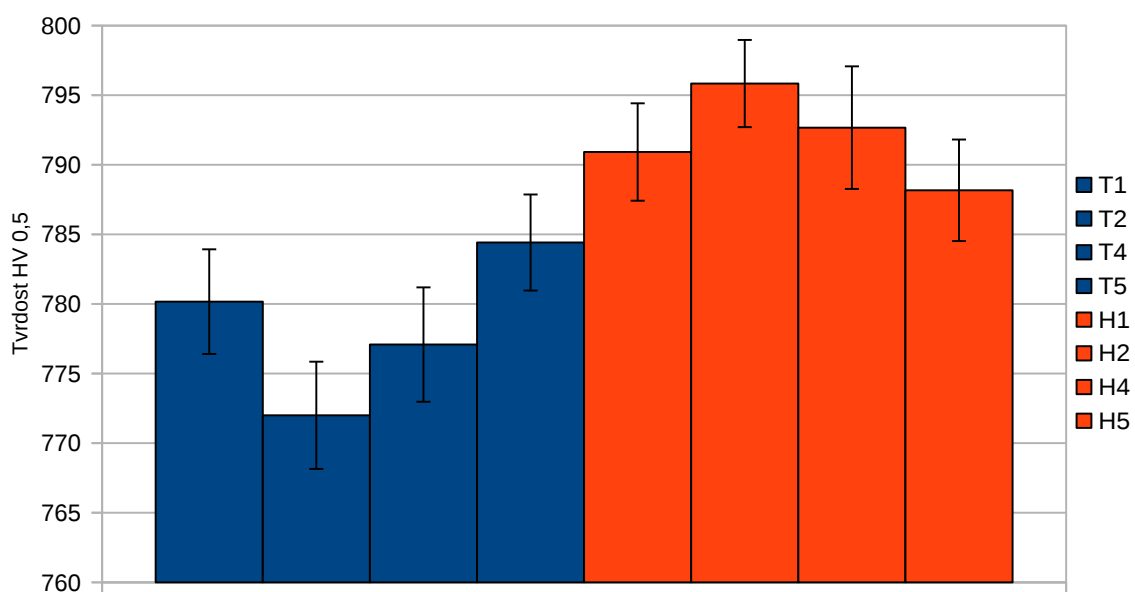


Obrázek 3.6: Hřídel(AWA) - porovnání průměrných povrchových tvrdostí

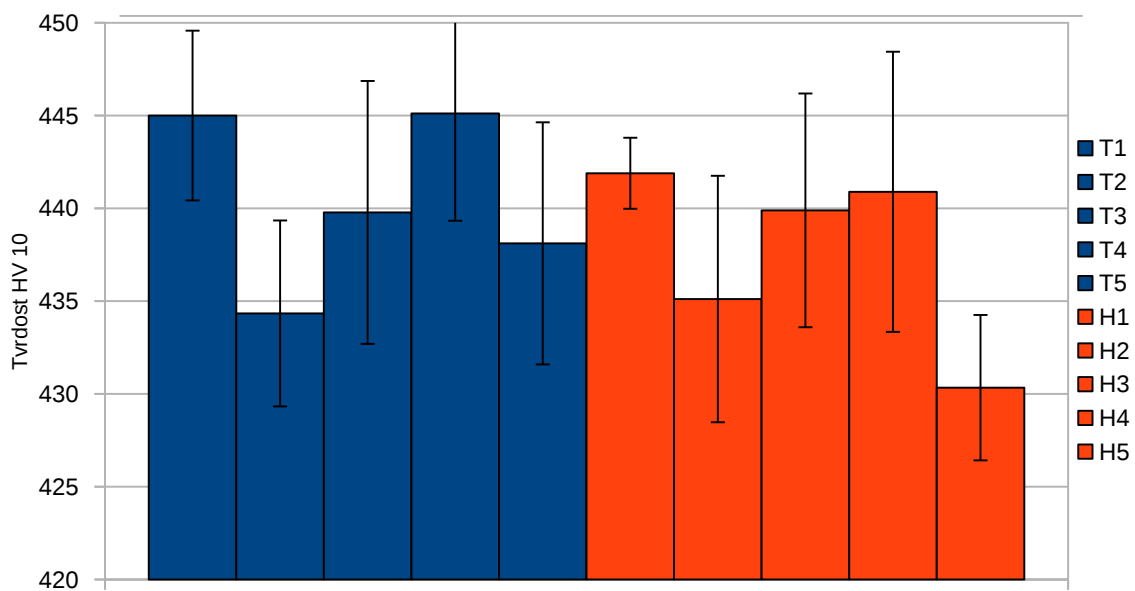
Pokud vyřadíme hodnotu T3, která se liší od ostatních hodnot a jejíž hodnota může být ovlivněna jinými vlivy, dostaneme graf 3.7, jehož rozdíly mezi tichými a hlučnými hřídeli jsou ještě o něco výraznější, než v předešlém případě. Zde je již rozdíl průměrných hodnot 14 HV, z čehož lze částečně vyvozovat závislost, že pro tišší hřídel platí nižší tvrdost.

Pokud se podíváme na tvrdosti hřídelí v jádře (graf 3.8), je rozdíl průměrné hodnoty tvrdostí tichých a hlučných hřídelí 8 HV. Z toho bychom mohli částečně říci, že pro tichou hřídel je tvrdost v jádře o něco vyšší a naopak. Ovšem průměrné hodnoty jednotlivých dílů jsou dosti rozdílné a zároveň směrodatná odchylka je vysoká.

<sup>2</sup>Interní značení ŠKODA AUTO a.s. pro dutou hřídel



Obrázek 3.7: Hřídel(AWA) - porovnání průměrných povrchových tvrdostí bez hodnoty T3/H3

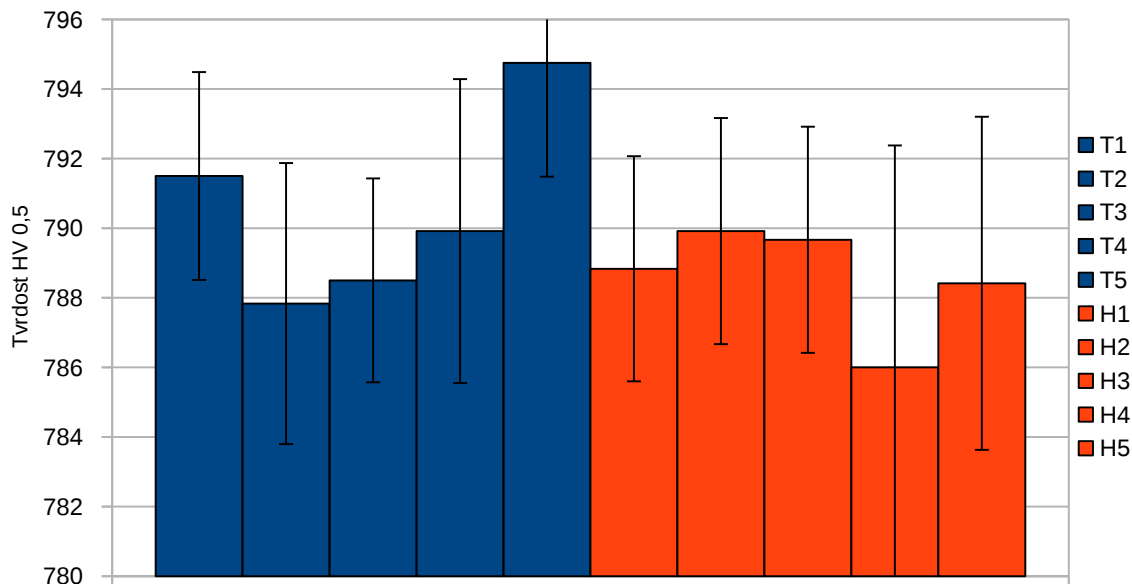


Obrázek 3.8: Hřídel(AWA) - porovnání průměrných tvrdostí v jádře

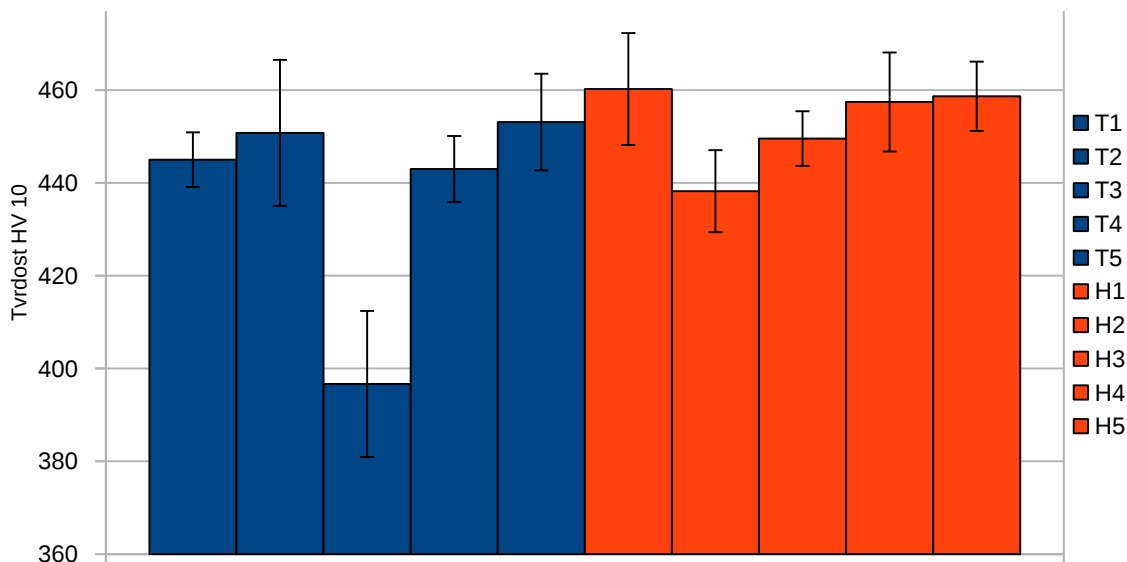


**Ozubené kolo**

Závislost povrchové tvrdosti (graf 3.9) mezi tichými a hlučnými ozubenými koly (SR4<sup>3</sup>) je opačná než u hřídelí, tzv. průměrné hodnoty povrchových tvrdostí tichých ozubených kol jsou větší než u hlučných, nicméně je zde opět velká směrodatná odchylka.



Obrázek 3.9: Ozubené kolo - průměrné hodnoty povrchových tvrdostí



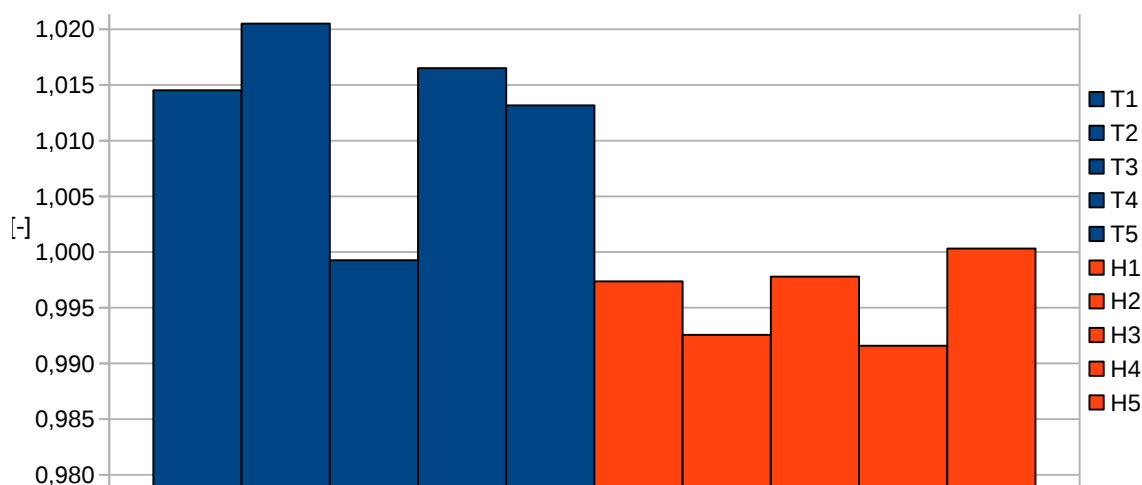
Obrázek 3.10: Ozubené kolo - průměrné hodnoty tvrdostí v jádře

<sup>3</sup>Interní značení ŠKODA AUTO a.s. pro ozubené kolo

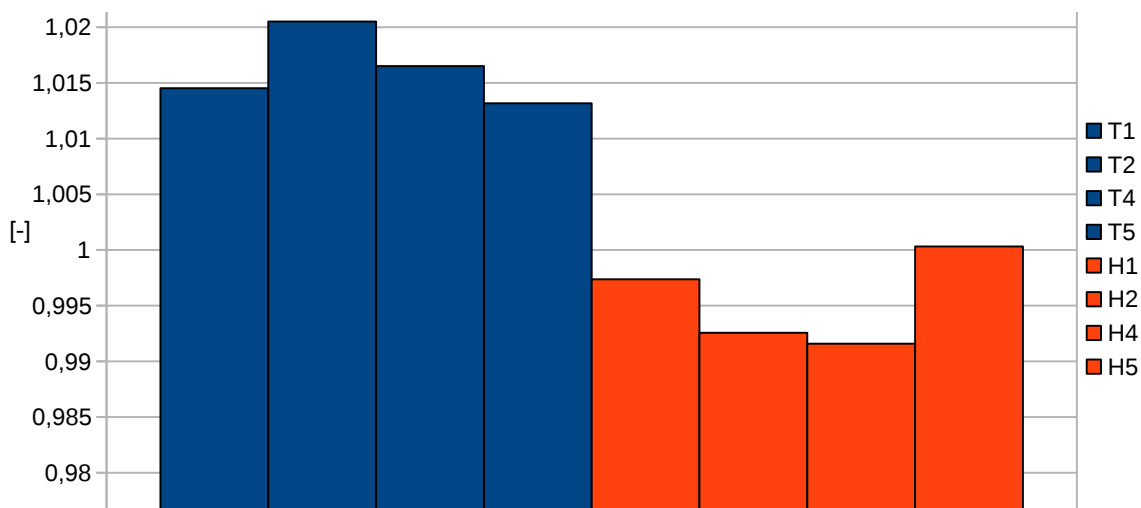
Průměrné hodnoty tvrdostí v jádře ozubených kol (graf 3.10) se zdají být nesystematické, z čehož usuzuji, že tvrdost v jádře nemá na hlučnost vliv. Je to ovšem způsobeno, jak již bylo řečeno, nedostačujícím statistickým souborem, u kterého kdyby obsahoval více zkoumaných součástí, by hodnoty mohly mít větší vypovídající hodnotu.

