



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

OPTIMALIZACE TRYSKÁNÍ OZUBENÝCH KOL

OPTIMISATION OF GEAR SHOT-BLASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

**Bc. Martin Lelek**

Praha 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lelek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **424638**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optimalizace tryskání ozubených kol**

Název diplomové práce anglicky:

**Optimisation of gear shot-blasting**

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie únavového zpevňování povrchu
2. Integrita povrchu - složky, význam, hodnocení
3. Mechanismy vzniku zbytkových napětí a jejich význam
4. Rozbor konkrétní aplikace na vybrané ozubené kolo převodovky Škoda
5. Měření zbytkových napětí
6. Technologické zkoušky navrhovaných zlepšení

Seznam doporučené literatury:

WAGNER, Lothar. Shot peening. Cambridge: Wiley-VCH, c2003. ISBN 3527305378.  
TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park, Ohio: ASM International, c2002. ISBN 0-87170-729-2.  
Specifikace koncernu Volkswagen

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Zdeněk Pitrmuc  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace tryskání ozubených kol** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Děkuji tímto Ing. Zdeňku Pitrmucovi za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Ivanu Slimákovi, PhD. a Ing. Pavlu Novotnému za pomoc při realizaci navržených řešení v závodě Škoda Auto a.s.

Dále děkuji Markovi Forbelskému a Jiřímu Adolfovi za pomoc při obsluze rentgenového difraktometru.

V poslední řadě děkuji Petru Patřičnému za pomoc při provádění experimentů v metalografické laboratoři.

# Obsah

Prohlášení.....	1
Poděkování.....	2
Abstrakt.....	5
Klíčová slova.....	5
1. Úvod.....	6
2. Technologie zpevňování povrchu.....	7
2.1 Zpevňování povrchu válečkováním.....	7
2.2 Laser shot peening (LSP).....	8
2.3 Shot peening (SP).....	10
2.4 Porovnání technologií LSP a SP.....	11
2.5 Shot blasting (SB).....	12
2.6 Tryskací média pro technologie SP a SB.....	14
3. Integrita materiálu.....	17
3.1 Drsnost povrchu.....	17
3.2 Geometrická přesnost.....	18
3.3 Zbytková napětí.....	19
3.3.1 Odvrtávací metoda.....	21
3.3.2 Rentgenová difrakční analýza.....	22
3.3.3 Elektrolytické odleptávání povrchových vrstev.....	23
3.4 Tvrdost.....	24
3.4.1 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse.....	25
3.5 Změny struktury.....	26
3.6 Tepelné změny.....	26
4. Mechanismus tvorby zbytkového napětí.....	27
4.1 Vliv vlastností tryskacího média na velikost vytvořeného tlakového napěťového pole.....	28
4.2 Vliv zbytkového napětí na únavovou odolnost materiálu.....	29
5. Výchozí stav.....	31
5.1 Almen test.....	32
5.2 Síťová analýza.....	33
5.3 Stroj.....	34
5.4 Charakteristika tryskacího média.....	35
5.5 Metací lopatky.....	36
5.6 Tryskaná součást.....	36
5.7 Rentgenový difraktometr.....	37
6. Postup přípravy a měření vzorku.....	38
6.1 Popis vzorků.....	38

6.2	Oddělení jednotlivých segmentů .....	39
6.3	Dělení segmentů na vzorky .....	39
6.4	Ohraničení leptané plochy .....	40
6.5	Seřízení měřicí aparatury .....	40
6.6	Leptání.....	40
6.7	Měření zbytkového napětí .....	41
7.	Analýza stability zbytkového napětí v závislosti na pozici ozubeného kola na tryskacím trnu.....	42
7.1	Analýza stability zbytkového napětí při použití standartních metacích lopatek .....	42
7.2	Zjišťování stupně pokrytí.....	45
7.3	Analýza stability zbytkového napětí při použití lopatek s výhodnější geometrií .....	48
8.	Analýza stability zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola.....	52
8.1	Fixace ozubených kol na tryskacím trnu .....	52
8.2	Zúžení intervalu pro vyhodnocení zbytkového napětí.....	56
8.3	Analýza mikrotvrlosti po obvodu ozubeného kola .....	59
9.	Optimalizace podmínek tryskání pro dosažení třídy 3.....	64
9.1	Zvýšení otáček metacího kola .....	64
9.2	Zkrácení času tryskání při konstantních otáčkách (2300 ot/min) .....	66
9.3	Zkrácení času tryskání při konstantních otáčkách (2150 ot/min) .....	67
10.	Výzkum závislosti zbytkového napětí na mikrotvrlosti .....	69
11.	Komparace sférického a arondovaného tryskacího média .....	73
11.1	Porovnání z hlediska drsnosti povrchu.....	73
11.2	Porovnání z hlediska ceny .....	77
11.3	Porovnání z hlediska hustoty .....	77
11.4	Porovnání z hlediska tvrdosti .....	77
11.5	Vícekritériální hodnocení .....	78
11.6	Vyhodnocení.....	79
12.	Závěr.....	80
	Seznam použité literatury .....	82
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	85
	Seznam příloh.....	86

## Abstrakt

Tato diplomová práce shrnuje základní teoretické poznatky o pevnostním tryskání. V úvodu práce je identifikována technologie pevnostního tryskání. V další části je pak blíže popsáno zbytkové napětí, včetně metod jeho hodnocení. Na tuto teoretickou část navazuje praktická část, v rámci které jsou prováděny rozličné experimenty s využitím mechanického tryskače Wheelabtator. Praktická část se skládá z několika kapitol, které jsou zaměřeny na optimalizaci procesu tryskání ozubených kol.

## Abstract

This diploma thesis summarizes theoretical knowledge about strength shot blasting. The beginning of the thesis focuses on the technology behind strength shot blasting. In the next part, residual stress is described in more detail, including methods for evaluation. Following this is the practical section, in which various experiments are carried out using a mechanical Wheelabtator nozzle. The practical section consists of several chapters aimed at optimizing the gearing process.

## Klíčová slova

Pevnostní tryskání, Tryskací médium, Zbytkové napětí, Rentgenová difrakční analýza, Mikrotvrdost.

## Key words

Shot blasting, Blasting medium, Residual stress, X-ray diffraction, Microhardness.

# 1. Úvod

Účelem převodovky v automobilu je změna otáček na výstupním hřídeli převodovky, schopnost běhu naprázdno (pokud se vůz nepohybuje), přenos a změna velikosti točivého momentu motoru a opačný smysl otáčení hnacích kol (zpětný chod).

Pístové spalovací motory pracují mezi minimální a maximální oblastí otáček. V této oblasti vytvářejí nekonstantní poměr točivého momentu. Převodovka umožňuje změnu převodu mezi motorem a hnacími koly tak, aby měl motor bez ohledu na rychlost jízdy co nejvýhodnější otáčky, při kterých bude motor pracovat efektivně. Při jízdě musí motor překonávat krom ztrát v samotném hnacím ústrojí ještě valivý odpor od kol a odpor vzduchu.

Z těchto informací si lze lehce vyvodit, že ozubená kola a hřídele v převodovce jsou extrémně namáhanými díly. Aby byla zajištěna spolehlivost převodovky, je zapotřebí, aby její komponenty byly schopny odolávat takovému namáhání. Toho lze dosáhnout pomocí pevnostního tryskání.

Zařazení technologie pevnostního tryskání komponent převodovek vozů škoda, bylo poprvé aplikováno při výrobě modelu škoda Felicia. Do té doby se ozubená kola a hřídele netryskala. Je to způsobeno především tím, že převodovka nepřenášela takové hodnoty točivého momentu jako v dnešní době. Tato skutečnost je shrnuta v následující tabulce.

*Tabulka 1: Rostoucí hodnoty točivého momentu napříč jednotlivými modely.*

<b>Model</b>	Škoda 105	Škoda 130	Škoda Favorit	Škoda Felicia	Škoda Octavia III	Škoda Superb II	Škoda Octavia RS
<b>Technická data</b>							
zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1046	1289	1289	1598	1896	3597	1984
maximální točivý moment [Nm]	72,8	97	100	135	235	350	370

Tato diplomová práce se zabývá problematikou technologie pevnostního tryskání, konkrétně problematikou tryskání ozubených kol automatické převodovky DQ 200. Práce se zabývá optimalizací procesu, na kterou je pohlíženo z několika hledisek, viz praktická část.

Praktická část práce probíhala v závodě Škoda Auto ve Vrchlabí na metačkovém tryskači Wheelabrator. Závod se od roku 2012, kdy byla zastavena výroba automobilů, zabývá výrobou automatických převodovek pro celý koncern Volkswagen. Téma závěrečné práce mi bylo přiděleno mým vedoucím praxe.



## 2. Technologie zpevnování povrchu

### 2.1 Zpevnování povrchu válečkováním

Charakteristickým znakem válečkování je dosažení tlakového napětí v povrchové vrstvě materiálu a s tím související dosažení vyšší meze únavy. Hloubka oblasti s tlakovým napětím po technologii válečkování se pohybuje okolo několika desetin milimetru. Největšího zpevnění se dosahuje v oblasti od 0,01-0,3 mm. V jádře materiálu pak převažuje napětí tahové. Tlaková napětí jsou příznivá z hlediska eliminace vzniku koroze, případně trhlin [1].

Tvářecí síly při válečkování dosahují hodnot mezi 20 až 40 \* 10<sup>4</sup> N. Síla se volí dle požadavků na hloubku zpevnění a vlastností materiálu součásti. Dle charakteru tvářecí síly lze rozdělit válečkování na **statické** a **dynamické** [1].

#### **Statické válečkování**

Zpevnování povrchu pomocí statického válečkování je charakterizováno odvalujícím se válečkem po povrchu součásti. Tlakové napětí je vyvoláno přitlačnou silou, která působí na odvalující se váleček. Tato síla může být vyvolána mechanicky (pružinou) nebo hydraulicky. Nástroj (váleček) je po celou dobu procesu v kontaktu s povrchem válečkované součásti. Síla působící na nástroj může být konstantní nebo proměnná [1].

#### **Dynamické válečkování**

Oproti statickému válečkování je dynamické válečkování charakterizováno tím, že nástroj (válečkovací element) působí na povrch součásti pouze omezenou dobu v pulsových intervalech. Síla je vyvozována buď mechanicky, anebo odstředivou silou. Intervaly, ve kterých působí válečkovací elementy na povrch součásti mohou být pravidelné či proměnné. Frekvence pulsů nástroje může být v intervalu od 10 do 5000 cyklů/sekundu. Dynamickým válečkováním dochází ke značnému zpevnění povrchu [1].

#### **Pracovní podmínky**

Dosažení kýžených výsledků souvisí s nastavením správných pracovních podmínek technologie válečkování. Pracovní podmínky jsou následující [1]:

- Velikost tvářecí síly
- Posuv nástroje
- Rychlost válečkování

- Počet pracovních cyklů
- Mazání, popřípadě chlazení nástroje

### **Materiály vhodné k válečkování**

Válečkovat se dají téměř všechny kovové materiály bez omezení. Běžně jsou touto technologií zpracovávány materiály jako uhlíková ocel, legovaná ocel, mosaz, litina, aj. V případě vysoce legovaných a tvrdých materiálů se doporučuje, aby byl povrch před válečkováním obroben na čisto, protože vzhledem k vysoké tvrdosti materiálu, nebude docházet k takové tvárnosti jako u materiálu s nižší tvrdostí [1].

Z mechanického hlediska jsou u materiálu důležité vlastnosti jako tažnost, mez pevnosti, mez kluzu a kontrakce. Z chemického hlediska je důležitý především obsah uhlíku. S jeho zvyšujícím se obsahem narůstá odpor proti deformaci a klesá tvárnost materiálu. Mezi další prvky, která mají negativní vliv na tvárnosti patří chrom, mangan, fosfor a křemík [1].

### **Typy tvářecích elementů**

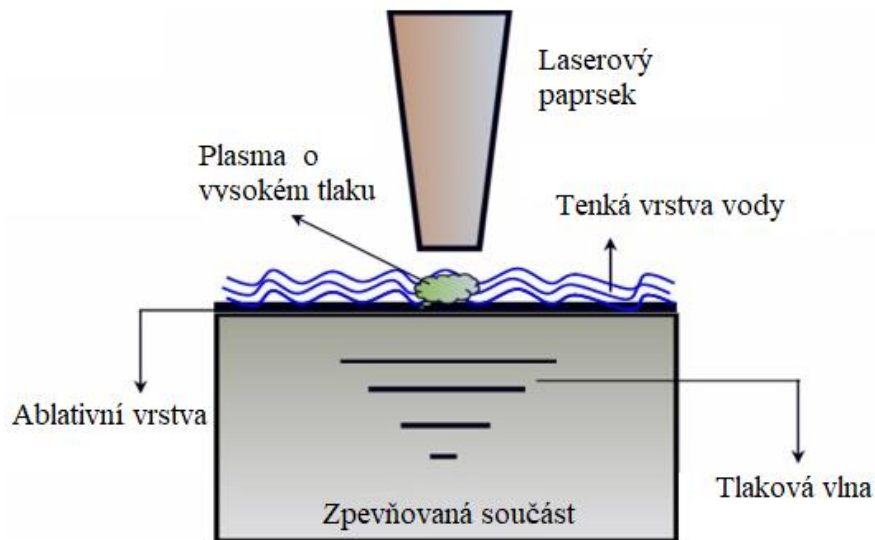
Tvářecí elementy lze rozdělit na elementy nesené středovým čepem a elementy odvalující se po vodící dráze nástroje. Špatná volba tvářecího elementu má za následek nevhodný průběh plastické deformace a s tím je spojená vlnitost povrchu. Dalšími následky jsou ztráty vzniklé třením mezi nástrojem a válečkovanou plochou. Tvářecí elementy mohou být z nástrojové, případně rychlořezné oceli, slinutého karbidu a diamantu [1].

### **Stroje a zařízení**

Válečkování lze provádět na konvenčních nebo moderních CNC soustruzích, vrtačce, frézce a v obráběcích centrech [1].

#### **2.2 Laser shot peening (LSP)**

Při procesu LSP je laserový paprsek namířen na povrch zpevňovaného materiálu. Záření rychle odpařuje tenkou část ablativní vrstvy, čímž je produkována plazma, která je omezována tenkou vrstvou vody, která proudí přes povrch. Vrstva vody je přibližně 1 mm. Vzniklá plazma expanduje, a vytváří tlakovou vlnu, která se šíří do materiálu, kde vytváří reziduální (zbytkové) napětí. Takto vytvořená tlaková vlna se šíří do materiálu, přičemž dosahuje do hloubky, která se přibližně rovná šířce zasažené oblasti. Hloubka zpevněné oblasti může dosahovat až 8 mm. Velikost oblasti, která je vztažena na jeden náraz laserového paprsku je čtverec o rozměru 3-10 mm. Efekt LSP na zpevňovaný materiál je prakticky shodný s efektem SP, tedy vznik zbytkového tlakového napětí a modifikace povrchové topografie [2].



Obrázek 1: Princip metody LSP.

### Parametry procesu

Základní předpoklady pro efektivní proces spočívají ve volbě typu laseru, vlastnostech laserového paprsku a zpevňovaného materiálu. Typické vybavení pro LSP je laserový systém založený na Nd:YAG, Nd:Glass a (Yb:YAG). Používané vlnové délky jsou 1054 nm (infra-červená), 532 nm (zelená) anebo 355 nm (ultra-fialová). Délka působení jednotkové tlakové vlny je v rozsahu 10 ns až 100 ns s energií od 1 J do 100 J. Používaná geometrie laserového svazku je kruhová, eliptická, trojúhelníková či čtvercová [4].

### Materiály vhodné pro LSP

Mezi materiály zpracovávané touto technologií se řadí titanové slitiny, hliníkové slitiny, oceli, slitiny mědi, zinek, slitiny niklu, superslitiny a další materiály. Celkové spektrum materiálů je tedy velmi široké [4].

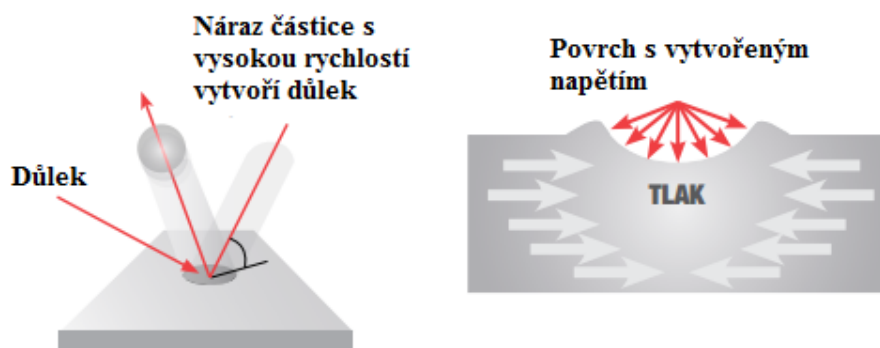
### Aplikace technologie LSP

Od počátku vykazuje LSP velký potenciál a použitelnost na průmyslové úrovni, zejména pro kriticky namáhané součásti. Tato technika výrazně zlepšila mechanické vlastnosti a výkonnost mnoha technických materiálů v důsledku zvýšení hloubky zbytkového tlakového napětí. Co se týká velikosti strojních součástí, lze zpracovávat díly od vstřikovací trysky až po panel křídla letadla. Největšího uplatnění se dosahuje v oblasti leteckého a kosmického průmyslu. Jednou z nesporných výhod LSP je možnost volby geometrie laserového paprsku v závislosti na strojní součásti [4].

## 2.3 Shot peening (SP)

Technologie shot peening je charakteristická ostřelováním povrchu materiálu malými sférickými elementy z oceli, skla, nebo keramiky. Velikost těchto elementů se pohybuje od 50  $\mu\text{m}$  do 3 mm v průměru. Princip této metody je založen na principu, že každé vystřelené tělísko, které narazí do tryskaného materiálu, působí jako malé kladívko, které vytvoří v povrchu malý důlek. Bombardováním povrchu materiálu dojde k odstranění tahového napětí, které se transformuje na tlakové napětí. Velikost napětí v tlaku může být až 80 % meze pevnosti tryskaného materiálu [2].

Shot peening je ekonomicky nejlepší metoda, jak vyvolat v povrchové vrstvě materiálu tlakové napětí, které přispívá ke zlepšení funkčních charakteristik a prodloužení životnosti dílů. Hojně se této metody využívá při výrobě ozubených kol [3].



Obrázek 2: Princip technologie shot peening.

Volba technologických parametrů závisí na mnoha parametrech. Mezi základní patří znalost aplikace dílu a jeho geometrie, technologické operace, kterými díl prošel před tryskáním, mechanické vlastnosti základního materiálu, citlivost tryskaného materiálu na vnesené napětí, provozní podmínky, ve kterých bude díl používán a další [7].

### Materiály vhodné pro shot peening

Mezi materiály, které jsou vhodné pro tuto technologii se řadí vysokopevné oceli, hliníkové slitiny, slitiny titanu a slinuté karbidy.

Pro běžnou netryskanou vysokopevnou ocel je dosahováno největší únavové pevnosti při tvrdosti kolem 40 HRC, v případě tryskané oceli se dosahuje největší únavové pevnosti při tvrdosti okolo 52 HRC. V případě slinutých karbidů byl po tryskání zaznamenán 22% nárůst odolnosti proti porušení a únavová životnost se zvýšila 10x. Tryskání titanu zvyšuje nízkocyklovou únavu při jeho zatěžování. Typickými strojními součástmi jsou lopatky tryskových motorů, díly převodovek, klikové hřídele, hřídele a nápravy, torzní tyče a další [5].

## Stroje a zařízení

Stroje používané pro zpevňování povrchu metodou shot peening lze rozdělit do dvou základních skupin podle způsobu urychlení média. Tato problematika bude podrobněji probrána v kapitole týkající se technologie shot blasting. Typická aparatura pro zpevňování povrchu touto metodou se skládá z trysky, která je řízena robotem. V případě použití trysky je nosným médiem nejčastěji stlačený vzduch. Pro srovnání, technologie shot blasting využívá mechanického urychlení tryskacího média pomocí metacích kol.

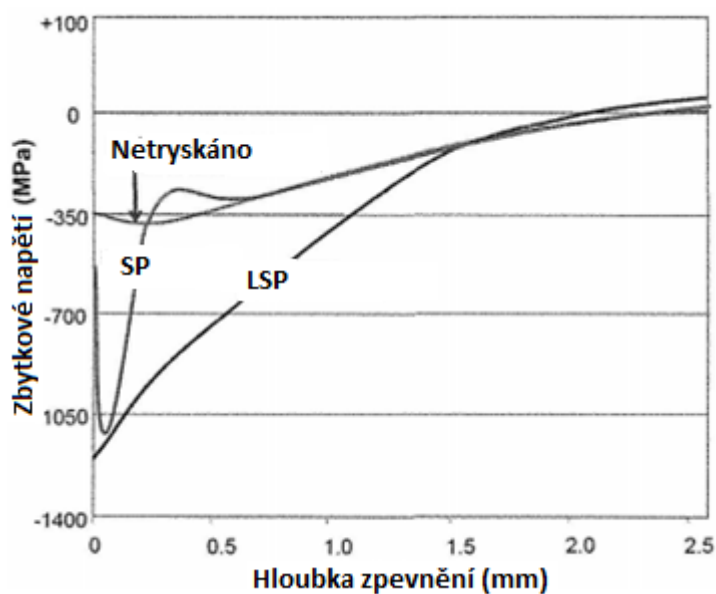
### 2.4 Porovnání technologií LSP a SP

Z obrázku je zřejmé, že technologie LSP nám umožňuje dosáhnout většího zbytkového napětí ve větších hloubkách, než jak je tomu v případě SP.

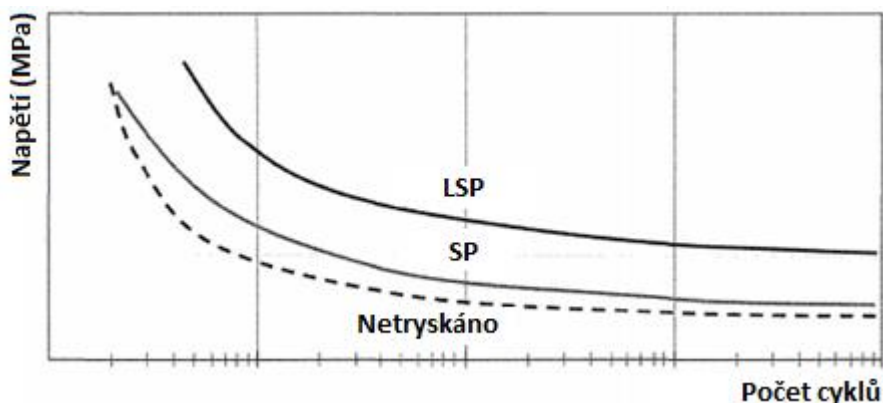
Únavová životnost se skládá ze dvou období, iniciace trhliny a následného šíření trhliny. Ve většině případů představuje velké procento celkové únavy právě období iniciace trhliny.

Na obrázku níže je Wöhlerova křivka porovnávací LSP, SP a netryskaný materiál. Z obrázku je patrné že

technologie LSP jasně dominuje v porovnání s technologií SP [2].



Obrázek 3: Porovnání LSP, SP a netryskaného povrchu z hlediska hloubky dosaženého zbytkového napětí [2].



Obrázek 4: Porovnání LSP, SP a netryskaného povrchu z hlediska únavové životnosti. [2].

## 2.5 Shot blasting (SB)

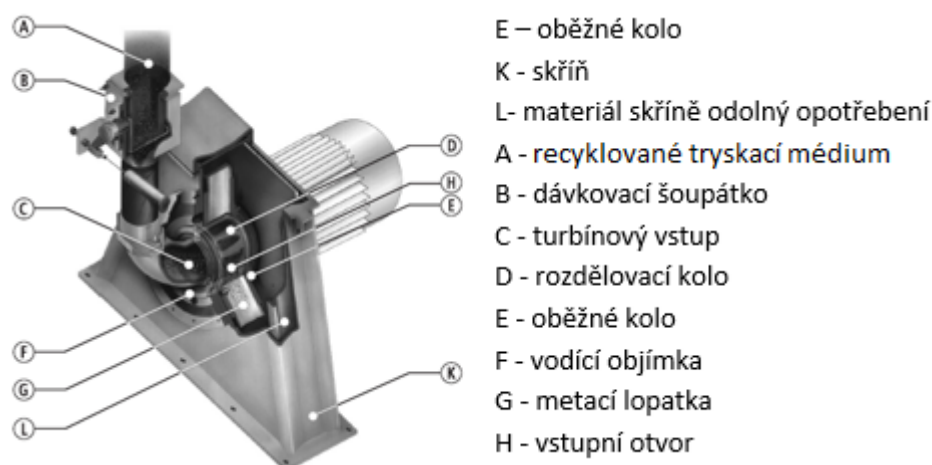
Shot blasting je metoda používaná k čištění, zpevnění, nebo leštění kovu. Tryskání je používáno téměř v každém průmyslu, který používá kovy, včetně letectví, automobilového průmyslu, stavebnictví, slévárenství, stavby lodí, železnice a mnoho dalších. Možnosti tryskání jsou buď pomocí metacích kol (**airless blasting**), případně je abrazivum unášeno pomocí média, kterým bývá stlačený vzduch (**air blasting**) anebo voda (**hydro blasting**).

### Airless blasting

Tento princip přímo přeměňuje energii elektromotoru na kinetickou energii otáčením turbínového kola. Kapacita každého kola se pohybuje od přibližně 60 kg/min až do 1200 kg/min. Důsledkem velkého množství zrychleného abraziva je třeba používat stroje robustní konstrukce, přičemž tryskací komora musí být zhotovena z vysoce odolných materiálů [9].