### Poměrový ukazatel

Z předchozích grafů lze pozorovat částečné závislosti u povrchových tvrdostí hřídele a ozubeného kola. Zajímavý ukazatel ovšem vznikne, pokud se stanoví poměrné hodnoty jednotlivých povrchových tvrdostí, neboli podělíme povrchovou tvrdost ozubeného kola povrchovou tvrdostí hřídele (graf 3.11).



Obrázek 3.11: Poměr průměrných tvrdostí ozubené kolo/hřídel (SR4/AWA)

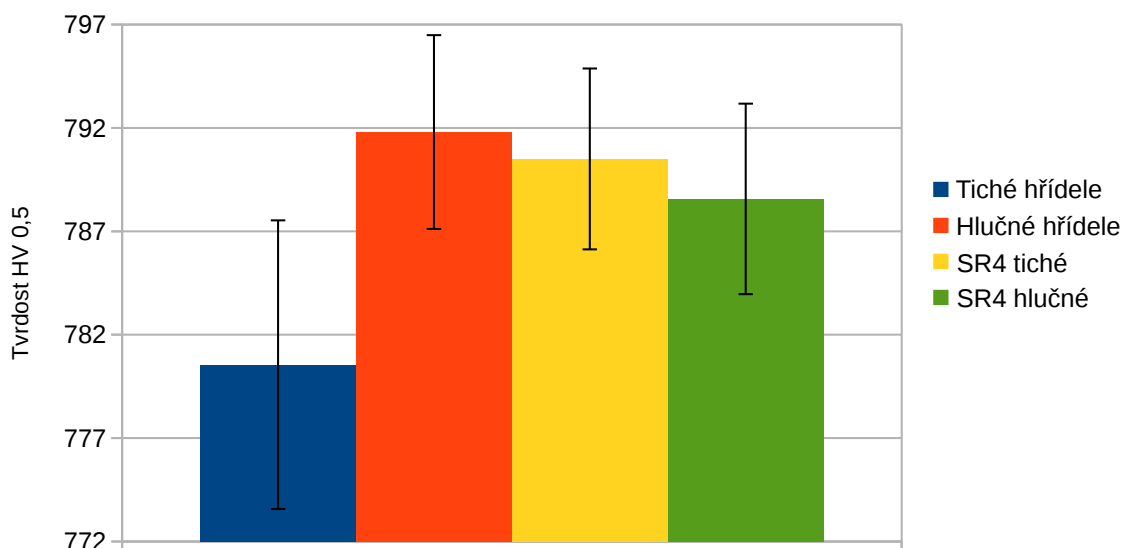


Obrázek 3.12: Poměr průměrných tvrdostí ozubené kolo/hřídel (SR4/AWA) bez hodnot T3/H3

Pokud vyřadíme námi již zmiňovanou hodnotu T3/H3, které nám svojí hodnotou vybočují z výsledných hodnot, dostaneme následující graf 3.12, kde je ovšem potřeba brát v potaz velmi podrobné měřítko osy y. Z tohoto grafu je patrné, že tiché soukolí má větší poměr povrchových tvrdostí (SR4/AWA), v porovnání se soukolím hlučných převodovek, kde je naopak poměr nižší.

### Souhrn průměrných tvrdostí

Pro názornost je zde připojen graf 3.13, kde lze vidět souhrn povrchových tvrdostí, se zobrazením rozdílu mezi hlučnou a tichou hřídelí, kde tichá má menší tvrdost a hlučná větší. U ozubeného kola je již rozdíl menší a platí zde opačná závislost.

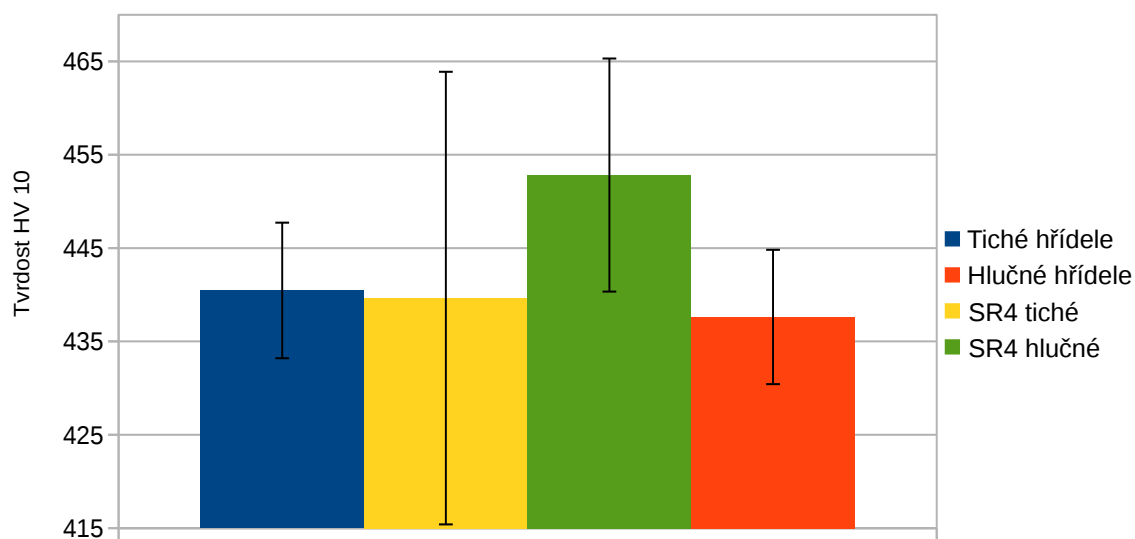


Obrázek 3.13: Průměrné hodnoty tvrdostí na povrchu

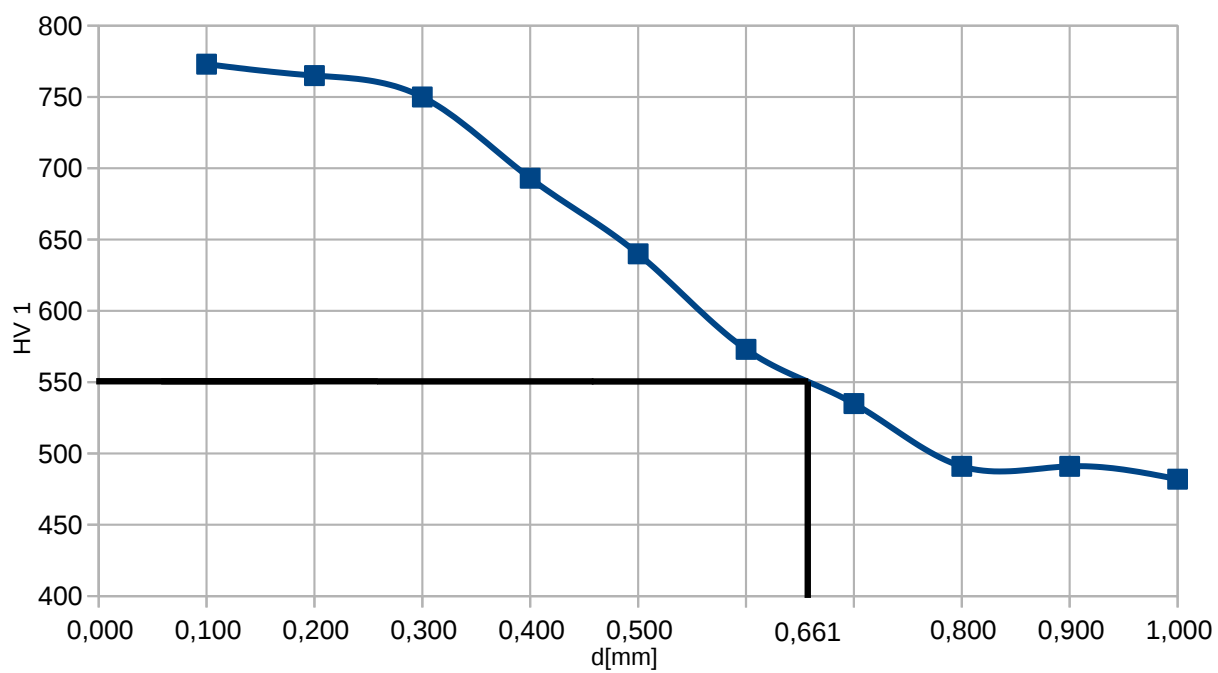
Graf průměrných hodnot v jádře (3.14) je pouze informativního charakteru, neboť zde nelze vypořádat jednoznačnou závislost, jednak v důsledku malých rozdílných hodnot a jednak v důsledku velkých směrodatných odchylek. Je zde ovšem zajímavá velká směrodatná odchylka u tichého ozubeného kola.

### 3.3.2 Vyhodnocení CHD

Pro vyhodnocení hloubky cementované vrstvy se používá metoda 550 HV 1. Měření bylo provedeno na dvaceti vzorcích. Na každém vzorku se měří CHD - jedno na boku a dvě na patě zubu. Pro ukázkou průběhu cementované vrstvy jsem zvolil vzorek T1, hřídel, měření boku zubu (graf 3.15).



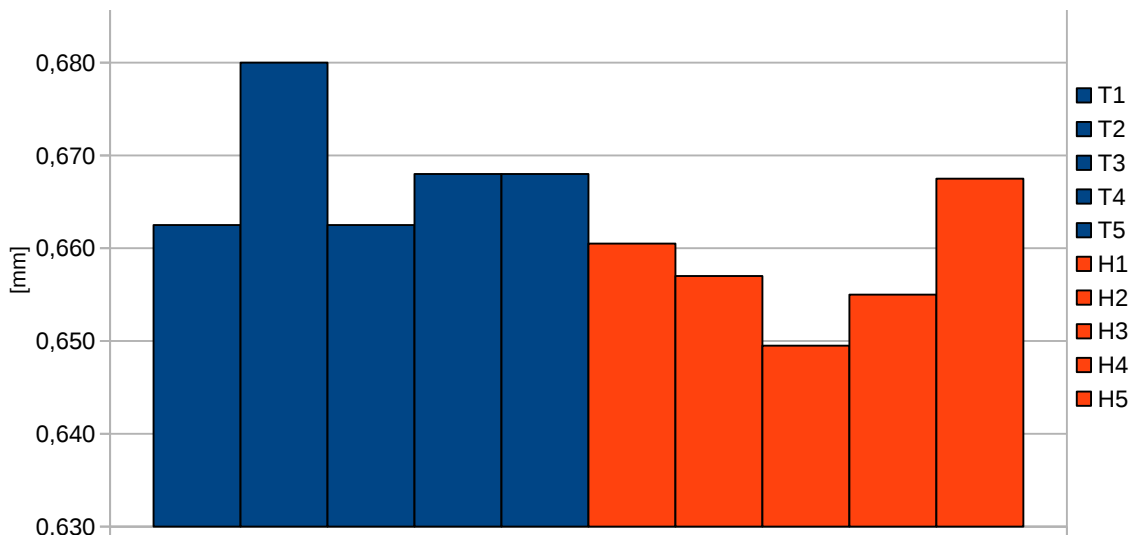
Obrázek 3.14: Průměrné hodnoty tvrdostí v jádře



Obrázek 3.15: Ukázka průběhu CHD vzorku AWA/T1 - Bok 1

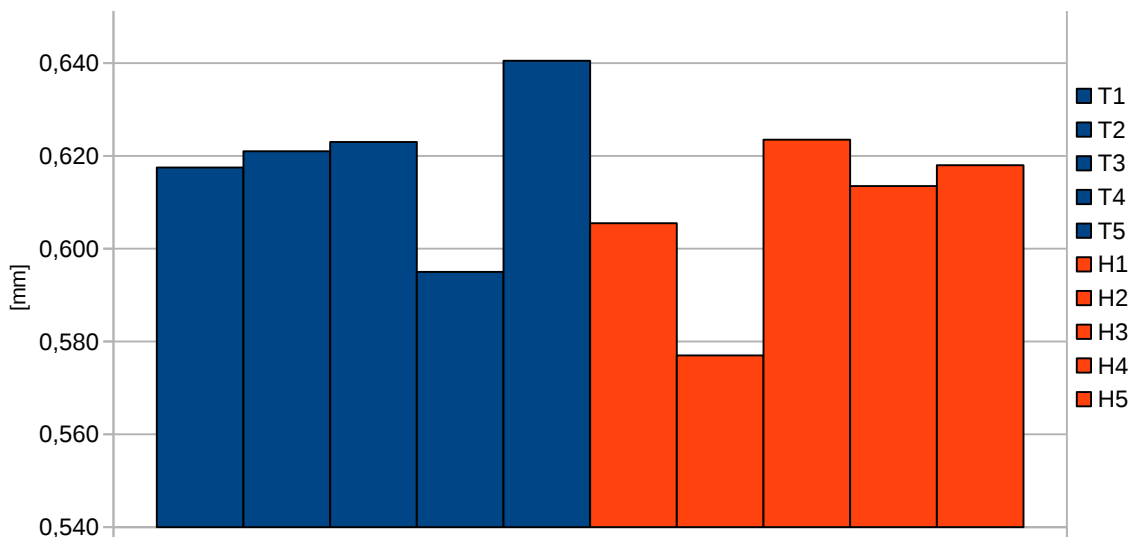
**CHD - hřídel**

Z naměřených hodnot nelze opět vyvozovat konečné závěry, neboť statistický soubor není dostatečně obsáhlý. Přesto rozdíl průměrných hodnot hloubky nauhličení hlučných a tichých hřídelí je jedna desetina milimetru.



Obrázek 3.16: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy AWA - bok zubu

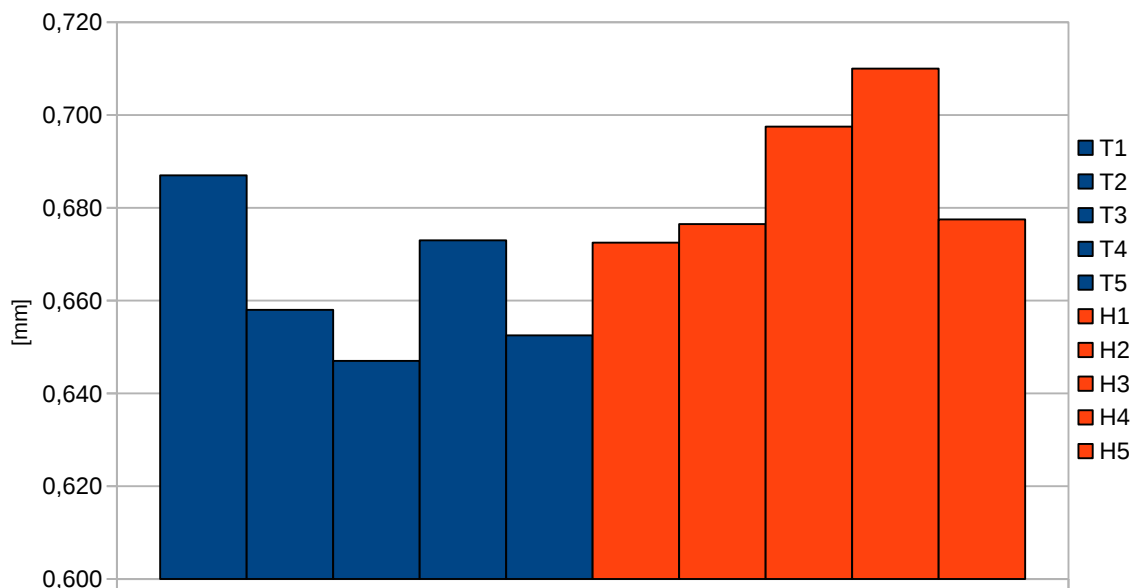
Nauhličení paty zubu je možné vyhodnotit obdobným způsobem jako bok zubu, neboli nauhličená vrstva u tichých vzorků je nepatrně větší, avšak neplatí to u všech měřených hřídelí, a zároveň rozdíl mezi tichými a hlučnými hřídeli je malý.



Obrázek 3.17: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy AWA - pata zubu

### CHD - ozubené kolo

U ozubeného kola nastává stejná problematika s malým statistickým souborem, jako u hřídele, což částečně omezuje při vyvozování závěrů, ale na první pohled je patrná opačná tendence jako u hřídele, neboli u boku a paty zubu mají mírně větší hloubku nauhličení než vzorky z hlučných dílů. Po vyřazení hodnoty T1/H1 by se již zmíněný rozdíl ještě více prohloubil.



Obrázek 3.18: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - bok zubu

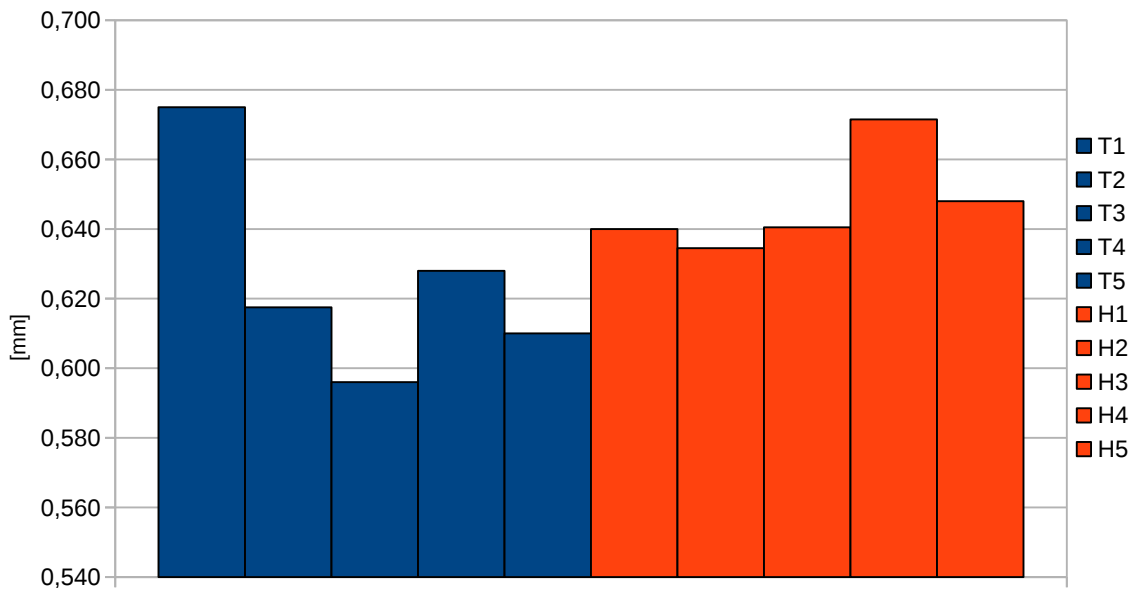
### CHD - ozubené kolo bez hodnot T1,H1

Po vyřazení hodnot T1, H1 se rozdíl mezi hlučnými a ozubenými koly ještě prohloubí. Rozdíl průměrných hodnot tichých a hlučných dílů je v obou případech (CHD bok zubu 3.20 CHD pata zubu 3.21) roven třem desetínám milimetru. Z následujících grafů vyplývá, že u tišších dílů je hloubka nauhličení nepatrně nižší.

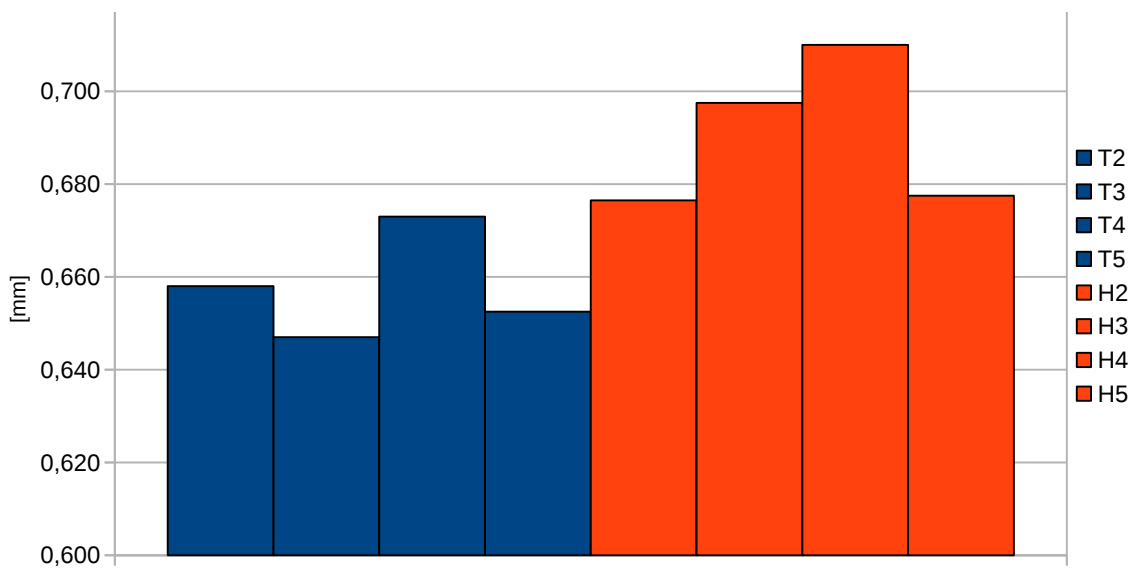
### 3.3.3 Vyhodnocení zbytkového austenitu a zbytkového napětí v tlaku

#### Zbytkové napětí v tlaku

Měření probíhá ve třech postupně odleptávaných vrstvách pracovní strany boku zubu. Jednotlivé vrstvy jsou specifikovány interní normou, která říká, že první vrstva je v rozmezí 1-5  $\mu\text{m}$ , druhá vrstva je v rozmezí 10-30  $\mu\text{m}$  a třetí vrstva je definována  $\geq 50\mu\text{m}$ . V našem případě bylo provedeno ještě čtvrté měření ve třetí vrstvě pro zkvalitnění výsledků. Z časových důvodů bylo provedeno měření pouze na jednom tichém a na jednom hlučném soukolí.



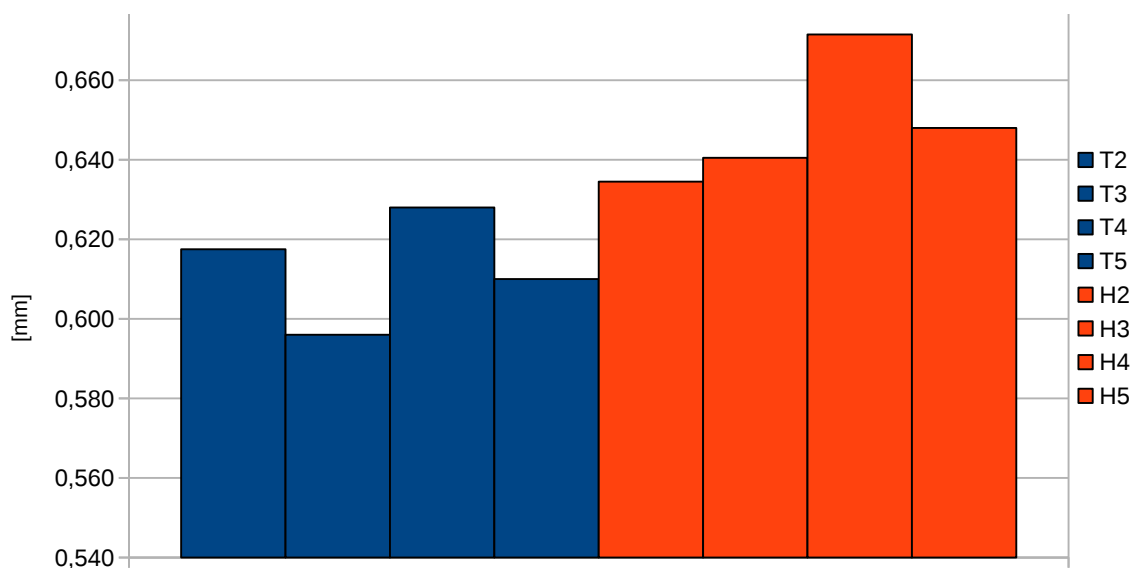
Obrázek 3.19: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - pata zubu



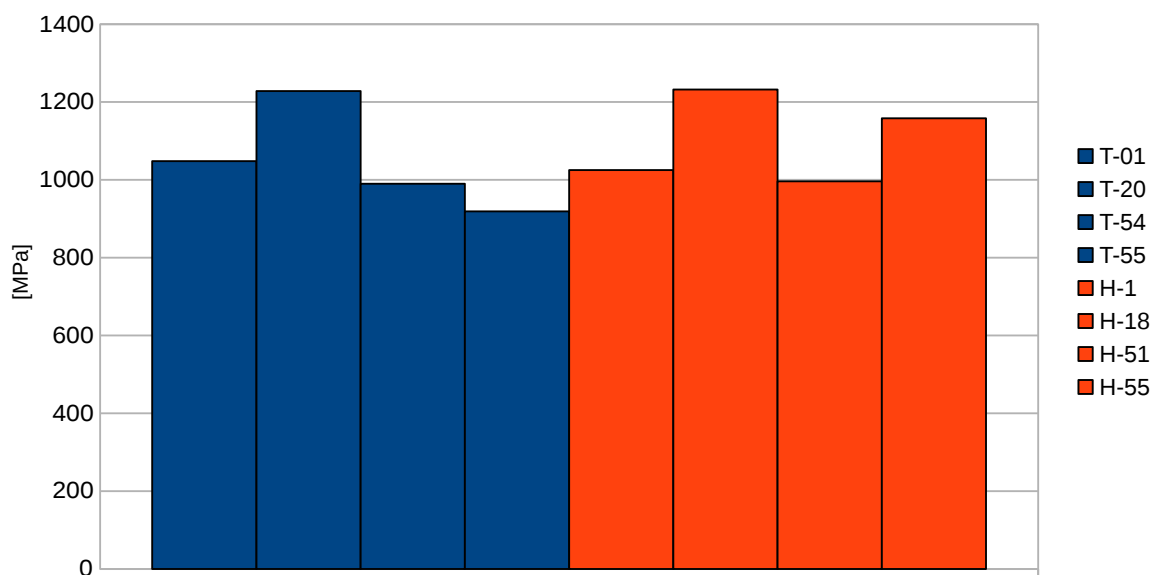
Obrázek 3.20: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - bok zubu (bez hodnot T1,H1)

V následujícím grafu 3.22 lze vidět vnitřní pnutí tiché a hlučné ozubené hřídele v jednotlivých vrstvách. Napětí jsou téměř shodná, tudíž se pravděpodobně nebude jednat o závislost.

Co se týče difrakce u ozubeného kola (graf 3.23), tak se jedná o téměř shodné výsledky jako v předešlém případě u hřídele, tzv. rozdíly mezi hlučnými a tichými měřeními díly jsou minimální, až zanedbatelné.