Tryskací médium je přiváděno do rotujícího metacího kola. Jako médium se používá především velmi tvrdá ocel, případně nerezová ocel. Stroje mohou být konstruovány s více metacími jednotkami. Nevýhoda tryskání metacími koly je omezení na velmi málo médií [6].

Při výběru stroje je potřeba myslet na dvě základní věci. Za prvé jsou to **vlastnosti součásti** (velikost, hmotnost a hustota, tvar, způsob výroby, metalurgie a vlastnosti povrchu) a za druhé **schopnosti a omezení stroje** [10].



Obrázek 5: Metací jednotka.

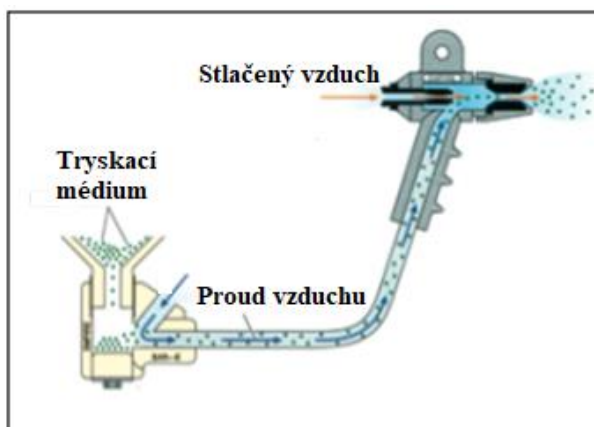
### Air blasting

Tryskací stroje pracující na principu stlačeného vzduchu mohou být vybaveny tryskací komorou nebo tryskací skříní. Abrazivum je pneumaticky zrychleno stlačeným vzduchem, který je řízen regulátorem tlaku. Používané tlaky se pohybují od 20 do 90 psi [9], [6].

Existují dva druhy transportních systémů. **Sací**, které se používá v tryskacích skříních a **tlakové**, které se používá v tryskacích skříních, tryskacích komorách a k venkovnímu tryskání.

- Sací systémy

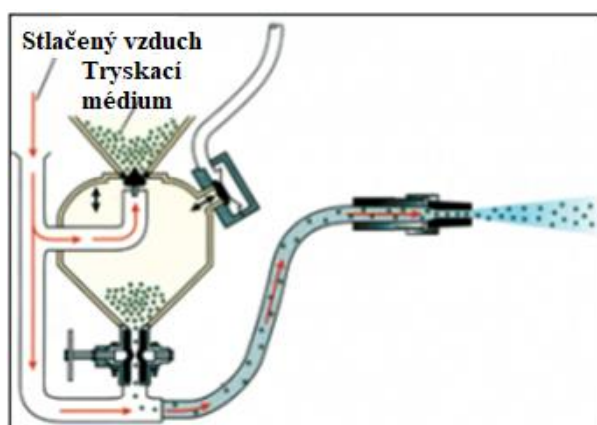
Pracuje na principu nasávání tryskacího média z násypky. Dráha zrychlení média je velmi krátká. Sací systémy mohou být nepřetržitě v provozu, dokud nedojde zásoba tryskacího média v násypce. Tyto systémy jsou však omezeny délkou nasávací hadice a jejich účinnost klesá s klesajícím tlakem okolního vzduchu. Výhodou je možnost použití většiny tryskacích médií [6].



Obrázek 6: Princip sacího systému [6].

- Tlakové systémy

Tlakové systémy využívají různé velikosti tlakových nádob. Tlaková nádoba obsahuje médium a je napájena stlačeným vzduchem. Poté co se smísí vzduch s tryskacím médiem, je tato směs urychlována. Zrychlení je o mnoho vyšší než v případě sacího systému. Tlakové systémy mohou pracovat se všemi typy médii bez ohledu na hmotnost nebo velikost a mohou také transportovat media při velmi nízkých tlacích [6].



Obrázek 7: Princip tlakového systému [6].

Pro speciální aplikace lze použít směs abraziva a vody, tzv. mokré tryskání. Zařízení může být vybaveno jednou či více tryskacími tryskami. V obou případech musí být trysky instalovány v pevné poloze. S tryskami lze během procesu manipulovat, v případě, že jsou instalovány na pohyblivé rameno robotu [9].

### **Hydro blasting**

Tento typ pevnostního tryskání používá jako nosné médium vodu pod tlakem, který je vytvořen čerpadly. Hydro systémy jsou výhodné pro dopravu velmi jemných částic [6].

Všechny výše zmíněné technologie potřebují transportní systémy (vzduch, voda, metací lopatky), tryskací kabinu, která je izolována od okolního prostředí, recyklační systémy pro třídění abraziva, sběrač prachu. Podrobněji budou tyto nezbytné části tryskacích zařízení probrány v praktické části této práce přímo na konkrétním stroji [6].

#### **2.6 Tryskací média pro technologie SP a SB**

Technologie shot peening pracuje především se sférickými typy médií. Lze tedy tryskat kulatými kovovými, skleněnými anebo keramickými částicemi. Sférická média se používají pro zpevňování povrchu a vytvářejí hladší povrchovou vrstvu.

#### **Keramické sférické částice**

Tryskání keramickými částicemi bylo poprvé aplikováno v roce 1981. Od té doby byl zaznamenán nárůst v poptávce po tomto typu tryskacího média. Keramiky se užívá především při tryskání ocelí, dále pak slitin hliníku a titanu. Keramické částice obsahují 67 %  $ZrO_2$ , 31 %  $SiO_2$  a 2 %  $Al_2O_3$ . Mikrostruktura se skládá z krystalu zirkonu uzavřeného ve fázi oxidu křemičitého. Výhodou tohoto typu média je především jeho malá destrukce. Vyrábí se v průměrech od 0,2 mm do 0,6 mm [8].

#### **Skleněné sférické částice**

Jedná se o perspektivní tryskací médium, mající tvar malých skleněných kuliček. Nespornou výhodou skleněného média je právě jeho dokonale kulový tvar všech jednotlivých elementů, který je u kovových médií v celé dávce těžce dosažitelný. Specifická hmotnost skleněného média je asi 3krát nižší než v případě kovového. Nízká hmotnost je výhodná především pokud je nosným médiem stlačený vzduch, který urychluje lehké skleněné kuličky rychleji než kovové. S nízkou hmotností souvisí ale i nižší kinetická energie jednotlivých elementů. Tato nevýhoda se projeví bezprostředně po opuštění trysky snížením kinetické energie elementů a k jejímu snížení dochází až do doby kontaktu tryskacího média s tryskaným povrchem. Tento problém lze však částečně řešit minimalizací vzdálenosti mezi tryskou a tryskaným materiálem. Další výhodou je chemická neutralita skleněného materiálu [8].



### **Litinový granulát**

Tento typ média se vyrábí tavením železa v peci. Při dosažení kritické teploty dojde k odlití taveniny do kalického tanku, ve kterém je voda. Interakcí taveniny s vodou dochází ke vzniku oválných elementů. Velké procento takto vzniklých elementů má kulatý tvar, zbývající elementy mají tvar hruškovitý, popřípadě červíčkovitý. Vlivem tepelného šoku mohou obsahovat takto vzniklé elementy trhliny. Bezprostředně po zchladnutí následuje třídění, které má za cíl vyřadit elementy s nežádoucím tvarem a velikostí. Výhodou tohoto typu tryskacího média je především nízká cena. Nevýhodou je jeho vysoká tvrdost 700-1000 HV, která způsobuje destrukci elementu při kontaktu s tryskaným materiálem [8].

### **Ocelový granulát**

Princip výroby je podobný jako v případě litinového granulátu. Ocelový granulát byl uveden na trh v roce 1950. Vstupním materiálem pro výrobu je zpravidla ocelový šrot, který je ale velmi pečlivě tříděn, aby byla zajištěna vysoká kvalita tryskacího média. Ocelové kuličky jsou vyráběny v různých velikostech. Tvrdost se pohybuje v rozpětí od 350HV do 500HV. V porovnání s litinovými částicemi disponují ocelové částice větší houževnatostí a odolností proti destrukci [8].

### **Sekaný drát**

Jak už je patrné z názvu, jedná se o pelety, které vznikají sekáním drátu. Délka takto zhotovených pelet se rovná jejich průměru. Drát používán k jejich výrobě by měl být přesně standardizován, aby byla zajištěna kvalita. Výsledné vlastnosti tryskacího média jsou závislé na vlastnostech drátu. Proto se na trhu objevuje několik typů sekaného drátu, jde například o zinkový sekaný drát, nerezový, mosazný, ocelový a další. Neupravený sekaný drát má ostré hrany, to se hodí například pro čištění povrchu součástí. Pokud chceme tento tryskací materiál používat například pro zpevnování povrchu je výhodnější zvolit zaoblený případně arondovaný sekaný drát. Takto upravenými peletami se dosahuje lepší drsnosti povrchu. Výrobce Kuhmichel, který je hlavním dodavatelem tryskacího materiálu do firmy Škoda Auto Vrchlabí dodává pelety ve třech modifikacích [8].

G1 – zrno ve formě pelet

G2 – zaoblené zrno

G3 – téměř kulaté (arondované) zrno



Obrázek 8: Zleva, sekaný drát ve formě ostrohranných pelet (G1), zaoblený sekaný drát (G2), arondovaný sekaný drát (G3).

### Nerezový granulát

Je vyráběn podobnou technikou jako v případě ocelového granulátu. Tento typ tryskacího média je v porovnání s ocelovým médiem několikanásobně dražší. S jeho použitím souvisí několik pravidel jako například nutnost zajistit, aby nedošlo k jeho kontaminaci například železem.

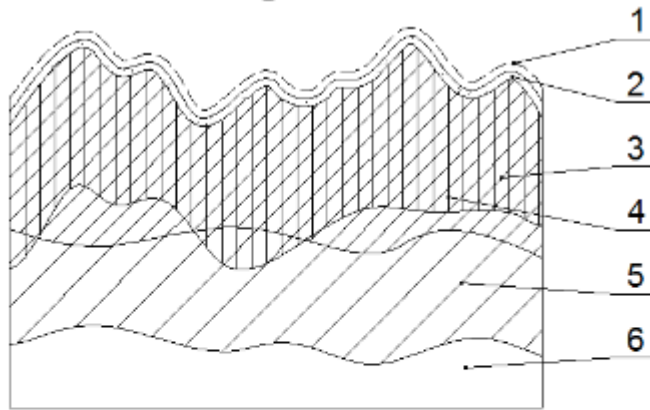
Proto je nezbytně nutné, aby byly metací lopatky, tryskací kabina a další části stroje se kterými přijde toto médium do kontaktu také z nerezové oceli [8].

APLIKACE \ MÉDIUM	Skleněné kuličky	Keramické kuličky	Ocelový sekaný drát	Ocelový granulát
Dokončování	ANO	ANO	ANO	ANO
Čištění povrchu	ANO	ANO	ANO	ANO
Zpevňování povrchu	ANO	ANO	ANO	ANO
Profilování povrchu	NE	NE	ANO	NE
Pracovní rychlost	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ	STŘEDNÍ
Recyklovatelnost	STŘEDNÍ	VYSOKÁ	VYSOKÁ	VELMI VYSOKÁ
Tvrdost (stupnice MOH)	5,5	7	6-7,5	6-7,5
Objemová hustota [lb/cu.ft]	100	150	280	280
Běžný tryskací tlak [psi]	20-55	20-90	20-90	20-90
Tvar	SFÉRICKÝ	SFÉRICKÝ	SFÉRICKÝ	SFÉRICKÝ

Obrázek 9: Porovnání vlastností jednotlivých typů tryskacích médií [6].

### 3. Integrita materiálu

Integrita povrchu je soubor vlastností, které ovlivňují povrch finálního výrobku. V průběhu obrábění je integrita ovlivňována mechanickými a tepelnými účinky. Výsledná integrita povrchu je pak dána **drsností povrchu, profilem povrchu, geometrickou přesností, zbytkovým napětím, tvrdostí, změnami struktury, tepelnými změnami a trhlinami** [13].



- 1 – adsorbovaná vrstva (až do 0.1  $\mu\text{m}$ ),
- 2 – oduhličená vrstva kovu, oxidy a nitridy (až do 0.1  $\mu\text{m}$ ),
- 3 – oblast plastické deformace (až do 500  $\mu\text{m}$ ),
- 4 – oblast elastické deformace (do 500  $\mu\text{m}$ ),
- 5 – tepelně ovlivněná oblast (do 200  $\mu\text{m}$ ),
- 6 – neovlivněný materiál

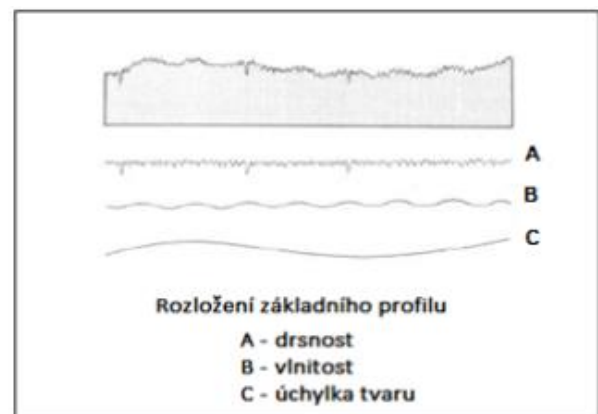
Obrázek 10: Jednotlivé složky integrity povrchu [22].

#### 3.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu patří s geometrickou přesností mezi hlavní ukazatele jakosti povrchu. Je předepisována na výkresy, protože na jejím základě je do jisté míry volena strategie obrábění, volba stroje, nástroje a nástrojového materiálu. S drsností jsou spojeny třídy přesnosti IT, které se zvyšují se zvyšujícími se nároky na kvalitu povrchu. Hodnota drsnosti povrchu by se měla předepisovat s ohledem na funkci výrobku, protože se zvyšujícími se nároky na drsnosti povrchu se zvyšují výrobní náklady. Cílem drsnosti je zmapovat obrobený profil a vyhodnotit, zdali je profil v souladu s požadovanou drsností. Drsnost povrchu a jeho profil je přesně definován v normě ČSN EN ISO 4287 [21].

Drsnost povrchu je jenom jedním z parametrů struktury povrchu. Struktura povrchu je charakterizována třemi parametry

- Parametr R, určen z profilu drsnosti
- Parametr W, určen z profilu vlnitosti
- Parametr P, určen ze základního profilu



Obrázek 11: Prvky základního profilu [21].

Parametry struktury povrchu			Filtrování podle ČSN EN ISO 11562		
			Profil		
			R	W	P
Výškové parametry	výstupků a prohlubní	největší výška výstupků	$R_p$	$W_p$	$P_p$
		největší hloubka prohlubně	$R_v$	$W_v$	$P_v$
		největší výška profilu	$R_z$	$W_z$	$P_z$
		průměrná výška profilu	$R_c$	$W_c$	$P_c$
		celková výška profilu	$R_t$	$W_t$	$P_t$
	průměrné hodnoty	průměrná aritmetická úchylka profilu	$R_a$	$W_a$	$P_a$
		průměrná kvadratická úchylka profilu	$R_q$	$W_q$	$P_q$
		šikmost profilu	$R_{sk}$	$W_{sk}$	$P_{sk}$
		špičatost profilu	$R_{ku}$	$W_{ku}$	$P_{ku}$
Délkové parametry		průměrná šířka profilu	$R_{sm}$	$W_{sm}$	$P_{sm}$
Hybridní parametry		průměrný kvadratický sklon profilu	$R_{dq}$	$W_{dq}$	$P_{dq}$
Křivky a příbuzné parametry		materiálový nosný poměr profilu	$R_{mr}(c)$	$W_{mr}(c)$	$P_{mr}(c)$
		rozdíl výšky úseku profilu	$R_{dc}$	$W_{dc}$	$P_{dc}$
		vzájemný materiálový poměr	$R_{mt}$	$W_{mt}$	$P_{mt}$

Obrázek 12: Parametry hodnotící strukturu povrchu [21].

### 3.2 Geometrická přesnost

Dalším důležitým ukazatelem je geometrická přesnost, která se zabývá měřením tvaru součásti a ukazuje odchylku od ideálního tvaru součásti. Geometrická nepřesnost je způsobena obráběcím nástrojem, tuhostí stroje, nástroje a obrobku a je do jisté míry závislá na řezných podmínkách. U rotačních součástí se hodnotí kruhovitost, válcovitost, sousost, soustřednost, čelní, obvodové nebo celkové házení. U rovinných součástí je to kupříkladu rovinnost, kolmost, rovnoběžnost. Jednotlivé odchylky jsou normovány. Ucelený seznam geometrických tolerancí včetně jejich značek je na obrázku níže [13].

Geometrické tolerance		Značka
Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	▭
	Kruhovitosti	○
	Válcovitosti	⊘
	Tvaru profilu	⌒
	Tvaru plochy	⌒
Směru	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	⊥
	Sklonu	↗
Polohy	Umístění	⊕
	Souměrnosti a sousosti	⊙
	Souměrnosti	≡
Házení	Kruhového	↗
	Celkového	↗

Obrázek 13: Geometrické tolerance [30].

### 3.3 Zbytková napětí

Od návrhu až po finální výrobek projde materiál řadou technologických operací, ať už jde o tváření, tepelné zpracování, nebo obrábění. Při těchto operacích je do materiálu vnášeno napětí, které vzniká silovým působením na materiál při obrábění nebo tváření. Odstranění těchto napětí je možné opatřeními, jako je například žíhání. Napětí jsou dvojího druhu, tlaková (-) a tahová (+). Velikosti těchto napětí se počítají v absolutních hodnotách [13].

Zbytková napětí jsou mechanická napětí, která se nachází v tělese bez působení vnějších sil. Napětí vyvolaná nemechanickými a teplotními účinky, považujeme ve smyslu této definice za napětí "vložená", i když jsou důsledkem stacionárních, po dlouhou dobu se neměnných podmínek. Pevné látky bez zbytkových napětí prakticky neexistují. Zbytková napětí jsou důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací. Pro třídění zbytkových napětí, která se nachází v polykrystalických materiálech se užívá obvykle jako klasifikačního kritéria velikosti objemů, v nichž je napětí konstantní ve své velikosti a směru (homogenní) [14].

Mechanismy vzniku zbytkových napětí lze rozdělit na **mechanické procesy, tepelné procesy, chemické procesy a kombinované procesy** [18].

Mezi mechanické procesy patří především povrchové opracování (pevností tryskání, válečkování, leštění a další). Na povrchu materiálu, který byl plasticky deformován, se vlivem deformace povrchu vytvoří zbytkové tlakové napětí. Uvnitř materiálu budou převládat tahová napětí. Mezi tepelné procesy vyvolávající zbytkové napětí patří například kalení, odlévání sváření, aj. Tepelná napětí jsou doprovázena napětími transformačními, které vznikají jako důsledek fázových transformací. Mezi chemické procesy, které generují zbytková napětí patří oxidace, koroze, nebo galvanické pokovení. Do kombinovaných procesů lze zařadit například neideálními podmínkami broušení [18].

#### **Dělení zbytkových napětí**

Zbytková napětí lze rozdělit na [14]:

- napětí I. druhu**
- napětí II. druhu**
- napětí III. druhu**

- Zbytková napětí I. druhu (makroskopická)

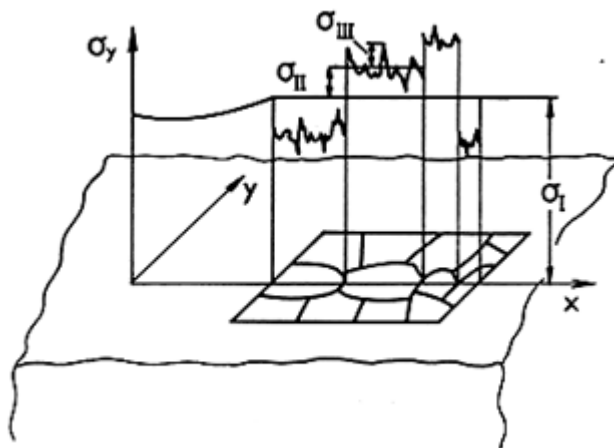
Tento typ zbytkového napětí je homogenní ve velké oblasti (v mnoha krystalech) materiálu. Pokud je zasazeno do silové rovnováhy tělesa obsahující napětí I. druhu, dochází ke změnám makroskopických rozměrů.

- Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)

Jsou homogenní v oblastech, které jsou srovnatelné s velikostmi jednotlivých krystalů. Zásah do silové rovnováhy tělesa nemusí nutně vést ke změnám tvaru tělesa.

- Zbytková napětí III. Druhu (submikroskopická)

Tato napětí jsou homogenní i v oblasti, která je srovnatelná s meziatomovými vzdálenostmi. Zásah do silové rovnováhy tělesa nevede ke změnám tvaru tělesa.



Obrázek 14: Zbytková napětí I, II, a III. druhu u jednofázového polykrystalického materiálu [18].

Výsledné zbytkové napětí v určitém bodě je vždy superpozicí všech tří typů napětí, ale technické praxi se pojem zbytková napětí nejčastěji rozumí především napětí I. druhu z důvodu jeho výrazného vlivu na životnost a deformace součásti.

### Metody zjišťování zbytkového napětí

Metody zjišťování zbytkových napětí lze rozdělit do dvou základních skupin: DESTRUKTIVNÍ

NEDESTRUKTIVNÍ

Přesnější rozdělení je shrnuto v následující tabulce. Dále budou rozpracovány tři metody, odvrtávání povrchové vrstvy, rentgenová difrakční analýza a technologie odleptávání povrchových vrstev [23].

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

Obrázek 15: Metody zjišťování zbytkových napětí [23].

### 3.3.1 Odvrtávací metoda

#### Popis

Někdy také nazývá jako metoda otvoru, patří mezi nejpoužívanější metody měření zbytkových napětí. Jedná se o destruktivní metodu. První návrh na měření zbytkových napětí pomocí uvolnění odvrtáním otvoru byl předložen v roce 1934 [11].

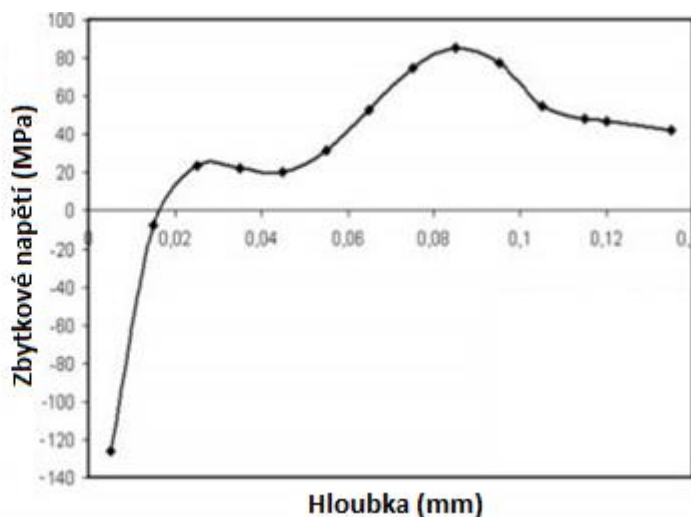
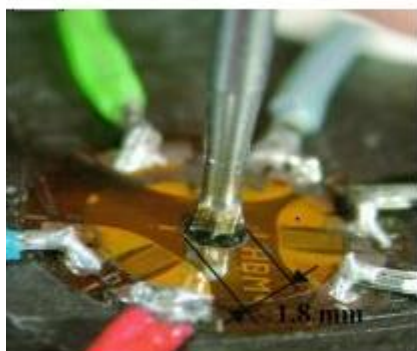
#### Princip

Odvrtávací metoda spočívá ve vyvrtání malého otvoru do povrchu materiálu. Tento otvor způsobí uvolnění zbytkových napětí a s tím spojené deformace v okolí otvoru. Na základě uvolněných deformací, je pomocí kalibračních koeficientů vyhodnoceno původní zbytkové napětí v materiálu.



Otvor se vytvoří čelní vřezovou frézou nebo pomocí alternativních technik (speciální tvary fréz, abrazivní trysky, laserové paprsky, elektrojiskrové odvrtávání). Často se doporučuje využívat vysokorychlostního odvrtávání, které zaručuje menší ovlivnění materiálu. Pro měření se používají tenzometry [11].

Odvrtávací metoda je v základní podobě normována standardem ASTM E 837. Měří se dvouosá napjatost, která je měřena v rovině povrchu materiálu do hloubky od 0,5 do 1,5 mm, přičemž lze vyhodnotit změnu napětí směrem do hloubky. Metodu lze použít na široké spektrum materiálů [12].



Obrázek 16: Vlevo, měření zbytkového napětí pomocí tenzometrické růžice. Vpravo pak výsledná křivka zbytkového napětí [12].

### 3.3.2 Rentgenová difrakční analýza

Jedná se o významnou metodu měření pro zjišťování zbytkových napětí v materiálu. Její uplatnění je nejen v oblasti materiálového výzkumu, ale i v oblasti technické praxe.