Obrázek 3.21: Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - pata zubu (bez hodnot T1,H1)

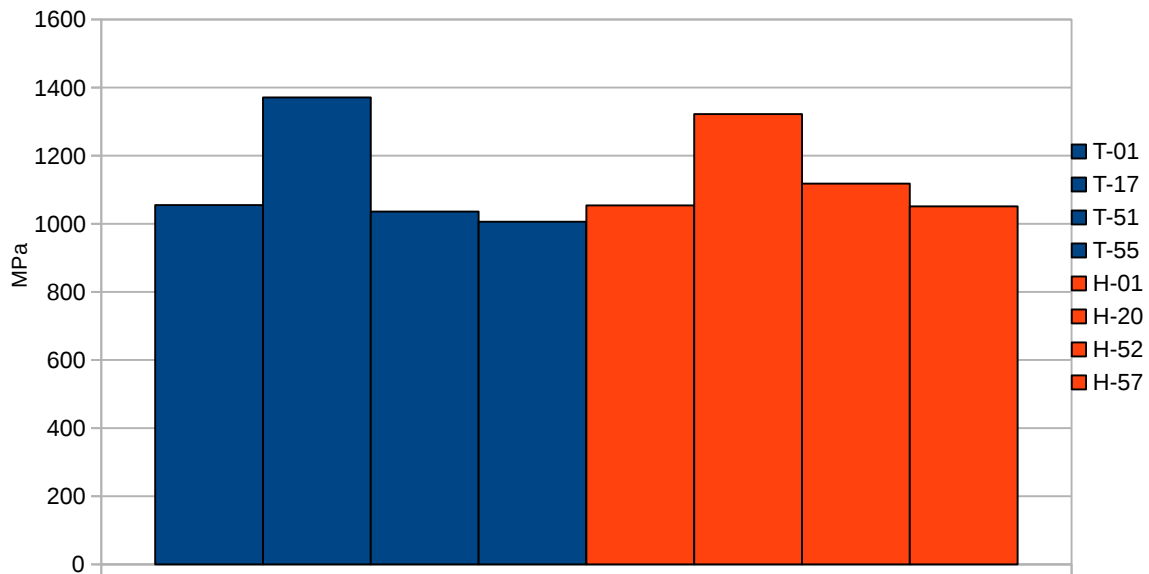


Obrázek 3.22: Zbytkové napětí - AWA

### Zbytkový austenit

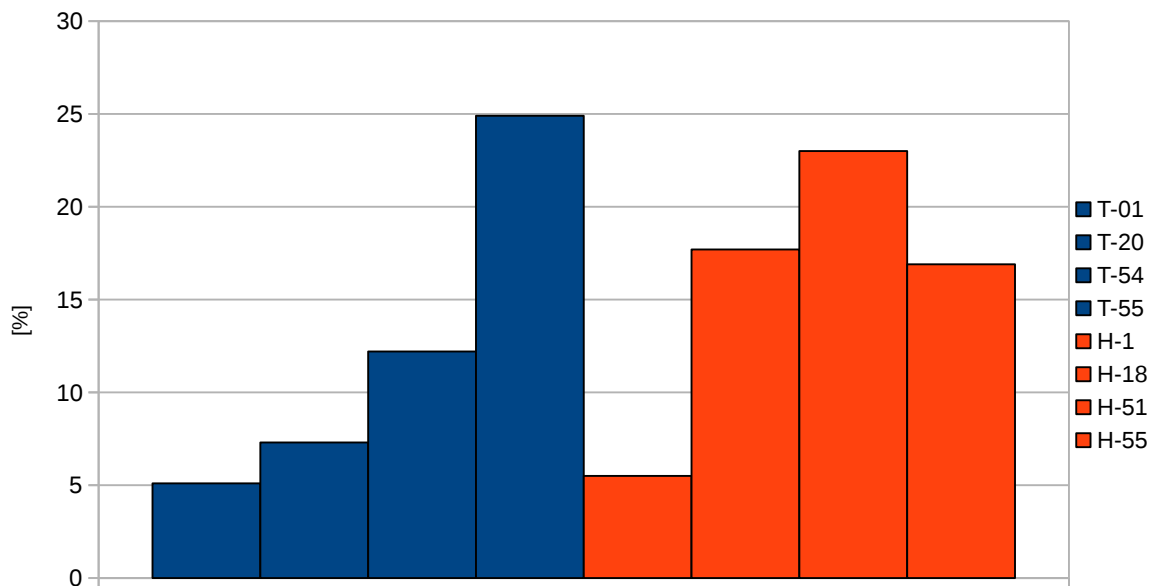
Zbytkový austenit není možné změřit přesně, měření je spíše založeno na porovnávání s etalony, které je pro naše potřeby ovšem dostačující. Pro měření jsou použity stejné vzorky jako pro měření povrchového napětí. Zbytkový austenit je softwarově vyhodnocen z napětích v daných vrstvách. [3]



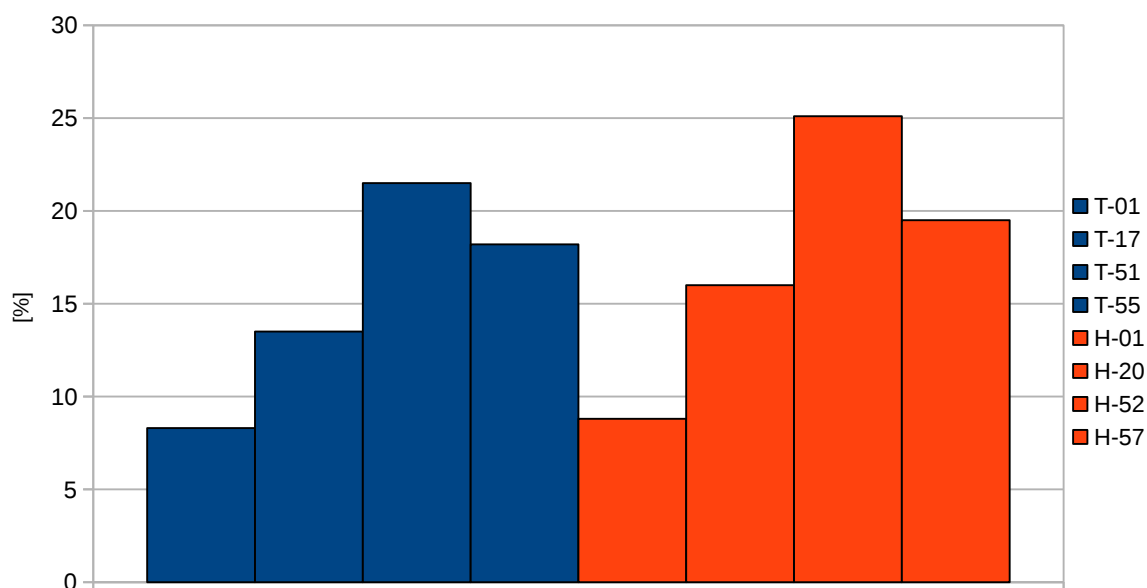


Obrázek 3.23: Zbytkové napětí - SR4

Pro vyvozování závěrů je ovšem nedostačující statistický soubor.



Obrázek 3.24: Zbytkový austenit - AWA



Obrázek 3.25: Zbytkový austenit - SR4

### 3.4 Porovnání mikrostruktury

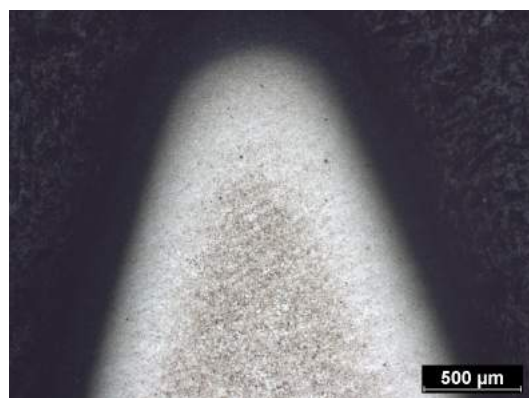
Pro porovnání mikrostruktury jsme zvolili náhodné zástupce tiché a hlučné duté hřídele a zástupce tichého a hlučného ozubeného kola. Dle našeho značení se jedná o vzorky AWA-H, AWA-T, SR4-H a SR4-T.

#### Světelný mikroskop

##### Dutá hřídel - hlučná



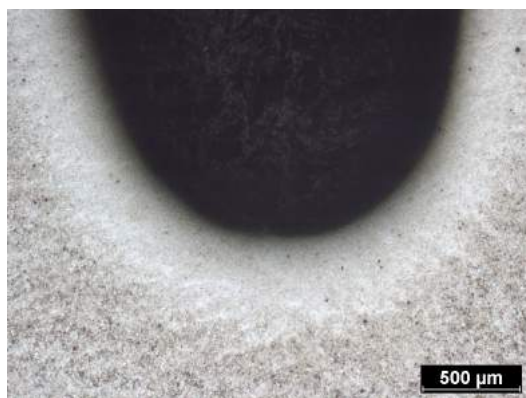
Obrázek 3.26: AWA-H špička zubu



Obrázek 3.27: AWA-H jádro zubu



Obrázek 3.28: AWA-H jádro zubu bez cementace



Obrázek 3.29: AWA-H pata zubu



Obrázek 3.30: AWA-H okolí evolventy

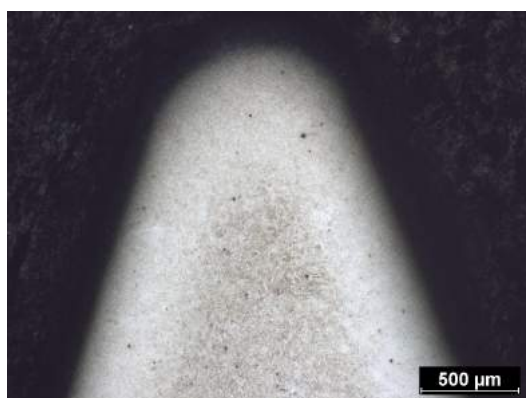


Obrázek 3.31: AWA-H okolí evolventy

### Dutá hřídél - tichá



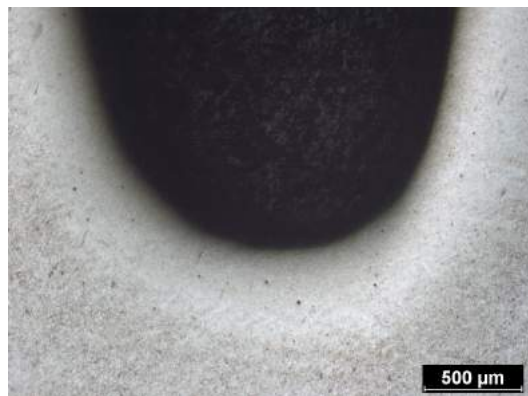
Obrázek 3.32: AWA-T špička zubu



Obrázek 3.33: AWA-T jádro zubu



Obrázek 3.34: AWA-T jádro zubu bez cementace



Obrázek 3.35: AWA-T pata zubu



Obrázek 3.36: AWA-T okolí evolventy



Obrázek 3.37: AWA-T okolí evolventy

#### Ozubené kolo - hlučné



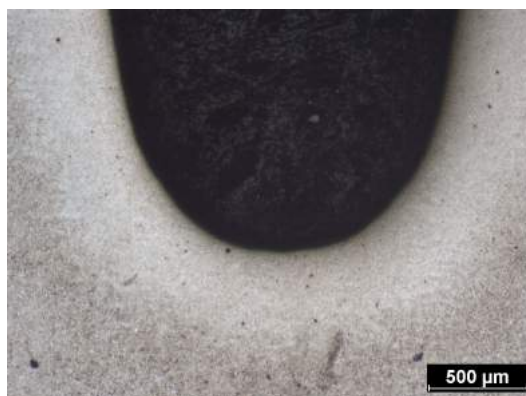
Obrázek 3.38: SR4-H špička zubu



Obrázek 3.39: SR4-H jádro zubu



Obrázek 3.40: SR4-H jádro bez cementace



Obrázek 3.41: SR4-H pata zubu



Obrázek 3.42: SR4-H okolí evolventy



Obrázek 3.43: SR4-H okolí evolventy

### Ozubené kolo - tiché



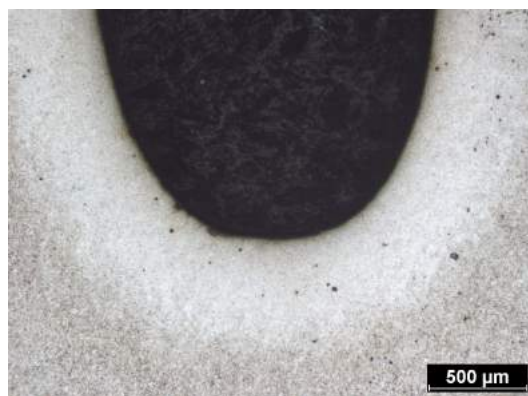
Obrázek 3.44: SR4-T špička zubu



Obrázek 3.45: SR4-T jádro zubu



Obrázek 3.46: SR4-T jádro bez cementace



Obrázek 3.47: SR4-T pata zubu



Obrázek 3.48: SR4-T okolí evolventy



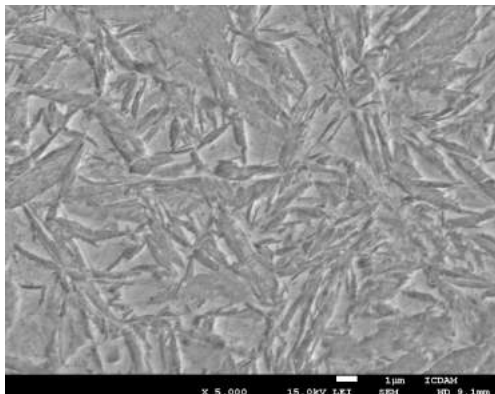
Obrázek 3.49: SR4-T okolí evolventy

#### Zhodnocení snímků povrchu - světelný mikroskop

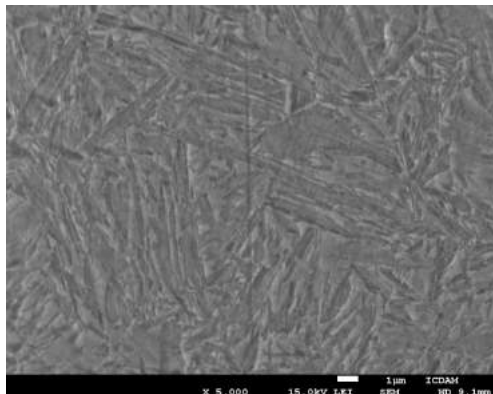
Při pozorování struktury jednotlivých částí zubů (vzorků) a následném porovnání tichých a hlučných dílů zjišťujeme, že nejsou patrné rozdíly, vše je prakticky shodné.