#### Základní principy difrakční analýzy

*Dopadá-li na elasticky deformovanou krystalovou mřížku monochromatický rentgenový paprsek tak, že bude splněna Braggova podmínka, pak se změna mezirovinné vzdálenosti projeví změnou Braggova úhlu (14).*

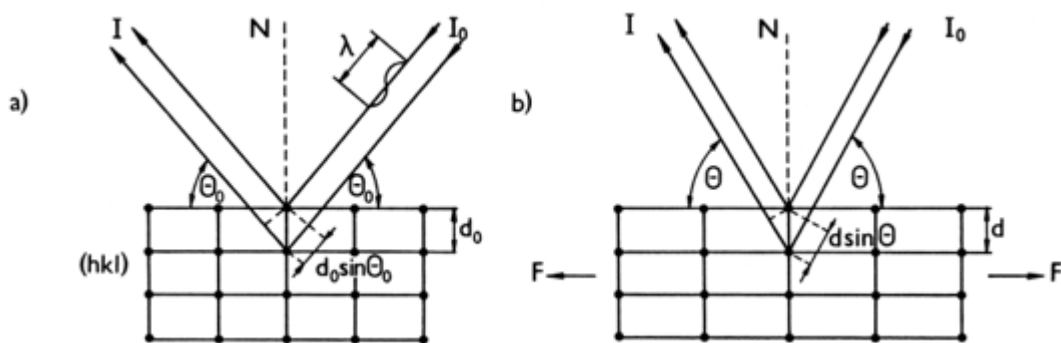
Relativní změna meziatomové vzdálenosti je definována jako [18]:

$$\varepsilon^{mř} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (1.1)$$

Změna meziatomové vzdálenosti se projeví změnou Braggova úhlu  $\theta$  [18]:

$$d_0 \rightarrow d \Rightarrow \theta_0 \rightarrow \theta \quad (1.2)$$





Obrázek 17: Deformace vzdálenosti mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima. a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$  [18].

Zjištěné deformace lze poté přepočítat na napětí pomocí vztahů teorie elasticity.

#### Specifické rysy

- měřit lze pouze krystalické látky, případně krystalické fáze částečně amorfních materiálů.
- při měření v tenké vrstvě na povrchu materiálu je metoda nedestruktivní, při zjišťování napětí ve větších hloubkách se difrakční analýza kombinuje s leptáním.
- Pokud chceme měřit deformaci u jednofázových materiálů, je toto měření omezeno pouze na vhodně orientované krystaly uvnitř objemu, který je ozářen rentgenovým svazkem.
- U vícefázových materiálů, lze stanovit mřížkové deformace na krystalech na každé fázi zvlášť.
- Pomocí rentgenové difrakční analýzy jsme schopni měřit zbytková napětí I. a II. druhu ve vícefázových polykrystalických materiálech [14].

#### Princip měření

Pro měření se používají stacionární a přenosné aparatury se zařízením, které umožňuje fotografickou detekci. Lze použít také mobilní aparaturu. Z fyzikálního hlediska lze říci, že měření spočívá ve stanovení vzdálenosti určitého systému mřížkových rovin, které se nacházejí v různých a různě orientovaných krystalech. Větší počet reflektujících krystalů zaručuje větší přesnost výsledku. Při záznamu difraktovaného záznamu na film získáme spojité Debeyovy-Scherrerovy linie. Výhodou této metody je, že neklade nároky na speciální úpravu povrchu zkoumaného materiálu [14].

#### 3.3.3 Elektrolytické odleptávání povrchových vrstev

Zbytkové napětí v materiálu vzniká důsledkem jeho předchozího zpracování. Při zjišťování zbytkového napětí měřeného vzorku metodou odleptávání povrchových vrstev dochází k jeho nerovnováze. Takto vzniklá nerovnováha se projevuje tím, že se vzorek deformuje (dojde k jeho ohnutí). Velikost deformace vzorku je funkcí zbytkového napětí, které je ve vzorku obsaženo a dále závisí na jeho elastických vlastnostech [19].

Při měření se odleptává určitá vrstva materiálu, která je nezbytná pro vyhodnocení rozložení zbytkového napětí v materiálu. Vyhodnocení je možné provádět s použitím optického mikroskopu, laserovým skenováním, popřípadě profilovým měřením. Mezi hlavní výhody této technologie patří především to, že nedochází k vnášení dodatečných napětí do vzorku [19].

Metoda elektrolytického odleptání povrchové vrstvy byla vyvinutá doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. na ČVUT v Praze, tato metoda umožňuje kontinuální měření deformace. Dále byla metoda vyvíjená doc. Ing. Jindřichem Kafkou, Csc.

*Tabulka 2: Charakteristické znaky metody elektrolytického odleptávání.*

VÝHODY	NEVÝHODY
Do materiálu se nevnaší žádné další napětí	Destruktivní metoda
Napětí se měří kontinuálně (na jedno upnutí)	Vhodná pouze pro vodivé materiály
Rychlá metoda	Měření jednoosé napjatosti
-	Měření pouze makro zbytkových napětí
-	Rozměrové a váhové omezení součásti

### 3.4 Tvrdost

Tvrdost je definována jako odolnost materiálu proti vnikání cizích těles. Princip zkoušení tvrdosti spočívá ve vnikání tělíska do materiálu, přičemž tělísko způsobí v materiálu plastickou deformaci. Poté se vtisk pomocí vhodných metod vyhodnocuje. Výhodami zkoušek tvrdosti je především jejich rychlost a nízké náklady. Metody zkoušení tvrdosti lze rozdělit podle **principu, rychlosti zatěžující síly a velikosti zatěžující síly a účelu měření**. [13], [15].

#### **Rozdělení zkoušek tvrdosti dle principu**

- Vnikací

Do zkoušeného materiálu se vtlačuje předepsanou silou indentor. Zkouška vyhodnocuje tvar a rozměry vzniklého vtisku. Příklady vnikajících zkoušek jsou zkoušky podle **Rockwella, Vickerse a Brinella** [16].

- Vrypové

Patří mezi nejstarší zkoušky měření tvrdosti. Hodnotí rozměry vrypu vytvořeného diamantovým tělesem. Zkoušky by měly vždy probíhat na vyleštěném materiálu. Příkladem vrypové zkoušky je **Martensova zkouška** [16].

- Odrazové

Při těchto zkouškách dopadá z určité výšky závaží definovaného tvaru a hmotnosti na povrch materiálu. Zkouška vyhodnocuje výšku odrazu závaží od zkoušeného materiálu. Příklady takových zkoušek je **Shorleho zkouška** [16].

## Rozdělení zkoušek tvrdosti dle rychlosti zatěžující síly

Tyto zkoušky lze dále rozdělit na statické a dynamické. Mezi zkoušky statické patří většina vnikacích zkoušek. Dynamické zkoušky jsou **odrazové**, popřípadě **Poldi kladívko** [16].

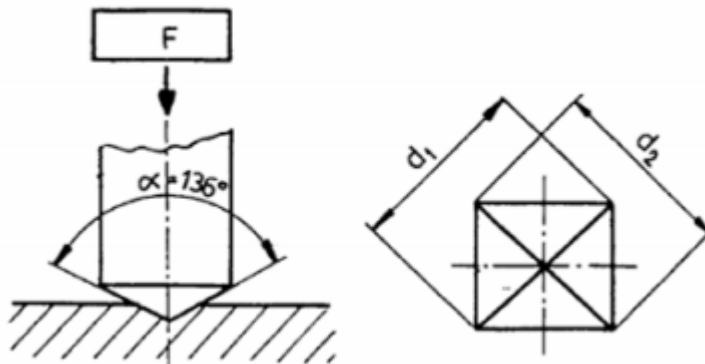
## Rozdělení zkoušek tvrdosti dle velikosti zatěžující síly a účelu měření

Podle velikosti zatěžující síly dělíme zkoušky na zkoušky **makrotvrdosti**, kde je síla větší než 10 N, zkoušky **mikrotvrdosti**, kde je síla od 0,1 N do 10 N a zkoušky **nanotvrdosti** se zatěžující silou menší než 0,1 N. Zkoušky makrotvrdosti hodnotí tvrdost materiálu jako celku. Při zkouškách mikrotvrdosti zjišťujeme tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu. Zkoušky nanotvrdosti se používají například pro zjištění tvrdosti povlaků [15].

K měření mikrotvrdosti se nejčastěji používají zkoušky dle Vickerse, Knoopa a Berkoviče. Pro hodnocení velikosti vtisku je nutné použít mikroskop ať už optický či digitální.

### 3.4.1 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Tato zkouška je vhodná pro měření velmi malých součástí, různých tenkých vrstev a povlaků, svarů a křehkých materiálů. Metoda je v principu podobná s klasickou zkouškou tvrdosti dle Vickerse. Indentorem je Vickersův jehlan vyroben z diamantu, který je upevněn přímo v objektivu metalografického mikroskopu. Vrcholový úhel jehlanu je  $136^\circ$ . Zkouška je blíže charakterizována normou ČSN EN ISO 4516 *Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu* [16], [20].

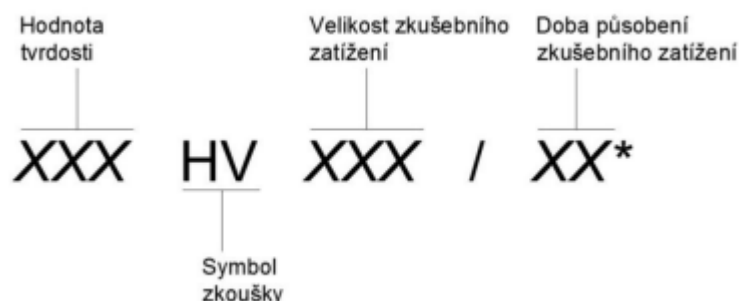


Obrázek 18: Vickersův indentoru pro měření mikrotvrdosti [20].

### Průběh zkoušky

„Zkoušený vzorek nebo vrstva musí mít tloušťku nejméně 1,5 násobku délky úhlopříčky vtisku. Vzdálenost středu vtisku od okraje zkušební vzorku musí být nejméně 2,5 až 3 násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku podle druhu zkoušeného materiálu. Střed dvou sousedních vtisků pro ocel, měď a její slitiny musí být od sebe vzdáleny alespoň o 3 násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku.

*U lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin je to o 6 násobek. Povrch vzorku musí být hladký, rovný, zbavený okují, mazadel a jiných nečistot (20).“ Měřená součástka musí ležet na tuhé podložce, aby nemohlo dojít k průhybu. Celý cyklus zatěžování (od počátku, až po dosažení maximální síly) by měl trvat od 2 do 8 sekund. Důležité je, aby indentor směřoval kolmo na zkoušený díl a rychlost zatěžování nepřekročila 0,2 mm/s [17].*



Obrázek 19: Schéma pro zápis tvrdosti dle Vickerse.

### 3.5 Změny struktury

Struktura lze měnit podle potřeby například žíhacími procesy. Důvodem, proč měníme strukturu, je to, že po obrábění vznikají v materiálu strukturní změny, které lze pomocí žíhání odstranit a tím dosáhnout v materiálu rovnovážného stavu. Mělo by platit, že struktura materiálu před a po obrábění by měla být zachována [13].

### 3.6 Tepelné změny

Jinak řečeno opaly jsou změny struktury, které vznikají v důsledku vysokých teplot při obrábění. Přítomnost opalů se zjišťuje chemicky, metodou odleptávání povrchu. Druhy opalů jsou vysokoteplotní a nízkoteplotní. Vznik opalů není přímo úměrný snižování procesní kapaliny [13].

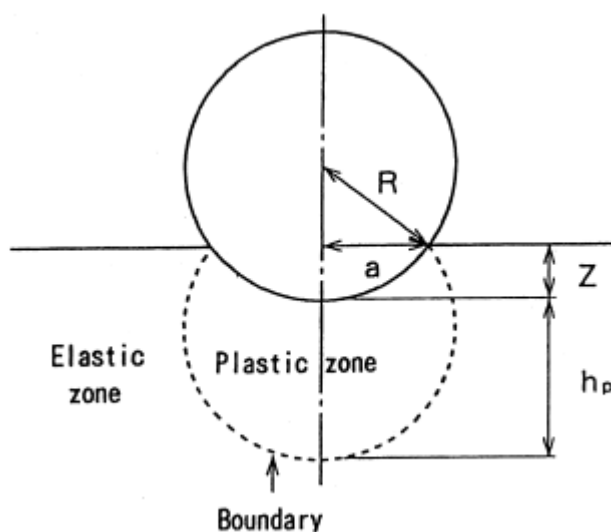
## 4. Mechanismus tvorby zbytkového napětí

Mechanismus vzniku tlakového zbytkového napětí při pevnostním tryskání je způsoben interakcí mezi tryskacím tělískem a tryskaným materiálem. Při tomto ději dochází ke vzniku elastických a plastických deformací. Studie zabývající se touto problematikou ukázaly, že při kontaktu tryskacího tělíska o poloměru  $R$  s tryskaným povrchem vytvoří toto tělísko na povrchu materiálu důlek  $Z$ . Vztah mezi hloubkou plastické zóny  $h_p$  hloubkou vytvořeného důlku  $Z$  je následující.

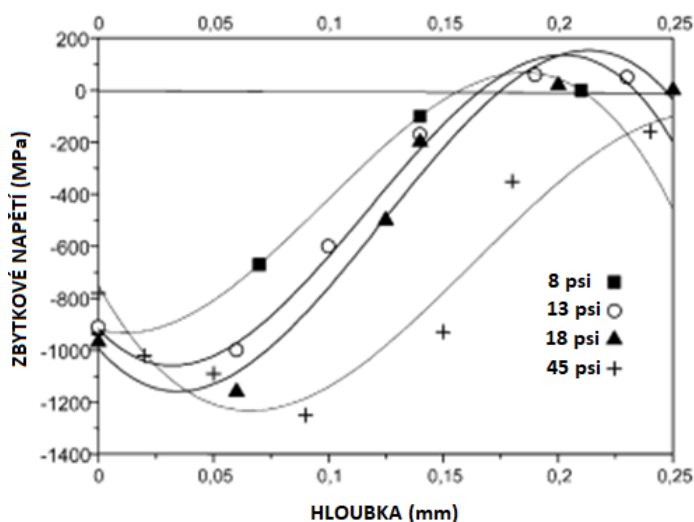
$$\frac{h_p}{R} = k \cdot \sqrt{\frac{Z}{R}}, \text{ kde } k = \text{konst.}$$

Tento model se zabývá pouze jediným výstřelem částice na povrch tryskaného materiálu. Pro modelování tlakového zbytkového napětí existují v podstatě dva způsoby. Jedná se o metodu konečných prvků anebo prostřednictvím empirických modelů založených na experimentálních datech [24] [25].

Na obrázku 21 je možné pozorovat, že se zvyšující se intenzitou tryskání se zvětšuje hloubka a šířka zbytkového tlakového napětí pole. Na druhou stranu zbytkové napětí na povrchu součásti je téměř stejné s výjimkou 45 psi. Tyto výsledky jsou v souladu s tvrzením, že napětí na povrchu je závislé více na mechanických vlastnostech (tvrdost, pružnost), než na intenzitě tryskání [25].



Obrázek 20: Schéma elasticko-plastické hranice [24].



Obrázek 21: [25]

#### 4.1 Vliv vlastností tryskacího média na velikost vytvořeného tlakového napěťového pole

Požadovaného zpevnění povrchu můžeme dosáhnout **velkými částicemi při malé rychlosti média**

**malými částicemi při velké rychlosti média**

Při tryskání dochází vlivem únavy materiálu k postupné destrukci metacích tělísek. Tato tělíška se během procesu neustále zmenšují, až dojde k tomu, že jsou oddělena separátorem. K oddělení dochází z důvodu neefektivnosti těchto tělísek, která je zapříčiněna jejich příliš malou velikostí. Z tohoto důvodu je snaha o co největší podíl „nových“ částic, které zajišťují efektivitu procesu, která vede ke kvalitním výrobkům. Je samozřejmé, že ve stroji není 100 % „nových“ částic. Vždy je stanovena určitá dolní hranice průměru částice. Tyto menší částice ovšem způsobují, že jejich zpevňující efekt není tak velký jako v případě „nové“ částice, protože metací rychlost je přizpůsobena pro větší částice. Tím, že ve stroji je určité procento menších částic dochází k tomu, že se zmenší oblast pokrytí, což má také za následek nižší zpevnění povrchu [26].

Nižší efektivita tryskacího média s menším průměrem spočívá v jeho nižší kinetické energii, protože kinetická energie závisí na hmotnosti a rychlosti tělesa. Větší hmotnost tělesa se pak projeví v nárůstu výsledné kinetické energie. Částice s vyšší kinetickou energií pak způsobuje větší oblast zbytkového napětí.

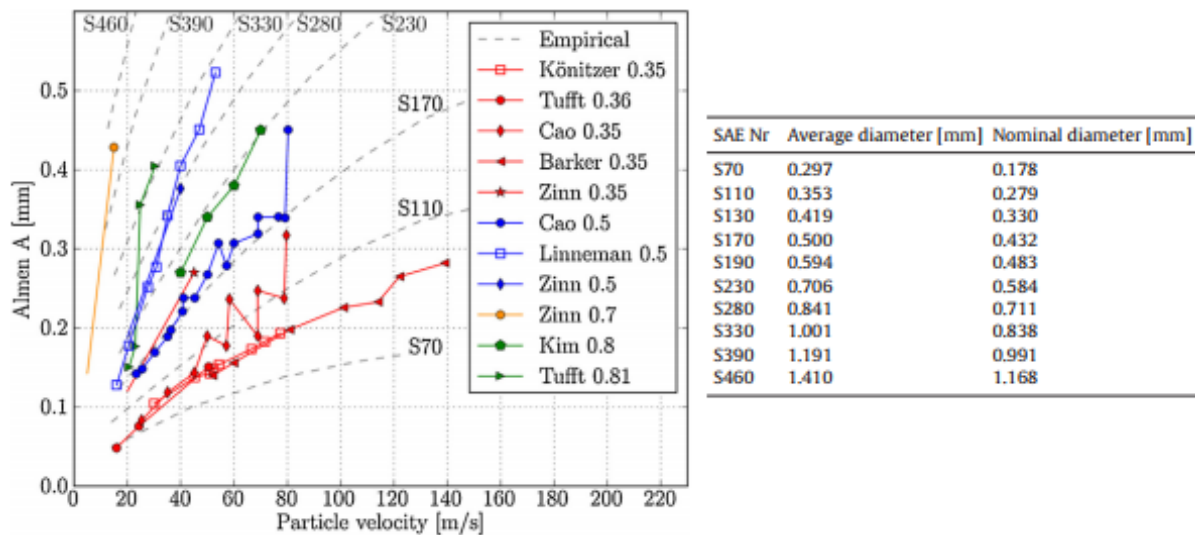
Kinetická energie hmotného bodu o hmotnosti  $m$ , který se pohybuje rychlostí o velikost  $v$  je dána

vztahem [31]:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Každou jednu částici tryskacího média lze charakterizovat krom jejich rozměrů jejími fyzikálními vlastnostmi. Mezi ty základní patří **hmotnost**, **hustota** a **objem** částice. Z toho pramení otázka, jak bude ovlivňovat kinetická energie částice velikost zbytkového napěťového tlakového pole vytvořeného touto částicí.

Z hlediska dosažení co největšího napěťového pole je jedním z možných řešení zvýšení rychlosti metaných částic, čímž se zvětší jejich kinetická energie. Vyšší rychlost však vede k vyššímu opotřebení tryskacího média a samotného stroje. Nedávná studie (2016) ukazuje vztah mezi výsledky Almen testu a rychlostí média. Tyto vztahy byly zjištěny experimentálně. Rychlost částice je zde určena na základě výsledků z Almen testu a průměru tryskacího média [27].



Obrázek 22: Vztah mezi Almen testem a rychlostí média, pro různé velikosti tryskacího média [27].

S vyšší rychlostí metaných částic se zvyšuje velikost plastické deformace (hloubky důlku), kterou tyto částice vytvoří. Mezi objemem, plochou a hloubkou plastické deformace neexistuje jednoznačná závislost. To je způsobeno nelineární plastickou deformací mezi povrchem materiálu a tryskacím médiem [27].

#### 4.2 Vliv zbytkového napětí na únavovou odolnost materiálu

Tlakové napětí v povrchové vrstvě má příznivý vliv na únavové vlastnosti materiálu. Únava materiálu je důležitý parametr, který je třeba vzít v úvahu u součástí, které jsou vystaveny konstantnímu a proměnnému amplitudovému zatížení. U vysokopevnostních ocelí hrají povrchové a podpovrchové vady důležitou roli při snižování únavové pevnosti. Jedním z dobrých způsobů, jak zlepšit únavovou odolnost je pomocí pevnostního tryskání, které vyvolává tlakové napětí v povrchových vrstvách materiálu a tím zabraňuje nukleaci a šíření trhliny [25].

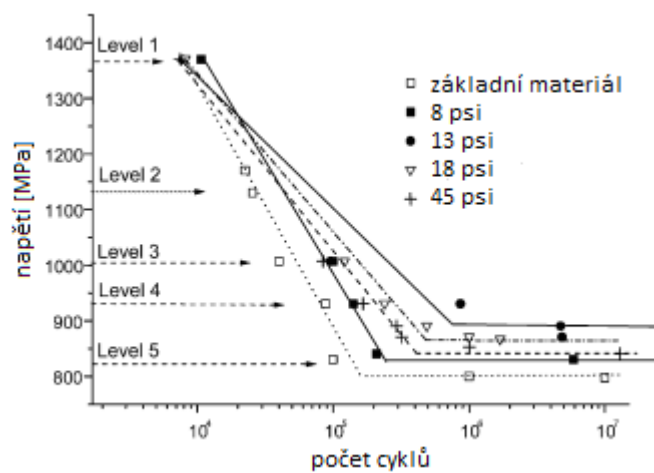
Výsledek pevnostního tryskání závisí na různých parametrech, které se dají seskupit do tří různých tříd.

- Parametry charakterizující povrch tryskané součásti
- Parametry charakterizující energii produkovanou tryskacím médiem
- Parametry popisující kontaktní podmínky mezi povrchem a médiem

Korelace mezi tlakovým napěťovým polem a únavovou životností není zcela jasná. Pro intenzitu 45 psi nižší hodnota napětí na povrchu neodpovídá nižší únavové životnosti. A podobně největší hloubka a šířka napěťového pole neodpovídá největší únavové životnosti, viz obrázek 23 [25].

Obecně dochází k iniciaci únavové trhliny na povrchu materiálu. Studie Wang a kol. však ukázala, že v případě vysokocyklové únavy materiálu může být trhlina iniciována uvnitř materiálu.

V případě vysokocyklové únavy byly nalezeny všechny trhliny uvnitř materiálu. Dále se ukázalo, že díky pevnostnímu tryskání dochází vlivem tlakového napětí k zatlačování iniciačních bodů trhliny pod tlakovou zónu [25].

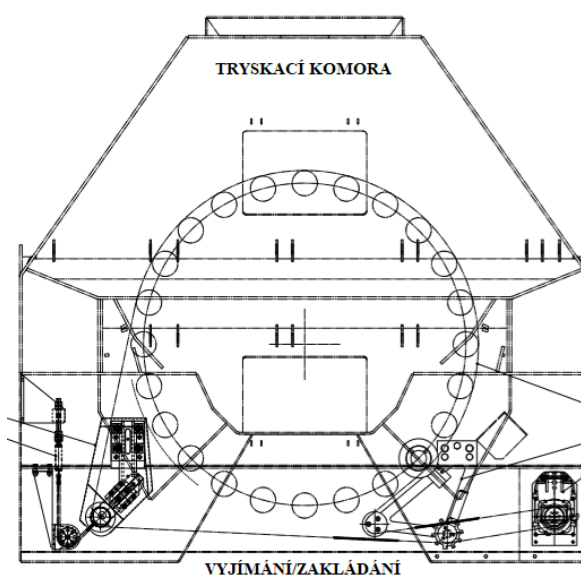


Obrázek 23: Vliv velikost zbytkového tlakového napětí na únavovou pevnost [25].



## 5. Výchozí stav

Ozubená kola převodovky jsou v zakaleném stavu po broušení a honování pevnostně tryskána za účelem vnesení zbytkového tlakového napětí, které působí proti iniciaci únavových trhlin při cyklickém namáhání. Tryskání probíhá na mechanickém tryskači Wheelablator SDT 1300/24. Tryskané díly jsou nasazeny na tryskací trny, které jsou umístěny v prostoru otočného stolu tryskače. V prostoru otočného stolu tryskače se nachází 24 trnů. Trny se pohybují směrem do tryskací komory vlivem rotace stolu, díky tomuto mechanismu je tak možné současně díly tryskat, vyjímat otryskané a zakládat netryskané díly. Tryskací trn má dvě pozice (vrchní a spodní), protože ozubená kola mají různé průměry. Podle typu tryskaného kola je na trn nasazeno tři až pět kusů ozubených kol. Aby bylo zabezpečeno otryskání po celém obvodu, konají trny rotační pohyb.

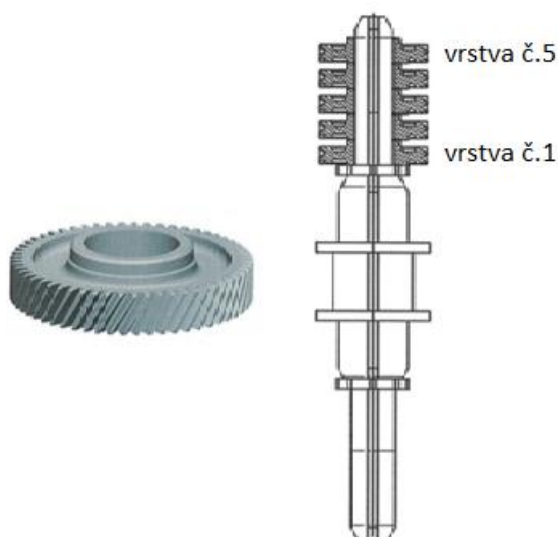


Obrázek 24: Tryskací komora včetně otočného stolu a pozic pro jednotlivé tryskací trny.

Praktická část práce se detailně věnuje optimalizaci tryskání ozubených kol. Skládá se z několika kapitol, přičemž každá pohlíží na optimalizaci z jiného úhlu pohledu.

Mezi hlavní problémy, které vznikají při tryskání ozubených kol patří nehomogenita otryskaných dílů. Jednak v rámci tryskacího trnu, kdy díly umístěné v nižších pozicích vykazují vyšší hodnoty zbytkového napětí, než díly umístěné výše a jednak po svém obvodu. Cílem je navrhnout opatření, která povedou ke snížení této nehomogenity. Touto problematikou se zabývají kapitoly číslo 7 a 8.

Dalšími požadavky, které na mne byly kladeny, bylo navrhnout technologické podmínky, které by splňovaly třídu 3, viz kapitola číslo 9. Zvážit možnosti nepřímého měření zbytkových napětí pomocí měření mikrotvrlosti, viz kapitola číslo 10 a nakonec porovnat dva typy tryskacích médií, viz kapitola číslo 11.



Obrázek 25: Tryskací trn s ozubenými koly.

Na začátku směny provádí každý pracovník **Almen test**, aby se přesvědčil, že je stroj správně nastaven. Při zanedbání tohoto kroku by mohly vznikat nevědomky zmetkové kusy. Pro zajištění kvality tryskacího média se provádí **sítová analýza**.

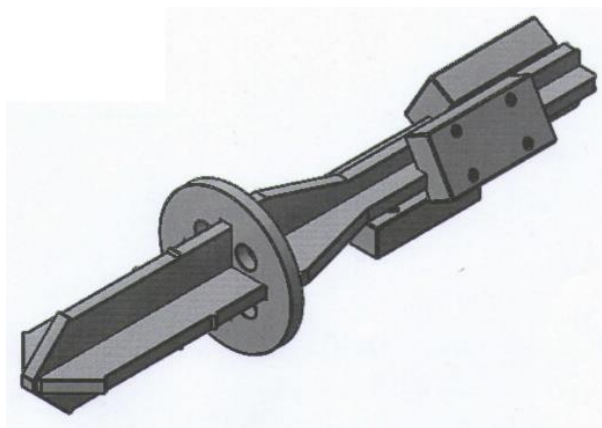
Otryskané díly jsou na začátku každé směny měřeny na **rentgenovém difraktometru**, který zjišťuje hodnoty zbytkového napětí v jednotlivých vrstvách zubu. Tyto hodnoty jsou rozděleny do tří tříd, přičemž každá třída má předepsány minimální hodnoty tohoto napětí ve třech hloubkách.

Tabulka 3: Minimální hodnoty zbytkového napětí v jednotlivých hloubkách dle normy VW 50019. Žlutě zvýrazněné hodnoty jsou požadovány za minimální.

Třída	Místo měření	Povrch	20 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
	Tolerance	(1–5) $\mu\text{m}$	(10–30) $\mu\text{m}$	(50–60) $\mu\text{m}$
2	Minimální hodnoty zbytkového napětí [MPa]	$\geq 600$	$\geq 800$	$\geq 600$
3		$\geq 800$	$\geq 1000$	$\geq 800$
4		$\geq 900$	$\geq 1100$	$\geq 1100$

## 5.1 Almen test

Almen test se provádí před začátkem tryskání sériových dílů, jako zkouška, zdali je stroj správně nastaven. Tato metoda měří intenzitu energie metaného abraziva.



Obrázek 26: Zkušební trn pro metodu Almen.

V našem případě je zkušební pásek fixován na speciálním trnu, který je určen pouze pro tento test. Vyhodnocení probíhá v horní, střední a dolní části. Minimální přípustná hodnota je 0,260 mm.

Během tryskání je zkušební pásek zpevňován pod intenzitou metaných částic a dochází k deformaci, která má podobu prohnutí pásku, směrem od podložky. Toto prohnutí je přímo úměrné intenzitě metaného abraziva. Pro vyhodnocení Almen testu se používá speciální měřící sady, která měří deformaci v různých částech zkušebního pásku [26].

Pro dané médium je výsledek Almen testu závislý na rychlosti média, úhlu nárazu, tvrdosti média, nebo vlastnostech almen pásku [26].

Účelem Almen testu je kontrola intenzity metaných částic před začátkem sériové výroby a také kontrola nastavených parametrů stroje.

#### Postup měření

1. Kalibrace měřidla pomocí etalonu.
2. Přiložení zkušebního pásku a zjištění jeho počáteční deformace.
3. Upnutí zkušebního pásku do držáku.
4. Vložení zkušební aparatury do tryskače a tryskání.
5. Vyjmutí zkušební aparatury z tryskače.
6. Měření zkušebního pásku.

#### 5.2 Síťová analýza

Síťová analýza se provádí z důvodu kontroly kvality tryskacího média. Provádí se jednou za dva dny odběrem 100 g abraziva z mísiče. Odebrané tryskací médium je prosíváno přes soustavu čtyř sít. Množství v jednotlivých sítích je zváženo a přepočteno na procenta. Podíl velikosti jednotlivých zrn ve směsi je kontrolován ze dvou hlavních důvodů.

Zrn s velikostí větší než **0,500 mm** by mělo být mezi (60–80) %, pokud je procentuální podíl větší dochází k nadměrnému opotřebení komponent stroje a mírnému zvýšení drsnosti povrchu.

Podíl zrn s velikostí menší než **0,300 mm** musí být bezpodmínečně hlídán, protože do této skupiny patří i prach, který se stává za vysokých teplot, kterých je v tryskací komoře dosahováno výbušným.

Síťová analýza je prováděna pracovníky údržby stroje. Její výsledky nebudou součástí této práce.

Tabulka 4: Tabulka shrnující podíly jednotlivých velikostí zrn.

Průměr zrna [mm]	Předpis [%]
> 0,500	60–80
> 0,425	> 10
> 0,300	> 10
< 0,300	< 5

### 5.3 Stroj

Tryskač má dvě tryskací komory, v jedné komoře jsou tryskána ozubená kola a ve druhé hřídele. V této práci se budu pro zachování objektivitu výsledků věnovat pouze tryskání ozubených kol.

Stroj disponuje otočným stolem s celkem 24 pozicemi, viz obrázek 24. Během tryskání dochází k otáčení stolu v předem nastaveném taktu. Tryskána je vždy pouze jedna pozice, na kterou je namířen proud tryskacího média. Tryskané dílce jsou při otevřených dveřích ručně umístěny na tryskací trny, které při tryskání konají rotační pohyb. Po tryskání jsou díly vyjmuty z prostoru troje a uloženy v koších.

Turbíny tryskače pracují nepřetržitě a přívod média je zajišťován elektromagnetickým dávkovacím zařízením. Uspořádání turbín je vodorovné.

Filtrační zařízení, které funguje na principu vzduchového třídění, slouží k oddělení prachu a opotřebených tryskacích částic.

Tabulka 5: Základní charakteristika tryskacího zřízení.

Maximální tryskaná výška	<b>120 mm</b>
Množství média v zásobníku	<b>cca 5000 kg</b>
Počet tryskacích jednotek (turbín)	<b>2 kusy</b>
Počet lopatek/turbína	<b>8 kusů/turbína</b>
Výkon turbíny	<b>22 kW</b>
Maximální otáčky turbíny	<b>2800 ot/min</b>
Urychlení média	<b>mechanické</b>

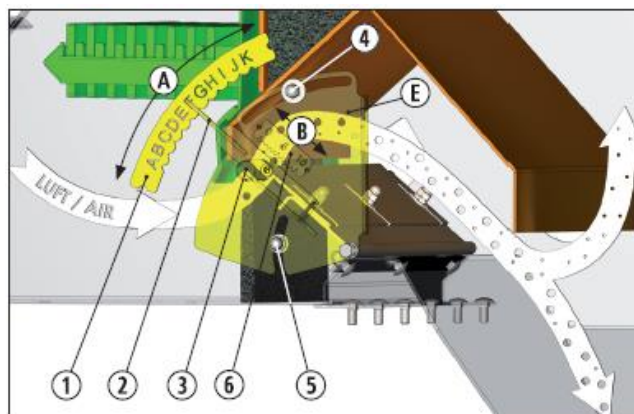
#### Oběh média

Tryskací médium opouští tryskací komoru spolu s nečistotami a padá do sběrného trychtýře, nacházejícího se pod tryskací komorou. Následně prochází skupinou sít k šnekovému dopravníku. S pomocí několika šnekových dopravníků se směs dopravuje až k patě korečkového elevátoru, který směs dopraví do místa čištění abraziva. Množství abraziva přiváděné k turbínám je možno plynule regulovat pomocí elektromagnetického ventilu.

## Recyklace použitého média

Tryskací médium musí tvořit rovnoměrnou clonu pod výkyvným ventilem. Odsávací štěrbinou s regulovatelným množstvím vzduchu se nastaví odsávané množství opotřebeného abraziva a prachu.

Množství vzduchu je regulováno **vzduchovou klapkou**. Pro odsátí malých částic se nastaví odsávací štěrbina velká, tím se sníží rychlost vzduchu a budou odsávány především částice malého průměru, eventuálně prachové částice. Oddělování nečistot probíhá nepřetržitě. Jemný prach se dostává k filtru, hrubý prach propadává do vyhrazené nádoby. Vyčištěné tryskací médium padá zásobního síla.



Obrázek 27: Vzduchová klapka.

## Životnost dílů tryskače

Jednotlivé díly tryskacího zařízení podléhají v důsledku provozních podmínek opotřebení. Obzvláště namáhány jsou díly turbín, jelikož přicházejí do přímého styku s tryskacím médiem.

Opotřebení těchto dílů je závislé na řadě faktorů, například **typ abraziva** (velikost, tvar, tvrdost atd..), **otáčky turbíny**, **výstupní rychlost abraziva**, **stupeň čištění abraziva**, **průtok abraziva**.

Například při použití 100 % ostrohranného tryskacího média se životnost metacích lopatek snižuje přibližně o 100 provozních hodin. To je jedním z důvodů, proč je předepsán maximální procentuální podíl 100 % ostrohranného média (nového) na 80 %.

### 5.4 Charakteristika tryskacího média

Tryskacím médiem je zaoblený (arondovaný) ocelový sekací drát (třída G3) o průměru 0,6 mm s tvrdostí 56 HRC, teplotou tání 1535 °C a hustotou 7,0 g/cm<sup>3</sup> [28].

Tabulka 6: Chemické složení tryskacího materiálu [28].

C [%]	0,73-0,78
Mn [%]	0,50-0,80
Si [%]	0,10-0,30
P [%]	max. 0,035
S [%]	max. 0,035
Fe	zbytek



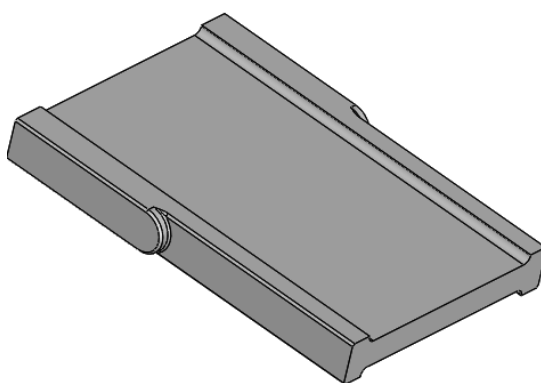
Obrázek 28: Arondovaný ocelový sekací drát, třída G3 [28].

## 5.5 Metací lopatky

Lopatky jsou vyrobeny z ocele **1.2379** (ČSN 19 573). Jedná se o nástrojovou ocel pro práci za studena. Chrom-molybden-vanadová, vysocelegovaná ledeburitická ocel, ke kalení v oleji a na vzduchu, s velkou prokalitelností. Vyznačuje se velkou odolností proti opotřebení a tlakovému namáhání. Tvrdost lopatek po tepelném zpracování je 60–62 HRC [35].

Tabulka 7: Chemické složení oceli 1.2379, dle ČSN 41 9573 [35].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	W [%]
1,40	0,20	0,20	11,00	0,60	x	0,80	x
1,60	0,45	0,45	12,50	0,95		1,20	



Obrázek 29: 3D model současné metací lopatky.

## 5.6 Tryskaná součást

Tryskanými díly jsou ozubená kola a hřídele převodovky DQ200. V této práci se budu detailněji zabývat pouze ozubeným kolem 7. rychlostního stupně. Před pevnostním tryskáním prošel díl postupně operacemi soustružení, frézování, chemicko-tepelným zpracováním, honováním a broušením ozubení. Po tryskání následuje poslední operace, a to broušení kužele. Obrobky jsou do firmy Škoda auto dodávány ve formě výkvočů, které jsou vyrobeny z materiálu TL4227 (označení dle normy VW\_TL4227). Ekvivalentem je ocel 16MnCr5 (ČSN 14 220) [29], [37].



Obrázek 30: Ozubené kolo 7. převodového stupně.

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti materiálu 16MnCr5 před chemicko-tepelným zpracováním [30].

Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tvrdost dle Brinella [HB]	Třída odpadu
min. 785	590	min. 239	021

## Charakteristika materiálu 16MnCr5

„Chrom-manganová ocel vhodná k cementování, kyanování a objemovému tváření. Dobře tvárná za tepla a po žihání i za studena. Dobrá obrobiteľnosť a svařitelnost. Strojní součásti s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a velkou pevností v jádře po kalení. Použití na menší hřídele, ozubená kola, šneky, vačkové hřídele, včetně obráběcích strojů, písní čepy, pera, zubové spojky, trny, upínací nářadí apod. (5)“.

Tabulka 9: Chemické složení materiálu TL4227 ve srovnání s jeho ekvivalentem 16MnCr5 [30], [37].

materiál	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	P <sub>max</sub> [%]	S <sub>max</sub> [%]
<b>16MnCr5</b>	0,14-0,19	1,10-1,40	0,17-0,37	0,80-1,10	0,035	0,035
<b>TL4227</b>	0,14-0,22	1,00-1,50	≥0,12	0,80-1,30	≤0,035	0,020-0,035

## Chemicko-tepelné zpracování

Díly jsou před pevnostním tryskáním chemicko-tepelně zpracovány technologií vakuového nauhličení a kalení v přetlaku plynu (18bar) – hélia. Díky tomu vzniknou díly s vysokou povrchovou tvrdostí a pružným jádrem. Hloubka cementace je 0,5-0,8 mm. Podíl uhlíku v povrchové vrstvě vzroste na 0,8-1 %. Po chemicko-tepelném zpracování je tvrdost v jádře asi 400 HV. Tvrdost povrchové vrstvy je pak 680-800 HV.

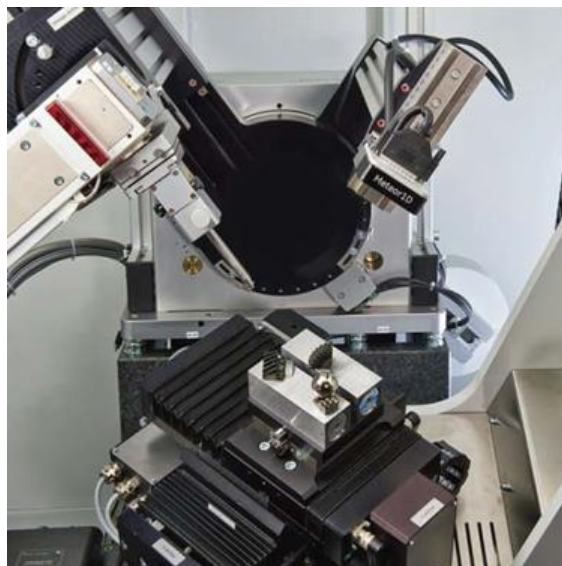
Díly jsou ohřáty na 960 °C, při této teplotě probíhá nauhličení. Následně jsou díly prudce ochlazeny na 30 °C. Struktura materiálu před kalením je ferit-perlit. Po kalení se v jádře vyskytuje houževnatější bainitická struktura, která přechází ve strukturu martenzitickou, která se vyskytuje na povrchu.

### 5.7 Rentgenový difraktometr

Díly po tryskání jsou měřeny za pomoci rentgenového difraktometru **SEIFERT CHARON XRD XL**. Rentgenový difraktometr obsahuje měřicí stanoviště a stanoviště pro přípravu vzorků.

- Měřicí stanoviště obsahuje ochrannou kabinu, rentgenový zdroj, rentgenový detektor, manipulátor se vzorky, rentgenový generátor, čerpadlo chladící vody ke chlazení rentgenového zdroje a PC se 2 monitory k řízení měření a vyhodnocování.
- Přípravna vzorků obsahuje manipulátor se vzorky s měřícím snímačem a kamerou a počítač včetně řízení os.

Manipulátor vzorků je motorem poháněné polohovací zařízení s translačními osami  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a s rotačními osami  $X$  (Chí) a  $\Psi$  (Psi). Kontrolovaný vzorek lze položit přímo na desku manipulátoru, nebo do držáku vzorků. Pomocí translačních os manipulátoru je požadované měřené místo na vzorku polohováno pomocí kamery. Osa **Chi** slouží k nastavení požadovaného sklonu povrchu vzorku. Pomocí osy **Psi** je vzorek otáčen. Na vzorek míří během měření kolimovaný rentgenový paprsek z rentgenové trubice.



Obrázek 31: Rentgenový difraktometr SEIFERT CHARON XRD XL.

Rentgenový paprsek je možné vychýlit pomocí osy  $\Omega$  (omega). Detektor snímá difraktogram, tzn. intenzitu jako funkci úhlu  $2\theta$ . Tyto difraktogramy mohou být vyhodnocovány pomocí analytických funkcí.

## 6. Postup přípravy a měření vzorku

### 6.1 Popis vzorků

Jednotlivá ozubená kola jsou popsána z důvodu lepší orientace mezi vzorky.



Obrázek 32: Označené ozubené kolo.



## 6.2 Oddělení jednotlivých segmentů

Jednotlivé segmenty z ozubeného kola jsou oddělovány s využitím kotoučové pily.



Obrázek 34: Kotoučová pila Discotom-60.



Obrázek 33: Oddělené segmenty.

## 6.3 Dělení segmentů na vzorky

Z jednotlivých segmentů jsou dále tvořeny vzorky. Tyto vzorky se skládají z dvojice spojených zubů, které jsou následně leptány.

Dělení probíhá ve svěráku za pomoci kladiva. Boky vzorků jsou po oddělení od segmentů zabroušeny na kotoučové brusce. Broušení se provádí z důvodu lepšího upnutí do svěráku při leptání. Pokud by došlo v průběhu leptání k sebemenšímu pohybu vzorku ve svěráku, nebyly bychom již schopni určit přesnou hloubku odleptané vrstvy.



Obrázek 35: Vzorky po dělení a zabroušení.

#### 6.4 Ohraničení leptané plochy

V tomto kroku je nezbytné ohraničit část plochy, která bude odleptána. Velikost této plochy by měla být přibližně 3x3 mm. Ohraničení plochy se provádí pomocí krycího laku, který se na vzorek nanáší za pomoci štětce.



Obrázek 36: Lakem ošetřené vzorky.

#### 6.5 Seřízení měřicí aparatury

K měření se používá digitální úchylkoměr. Vzorek se upne do svěráku. Podle polohy vzorku se měřidlo vynuluje. Během odleptávání se pomocí takto seřízené měřicí aparatury sleduje hloubka odleptané vrstvy.

Po dosažení požadované hloubky je nutné vyznačit místo, ve kterém byl vzorek měřen. Podle této značky se následně seřizuje rentgenový difraktometr.



Obrázek 37: Měřicí aparatura.

#### 6.6 Leptání

Na leptacím přístroji se nastaví požadovaný čas leptání. Odleptaná hloubka je pak funkcí teploty elektrolytu a jeho koncentrace. Mezi jednotlivými fázemi leptání je vzorek přeměřován, aby byla zjištěna aktuální hloubka odleptané vrstvy.

Leptání probíhá tak, že je uchopen svěrák se vzorkem. Svěrák je položen na leptací přístroj, a to tak aby byl vzorek v místě proudění elektrolytu. Na přístroji se nastaví požadovaný čas leptání. Po uplynutí času je svěrák se vzorkem vyjmut z leptacího přístroje a vzorek následně přeměřen. Pokud je odleptaná hloubka malá, následuje další „doleptání“ na námi požadovanou hloubku.

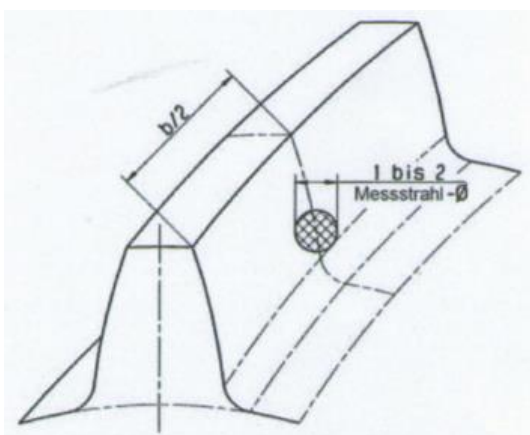


Obrázek 38: Leptací přístroj od firmy Struers.

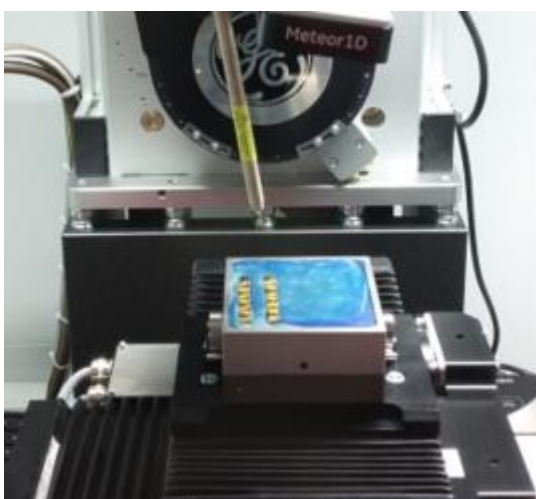
## 6.7 Měření zbytkového napětí

Vzorky jsou měřeny pomocí rentgenového difraktometru. Před měřením jsou vzorky vmáčknuty do speciální plastické hmoty, aby nedocházelo k jejich pohybu během měření, který by byl nežádoucí. S takto fixovanými vzorky následuje nastavení stroje. Pozice, ve které má stroj měřit se nastavuje podle značky, která odpovídá místu měření odleptané vrstvy. Správná poloha značky je klíčová při nastavení stroje, protože plocha, ve které stroj měří je pouze 1 mm<sup>2</sup>. Nastavení se provádí mimo prostor stroje na přípravném pracovišti, kde je za pomoci softwaru stroj naprogramován.

Vyhodnocení naměřených hodnot zbytkového napětí bude probíhat dle interní normy VW 50019, která udává minimální hodnoty zbytkového napětí pro danou hloubku a danou třídu (viz tabulka 3 pro kapitoly 7.1, 7.3, 8.1, 8.2). V kapitolách 9.1 – 9.3 bude vyhodnocení probíhat dle stejné normy s tím rozdílem, že budou použity specifikace z tabulky 23.



Obrázek 39: Místo měření zbytkového napětí, dle normy VW.



Obrázek 40: Zjišťování zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce.

## 7. Analýza stability zbytkového napětí v závislosti na pozici ozubeného kola na tryskacím trnu

Tato kapitola věnuje pozornost zjištění příčin nerovnoměrně otryskaných dílů v rámci jednoho tryskacího trnu. To znamená, že jsou zkoumány rozdílné hodnoty zbytkového napětí u dílů ve spodní části tryskacího trnu a u dílu v horní části tryskacího trnu.

Při tryskání ozubených kol v sériové výrobě bylo zjištěno, že kola, která jsou umístěna v horní části tryskacího trnu, mají rozdílné hodnoty zbytkového napětí v porovnání s koly v dolní části tryskacího trnu. Přesněji mají kola, která jsou tryskána v 1. vrstvě (dole) vyšší hodnoty zbytkového napětí než kola, ve vrstvě číslo 5 (nahore). K tomuto jevu dochází především v hloubce 50-60  $\mu\text{m}$  pod povrchem. V případě hloubek 1-5  $\mu\text{m}$  a 10-30  $\mu\text{m}$  jsou tyto rozdíly zanedbatelné.

### 7.1 Analýza stability zbytkového napětí při použití standartních metacích lopatek

#### *Postup měření a příprava experimentu*

Na tryskací trn bylo nasazeno pět kusů ozubených kol. Tato kola byla tryskána a po otryskání následovalo měření jedno kola z horní vrstvy (vrstva č. 5) a jedno kola z dolní vrstvy (vrstva č. 1). Měření probíhalo ve třech hloubkách 1-5  $\mu\text{m}$ , 10-30  $\mu\text{m}$  a 50-60  $\mu\text{m}$  a vyhodnocení probíhalo dle normy VW 50019 viz tabulka 3.