## Elektronový mikroskop

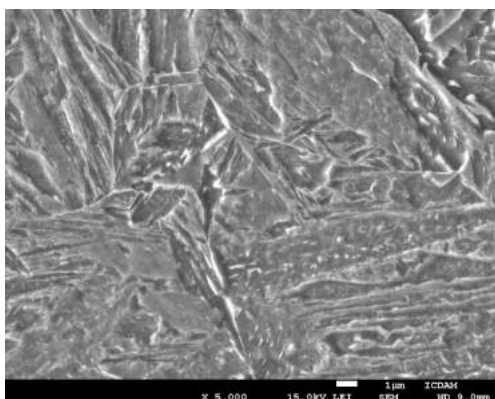
### Dutá hřídel - hlučná



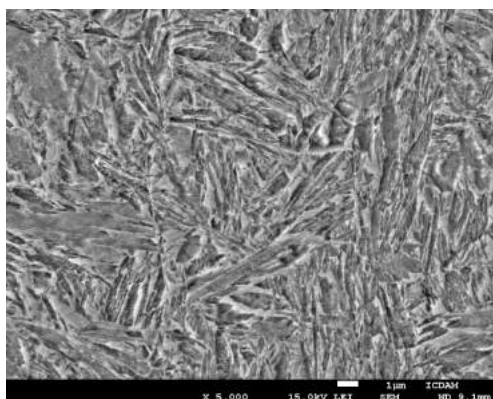
Obrázek 3.50: AWA-H špička zubu



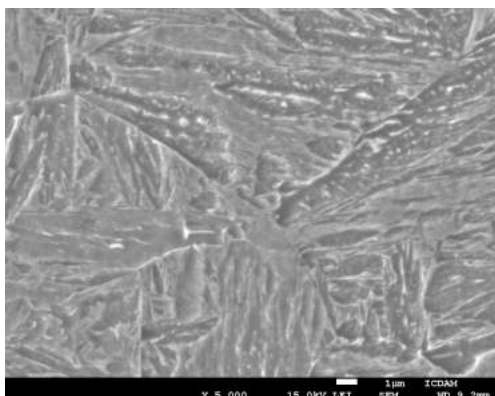
Obrázek 3.51: AWA-H bok zubu



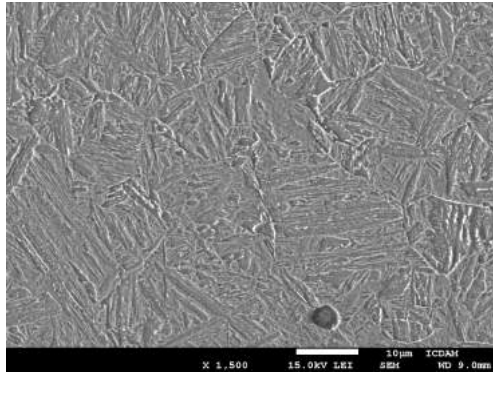
Obrázek 3.52: AWA-H jádro vzorku



Obrázek 3.53: AWA-H pata zubu

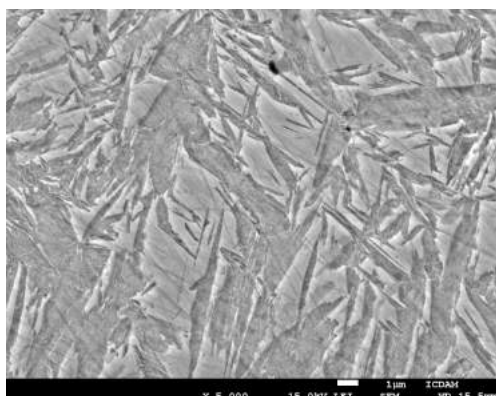


Obrázek 3.54: AWA-H jádro zubu

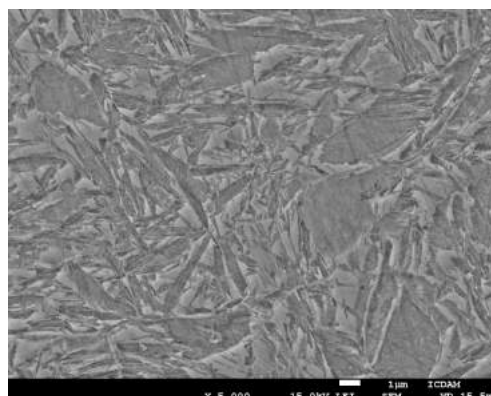


Obrázek 3.55: AWA-H jádro vzorku (menší zvětšení)

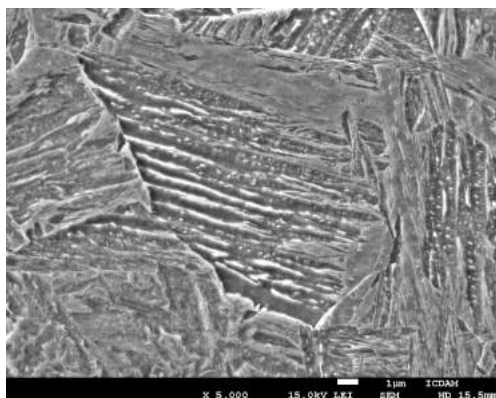
Dutá hřídel - tichá



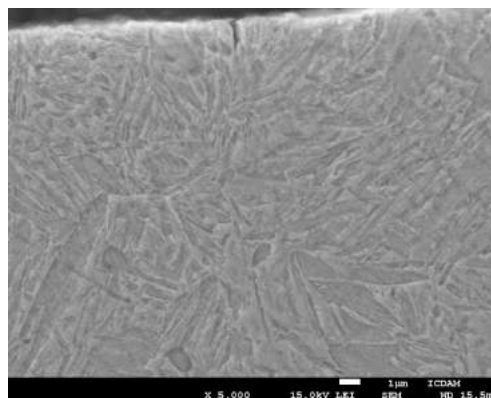
Obrázek 3.56: AWA-T špička zubu



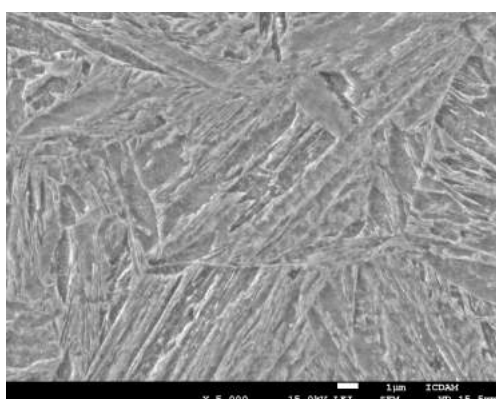
Obrázek 3.57: AWA-T bok zubu



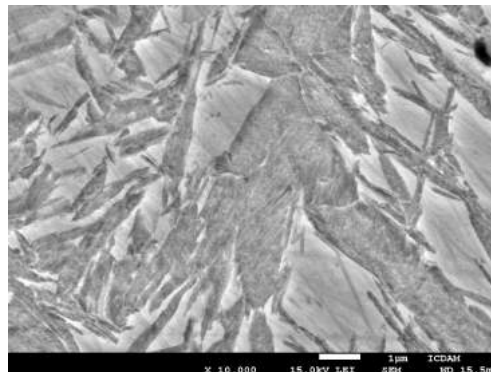
Obrázek 3.58: AWA-T jádro vzorku



Obrázek 3.59: AWA-T pata zubu



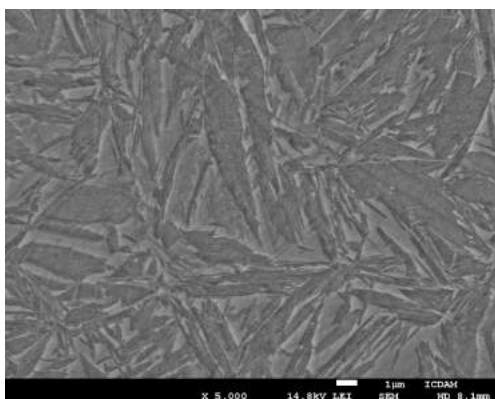
Obrázek 3.60: AWA-T jádro zubu



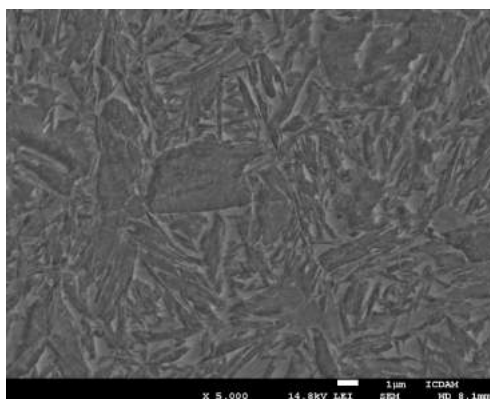
Obrázek 3.61: AWA-T špička zubu (větší zvětšení)



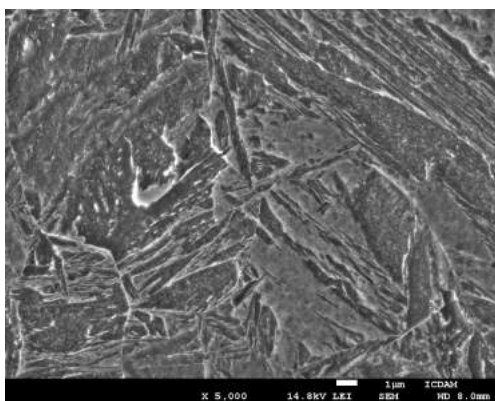
Ozubené kolo - hlučné



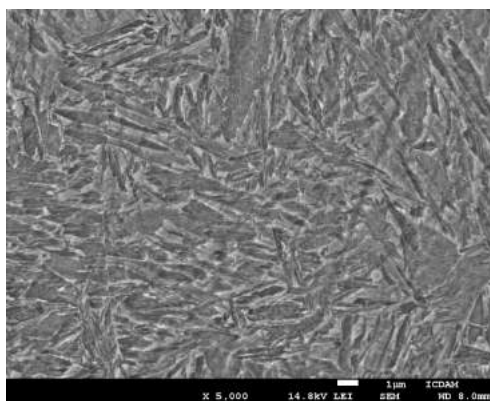
Obrázek 3.62: SR4-H Špička zubu



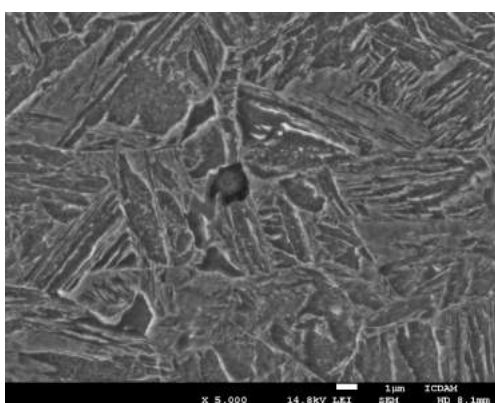
Obrázek 3.63: SR4-H bok zubu



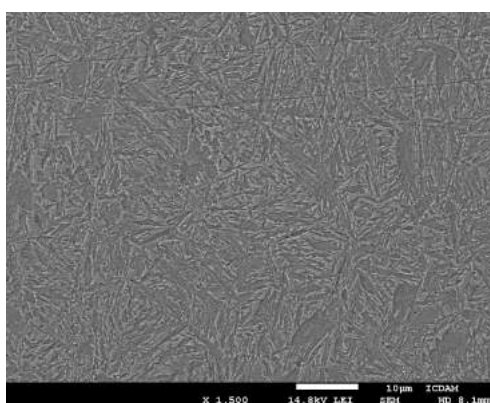
Obrázek 3.64: SR4-H jádro vzorku



Obrázek 3.65: SR4-H pata zubu

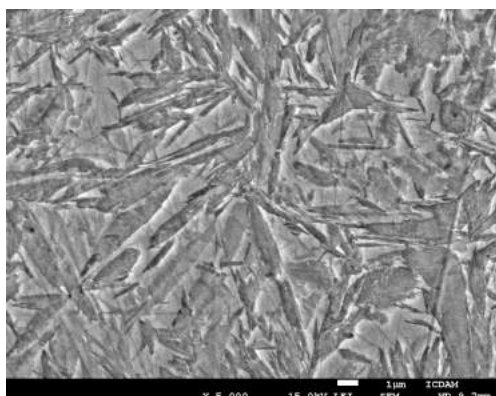


Obrázek 3.66: SR4-H jádro zubu

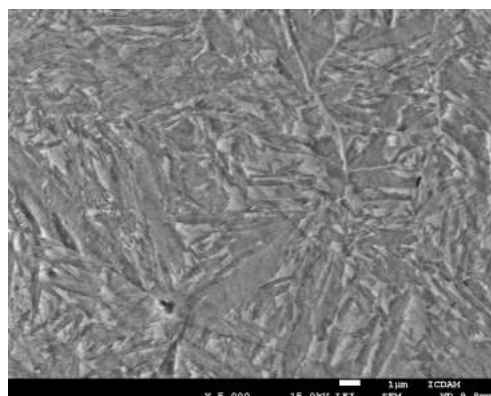


Obrázek 3.67: SR4-H bok zubu (menší zvětšení)

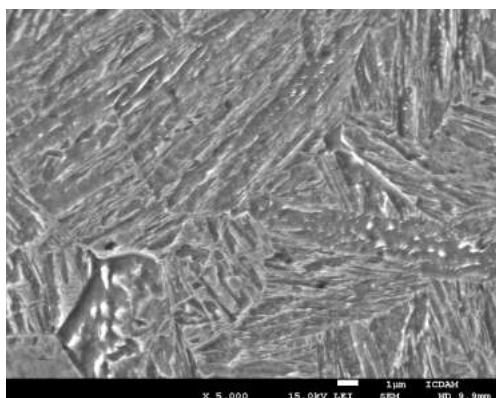
Ozubené kolo - tiché



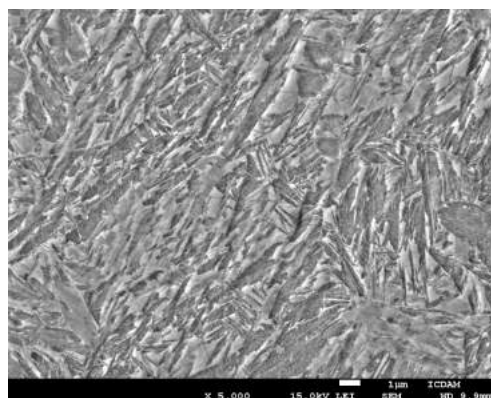
Obrázek 3.68: SR4-T Špička zubu



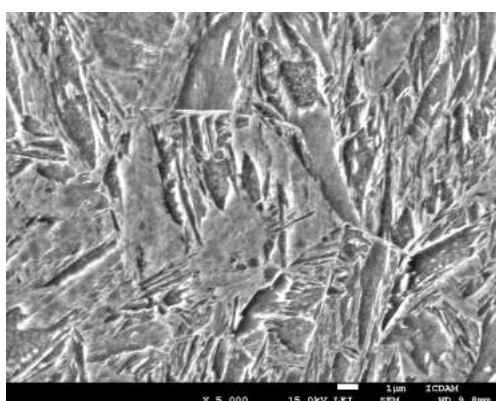
Obrázek 3.69: SR4-T bok zubu



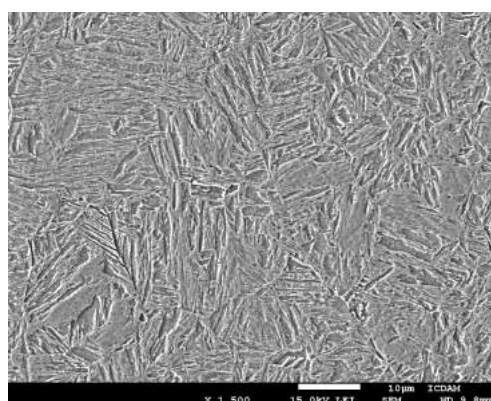
Obrázek 3.70: SR4-T jádro vzorku



Obrázek 3.71: SR4-T pata zubu



Obrázek 3.72: SR4-T jádro zubu



Obrázek 3.73: SR4-T jádro zubu (menší zvětšení)