*Tabulka 10: Technologické parametry stroje.*

otáčky turbíny [ot/min]	<b>1900</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>8</b>

Výsledky měření

Tabulka 11: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 2 (viz tabulka 3)

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]	ozubené kolo v 1. vrstvě		ozubené kolo v 5. vrstvě	
hloubka	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.1	vzorek č.2
(1–5) $\mu\text{m}$	844	850	927	932
(10–30) $\mu\text{m}$	1178	1124	1156	1114
(50–60) $\mu\text{m}$	1042	962	850	781

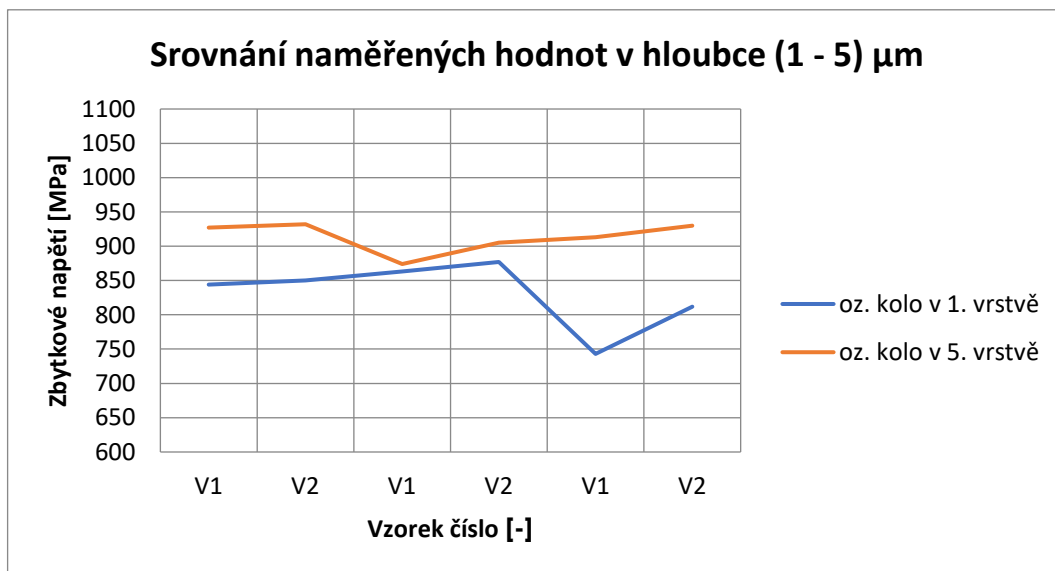
  

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]	ozubené kolo v 1. vrstvě		ozubené kolo v 5. vrstvě	
hloubka	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.1	vzorek č.2
(1–5) $\mu\text{m}$	863	877	874	905
(10–30) $\mu\text{m}$	1207	1205	1197	1093
(50–60) $\mu\text{m}$	994	1045	749	623

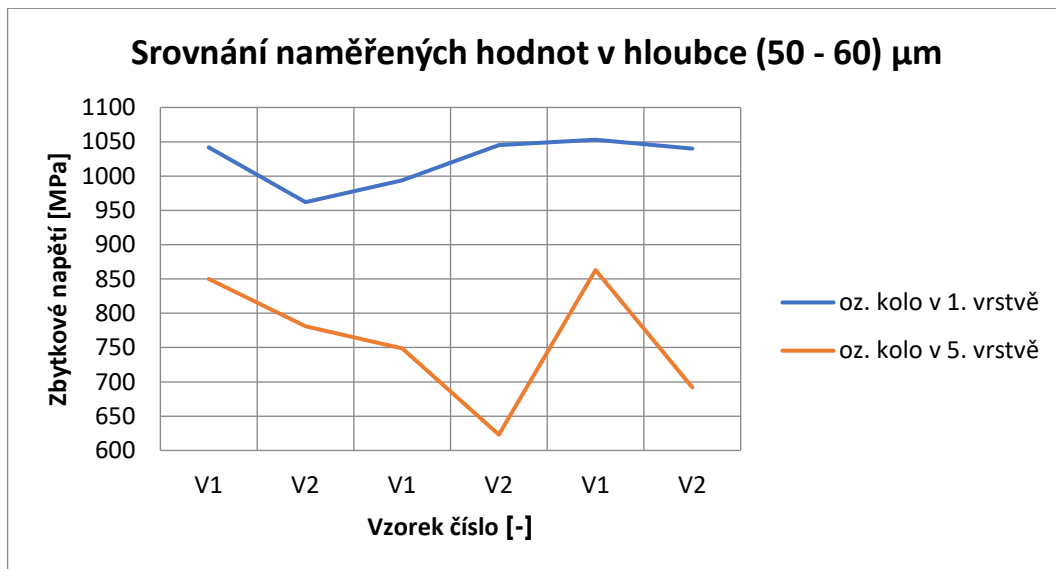
  

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]	ozubené kolo v 1. vrstvě		ozubené kolo v 5. vrstvě	
hloubka	vzorek č.1	vzorek č.2	vzorek č.1	vzorek č.2
(1–5) $\mu\text{m}$	743	812	913	930
(10–30) $\mu\text{m}$	1153	1215	1189	1174
(50–60) $\mu\text{m}$	1053	1040	863	692

Analýza naměřených hodnot



Obrázek 41: Zbytkové napětí v hloubce 1-5  $\mu\text{m}$  pro díly v 1. a 5. vrstvě. V1 (vzorek č.1), V2 (vzorek č.2).



Obrázek 42: Zbytkové napětí v hloubce 50-60  $\mu\text{m}$  pro díly v 1. a 5. vrstvě. V1 (vzorek č.1), V2 (vzorek č.2).

### Závěr

V grafech výše jsou porovnány průměrné hodnoty zbytkového napětí v hloubce 1-5  $\mu\text{m}$  a 50-60  $\mu\text{m}$ . Z grafů vyplývá, že hodnoty zbytkového napětí se liší podle toho, zdali je tryskaný díl v první vrstvě (dole) anebo v páté vrstvě (nahore). Tyto hodnoty se nejvíce liší v měřené hloubce 50–60  $\mu\text{m}$ . Jak ukazuje tabulka níže, rozpětí hodnot v této hloubce je více než 3krát větší, než v případě měření v hloubce 1–5  $\mu\text{m}$  a v případě hloubky 10-30  $\mu\text{m}$  je rozpětí těchto hodnot větší téměř 10krát.

Tabulka 12: Porovnání průměrných hodnot zbytkového napětí v závislosti na pozici dílu na tryskacím trnu.

průměrná hodnota zbytkového napětí [MPa]			
hloubka	1. vrstva	5. vrstva	Variační rozpětí R
(1-5) $\mu\text{m}$	832	914	82
(10-30) $\mu\text{m}$	1180	1154	27
(50-60) $\mu\text{m}$	1023	760	263

Tato zjištěná skutečnost může být způsobena tím, že ozubené kolo v 5. vrstvě je až příliš vysoko, než aby mohlo být dostatečně zpevněno. Při tryskání působí na jednotlivá zrna abraziva gravitační síla, působící směrem dolů. Tím může být způsobeno, že kola na nejvyšší pozici nejsou dostatečně zpevněna a kola na nejnižší pozici ano.

Dalším faktorem pro tuto diferenci může být nevhodná geometrie metacích lopatek, která neumožňuje dostatečné pokrytí u dílů, které se vyskytují ve vyšších vrstvách na tryskacím trnu.

Toto velké rozpětí hodnot vede v konečném důsledku u tomu, že je obtížné stanovit jednotné podmínky tryskání.

V současnosti se při nastavování podmínek tryskání počítá vždy s tímto nemalým rozpětím hodnot v největší měřené hloubce, a proto se nastavují otáčky tryskače vždy o něco větší, než by museli být. Větší otáčky vedou k většímu opotřebení metacích lopatek a dalších částí stroje.

### Návrh řešení

V reakci na zjištěné skutečnosti byla navržena následující opatření.

#### 1. Snížení počtu kol na trnu.

Pokud by byl snížen počet dílů na tryskacím trnu, tak vzhledem k naměřeným výsledkům by bylo dosaženo menšího rozpětí hodnot zbytkového napětí mezi dílem v nejnižší a nejvyšší vrstvě. Toto řešení ale nebylo v praxi testováno, jelikož vzhledem k velikosti výroby není efektivním řešením snížit počet kol na trnu.

#### 2. Použití lopatek s výhodnější geometrií

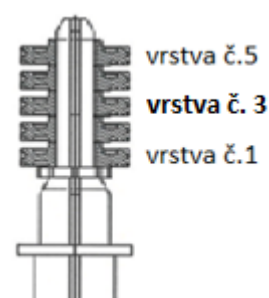
Toto řešení je podrobena výzkumu v kapitole 7.3.

## 7.2 Zjišťování stupně pokrytí

V předchozím experimentu bylo pomocí měření zbytkového napětí zjištěno, že ozubené kolo v 5. vrstvě dosahuje menšího zbytkového napětí, než ozubené kolo v 1. vrstvě, a to především v hloubce 50-60  $\mu\text{m}$ . Cílem experimentu 1.2 je ověřit toto tvrzení pomocí optické metody. Předmětem této kapitoly bylo zjistit stupeň pokrytí na základě barevné indikace, kterou poskytlá povrchová úprava každého tryskaného dílu.

### *Postup měření a příprava experimentu*

Před tryskáním byly připraveny tři sady ozubených kol, přičemž každá sada měla jinou povrchovou úpravu. Takto upravené díly se na tryskacím trnu nacházely na pozicích 1, 3 a 5. Díly ve vrstvě 2 a 4 byly standardní díly z výroby, které nebyly dále nijak vyhodnocovány. Tryskání probíhalo za podmínek jako při běžném provozu s jediným rozdílem, a sice že byla proměnná doba tryskání (5, 10 a 15 sekund). Pro každý čas byly tryskány vždy 3 sady ozubených kol. Tzn., že pro jeden čas bylo tryskáno 9 kusů kol, přičemž vždy 3 kola měla stejnou povrchovou úpravu.



Obrázek 43: Pozice dílů na tryskacím trnu.



Vyhodnocení experimentu probíhalo nejprve vizuálně, poté za pomoci digitálního mikroskopu od firmy Keyence. V závěru byl hodnocen stupeň pokrytí. Pozornost byla zaměřena především na rozdílný stupeň pokrytí mezi díly v 1. a 5. vrstvě.

Původním plánem experimentu bylo opatřit každé kolo akrylovou barvou. Tento postup jsem bohužel nemohl aplikovat, protože do tryskače by se údajně neměly dostat žádné nekovové částice, proto jsem musel zvolit alternativní řešení.

Typy zvolených povrchových úprav: **1. mechanické otryskání ozubeného kola**  
**2. ohřev za účelem dosažení oxidické vrstvy na povrchu**  
**3. chemická koroze v HCL (kyselina chlorovodíková)**

ad 1)

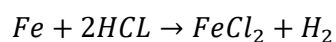
Každé ozubené kolo bylo otryskáno, tím bylo dosaženo matné struktury a zdrsnění povrchu. Použitým abrazivem byla ocelová drť.

ad 2)

Díly byly zahřáty v peci na teplotu 350 °C, výdrž na teplotě byla dvě hodiny. Tímto postupem bylo dosaženo matně černého povrchu. Během zahřívání oceli na vysoké teploty dochází k barevným změnám na povrchu. Tyto změny jsou způsobeny formováním tenké oxidické vrstvy na povrchu. Takto zoxidovaný povrch bývá matný, bez lesklé kovové struktury.

ad.3

Koroze železa s kyselinou chlorovodíkovou probíhá dle následující rovnice.



Obrázek 44: Tři sady ozubených kol pro experiment 1.2. Zleva: tryskané, tepelně ovlivněné a chemicky ovlivněné díly.



Tabulka 13: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	<b>1700</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>5, 10, 15</b>

#### Výsledky měření



Obrázek 45: Díly v 5. vrstvě. Čas tryskání 5, 10, 15 sekund (zleva). Zvětšeno 100x.



Obrázek 46: Díly ve 3. vrstvě. Čas tryskání 5, 10, 15 sekund (zleva). Zvětšeno 100x.



Obrázek 47: Díly ve 1. vrstvě. Čas tryskání 5, 10, 15 sekund (zleva). Zvětšeno 100x.

#### Analýza naměřených hodnot

Vyhodnocení probíhalo nejdříve vizuálně, poté s použitím digitálního mikroskopu Keyence VHX 6000. Při vizuálním vyhodnocení nebyly nalezeny žádné stopy po povrchové vrstvě, která byla vytvořena reakcí oceli s kyselinou chlorovodíkovou. Vyhodnocení s použitím mikroskopu spočívalo v přiblížení otryskaného povrchu (100x). Při tomto přiblížení lze pozorovat na povrchu součásti znatelné rozdíly textury povrchu, která byla způsobena tryskáním.



Obrázek 48: Digitální mikroskop Keyence VHX 6000.

### Závěr

Snímky pořízené digitálním mikroskopem umožňují detailní pohled na texturu povrchu po tryskání. Výsledky experimentu se ztotožňují s výsledky, které byly zjištěny v předchozí kapitole 7.1, kde bylo pomocí výsledků z rentgenového difraktometru zjištěno rozdílné zbytkové napětí u dílů v 1. a 5. vrstvě. U dílů na všech třech pozicích (1,3,5) došlo prodloužením času tryskání k úbytku povrchové rzi. Tento úbytek byl nejzřetelnější při porovnání dílu tryskaného 5 sekund a dílu tryskaného 15 sekund. Úbytek povrchové rzi se zmenšuje také směrem k nižší poloze na tryskacím trnu, tzn. od 5. vrstvy k 1. vrstvě. To je nejzřetelnější při porovnání dílů, které byly tryskány při čase 5 sekund.

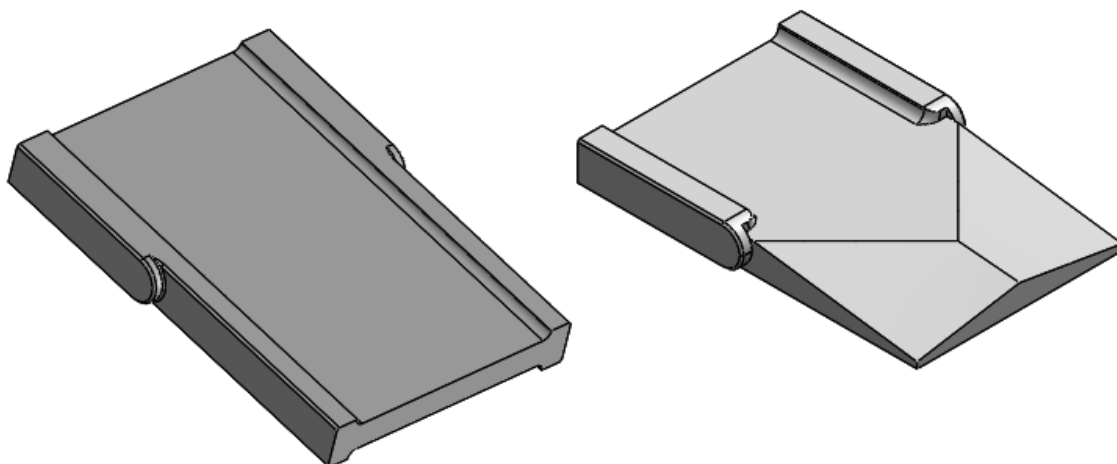
Kromě úbytku povrchové rzi lze sledovat povrch z hlediska jeho textury. Povrch tryskaný kratší dobu vykazoval méně deformovanou povrchovou vrstvu, než jak je tomu v případě 15 sekund. Podobně lze sledovat měnící se texturu směrem k nižší poloze na tryskacím trnu (díly v nižších vrstvách mají hrubší texturu povrchu).

### 7.3 Analýza stability zbytkového napětí při použití lopatek s výhodnější geometrií

#### *Postup měření a příprava experimentu*

Experiment probíhal při stejných podmínkách jako experiment v kapitole 7.2, s tím rozdílem, že byly vyměněny metalické lopatky za jiný typ s výhodnější geometrií, která slibovala rovnoměrnější otryskání. Geometrie lopatky byla zvolena s ohledem na poznatky zjištěné v předchozích kapitolách.

Podobně jako v předchozích experimentech bylo na tryskací trn nasazeno pět kusů ozubených kol. Tato kola byla tryskána a poté podrobena měření. Bylo měřeno jedno kolo z horní vrstvy (vrstva č. 5) a jedno kolo z dolní vrstvy (vrstva č. 1). Vyhodnocení probíhalo podobně jako v kapitole 7.1 dle normy VW 50019.



Obrázek 49: Vlevo: 3D model metací lopatky používané v současné době. Vpravo: 3D model metací lopatky s vylepšenou geometrií.

Poznámka:

Úkosity u 3D modelu metací lopatky s novou geometrií byly vymodelovány úmyslně větší, aby byl zřejmý princip geometrie. Reálné úkosity se pohybovaly v rozmezí 1°-3°. Přesné rozměry jsou neznámé, protože nebyly výrobcem poskytnuty.

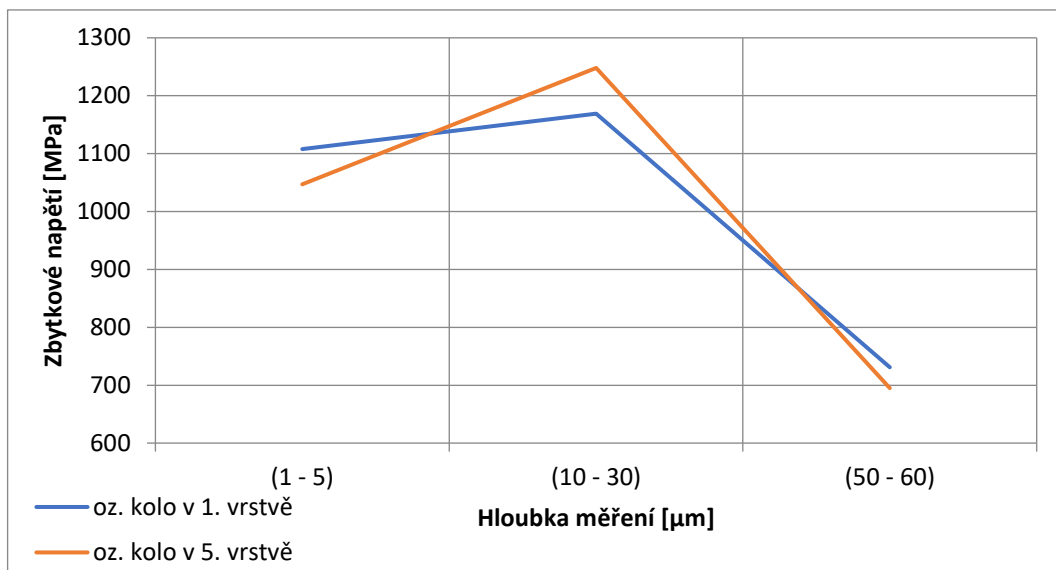
Tabulka 14: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	<b>1700</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>10</b>

Výsledky měření

Tabulka 15: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 2 (viz tabulka 3).

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]	oz. kolo v 1. vrstvě	oz. kolo v 5. vrstvě	Variační rozpětí
<b>hloubka</b>			
(1–5) μm	<b>1108</b>	<b>1047</b>	<b>61</b>
(10–30) μm	<b>1169</b>	<b>1248</b>	<b>79</b>
(50-60) μm	<b>731</b>	<b>695</b>	<b>36</b>



Obrázek 50: Porovnání metacích lopatky s původní a novou geometrií.

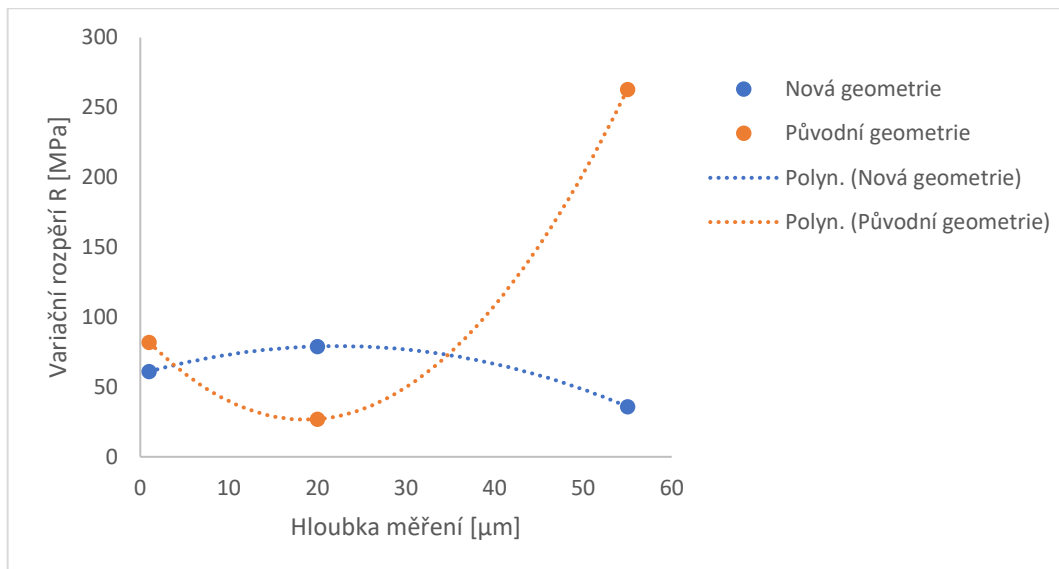
Závěr:

Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že všechny naměřené hodnoty splňují požadavek na minimální hodnoty zbytkového napětí v dané hloubce. Z těchto hodnot byl sestrojen graf, podle kterého lze soudit, že s nasazením nových metacích lopatek došlo ke zlepšení procesu. Následující tabulka prezentuje velikost variačního rozpětí mezi jednotlivými naměřenými hodnotami u metacích lopatek s novou geometrií a původní geometrií.

Tabulka 16: Porovnání rozpětí naměřených hodnot v případě použití metacích lopatek s novou a původní geometrií (viz tabulka 12, experiment 7.1).

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]	Variační rozpětí R	
	Nová geometrie	Původní geometrie
hloubka (1-5) μm	<b>61</b>	<b>82</b>
hloubka (10-30) μm	<b>79</b>	<b>27</b>
hloubka (50-60) μm	<b>36</b>	<b>263</b>

Jeden z hlavních důvodů pro výměnu původních metacích lopatek za lopatky s výhodnější geometrií bylo velké rozpětí mezi naměřenými hodnotami u dílů jejichž pozice na tryskacím trnu byla v 1. a 5. vrstvě při měření hloubce 50-60 μm pod povrchem. Tento problém byl při nasazení nových lopatek odstraněn. Jak prezentuje tabulka výše, variační rozpětí hodnot v hloubce 50-60 μm se rapidně zmenšilo. Zatím co v případě původních lopatek bylo rozpětí naměřených hodnot **263**, tak při nasazení nových lopatek bylo pouze **36**. Toto zlepšení je dáno výhodnější geometrií, která podporuje, aby se tryskací médium dostalo i do dostatečného kontaktu s díly z vyšších pozic na tryskacím trnu.



Obrázek 51: Variační rozpětí naměřených hodnot v závislosti na hloubce měření.

Z tabulky prezentující rozpětí naměřených hodnot a grafu výše vyplývá, že proces se stal s použitím nových metacích lopatek stabilnějším, tzn. že nedochází k tak velkému rozpětí naměřených hodnot jako tomu bylo v případě původních metacích lopatek.

### Dopady použití nových metacích lopatek z dlouhodobého hlediska

#### Pozitivní dopady

Lopatky s novou geometrií se osvědčily z hlediska rovnoměrnějšího otryskání kol nezávisle na tom, v které vrstvě se kolo nachází.

#### Negativní dopady

Ačkoli se nová geometrie lopatek osvědčila, z dlouhodobého hlediska bylo zjištěno, že nedosahují ani zdaleka takové životnosti jako tomu bylo v případě lopatek původních. Bylo zjištěno, jejich životnost je zhruba o 50 % nižší, než byla u původních lopatek. To je dáno především tím, že v místech, kde byly vyrobeny úkosy došlo k zeslabení lopatky a ta se vlivem abrazivního působení zrn opotřebila rychleji. Dalším důvodem pro toto velké opotřebení je také fakt, že lopatka disponuje pouze jednou pracovní stranou. Kdybychom chtěli vyrobit úkosy i na druhé straně metací lopatky, aby měla lopatka dvě pracovní strany, jak je tomu v případě lopatek původních, byla by životnost paradoxně ještě nižší, jelikož by došlo k dalšímu zeslabení tloušťky materiálu.

Vzhledem k ceně lopatky a faktu, že v jedné turbíně je 8 kusů metacích lopatek bylo rozhodnuto, že po skončení životnosti lopatek se firma vrátí zpět k původním metacím lopatkám. Všechny následující experimenty budou tedy prováděny s nasazením původních metacích lopatek.





Obrázek 52: Fotografie opotřeбенé metalické lopatky.

## 8. Analýza stability zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola

Kapitola je zaměřena na analýzu stability zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola. Řešení je rozděleno do dvou částí.

První část byla postavena na předpokladu, že hodnoty zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola se liší, protože se tryskané díly na trnu pootočí (týká se především dílů, jejichž pozice na tryskacím trnu je ve vyšší vrstvě). Při plánování experimentů 8.1 a 8.2 jsem tedy předpokládal, že se tryskané díly pootočí důsledkem proudu abraziva a rotačního pohybu stolu. Výsledkem tohoto pootáčení pak byly rozdílné hodnoty zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola.

Druhá část se zabývala výzkumem nehomogenity materiálu, ze kterého jsou ozubená kola vyrobena. Předmětem této kapitoly bylo zjistit, v jakém intervalu se pohybují hodnoty mikrotvrlosti v různých místech ozubení. Dále bylo zkoumáno, jaký vliv má pevnostní tryskání na nárůst mikrotvrlosti. Viz kapitola 8.3.

### 8.1 Fixace ozubených kol na tryskacím trnu

#### *Postup měření a příprava experimentu*

Tento experiment sleduje primárně ozubené kolo v 5. vrstvě a je rozděleno do dvou částí. V jednom případě byl tryskaný díl **volný** (jak tomu bývalo doposud), v druhém případě bylo tryskané kolo **fixované**. Fixace kola byla provedena za pomoci jednoúčelového fixačního přípravku. Takto byl vytvořen pevný blok, který se v průběhu tryskání nemohl otáčet jednak vzhledem k jeho hmotnosti a jednak díky zaklínění tyče mezi žebra tryskacího trnu. Pokud by se prokázalo, že se kola během tryskání pootočí, byl by navržen sofistikovanější fixační přípravek.