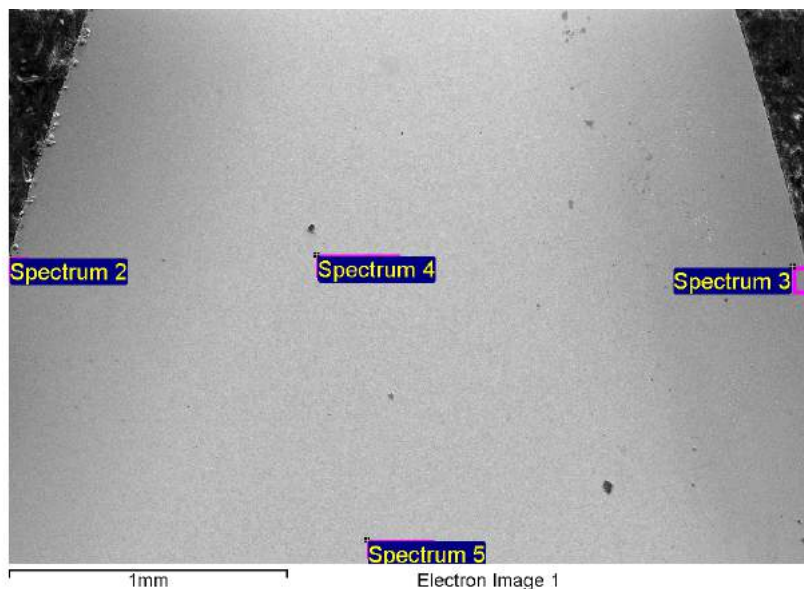
### Zhodnocení snímků povrchu - elektronový mikroskop

Při pozorování struktury jednotlivých částí zubů (vzorků) a následném porovnání tichých a hlučných dílů, dostáváme podobné výsledky jako u světelného mikroskopu, tzn. nejsou žádné výrazné rozdíly.

Při rozboru struktury vidíme ve špičce zubu martenzit se značnou koncentrací zbytkového austenitu. U paty zubu je již zbytkového austenitu méně a u boku zubu koncentrace zbytkového austenitu dále ještě klesne. V jádře zubu je obsažen martenzit a dolní bainit a jádro samotného vzorku je tvořeno směsí horního a dolního bainitu.

### 3.5 Prvková analýza EDS

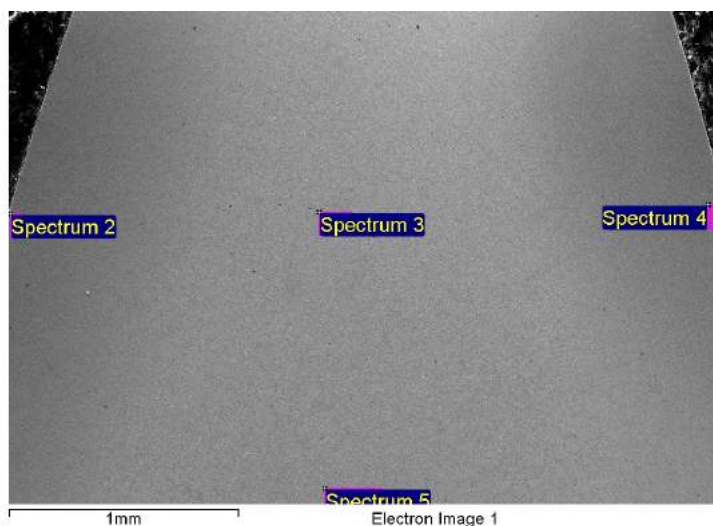
Na výbrusech byla provedena detailní strukturní analýza s využitím řádkovacího elektronového mikroskopu Jeol JSM 7600F vybaveného detektorem a mikroanalýzátorem EDS<sup>4</sup> umožňující provedení mikroanalýzy chemického složení. Liniová analýza provedená u vybraných vzorků je vedena přibližně v místě roztečné kružnice ozubení, kde protokoly z měření této analýzy jsou dostupné v příloze (B.4, B.5, B.6, B.7). Místa mikroanalýzy jsou na obr. 3.74, kde lze vidět jednotlivé oblasti pozorování vzhledem k orientaci zubu, které platí pro vzorky SR4-T a AWA-H. Spektrum 2 značí oblast na povrchu zubu, spektrum 3 je totéž, ovšem opačná strana zubu, spektrum 4 značí jádro zubu a spektrum 5 je jádro samotného vzorku. Spektrum 6 je oblast měření zhruba 3 mm pod patou zubu. Tabulka se Spektrem 6, které obsahuje procentuální zastoupení uhlíku, slouží pro porovnání jádra a povrchové vrstvy zubu. Druhá tabulka, kde již Spektrum 6 neobsahuje procentuální zastoupení uhlíku, slouží pro zobrazení chemického složení materiálu.



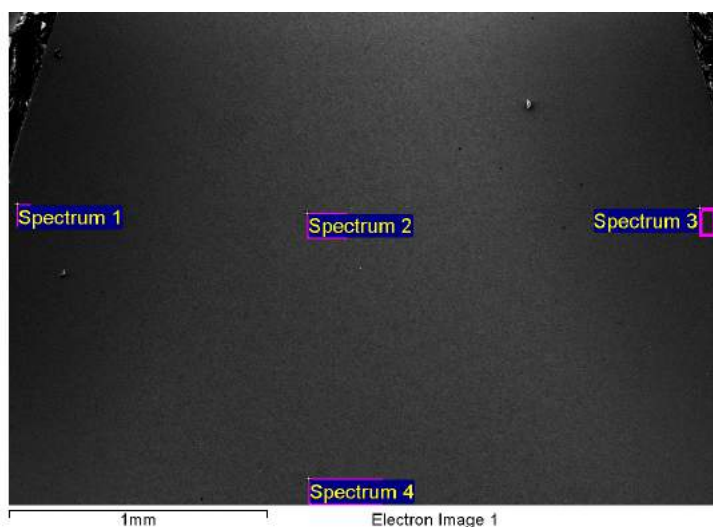
Obrázek 3.74: Schématické znázornění pozic pro vzorky SR4-T a AWA-H

<sup>4</sup>Energiově disperzní spektroskopie

Pozice měření pro vzorek AWA-T znázorňuje obrázek 3.75 a pro vzorek SR4-H obrázek 3.76. Jednotlivé pozice jsou totožné jako v prvním případě, rozdíl je pouze v odlišném značení. Pro všechny případy platí, že krajní pozice na vzorku by měly mít podobné chemické složení (u vzorků SR4-T, AWA-H spektrum 2,3) a zároveň pozice v jádře (u vzorků SR4-T, AWA-H spektrum 4,5,6) by opět měly mít opět podobné chemické složení.



Obrázek 3.75: Schématické znázornění pozic pro vzorek AWA-T



Obrázek 3.76: Schématické znázornění pozic pro vzorek SR4-H

## Dutá hřídel - hlučná/tichá

Tabulka 3.2: AWA-H

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 2	Yes	6.28	0.21	0.14	0.01	0.03	1.22	1.38	90.72	0.01
Spectrum 3	Yes		0.39	1.26	0.02	0.04	1.23	1.34	95.65	0.07
Spectrum 4	Yes	4.23	0.24	0.17	0.00	0.11	1.23	1.62	92.42	
Spectrum 5	Yes	4.12	0.19	0.17	0.04	0.04	1.22	1.46	92.65	0.10
Spectrum 6	Yes	4.19	0.20	0.14	0.00	0.06	1.19	1.46	92.74	

Tabulka 3.3: AWA-T

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 2	Yes	5.36	0.15	0.15	0.00	0.01	1.27	1.40	91.66	
Spectrum 3	Yes	3.89	0.21	0.16	0.03	0.07	1.28	1.52	92.84	
Spectrum 4	Yes	6.57	0.22	0.12	0.04	0.03	1.17	1.33	90.53	
Spectrum 5	Yes	3.84	0.17	0.16	0.02	0.11	1.25	1.49	92.97	
Spectrum 6	Yes	3.96	0.17	0.17	0.01	0.03	1.25	1.45	92.92	0.05

Tabulka 3.4: AWA -H

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 6	Yes		0.22	0.15	0.00	0.07	1.25	1.52	96.79	

Tabulka 3.5: AWA -T

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 6	Yes		0.19	0.18	0.01	0.04	1.30	1.51	96.74	0.05

## Ozubené kolo - hlučné/tiché

Tabulka 3.6: SR4-H

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 1	Yes	6.44	0.19	0.13	0.02	0.03	1.10	1.29	90.81	
Spectrum 2	Yes	5.06	0.19	0.16	0.02	0.06	1.27	1.47	91.77	
Spectrum 3	Yes	6.46	0.21	0.13	0.03	0.08	1.22	1.49	90.39	
Spectrum 4	Yes	4.92	0.18	0.15			1.14	1.29	92.25	0.07
Spectrum 5	Yes	4.03	0.20	0.13	0.02	0.04	1.26	1.40	92.92	

Tabulka 3.7: SR4-T

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe
Spectrum 2	Yes	5.81	0.20	0.19	0.05	0.02	1.25	1.39	91.09
Spectrum 3	Yes	8.89	0.26	0.16	0.01	0.03	1.17	1.34	88.15
Spectrum 4	Yes	4.28	0.21	0.14		0.03	1.17	1.33	92.84
Spectrum 5	Yes	4.17	0.19	0.15	0.02	0.01	1.19	1.37	92.89
Spectrum 6	Yes	4.07	0.17	0.14	0.03	0.06	1.20	1.44	92.89

Tabulka 3.8: SR4 -H

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 5	Yes		0.21	0.14	0.03	0.04	1.31	1.46	96.81	

Tabulka 3.9: SR4 -T

Spectrum	In stats.	C	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Total
Spectrum 6	Yes		0.18	0.15	0.03	0.06	1.25	1.51	96.82	100.00

## Shrnutí výsledku prvkové analýzy EDS

Po porovnání všech naměřených hodnot vychází chemické složení všech měřených vzorků jak v povrchové vrstvě, tak i v jádře materiálu shodně, pouze s malými rozdíly.

# Kapitola 4

## Závěr

V této bakalářské práci bylo na základě provedených experimentů a rozboru výsledků zjištěno, že pro tichá soukolí je charakteristická menší tvrdost na povrchu u hřídelí a větší povrchová tvrdost u ozubených kol. V dalších sledovaných parametrech již nejsou tak výrazné rozdíly, ale určité zákonitosti lze vyzdvihnout u měření tvrdosti v jádře a u CHD. Platí, že u tichých soukolí je tvrdší jádro a větší hloubka nauhličení u hřídelí oproti měkkému jádru s menší hloubkou nauhličení u ozubených kol.

### 4.1 Zhodnocení splnění cílů

Hlavní cíle vytyčené zadavatelem této bakalářské práce byly splněny dle očekávání. Z tichých a hlučných převodovek byly separovány odpovídající díly, z kterých byly připraveny vzorky. Tyto vzorky byly podrobeny materiálovým analýzám dle předem dohodnutých požadavků a rozsahu měření. Na základě vyhodnocení souboru naměřených údajů byly vyvozeny patřičné závěry.

### 4.2 Doporučení

V případě pokračování, či navázání na problematiku této bakalářské práce, by bylo vhodné výrazně rozšířit soubor měření. Dále navázat na měřové středisko a sledovat, v jaké části tolerančního pole se vyskytují jednotlivé hodnocené díly. Pokud se podaří ověřit výsledky této bakalářské práce, potom jako další krok doporučuji zmapovat vzorky vzhledem k jednotlivým pozicím v peci, kde se můžou vyskytovat rozdílné podmínky.



# Literatura

- [1] Neušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 11, jejich složení a tepelné zpracování. [online]. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli/oceli-tridy-11/>>.
- [2] Povrchové kalení. [online]. Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/povrchove-kaleni>>.
- [3] Retained Austenite. *Analytical instruments group*. s. 27. Dostupné z: <<http://www.wiesmueller.com/Uploads/11072014162819KPFODP2A.pdf>>.
- [4] X-ray view of steel. *Offermans*. 2004, , 1, s. 5. Dostupné z: <[http://www.tudelft.nl/fileadmin/UD/MenC/Support/Internet/TU\\_Website/TU\\_Delft\\_portal/Actueel/Magazines/Delft\\_Integraal/archief/2004\\_DI/2004-2/doc/D0-042-0ffermans.pdf](http://www.tudelft.nl/fileadmin/UD/MenC/Support/Internet/TU_Website/TU_Delft_portal/Actueel/Magazines/Delft_Integraal/archief/2004_DI/2004-2/doc/D0-042-0ffermans.pdf)>.
- [5] The Advantages And Disadvantages Of Straight Cut Gears. *Carthrottle*. 2016. Dostupné z: <<https://www.carthrottle.com/post/the-advantages-and-disadvantages-of-straight-cut-gears/>>.
- [6] KRAUS, I. – GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Praha : Vydavatelství ČVUT, vyd. 1. edition, 2004. ISBN 80-010-3099-7.
- [7] MACEK, K. – ZUNA, P. *Nauka o materiálu*. Praha : České vysoké učení technické, vyd. 1. edition, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [8] MACEK, K. – ZUNA, P. – JANOVEC, J. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Praha : ČVUT, 1993. ISBN 80-010-1002-3.
- [9] MORAVEC, V. *Konstrukce strojů a zařízení II*. Ostrava : Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [10] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno : CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [11] x-ray diffractometry. *x-ray diffractometry* [online]. 2016. [cit. 6.06.2016]. Dostupné z: <<http://mini.physics.sunysb.edu/~marivi/TEACHING-OLD/PHY313/lib/exe/fetch.php?cache=&media=lectures:braggslaw.png>>.
- [12] *ČSN EN ISO 2639 (42 0448)*. Český normalizační institut, Praha, 2003. Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace.



- [13] ČIŽMÁROVÁ, E. – SOBOTOVÁ, J. *Nauka o materiálu I. a II.* V Praze : České vysoké učení technické, 1. vyd. edition, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

# Seznam obrázků

2.1	Schéma záběru zatížených zubů [9] . . . . .	5
2.2	Vlevo: modifikace tvaru evolventy, vpravo: změna úhlu záběru [9] . . . . .	5
2.3	Průběhy tuhosti během záběru ozubení [9] . . . . .	6
2.4	Vliv modifikace na hlučností [9] . . . . .	6
2.5	Vlevo: Změna tvaru boční křivky, vpravo: změna úhlu šroubovice [9] . . . . .	7
2.6	Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích [10] . . . . .	11
2.7	Schéma postupů kalení po cementování [10] . . . . .	12
2.8	Část diagramu Fe-N [10] . . . . .	13
2.9	Schématické znázornění nitridačních vrstev . . . . .	13
2.10	Závislost tvrdosti HV na vzdálenosti od povrchu [10] . . . . .	14
3.1	Měření hlučností převodovek . . . . .	16
3.2	Schématické znázornění pásu vtisku [12] . . . . .	17
3.3	Soubor pěti hlučných a pěti tichých soukolí (po částečném oddělení vzorků) . . . . .	18
3.4	Grafické znázornění pozic měření tvrdosti/CHD . . . . .	18
3.5	Princip rentgenové difraktometrie [11] . . . . .	19
3.6	Hřídel(AWA) - porovnání průměrných povrchových tvrdostí . . . . .	20
3.7	Hřídel(AWA) - porovnání průměrných povrchových tvrdostí bez hodnoty T3/H3 . . . . .	21
3.8	Hřídel(AWA) - porovnání průměrných tvrdostí v jádře . . . . .	21
3.9	Ozubené kolo - průměrné hodnoty povrchových tvrdostí . . . . .	22
3.10	Ozubené kolo - průměrné hodnoty tvrdostí v jádře . . . . .	22
3.11	Poměr průměrných tvrdostí ozubené kolo/hřídel (SR4/AWA) . . . . .	23
3.12	Poměr průměrných tvrdostí ozubené kolo/hřídel (SR4/AWA) bez hodnot T3/H3 . . . . .	23
3.13	Průměrné hodnoty tvrdostí na povrchu . . . . .	24
3.14	Průměrné hodnoty tvrdostí v jádře . . . . .	25
3.15	Ukázka průběhu CHD vzorku AWA/T1 - Bok 1 . . . . .	25
3.16	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy AWA - bok zubu . . . . .	26
3.17	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy AWA - pata zubu . . . . .	26

---

3.18	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - bok zubu . . . . .	27
3.19	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - pata zubu . . . . .	28
3.20	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - bok zubu (bez hodnot T1,H1) . . . . .	28
3.21	Zprůměrované hodnoty hloubky cementované vrstvy SR4 - pata zubu (bez hodnot T1,H1) . . . . .	29
3.22	Zbytkové napětí - AWA . . . . .	29
3.23	Zbytkové napětí - SR4 . . . . .	30
3.24	Zbytkový austenit - AWA . . . . .	30
3.25	Zbytkový austenit - SR4 . . . . .	31
3.26	AWA-H špička zubu . . . . .	31
3.27	AWA-H jádro zubu . . . . .	31
3.28	AWA-H jádro zubu bez cementace . . . . .	32
3.29	AWA-H pata zubu . . . . .	32
3.30	AWA-H okolí evolventy . . . . .	32
3.31	AWA-H okolí evolventy . . . . .	32
3.32	AWA-T špička zubu . . . . .	32
3.33	AWA-T jádro zubu . . . . .	32
3.34	AWA-T jádro zubu bez cementace . . . . .	33
3.35	AWA-T pata zubu . . . . .	33
3.36	AWA-T okolí evolventy . . . . .	33
3.37	AWA-T okolí evolventy . . . . .	33
3.38	SR4-H špička zubu . . . . .	33
3.39	SR4-H jádro zubu . . . . .	33
3.40	SR4-H jádro bez cementace . . . . .	34
3.41	SR4-H pata zubu . . . . .	34
3.42	SR4-H okolí evolventy . . . . .	34
3.43	SR4-H okolí evolventy . . . . .	34
3.44	SR4-T špička zubu . . . . .	34
3.45	SR4-T jádro zubu . . . . .	34
3.46	SR4-T jádro bez cementace . . . . .	35
3.47	SR4-T pata zubu . . . . .	35
3.48	SR4-T okolí evolventy . . . . .	35
3.49	SR4-T okolí evolventy . . . . .	35
3.50	AWA-H špička zubu . . . . .	36
3.51	AWA-H bok zubu . . . . .	36
3.52	AWA-H jádro vzorku . . . . .	36
3.53	AWA-H pata zubu . . . . .	36
3.54	AWA-H jádro zubu . . . . .	36

3.55	AWA-H jádro vzorku (menší zvětšení)	36
3.56	AWA-T špička zubu	37
3.57	AWA-T bok zubu	37
3.58	AWA-T jádro vzorku	37
3.59	AWA-T pata zubu	37
3.60	AWA-T jádro zubu	37
3.61	AWA-T špička zubu (větší zvětšení)	37
3.62	SR4-H Špička zubu	38
3.63	SR4-H bok zubu	38
3.64	SR4-H jádro vzorku	38
3.65	SR4-H pata zubu	38
3.66	SR4-H jádro zubu	38
3.67	SR4-H bok zubu (menší zvětšení)	38
3.68	SR4-T Špička zubu	39
3.69	SR4-T bok zubu	39
3.70	SR4-T jádro vzorku	39
3.71	SR4-T pata zubu	39
3.72	SR4-T jádro zubu	39
3.73	SR4-T jádro zubu (menší zvětšení)	39
3.74	Schématické znázornění pozic pro vzorky SR4-T a AWA-H	40
3.75	Schématické znázornění pozic pro vzorek AWA-T	41
3.76	Schématické znázornění pozic pro vzorek SR4-H	41
B.1	Měření hlučnosti převodovek z dlouhodobějšího hlediska	55
B.2	Měření hlučnosti převodovek - zobrazení dávek jedné vsázky	56
B.3	Ukázka výsledku měření profilu SR4/H3	57
B.4	AWA-T1 liniová analýza	58
B.5	SR4-T1 liniová analýza	59
B.6	AWA-H liniová analýza	60
B.7	SR4-H liniová analýza	61



# Seznam tabulek

2.1	Chemické složení oceli 30CrMoV9 [10] . . . . .	7
2.2	Vybraní představitelé cementačních ocelí [10] . . . . .	8
2.3	Vybraní představitelé ocelí k nitridování [10] . . . . .	9
3.1	Rozsahy zkušebního zatížení při zkoušce dle Vickerse [13] . . . . .	17
3.2	AWA-H . . . . .	42
3.3	AWA-T . . . . .	42
3.4	AWA -H . . . . .	42
3.5	AWA -T . . . . .	42
3.6	SR4-H . . . . .	42
3.7	SR4-T . . . . .	42
3.8	SR4 -H . . . . .	42
3.9	SR4 -T . . . . .	42



## Příloha A

# Obsah přiloženého CD

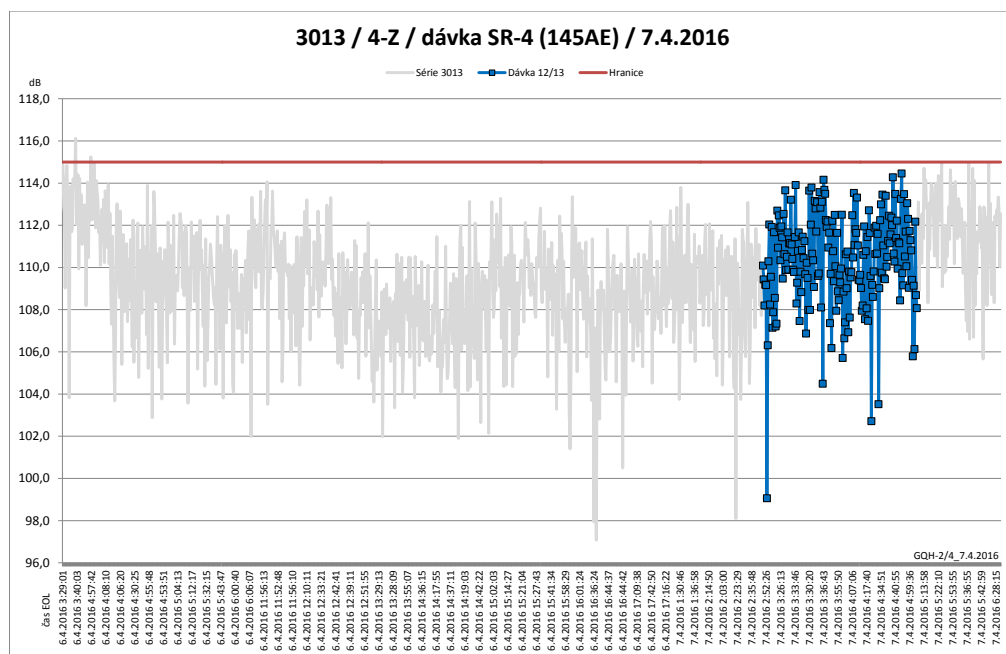
- Přiložené CD obsahuje adresář text s elektronickou verzí a zdrojovým kódem této práce.