Technologické podmínky tryskání navržené pro tento experiment byly shodné s podmínkami tryskání u předchozího experimentu (viz kapitola 7.3). V rámci zachycení co největšího podílu obvodu kola bylo z každého tryskaného dílu odděleno sedm segmentů (vzorků).

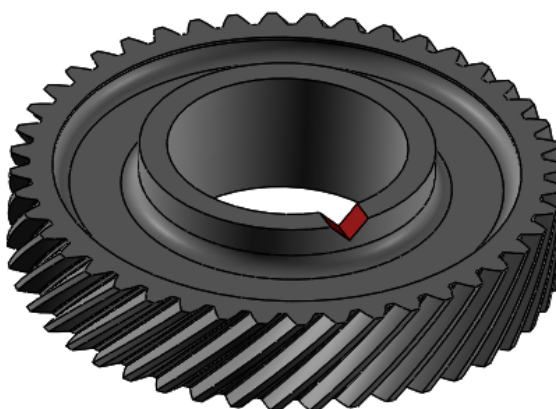
V tomto experimentu byl v první fázi vyroben fixační přípravek, který byl následně vložen do stroje. Po dokončení tryskání byl přípravek vyjmut z prostoru stroje a tryskané díly byly podrobeny měření podobně jako v předchozích experimentech pouze s jednou změnou a sice, že v tomto experimentu bylo měření provedeno pouze v hloubce **(50-60)  $\mu\text{m}$** . Jednak proto, že by byla příprava a samotné měření vzorků časově náročné, pokud by měření probíhalo ve třech hloubkách a dále proto, že v této hloubce dochází k největšímu rozpětí hodnot, jak mimo jiné potvrzují předchozí kapitoly 7.1, 7.2, 7.3.

#### Fixační přípravek

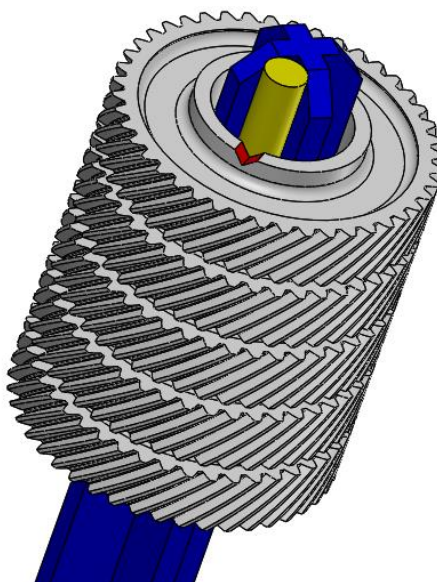
Byl navržen a následně vyroben fixační přípravek sloužící k eliminaci možného protáčení ozubených kol během tryskání. Podmínkou při výrobě přípravku bylo nepoškodit tryskací trn a zvolit co nejjednodušší a nejlevnější variantu. Hotový přípravek včetně ozubených kol byl umístěn do prostoru tryskače a následně tryskán.

#### Postup výroby

1. Pomocí pásové pily byla uříznuta 120 mm dlouhá ocelová tyč o průměru 10 mm.
2. V dalším kroku byly v ozubených kolech pomocí úhlové brusky vytvořeny klínové drážky.
3. Ozubená kola byla naskládána na tryskací trn a postupně přivařena k ocelové tyči v místě klínové drážky. Tím byla splněna podmínka, že nedojde k poškození tryskacího trnu.



Obrázek 53: 3D model ozubeného kola s červeně zvýrazněnou drážkou pro svar.



Obrázek 54: 3D model fixačního přípravku. V místě červeně zvýrazněné drážky byl zhotoven svar.

Tabulka 17: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	<b>1700</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>10</b>

#### Výsledky měření

Tabulka 18: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 2 (viz tabulka 3)

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]		oz. kolo v 5. vrstvě						
hloubka	stav kola	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5	vzorek č. 6	vzorek č. 7
(50-60) $\mu\text{m}$	volné	737	616	690	712	798	574	609
(50-60) $\mu\text{m}$	fixované	624	584	787	665	704	768	807

#### Analýza naměřených hodnot

Z tabulky naměřených hodnot je zřejmé, že část hodnot nevyhověla požadavku na minimální hodnotu zbytkového napětí. Nedostatečná hodnota zbytkového napětí mohla být způsobena několika faktory.

- Nehomogenita materiálu
- Vznik nepřesnosti při leptání
- Nepřesnost rentgenového difraktometru
- Šířka oblasti tolerančního pole pro leptání



Ad a)

Nehomogenitou materiálu je myšlena rozdílná tvrdost v různých místech materiálu. Tato rozdílná tvrdost může mít vliv na konečné zpevnění povrchu. Nehomogenitou materiálu se blíže zabývá kapitola 8.3.

Ad b)

Během leptání vzorku může dojít snadno k chybě. Pokud se vzorek během leptání nějakým způsobem (např.: elektrický výboj, nedokonale připravené stykové plochy atd.) pohne vzhledem ke svěráku ve kterém je fixován není již možno zjistit přesnou hloubku odleptané plochy. Zpětně se tato informace dá zjistit přeměřením vzorku profiloměrem.

Ad c)

Tato nepřesnost činí celkově 80 MPa (40 MPa do plusových hodnot, 40 MPa do minusových hodnot).

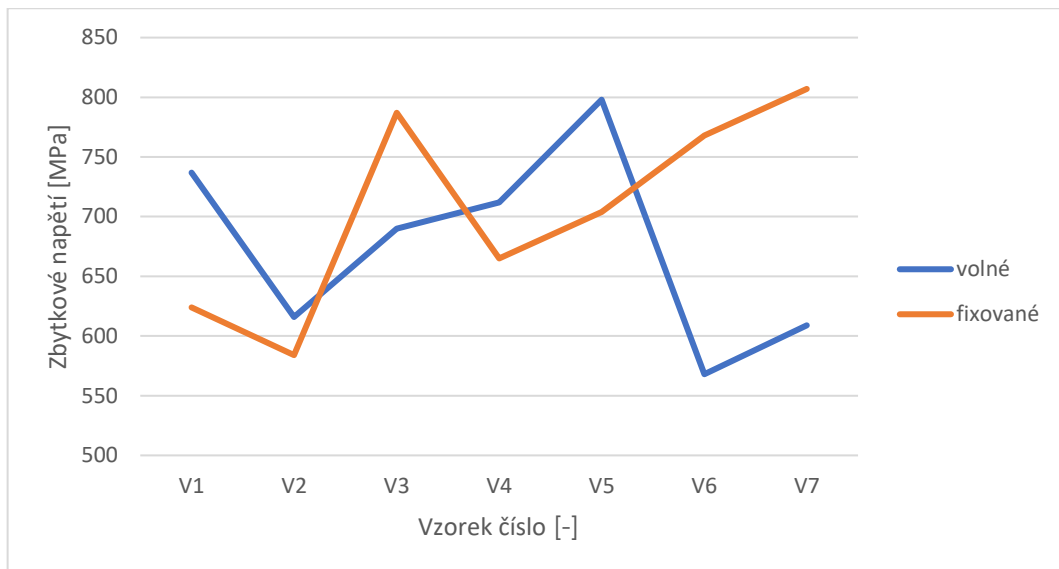
Ad d)

Tento faktor je podroben analýze v následující kapitole 8.2.

Následující tabulka prezentuje průměrnou hodnotu zbytkového napětí. Míra variace naměřených hodnot je prezentována výpočtem směrodatné odchylky. Variační rozpětí, které vyjadřuje míru variability statického souboru je získáno jako rozdíl maximální a minimální hodnoty. Hodnoty variačního rozpětí se liší pouze o 7 MPa.

*Tabulka 19: Analýza naměřených hodnot.*

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]		Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	MIN	MAX	Variační rozpětí R
hloubka	stav kola	$\bar{x}$	s			
(50-60) $\mu\text{m}$	volné	676	75,45	568	798	230
(50-60) $\mu\text{m}$	fixované	706	79,19	584	807	223



Obrázek 55: Grafické znázornění naměřených hodnot volného a fixovaného kola v hloubce 50-60  $\mu\text{m}$ . V1 (vzorek č.1), V2 (vzorek č.2) ...

### Závěr

Při porovnání hodnot získaných z obou částí experimentu, tzn. **volné** vs. **fixované**, jsem došel k závěru, že během procesu tryskání nedochází k protáčení dílu v 5. vrstvě vzhledem k ostatním dílům. Důkazem tohoto tvrzení jsou naměřené hodnoty. V případě, kdy bylo tryskané kolo volné, bylo rozpětí mezi nejmenší a největší naměřenou hodnotou **230 MPa**. V druhém případě, kdy bylo tryskané kolo fixováno, bylo rozpětí mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou **223 MPa**. Tyto rozdílné hodnoty vypovídají o tom, že k otáčení kol během tryskání s největší pravděpodobností nedochází.

## 8.2 Zúžení intervalu pro vyhodnocení zbytkového napětí

### Postup měření a příprava experimentu

Úkolem této kapitoly bylo zjistit, proč jsou naměřené hodnoty po obvodu kola tak rozdílné, když k protáčení kol během tryskání nedochází. Je třeba brát v úvahu nepřesnost rentgenového difraktometru, která je **80 MPa** a dále nepřesnosti při měření odleptaného povrchu, jakož i nepřesnost samotného leptání. Předmětem tohoto experimentu je zúžení intervalu pro vyhodnocení zbytkového napětí. Zatímco v předchozích experimentech byl vzorek leptán s přesností **(50-60)  $\mu\text{m}$** , v tomto experimentu byl vzorek leptán s přesností **(50-52)  $\mu\text{m}$** .

Měřeným dílem je podobně jako v předchozím experimentu 8.1 ozubené kolo v 5. vrstvě, které nebylo nijak fixováno. Z tohoto kola bylo odebráno 7 vzorků, které byly následně měřeny. Technologické parametry stroje zůstaly shodné s předchozím experimentem 8.1.

## Výsledky měření

Tabulka 20: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 2 (viz tabulka 3)

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]		ozubené kolo v 5. vrstvě						
hloubka	stav kola	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5	vzorek č. 6	vzorek č. 7
(50-52) $\mu\text{m}$	volné	<b>706</b>	<b>639</b>	<b>657</b>	<b>769</b>	<b>760</b>	<b>774</b>	<b>682</b>

### Analýza naměřených hodnot

Hodnoty zbytkového napětí, které byly naměřeny v tomto experimentu vykazují na první pohled menší rozpětí hodnot, než jak tomu bylo v předchozím experimentu, kde byl interval hloubky leptání 50-60  $\mu\text{m}$ . Dalším pozitivem, oproti předchozímu experimentu je také fakt, že všechny naměřené hodnoty splňují podmínku minimálního zbytkového napětí dle třídy 2. Následující tabulka porovnává hodnoty zjištěné v předchozí kapitole 8.1 s hodnotami, které byly zjištěny v této kapitole.

Tabulka 21: Srovnání hodnot naměřených v kapitole 8.1 (horní řádek) a kapitole 8.2 (spodní řádek).

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]		oz. kolo v 5. vrstvě						
hloubka	stav kola	vzorek č. 1	vzorek č. 2	vzorek č. 3	vzorek č. 4	vzorek č. 5	vzorek č. 6	vzorek č. 7
(50-60) $\mu\text{m}$	volné	<b>737</b>	<b>616</b>	<b>690</b>	<b>712</b>	<b>798</b>	<b>574</b>	<b>609</b>
(50-52) $\mu\text{m}$	volné	<b>706</b>	<b>639</b>	<b>657</b>	<b>769</b>	<b>760</b>	<b>774</b>	<b>682</b>

Tabulka 22: Variační rozpětí naměřených hodnot pro interval leptání 50-60  $\mu\text{m}$  a 50-52  $\mu\text{m}$ .

Hodnoty zbytkového napětí [MPa]		Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	MIN	MAX	Variační rozpětí R
hloubka	stav kola	$\bar{x}$	s			
(50-60) $\mu\text{m}$	volné	<b>676</b>	75,45	<b>568</b>	<b>798</b>	<b>230</b>
(50-52) $\mu\text{m}$	volné	<b>712</b>	51,67	<b>639</b>	<b>774</b>	<b>135</b>

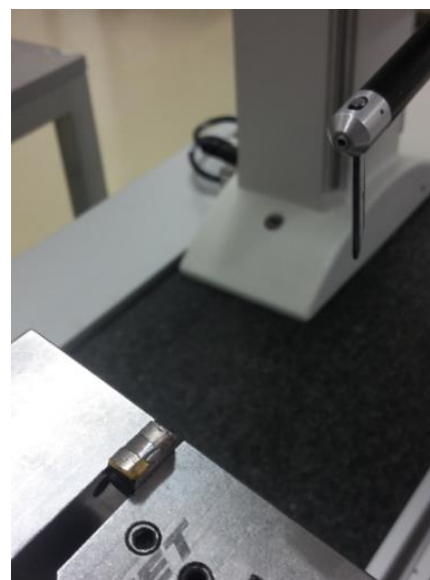
### Závěr

Zvýšení přesnosti měření v tomto experimentu přispělo k tomu, že došlo i k výraznému snížení variačního rozpětí jednotlivých hodnot, viz tabulka výše. Dalším pozitivním přínosem zpřesněného intervalu měření je nižší hodnota směrodatné odchylky.

Měření s touto přesností je ale velice časově náročné a při množství kontrolovaných vzorků při běžné sériové výrobě je tento interval obtížně dosažitelný, protože leptání se musí provádět v několika cyklech, které výrazně prodlužují celkový čas kontroly dílů.

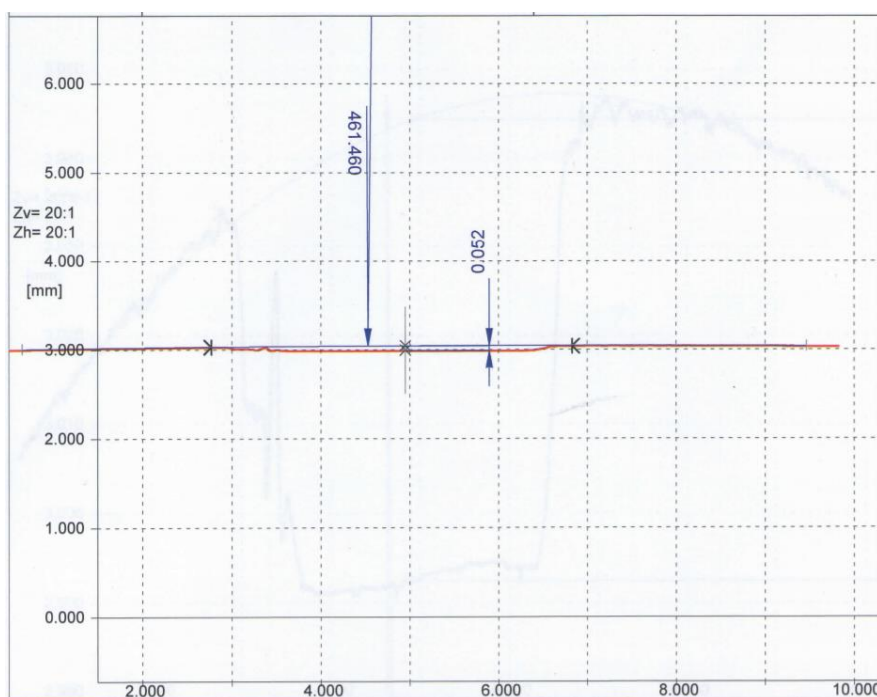
Na závěr tohoto experimentu bylo provedeno měření profilu odleptané části zubu. Měření probíhalo na profiloměru Hommel-Etamic C8000. Z následujících protokolů vychází jeden důležitý fakt.

Hloubka odleptané vrstvy není na všech místech stejná. To znamená, že rentgenový difraktometr musíme nastavit přesně do stejného bodu, ve kterém měříme při odleptávání množství odleptaného povrchu. Pokud se toto nepovede, došlo by k tomu, že bychom měřili zbytkové napětí v jiném bodě, který může mít jinou odleptanou hloubku. Nedodržení této skutečnosti se pak může projevit v nepřesnostech měření. Rentgenový difraktometr totiž měří na ploše pouhý 1 mm<sup>2</sup>.

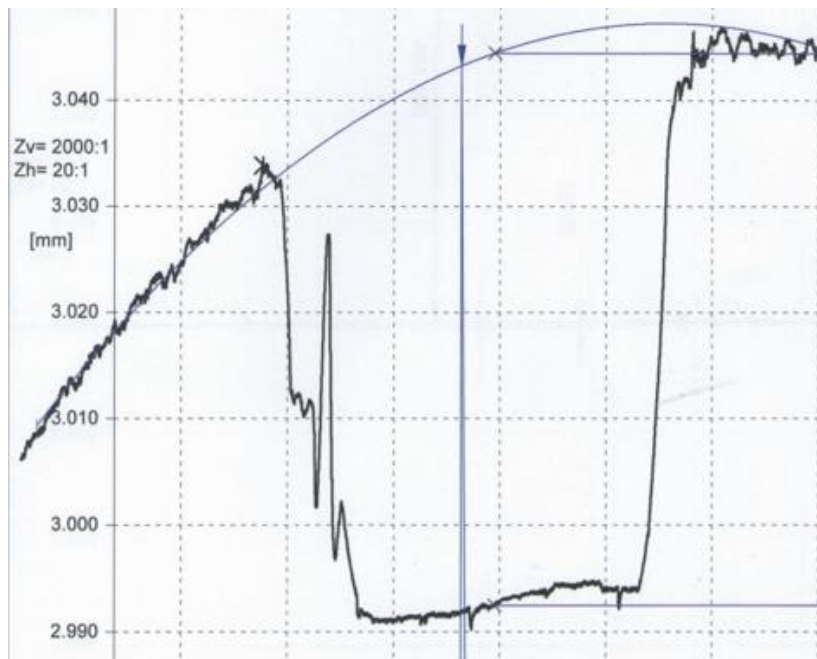


Obrázek 56: Měření skutečné vrstvy.  
Hommel-Etamic C8000.

Následující obrázky prezentují strukturu odleptaného povrchu, která byla naměřena na jednom vzorku, který byl použit v tomto experimentu. První obrázek byl pořízen při zvětšení 20:1. Na obrázku je vidět kóta, která znázorňuje hloubku odleptaného povrchu (0,052 mm) a kóta týkající se radiusu odleptané plochy (461,460 mm). Druhý obrázek byl pořízen při zvětšení 2000:1. Při tomto zvětšení lze pozorovat, že hloubka leptané plochy není na všech místech stejná.



Obrázek 57: Struktura odleptaného povrchu při zvětšení 20:1.



Obrázek 58: Struktura odleptaného povrchu při zvětšení 2000:1.

### 8.3 Analýza mikrotvrdosti po obvodu ozubeného kola

#### *Postup měření a příprava experimentu*

Z výroby byly odebrány dva typy dílů (ozubených kol). V prvním případě se jednalo o vzorek netryskaný, v druhém případě šlo o vzorek tryskaný. Podmínky tryskání byly následující: otáčky 1700 ot/min, množství tryskacího média 300 kg/min, otáčky satelitu 10 ot/s, čas tryskání 10 s. Aby byla zajištěna objektivita měření, pocházely oba vzorky ze stejné tavby a jejich pozice v peci byla stejná. Cílem této kapitoly byl jednak výzkum nehomogenity materiálu v různých místech ozubení pomocí měření mikrotvrdosti a dále zjištění vlivu pevnostního tryskání na nárůst mikrotvrdosti.

Díly po tryskání díly byly v laboratoři děleny kotoučovou pilou, podobně jak je tomu v případě přípravy vzorků pro rentgenovou difrakci. Z každého vzorku byla odříznuta část ozubení tak, aby bylo možné měřit minimálně tři zuby. Nařezaný segment byl následně zalit do pryskyřice. Po vytvrzení pryskyřice byly vzorky několikrát přešetřeny. Takto připravené vzorky byly umístěny do měřicího prostoru stroje. Na každém segmentu bylo nasnímáno 42 bodů ve kterých se změřila mikrotvrdost v hloubce 50  $\mu\text{m}$  pod povrchem. Hloubka 50  $\mu\text{m}$  byla zvolena především proto, protože v této hloubce probíhá většina měření zbytkových napětí.

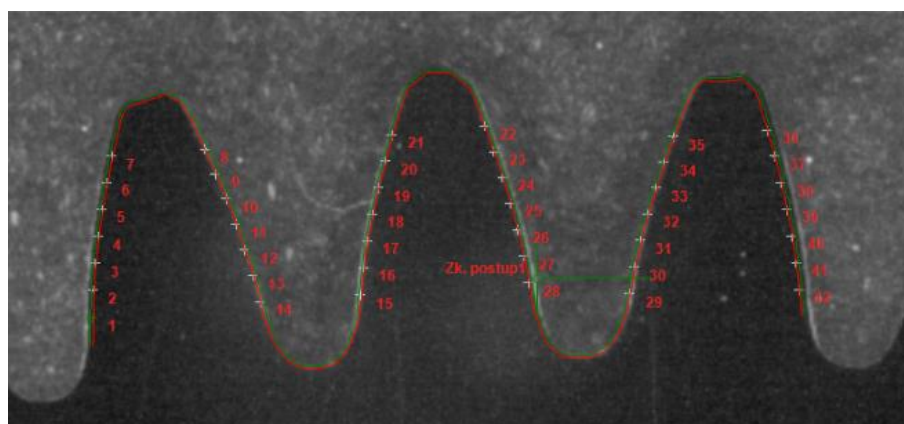


Obrázek 59: Vlevo, vyleštěný vzorek zalitý v pryskyřici. Vpravo, mikrotvrdoměr Qness během měření.

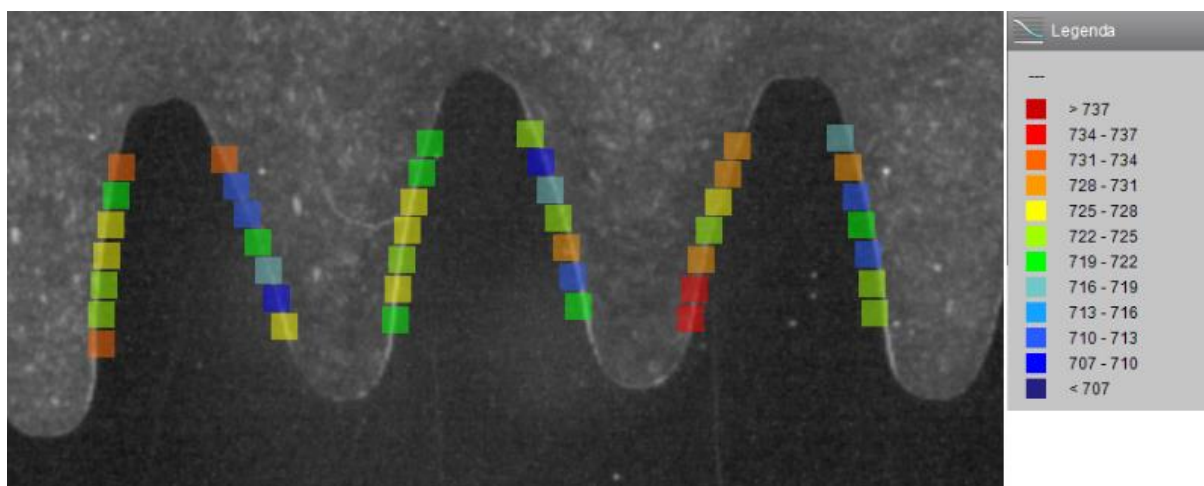
Pro měření mikrotvrdoměti byla zvolena metoda **dle Vickerse**. Měření probíhalo při zátěži 0,5 kg, vzdálenost jednotlivých vpichů od hraje vzorku byla 0,05 mm. Průměrná délka úhlopříčky vtisku byla v případě netryskaného vzorku 35,9  $\mu\text{m}$  a v případě tryskaného vzorku 34,5  $\mu\text{m}$ . Dle normy ČSN EN ISO 4516 je minimální přípustná vzdálenost středu vpichu od okraje materiálu 2,5 - 3násobek průměrné délky úhlopříčky. Z toho vyplývá, že ani jedna z variant by nesplňovala požadavek této normy na minimální vzdálenost od kraje zkoumaného vzorku.

Pro vyhodnocení experimentu byla použita norma VW 50019, která se běžně používá při kontrole sériových dílů. Tato norma mimo jiné definuje měření mikrotvrdoměti v hloubce 50  $\mu\text{m}$  při zatížení 0,5 kg, přičemž hodnota mikrotvrdoměti musí být v intervalu (680 + 120) HV. Oba měřené vzorky tuto podmínku splňují [38].

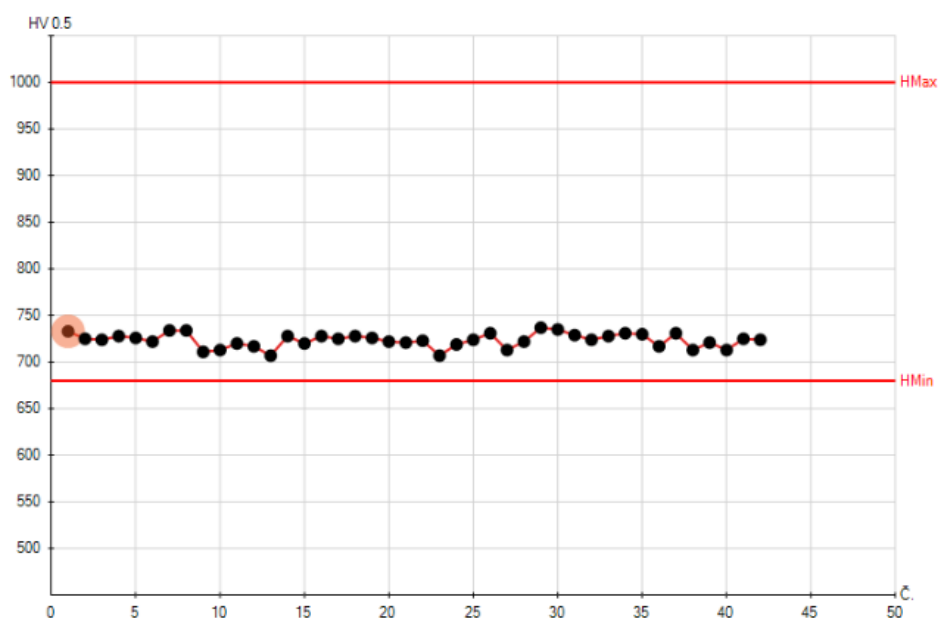
Netrysaný vzorek



Obrázek 60: Oblasti měření jednotlivých bodů.



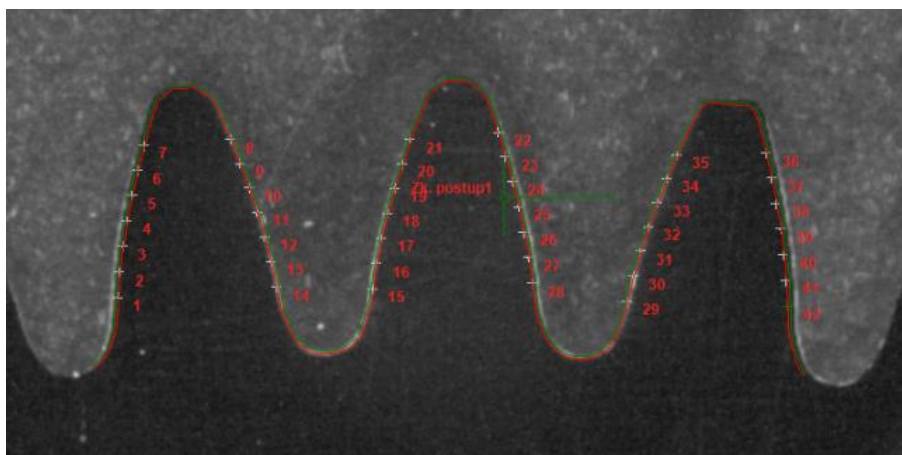
Obrázek 61: Hodnoty mikrotvrdosti v jednotlivých měřených bodech.



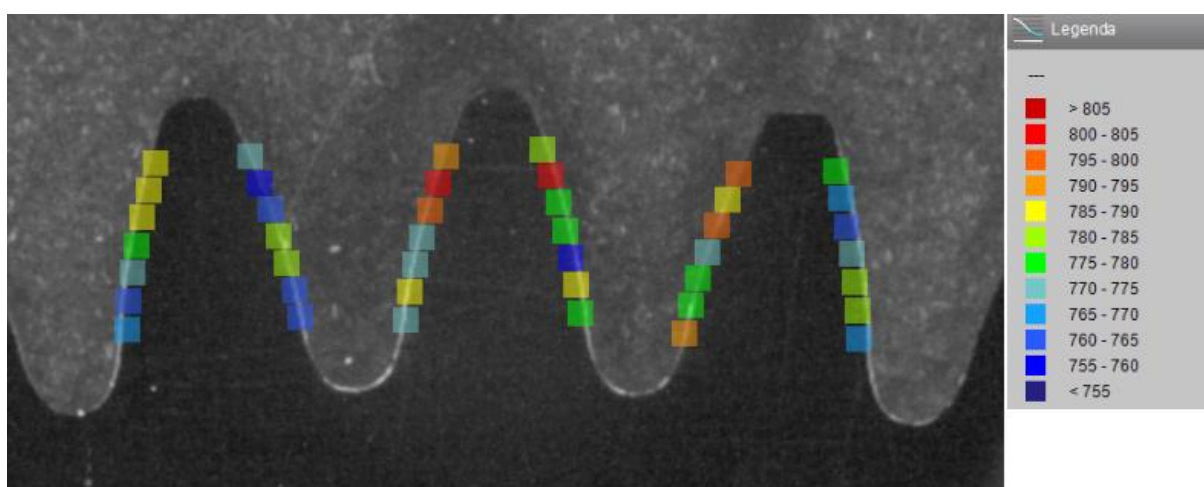
Obrázek 62: Analýza naměřených hodnot v grafu.



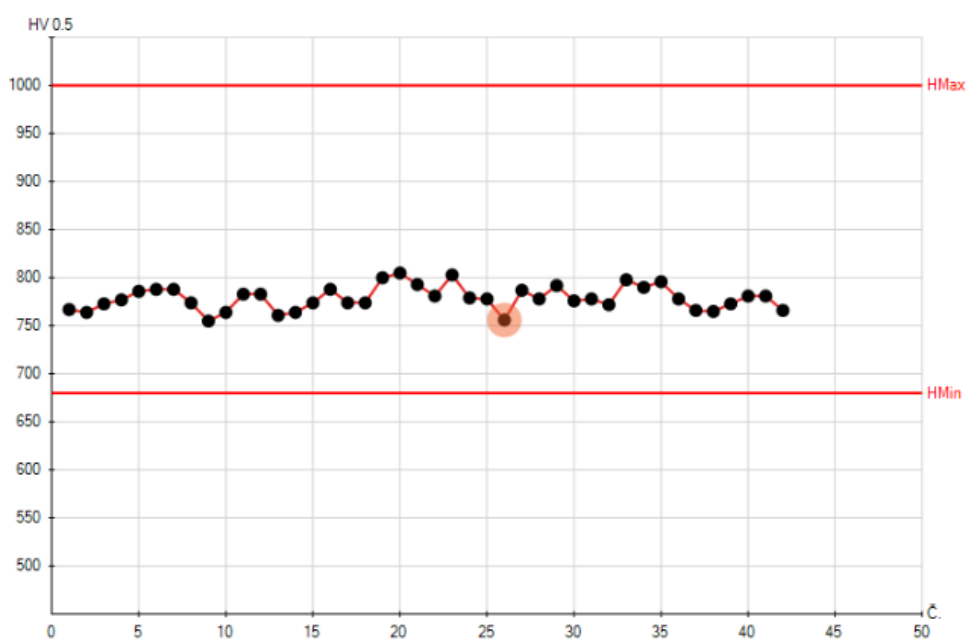
## Trysaný vzorek



Obrázek 63: Oblasti měření jednotlivých bodů.



Obrázek 64: Hodnoty mikrotvrlosti v jednotlivých měřených bodech.



Obrázek 65: Analýza naměřených hodnot v grafu.



## *Závěr*

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit nehomogenitu materiálu ozubeného kola na základě měření mikrotvrlosti. Měření bylo provedeno na netryskaném a tryskaném vzorku. Důvodem pro to byly především různé hodnoty zbytkového napětí, které byly naměřeny v předchozích experimentech.

Z naměřených hodnot vyplývá, že v obou případech (tryskaný vzorek, netryskaný vzorek) bylo rozpětí hodnot přibližně v intervalu (40 – 50) HV. Nepřesnost při měření mikrotvrlosti bývá 5-10 % z měřených hodnot, proto lze tvrdit, že naměřené rozpětí je malé. Lze se však domývat, že i tyto malé diference se mohou podílet na již dříve diskutovaném rozpětí hodnot zbytkového napětí v různých místech po obvodu ozubeného kola.

Zajímavým poznatkem z tohoto experimentu je však nárůst mikrotvrlosti u tryskaného vzorku. Z grafů (obrázek 62 a 65) je zřejmé, že po pevnostním tryskání došlo k nárůstu mikrotvrlosti přibližně o hodnotu 100 HV. Z toho lze usuzovat, že zbytkové napětí, které vzniká v povrchové vrstvě materiálu při pevnostním tryskání má vliv na mikrotvrlost. Spojitost mezi zbytkovým napětím a mikrotvrlostí bude zkoumána v kapitole 10.

V návaznosti na tento poznatek bylo zjištěno, že v konkurenční firmě se k měření zbytkového napětí nepoužívá rentgenové měřicí techniky. Zbytkové napětí je kontrolováno nepřímou z výsledků naměřené mikrotvrlosti. Princip měření spočívá v měření mikrotvrlosti u netryskaného a tryskaného vzorku. Rozdíl v hodnotách mikrotvrlosti pak vyjadřuje přibližnou hodnotu zbytkového napětí.

## 9. Optimalizace podmínek tryskání pro dosažení třídy 3

Tato kapitola je zaměřena na nastavení takových podmínek tryskání, aby ozubená kola po tryskání splňovala minimální hodnoty zbytkového napětí, které jsou předepsány třídou číslo 3. Finální podmínky tryskání by měly být voleny i s ohledem na maximální životnost komponent stroje. Je známo, že se zvyšujícími otáčkami stroje se životnost jeho jednotlivých komponent snižuje.

Důvodem pro navýšení minimálních hodnot přípustného zbytkového napětí je požadavek z VW Kassel, který se zabývá podobně jako Škoda Vrchlabí výrobou převodovek.

Pro zjednodušení a dosažení větší objektivitu výsledků bylo zkoumáno zbytkové napětí pouze v hloubce (50-60)  $\mu\text{m}$ . V této hloubce dochází také k největšímu rozpětí naměřených hodnot, jak již bylo dokázáno v předchozích kapitolách.

Tabulka 23: Minimální hodnoty zbytkového napětí v jednotlivých hloubkách dle normy VW 50019. Barevně je označena žádaná třída č. 3.

Třída	Místo měření	Povrch	20 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
	Tolerance	(1-5) $\mu\text{m}$	(10-30) $\mu\text{m}$	(50-60) $\mu\text{m}$
2	Minimální hodnoty	$\geq 600$	$\geq 800$	$\geq 600$
3	zbytkového napětí	$\geq 800$	$\geq 1000$	$\geq 800$
4	[MPa]	$\geq 900$	$\geq 1100$	$\geq 1100$

### 9.1 Zvýšení otáček metacího kola

#### Postup měření a příprava experimentu

Předmětem tohoto experimentu byla snaha zvýšit kinetickou energii metaných částic tak, aby byly dosaženy hodnoty zbytkového napětí, které by splňovaly požadavky pro třídu tryskání 3 (viz tabulka 23). V této kapitole byla kinetická energie částic zvýšena za pomoci zvýšení otáček stroje. Tento přístup by se měl výrazně podepsat na zvýšení zbytkového napětí.

Byly zvoleny tři stupně otáček (2000, 2300, 2600) ot/min. Všechny ostatní parametry jako je množství abraziva, otáčky satelitu a čas tryskání byly pro všechny tři varianty otáček konstantní (viz tabulka 24). Podobně jako v předchozích experimentech bylo tryskáno 5 kusů ozubených kol, přičemž měření byla podrobena tři ozubená kola z vrstev 1, 3, a 5. Měření zbytkového napětí probíhalo na rentgenovém difraktometru (podobně jako v předchozích experimentech) dle normy VW 50019 viz tabulka 23.

Tabulka 24: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	2000	2300	2600
množství abraziva [Kg/min]	300	300	300
otáčky satelitu [ot/min]	10	10	10
čas tryskání [s]	10	10	10

## Výsledky měření

Tabulka 25: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 3 (viz tabulka 23)

Zbytkové napětí $\sigma_z$ [MPa]	otáčky [ot/min]								
	2000			2300			2600		
	vstava č.								
hloubka [ $\mu\text{m}$ ]	1	3	5	1	3	5	1	3	5
50-60 <sup>1)</sup>	1037	1105	784	1350	1266	1069	978	1251	1069
50-60 <sup>2)</sup>	1025	1173	785	1298	1113	1059	1016	1278	1084
$\Delta \sigma_z^{1), 2)}$	12	68	1	52	153	10	38	27	15

### Analýza naměřených hodnot

Z tabulky naměřených hodnot bylo zjištěno, že při 2000 ot/min nebylo dosaženo požadované minimální hodnoty zbytkového napětí u vzorku v 5. vrstvě. V případě 2300 ot/min a 2600 ot/min splňovaly všechny naměřené hodnoty požadavek minimálního zbytkového napětí dle třídy 3. Z důvodu objektivity výsledků bylo provedeno opakované měření.

V druhém kroku byl stanoven rozdíl mezi oběma měřeními hodnotami  $\Delta \sigma_z^{1), 2)}$ . Při zvolených technologických parametrech jsou hodnoty tohoto rozdílu (variačního rozpětí) relativně nízké.

### Závěr

Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že naměřené hodnoty splňují podmínku minimální přípustné hodnoty zbytkového napětí u vzorků tryskaných při 2300 ot/min a 2600 ot/min. Tento výsledek však nelze považovat za konečný, protože vysoké otáčky působí negativně na životnost metacích lopatek, média a celkové celého stroje. Předmětem následujících kapitol 9.2 a 9.3 bude snaha o nastavení co nejmenší hodnoty otáček, které by splňovaly požadovaný předpis.

Dále bylo zjištěno, že při čase tryskání 10 sekund jsou hodnoty rozpětí  $\Delta \sigma_z^{1), 2)}$  relativně nízké. Malé hodnoty variačního rozpětí lze přičítat malému množství naměřených hodnot. V následujících kapitolách 9.2 a 9.3 dochází s přibývajícimi měřeními k růstu tohoto rozpětí. V experimentu 8.2 bylo dokázáno, že hodnota rozpětí mezi naměřenými hodnotami se pohybuje okolo 200 MPa pro metací lopatky s původní geometrií (bez úkosů) a interval měření 50-60  $\mu\text{m}$ .

## 9.2 Zkrácení času tryskání při konstantních otáčkách (2300 ot/min)

### Postup měření a příprava experimentu

V předchozí kapitole bylo zjištěno, že kola tryskána při 2000 ot/min nesplňují požadované hodnoty minimálního zbytkového napětí pro třídu 3. V tomto experimentu byly na stroji nastaveny konstantní otáčky 2300 ot/min. Proměnnou veličinou byl v tomto experimentu čas tryskání, který byl 3,5 a 7 sekund. Další technologické parametry jsou shrnuty v tabulce 26.

Tabulka 26: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	<b>2300</b>	<b>2300</b>	<b>2300</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

### Výsledky měření

Tabulka 27: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 3 (viz tabulka 23).

Zbytkové napětí [MPa]	otáčky [ot/min]_čas [s]								
	2300_3			2300_5			2300_7		
	vrstva č.								
hloubka [μm]	1	3	5	1	3	5	1	3	5
50-60 <sup>1)</sup>	1006	942	950	1124	1177	1063	1217	1133	1060
50-60 <sup>2)</sup>	928	1089	941	1315	1090	1093	1143	1134	916
$\Delta \sigma_z^{1), 2)}$	78	147	9	191	87	30	74	1	144
50-60 <sup>3)</sup>	1012	1145	743	1310	1108	885	1229	1061	1021
$\Delta \sigma_z^{1), 2), 3)}$	84	203	207	191	87	208	86	73	144

### Analýza naměřených hodnot

Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že téměř všechny naměřené hodnoty jsou v mezích, které specifikuje třída 3 (>800 MPa pro hloubku 50-60 μm). Hodnoty zbytkového napětí u jednotlivých vzorků vykazují klesající charakter směrem k vyšší vrstvě na tryskacím trnu, jak bylo dokázáno v kapitole číslo 7.

Z naměřených hodnot bylo v dalším kroku spočteno variační rozpětí  $\Delta \sigma_z^{1), 2)}$   $\Delta \sigma_z^{1), 2), 3)}$ . Pokud porovnáme rozpětí naměřených hodnot v případě doby tryskání 3 sekundy a 7 sekund, zjistíme, že v čase 7 sekund jsou hodnoty mezi maximální a minimální hodnotou nižší (krom dílů v 1. vrstvě, kde je rozdíl pouhé 2 MPa). Z toho lze usuzovat, že velikost rozpětí naměřených hodnot je pravděpodobně závislá také na délce tryskání a s rostoucí délkou tryskání se rozpětí naměřených hodnot zmenšuje.

## Závěr

Z tabulky naměřených hodnot vyplývá, že téměř všechny naměřené hodnoty splňují minimální hodnoty zbytkového napětí podle třídy 3. Ačkoli všechny naměřené hodnoty splňují požadovaný předpis, je zapotřebí dalšího experimentu, který bude navržen s ohledem na snížení otáček stroje. Důvodem pro další snižování otáček je fakt, že zbytečně vysoké otáčky mají negativní dopady na životnost komponent stroje.

### 9.3 Zkrácení času tryskání při konstantních otáčkách (2150 ot/min)

#### Postup měření a příprava experimentu

Cílem experimentu bylo další snížení otáček stroje, které by zajišťovaly nižší opotřebení komponent stroje, přičemž minimální hodnota zbytkového napětí by neměla dosáhnout menší hodnoty, než povoluje třída 3 (800 MPa).

Tabulka 28: Technologické parametry stroje.

otáčky turbíny [ot/min]	<b>2150</b>	<b>2150</b>	<b>2150</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

#### Výsledky měření

Tabulka 29: Tabulka naměřených hodnot. Hodnoceno dle třídy 3 (viz tabulka 23).

Zbytkové napětí $\sigma_z$ [MPa]	otáčky [ot/min]_čas [s]								
	2150_3			2150_5			2150_7		
	vrstva č.								
hloubka [ $\mu\text{m}$ ]	1	3	5	1	3	5	1	3	5
50-60 <sup>1)</sup>	793	952	840	1222	964	811	1025	1058	922
50-60 <sup>2)</sup>	1108	938	1061	1099	1061	677	964	961	812
$\Delta \sigma_z^{1), 2)}$	315	14	221	123	97	134	61	97	110
50-60 <sup>3)</sup>	1121	1041	671	1061	1086	784	990	947	898
$\Delta \sigma_z^{1), 2), 3)}$	328	103	169	161	122	134	61	111	110

Tabulka 30: Skutečná hloubka odleptané vrstvy.

čas tryskání [s]/poloha vzorku		3/1	3/5
interval [ $\mu\text{m}$ ]	50-60 <sup>1)</sup>	56	56
	50-60 <sup>2)</sup>	52	70

#### Analýza naměřených hodnot

U vzorků 2150\_3/1 a 2150\_3/5, u kterých byl rozdíl mezi oběma měřenými hodnotami  $\Delta \sigma_z^{1), 2)}$  v prvním případě **315 MPa** a v druhém případě **221 MPa** byla přeměřena hloubka odleptané vrstvy.

Měření probíhalo za pomoci profiloměru Hommel-Etamic C8000 podobně jak tomu bylo v experimentu 8.3. Důvodem k přezkoumání hloubky odleptané vrstvy byl fakt, že v průběhu leptání mohlo dojít k pohybu vzorku ve svěráku a tím byla odleptána větší, popřípadě menší hloubka, která neodpovídá požadovanému intervalu 50  $\mu\text{m}$  – 60  $\mu\text{m}$ . Bylo zjištěno, že u vzorku 2150\_3/1 byl dodržen stanovený interval. Naopak u vzorku 2150\_3/5 byla zjištěna větší odleptaná hloubka (70  $\mu\text{m}$ ) a proto je hodnota 1061 MPa označena červeně a nezapočítává se do další analýzy.

V dalším kroku bylo provedeno opětovné měření zbytkového napětí 50-60<sup>3)</sup> viz tabulka 29. Bylo zjištěno, že dva vzorky, konkrétně 3/5 a 5/5, nesplňují požadavek na minimální hodnotu zbytkového napětí. Nakonec bylo spočteno variační rozpětí ( $\Delta \sigma_z^{1), 2), 3)}$  ze všech tří měření. Průběh variačního rozpětí je obdobný jako v předchozí kapitole 9.2, a sice že při tryskání časem 3 sekundy je hodnota variačního rozpětí vyšší než při tryskání časem 7 sekund.

#### *Závěr*

Závěrem experimentu lze konstatovat, že z dosud provedených měření je pro hodnotu otáček 2150 jediným vyhovujícím časem tryskání 7 sekund. Dalšího snížení otáček stroje by bylo možno dosáhnout například prodloužením doby tryskání.

#### *Souhrnný závěr ke kapitolám 9.1, 9.2, 9.3*

Náplní kapitoly 9 byla snaha o nastavení takových technologických parametrů stroje, aby tryskané díly splňovaly třídu 3 (viz tabulka 23). Byly provedeny tři experimenty, které zkoumaly především vliv různých otáček stroje při daných časech na velikost zbytkového napětí. Za nejlepší z provedených experimentů lze považovat variantu 2150/7, tzn. tryskání při 2150 otáčkách za minutu a době 7 sekund. Tímto by došlo k navýšení otáček o 450 ot/min oproti standartním 1700 ot/min. Čas 7 sekund je výhodný jednak z hlediska stupně pokrytí, jak je řečeno dále a jednak dojde ke zrychlení celého procesu o 3 sekundy.

V kapitole 7.2, kde byl zkoumán stupeň pokrytí bylo zjištěno, že při kratší době tryskání je stupeň pokrytí nižší. V kapitolách 9.1, 9.2 a 9.3 byly proměnnou veličinou otáčky a při těchto otáčkách byla ozubená kola tryskána vždy ve třech časech 3, 5 a 7 sekund, krom prvního experimentu (9.1) kdy byl čas konstantní (10 sekund). Právě nízký stupeň pokrytí, který se objevuje při krátké době tryskání může mít na svědomí velké hodnoty variačního rozpětí mezi naměřenými hodnotami, jak je tomu například v experimentu 9.3, kdy při čase tryskání 3 sekundy bylo zbytkové napětí jednou **793 MPa** a následně **1108 MPa**, ačkoli byl rozdíl v leptané hloubce pouze 4  $\mu\text{m}$ . V praxi to znamená to, že zbytkové napětí 793 MPa bylo naměřeno v místě, kam se nedostalo takové množství tryskacího média, a tudíž toto místo nebylo dostatečně zpevněno.

## 10. Výzkum závislosti zbytkového napětí na mikrotvrdosti

Předmětem této kapitoly není primárně měření zbytkových napětí, jak tomu bylo v předchozích kapitolách, ale zjišťování mikrotvrdosti. V kapitole 8.3 jsem hodnotil dva díly, přičemž první byl pevnostně tryskán a druhý nikoli. V závěru experimentu jsem se pak zmínil o nárůstu mikrotvrdosti právě u tryskaného vzorku přibližně o hodnotu 100 HV, v porovnání s netryskaným vzorkem.

V kapitole číslo 9 bylo mým cílem navrhnout takové podmínky tryskání, aby byly splněny požadavky pro tryskání dle třídy 3. Bylo provedeno několik experimentů, které byly zaměřeny na změnu technologických parametrů stroje, především se jednalo změnu otáček a času tryskání.

Především díky poznatku o nárůstu mikrotvrdosti, který byl zjištěn v kapitole 8.3 a značnému množství tryskaných dílů, které byly hodnoceny v rámci předchozí kapitoly jsem mohl přistoupit k realizaci této části. Hlavní motivací bylo zjistit, zdali by nemohlo být nahrazeno komplikované měření zbytkových napětí právě měřením mikrotvrdosti, které je dle mého soudu jednodušší a rychlejší.

*Postup měření a příprava experimentu*

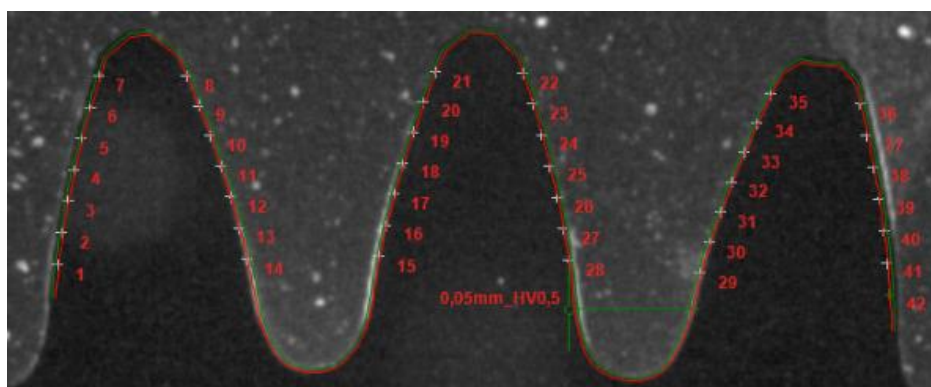
Mikrotvrdost byla zjišťována u dílů, které byly tryskány při proměnných otáčkách, přičemž doba tryskání byla konstantní.

*Tabulka 31: Technologické parametry stroje.*

otáčky turbíny [ot/min]	<b>1700</b>	<b>2000</b>	<b>2300</b>	<b>2600</b>
množství abraziva [Kg/min]	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>
otáčky satelitu [ot/min]	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
čas tryskání [s]	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>

Příprava a měření vzorků probíhalo obdobně, jako tomu bylo v případě experimentu v kapitole 8.3, kde je tento postup podrobněji popsán.

Měření probíhalo při zátěži 0,5 kg, vzdálenost jednotlivých vpichů od kraje vzorku byla 50  $\mu\text{m}$  (HV0,5). V případě experimentu v kapitole 8.3 bylo měření prováděno dle normy VW 50019. Následující měření se také opírá o tuto normu. Celkem bylo měřeno 42 bodů, viz následující obrázek.



*Obrázek 66: Oblasti měření jednotlivých bodů.*

Výsledky měření

Tabulka 32: Hodnoty naměřené mikrotvrdosti v jednotlivých bodech.