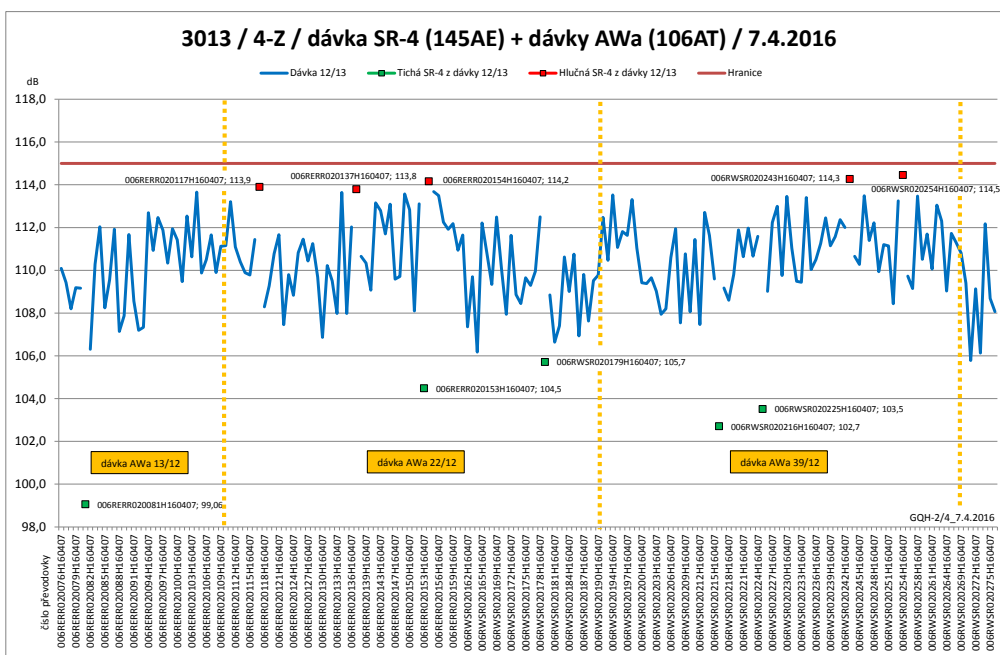


# Příloha B

## Obrázky



Obrázek B.1: Měření hlučnosti převodovek z dlouhodobějšího hlediska

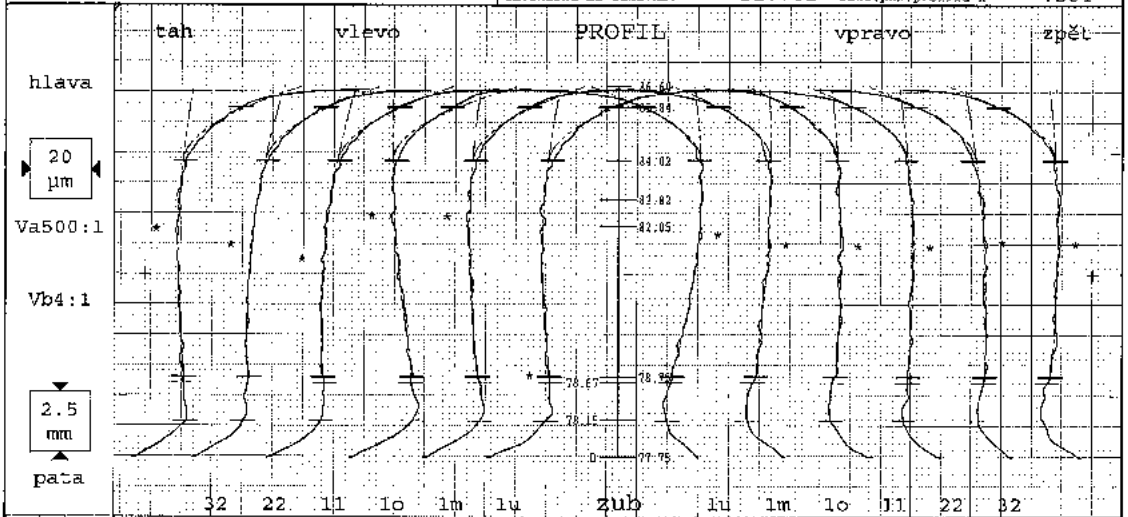


Obrázek B.2: Měření hlučnosti převodovek - zobrazení dávek jedné vsázky

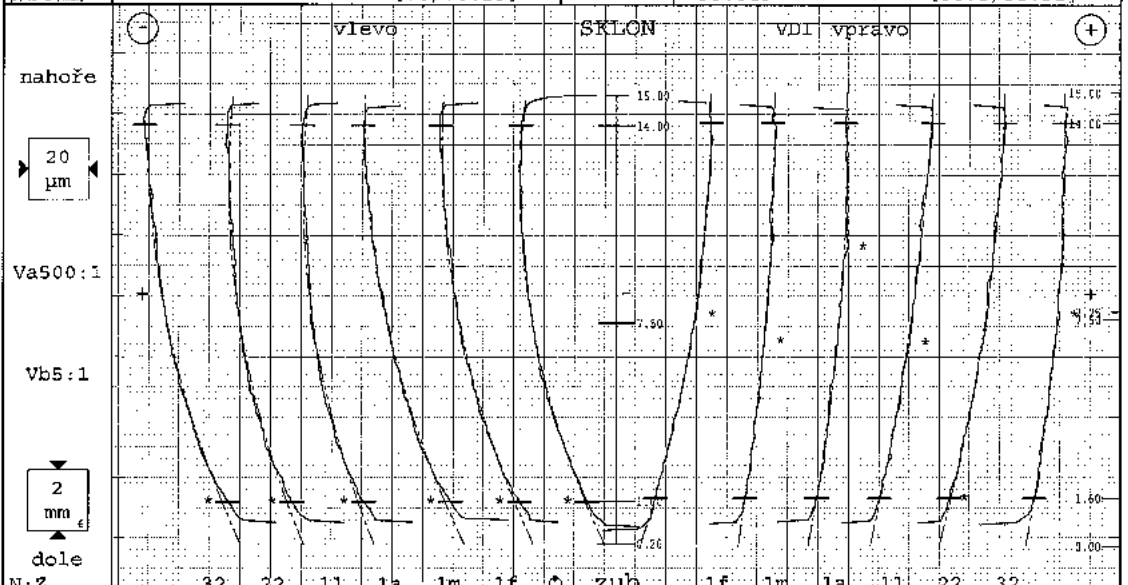
## čelní kolo - profil/sklon



č. prog.:	GST0410113 0 P26	obsluha:	Maslo Jaromir	datum:	16.04.2016 13:50
název:	ZSB SR4	počet zubů z	42	šířka zubu b	15mm
č. výkresu:	0AM 145 AE-r.M op.1000	modul m	1.62mm	pásmo na profilu La	8.91mm
č. zak./série:	RER0154H160407---	úhel záběru	15°	pásmo na sklonu Lb	12.4mm
firma/stroj č.:	Z5 Neznamy stroj	úhel sklonu	-33°	začátek vyhod. Ml	7.57mm
místo měření:	B7554	pr. základní kr. dh	77.28mm	průměr dotyku (#4C)	1mm
stav:		úh. sklonu na zákl. kr.	-31.741°	souř. poz. profilu x	.284



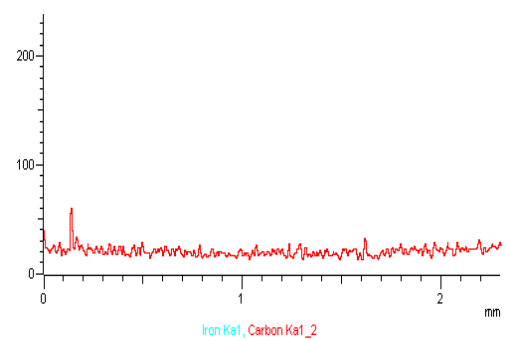
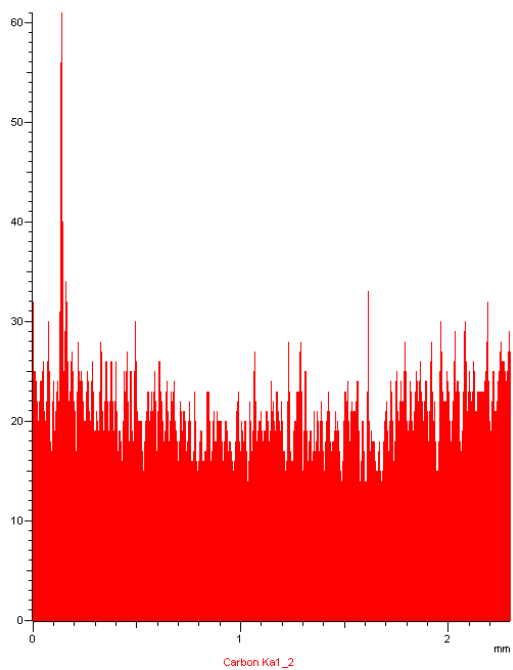
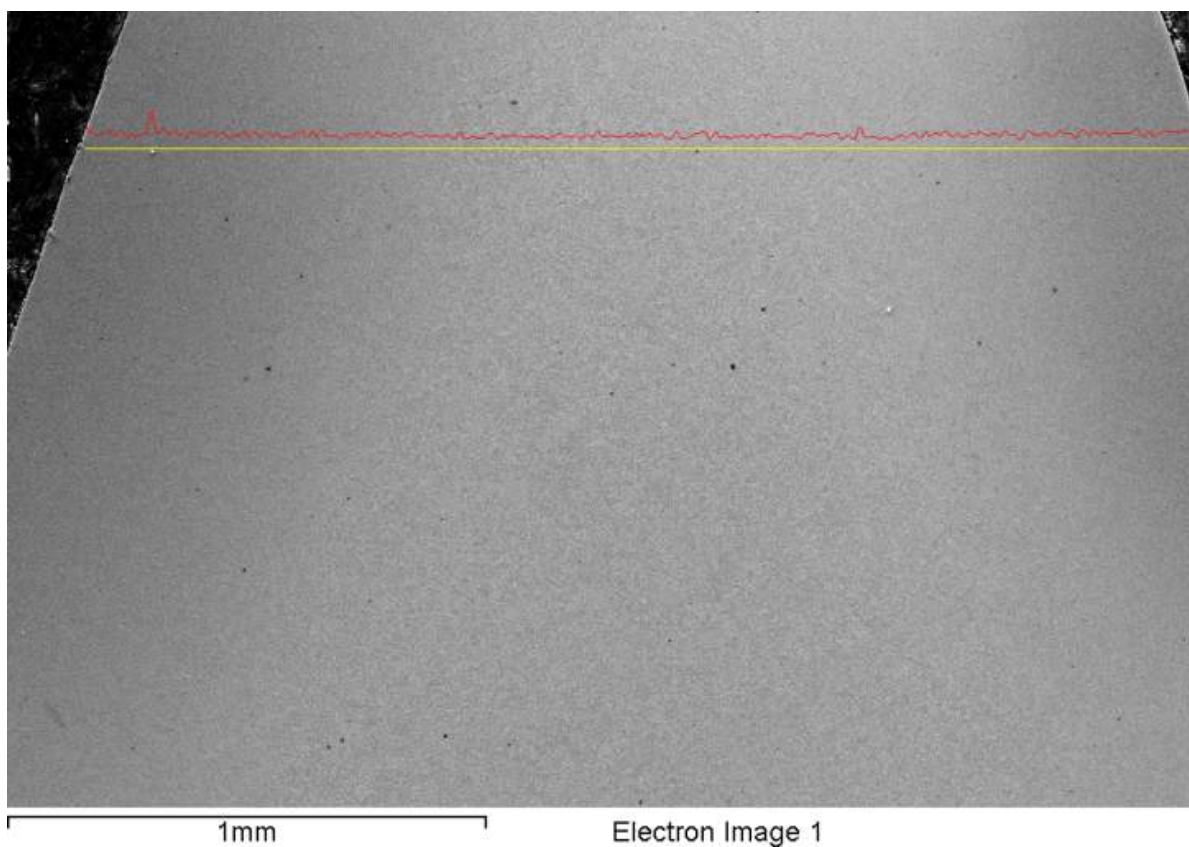
tolerance	středn.	nam. hodn. [µm]						jakost tolerance	nam. hodn. [µm]						středn.	jakost
Var	8														8	
fRa	-3±4	-2	1	-6	-5	7	2	1	2±3	10	5	0	0	-3	2	1
Fa	4	4	4	3	3	9	5	4		8	4	4	3	6	3	4
fRa	4	2	2	1	2	2	2	3	4	2	2	2	2	2	2	2
Ca	3±2	2	2	2	2	1	2	2	3±2	3	1	1	2	2	1	2
Ca	20±6	21	21	21	21	22	20	22	20±6	19	17	16	18	19	19	18
fRa	4	3	4	3	2	4	3	4	4	2	2	1	2	2	2	2
p/n-δ [mm]		76.051 [76/76.25]							86.849 [86.8/86.95]							



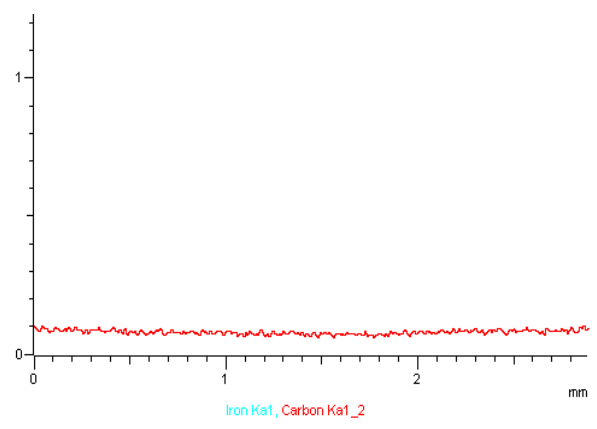
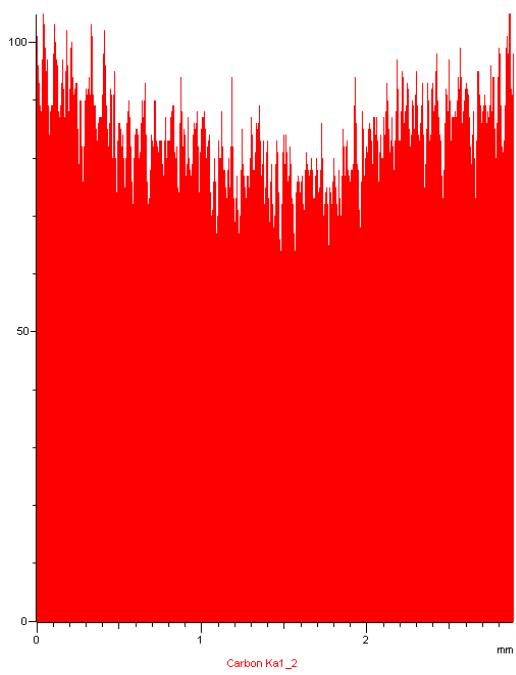
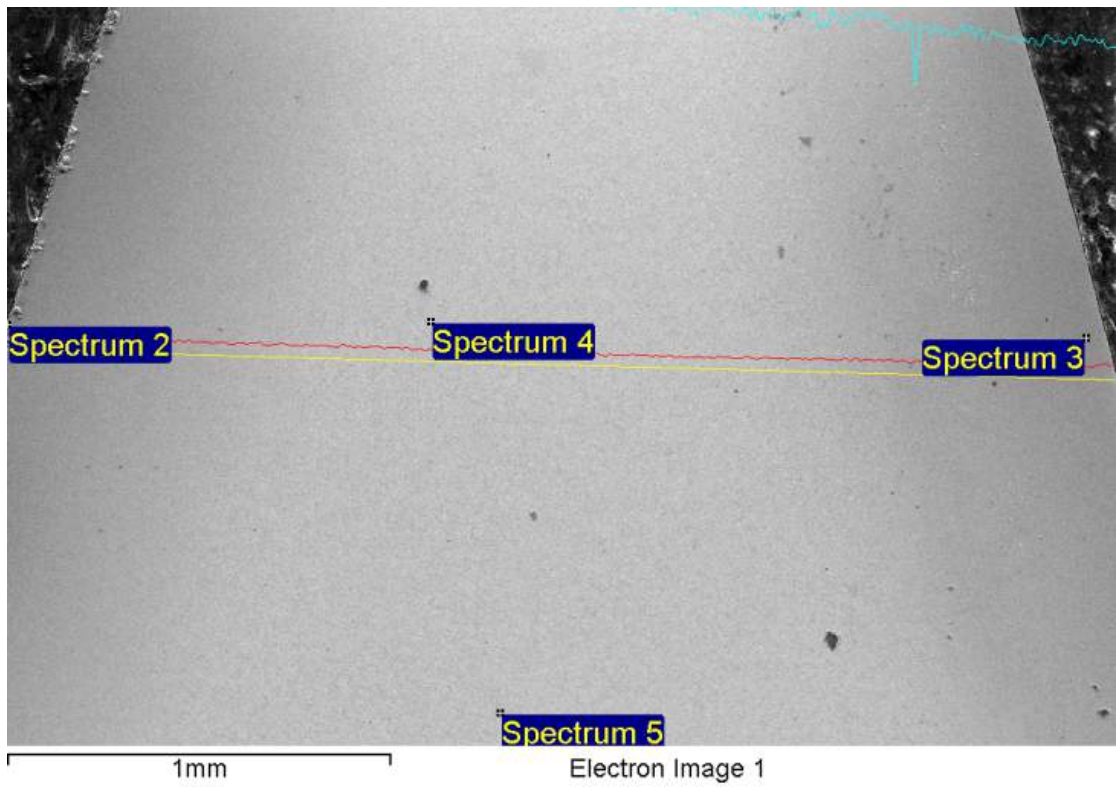
Var	8												9			
fRa	-27±3	-25	-29	-22	-21	-32	-29	-25	18±4	22	12	12	20	21	12	16
Fa	5	6	5	5	7	4	2		4	7	6	4	4	6	5	
fRa	5	3	3	3	3	3	2	5	1	2	2	2	1	2	2	
Ca	8±2	7	6	7	7	7	7	8	4±3	4	2	3	2	3	3	3



Obrázek B.3: Ukázka výsledku měření profilu SR4/H3



Obrázek B.4: AWA-T1 liniová analýza



Obrázek B.5: SR4-T1 liniová analýza