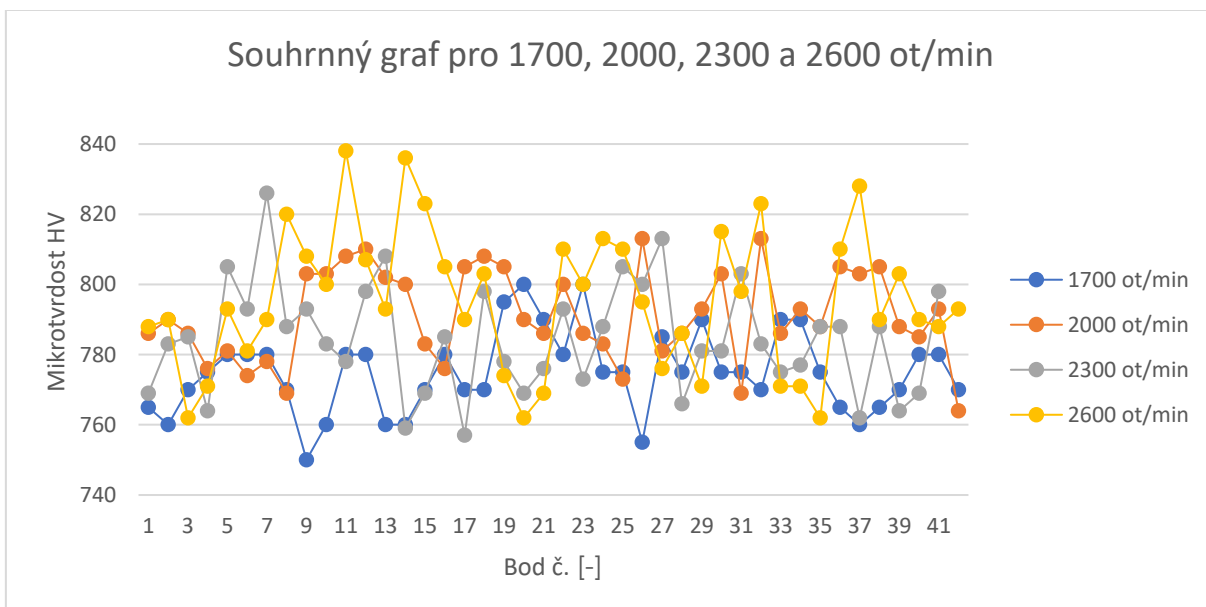
1700 ot/min		2000 ot/min		2300 ot/min		2600 ot/min	
bod č.	HV 0,5	bod č.	HV 0,5	bod č.	HV 0,5	bod č.	HV 0,5
1	765	1	786	1	769	1	788
2	760	2	790	2	783	2	790
3	770	3	786	3	785	3	762
4	775	4	776	4	764	4	771
5	780	5	781	5	805	5	793
6	780	6	774	6	793	6	781
7	780	7	778	7	826	7	790
8	770	8	769	8	788	8	820
9	750	9	803	9	793	9	808
10	760	10	803	10	783	10	800
11	780	11	808	11	778	11	838
12	780	12	810	12	798	12	807
13	760	13	802	13	808	13	793
14	760	14	800	14	759	14	836
15	770	15	783	15	769	15	823
16	780	16	776	16	785	16	805
17	770	17	805	17	757	17	790
18	770	18	808	18	798	18	803
19	795	19	805	19	778	19	774
20	800	20	790	20	769	20	762
21	790	21	786	21	776	21	769
22	780	22	800	22	793	22	810
23	800	23	786	23	773	23	800
24	775	24	783	24	788	24	813
25	775	25	773	25	805	25	810
26	755	26	813	26	800	26	795
27	785	27	781	27	813	27	776
28	775	28	786	28	766	28	786
29	790	29	793	29	781	29	771
30	775	30	803	30	781	30	815
31	775	31	769	31	803	31	798
32	770	32	813	32	783	32	823
33	790	33	786	33	775	33	771
34	790	34	793	34	777	34	771
35	775	35	788	35	788	35	762
36	765	36	805	36	788	36	810
37	760	37	803	37	762	37	828
38	765	38	805	38	788	38	790
39	770	39	788	39	764	39	803
40	780	40	785	40	769	40	790
41	780	41	793	41	798	41	788
42	770	42	764	42	-	42	793



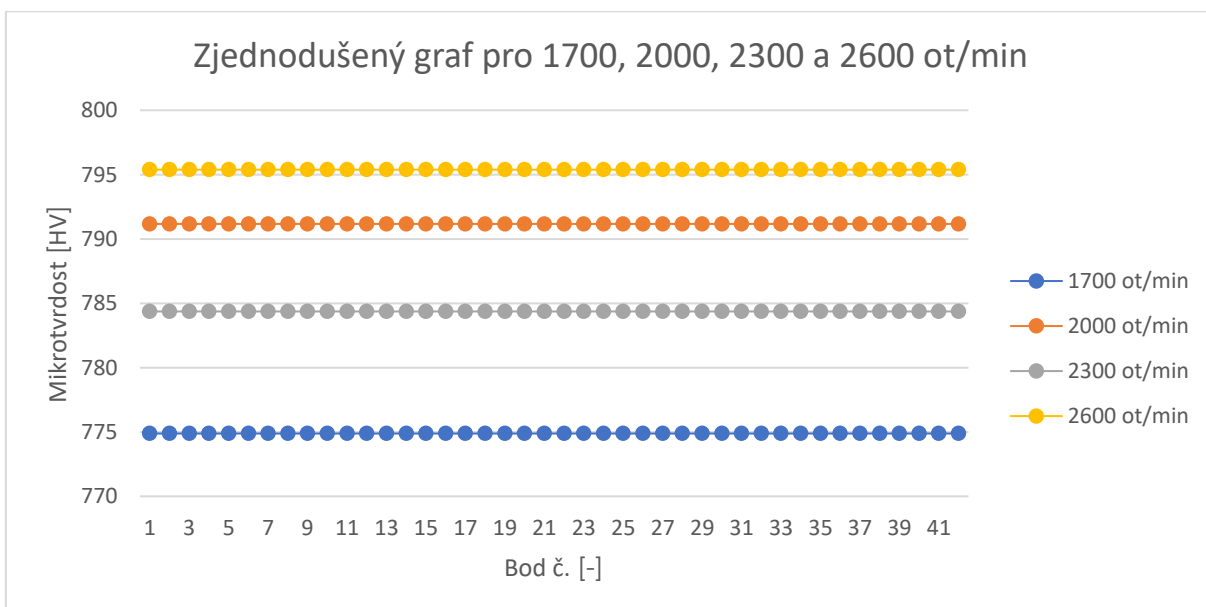
Analýza naměřených hodnot

Tabulka 33: Zpracování naměřených hodnot

HV	1700 ot/min	2000 ot/min	2300 ot/min	2600 ot/min
Aritmetický průměr $\bar{x}$	775	791	784	795
MIN hodnota	750	764	757	762
MAX hodnota	800	813	826	838
Variační rozpětí R	50	49	69	76
Směrodatná odchylka s	11,47	12,93	15,51	19,74



Obrázek 67

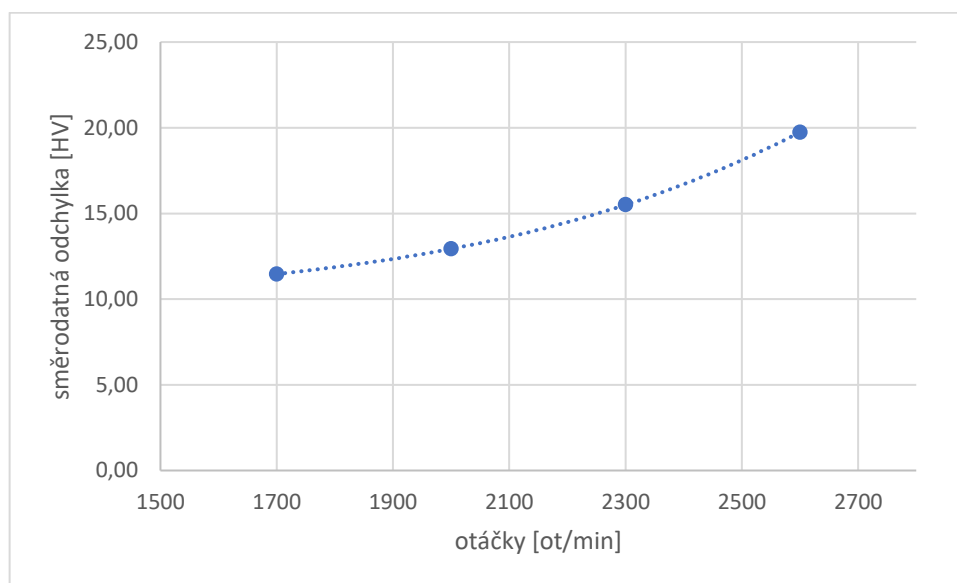


Obrázek 68: Zjednodušený graf, který byl zkonstruován z průměrných hodnot mikrotvrdości pro dané otáčky.

## Závěr

Ze zjednodušeného grafu pro 1700, 2000, 2300 a 2600 ot/min, který byl zkonstruován z průměrné hodnoty mikrotvrlosti pro danou hodnotu otáček je vidět, že při nižší hodnotě otáček je hodnota mikrotvrlosti nižší než v případě vyšších otáček. To je nejzřetelnější při porovnání varianty se 1700 ot/min a varianty s 2600 ot/min. Průměrný nárůst mikrotvrlosti byl však pouze 20 HV.

Z naměřených hodnot byla dále stanovena směrodatná odchylka a variační rozpětí. Zde stojí za povšimnutí, že směrodatná odchylka se s vzrůstající hodnotou otoček stroje výrazně zvyšuje viz obrázek níže.



Obrázek 69: Graf závislosti směrodatné odchylky na hodnotě otáček stroje.

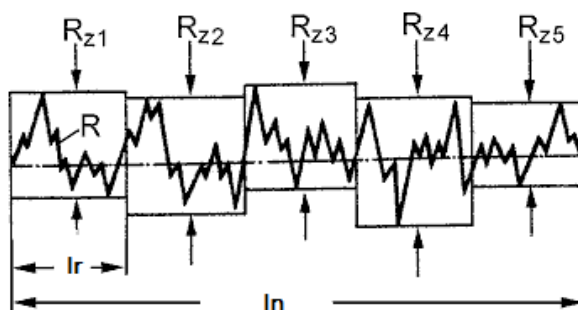
Odpověď na otázku, zdali by bylo možné nahradit měření zbytkových napětí měřením mikrotvrlosti není zcela jednoznačná. Pokud by byla hodnota otáček nízká (například 1700 ot/min) byl by nízká i směrodatná odchylka a šlo by o tomto řešení uvažovat. Avšak v případě vyšších otáček by docházelo ke stále větší nepřesnostem, které vyplývají z rostoucí směrodatné odchylky a variačního rozpětí naměřených hodnot.

## 11. Komparace sférického a arondovaného tryskacího média

Poslední částí této práce se zabývá porovnáním zaobleného (arondovaného) ocelového sekaného drátu G3 (současné tryskací médium) a ocelového granulátu S110. Sekaný drát je dodáván o průměru zrna 0,6 mm. Ocelový granulát je dodáván o nominálním průměru zrna 0,3 mm, skutečný průměr zrna je pak v rozmezí od 0,18 mm do 0,6 mm. Pro účel experimentu byla tryskána 2 ozubená kola, na kterých byla následně vyhodnocována drsnost povrchu. Současné tryskací médium je místy ostrohranné, a proto se lze domývat, že nasazení ocelového granulátu bude slibovat lepší výslednou drsnost povrchu. Důvodem zkoumání drsnosti je fakt, že úzce souvisí s hlučností celého mechanismu. Se snížením drsnosti ozubených kol by bylo dosaženo snížení hlučnosti, která je v dnešním automobilovém průmyslu velmi sledována. Pro výběr optimální varianty bylo použito vícekritériální hodnocení.

### 11.1 Porovnání z hlediska drsnosti povrchu

Jako parametr charakterizující drsnost povrchu byl zvolen parametr  $R_z$  (maximální výška profilu). Dle DIN EN ISO 4287 je tento parametr definován jako „*součet nejvyššího výstupku a hloubky nejnižší rýhy uvnitř základní délky (32)*“. Při zjišťování tohoto parametru se měřený profil rozdělí do pěti stejných částí, délka těchto částí je definována mezní vlnovou délkou. V každé části je následně změřena maximální hodnota a z průměru hodnot se určí parametr  $R_z$ . Drsnost povrchu je měřena na délce ( $l_n$ ), což je 5 základních délek ( $l_r$ ) [32].



Obrázek 70: Definice parametru  $R_z$  (32).

Drsnoměr používaný v rámci tohoto experimentu byl HOMMEL-ETAMIC C8000. Jedná se o drsnoměr, který je schopen měřit všechny typy profilů. Disponuje třemi typy měřících ramínek (TA-60 standart, TA-60 s rubínovou kuličkou a TA-60 do díry). Drsnoměr je dále vybaven profilovým snímacím zařízením wavecountur digital [33].

Parametry snímacího zařízení [13]:

Snímací systém	Lineární pravítko
Maximální zdvih v ose Z	60 mm
Rozlišení v ose Z	max. 0,05 v rozsahu 60 mm
Rozlišení v ose X	až 0,01 $\mu\text{m}$
Přítlačná síla	0–20 mN
Max. úhel stoupání/klesání	77°/88°

Podmínky měření:

Snímací ramínko	TA-60 standart
Snímač	TKU 300
Měřicí rozsah	80 $\mu\text{m}$
Lineární posuvový přístroj	waveline 120
Měřená délka (ln)	4,8 mm *
Posuvová rychlost (Vt)	0,15 mm/s
Filtr P-W-R-Profil	ISO 11562
Základní délka lr (cut off)	0,8 mm

*\* Na zkušebních protokolech (viz příloha 1) je uvedena měřená délka 2,40 mm. Minimální měřená délka bývá z pravidla 5 základních délek (v rámci tohoto experimentu se rovnala měřená délka šesti základním délkám), proto bylo měření na délce 2,40 mm provedeno dva krát a následně byla z těchto dvou hodnot vypočítána průměrná hodnota. Takto bylo zajištěno měření na minimální požadované délce 4,8 mm. Důvodem byl omezený prostor mezi ozubením, do kterého se nevešel měřicí snímač.*

Snímač TKU 300 je univerzální snímač s výměnnými doteky. Zdvih snímače je 300  $\mu\text{m}$ , rádius hrou 0,5  $\mu\text{m}$ . Snímací hrot je vyroben z diamantu a upínání snímače je magnetické.

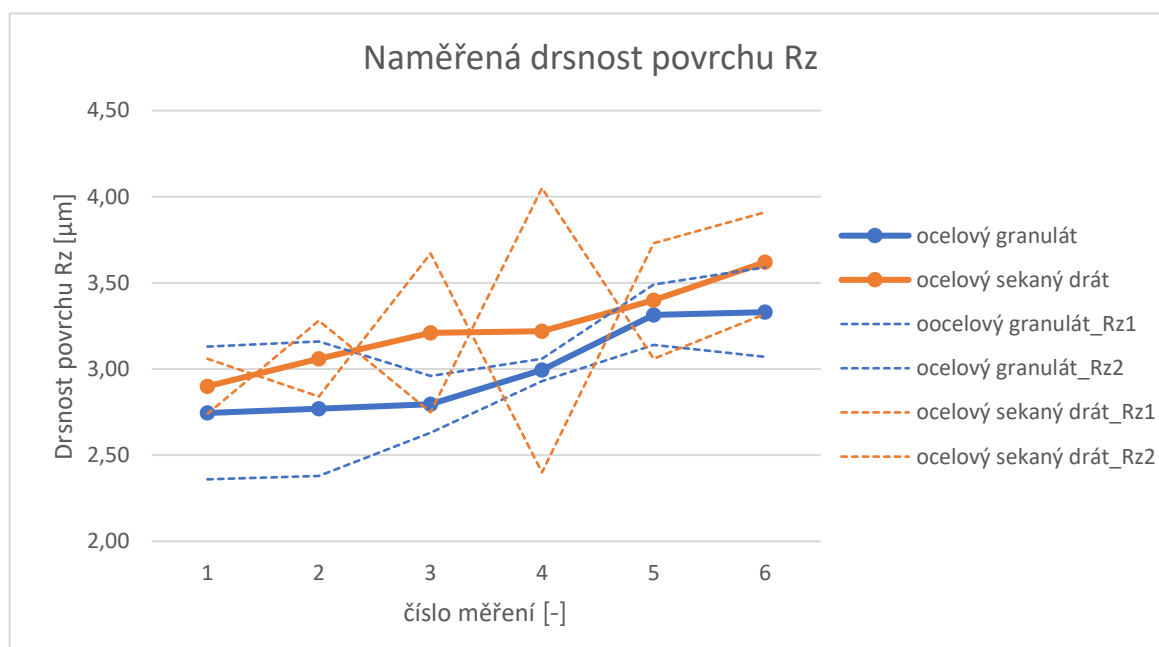
Po tryskání byly oba vzorky popsány a v další fázi podrobeny měření drsnosti. Drsnost byla měřena na červeně označených zubech, přičemž každý zub byl měřen z obou stran, tzn. byla měřena jak tažná, tak zpětná část zubu. Měření probíhalo kolmo k ose ozubeného kola.



Obrázek 71: Tryskané vzorky připravené na měření drsnosti povrchu. Vlevo: vzorek tryskán ocelovým granulátem. Vpravo: vzorek tryskáný arondovaným sekaným drátem.

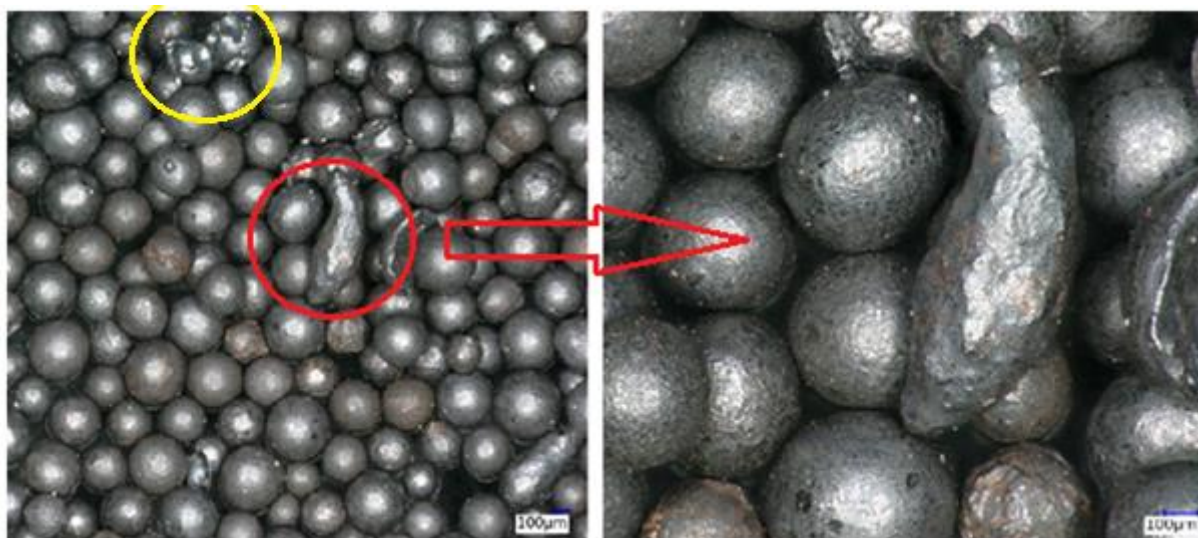
Tabulka 34: Tabulka naměřených hodnot drsnosti Rz (protokoly z měření viz Příloha 1).

Naměřená drsnost povrchu Rz [ $\mu\text{m}$ ]								Aritmetický průměr $\bar{x}$	Směrodatná odchylka $s$
ocelový granulát	Rz1	3,13	3,16	2,96	3,06	3,49	3,59	2,99	0,27
	Rz2	2,36	2,38	2,63	2,93	3,14	3,07		
	Rz	<b>2,75</b>	<b>2,77</b>	<b>2,79</b>	<b>3,00</b>	<b>3,32</b>	<b>3,33</b>		
ocelový sekaný drát	Rz1	3,06	2,84	3,67	2,4	3,73	3,91	3,24	0,25
	Rz2	2,74	3,28	2,75	4,05	3,06	3,32		
	Rz	<b>2,9</b>	<b>3,06</b>	<b>3,21</b>	<b>3,22</b>	<b>3,4</b>	<b>3,62</b>		



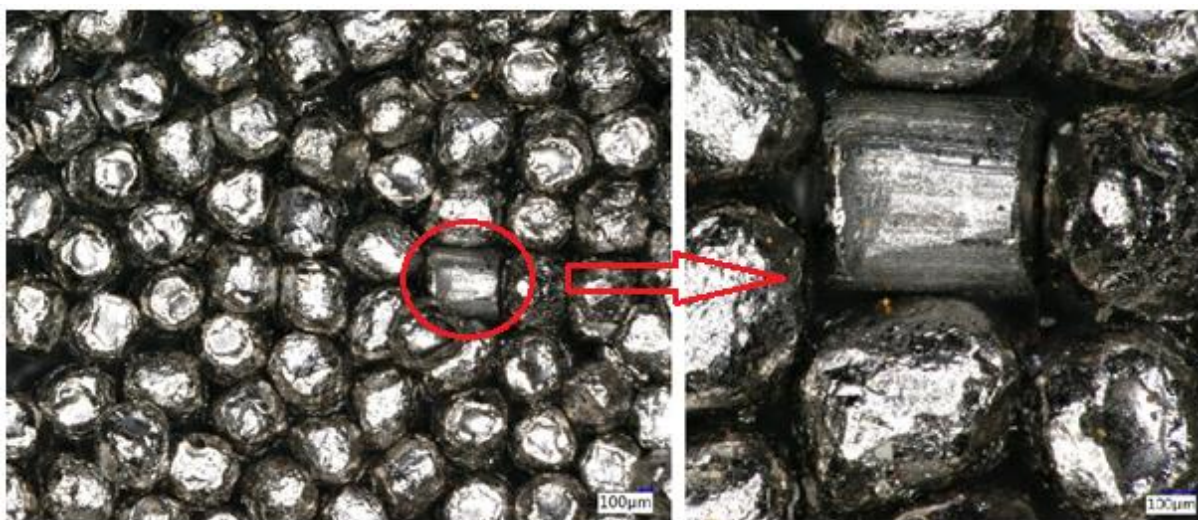
Obrázek 72: Porovnání ocelového sekaného drátu a ocelového granulátu z hlediska drsnosti povrchu.

Na základě výsledků naměřené drsnosti povrchu jsem přistoupil k bližší analýze obou tryskacích médií. Pomocí laboratorní lopatky byla odebrána malá část nepoužitého tryskacího média, které bylo umístěno na hodinové sklíčko a dále zkoumáno pomocí digitálního mikroskopu od firmy Keyence (stejný byl použit i v kapitole 7.2). Výstupem jsou následující fotografie, které zachycují detailní tvar obou porovnávaných tryskacích médií.



Obrázek 73: Ocelový granulát.

Z obrázku výše vyplývá několik faktů. Jednak je patrné, že jednotlivé částice ocelového granulátu mají relativně pravidelný kulový tvar. Dále si lze všimnout několika částic, které mají oválný až červíkovitý tvar. V horní části obrázku se nachází zrno, u kterého došlo během výrobního procesu k jeho destrukci. Destrukce způsobila, že obě poloviny zrna mají v oblasti lomu ostré hrany. Výše popsané vady mají nepochybně vliv na výslednou drsnost povrchu.



Obrázek 74: Ocelový sekaný drát.

Podobně jako v případě ocelového granulátu se i mezi zrny arondovaného sekaného drátu nacházejí částice, které by se tam neměly vyskytovat. Jedná se například o zcela nezaoblené pelety, jak je zvýrazněno na obrázku výše. Tyto ostrohranné pelety bezpochyby zhoršují výslednou drsnost povrchu.



Co se týče tvaru ostatních zrn je patrné, že jejich tvar není zcela kulový, jak je tomu v případě ocelového granulátu.

Z porovnání obou tryskacích médií z hlediska naměřené drsnosti povrchu (tabulka 34), vyšla jako lepší varianta ocelový granulát. Průměrná hodnota drsnosti, která byla naměřena při použití sekaného drátu je 3,24  $\mu\text{m}$ , což je výsledek o 0,25  $\mu\text{m}$  horší než v případě ocelového granulátu. Tento malý rozptyl hodnot mezi jednotlivými typy tryskacích médií do značné míry koresponduje s výsledky, které byly zjištěny digitálním mikroskopem a které poukazují na to, že oba typy médií obsahovaly částice, které by obsahovat neměly.

### 11.2 Porovnání z hlediska ceny

Následující hodnoty jsou převzaty od dodavatele tryskacích médií Kuhmichel [28].

Cena ocelového sekaného drátu G3:	<b>45 Kč/kg</b>
Cena ocelového granulátu S110:	<b>18 Kč/kg</b>

### 11.3 Porovnání z hlediska hustoty

Následující hodnoty jsou převzaty od dodavatele tryskacích médií Kuhmichel [28].

Hustota ocelového sekaného drátu G3:	<b>7,4 g/cm<sup>3</sup></b>
Hustota ocelového granulátu S110:	<b>7,8 g/cm<sup>3</sup></b>

### 11.4 Porovnání z hlediska tvrdosti

Následující hodnoty jsou převzaty od dodavatele tryskacích médií Kuhmichel [28].

Tvrdost ocelového sekaného drátu G3:	<b>56 HRC</b>
Tvrdost ocelového granulátu S110:	<b>40-52 HRC</b>

## 11.5 Vícekriteriální hodnocení

Vícekriteriální rozhodování umožňuje vybrat z několika různých variant tu neoptimálnější. Varianty se hodnotí podle určitých hledisek, která jsou vyjádřena kvantitativně ve formě kritérií. Metody vícekriteriálního rozhodování umožňují stanovit pořadí jednotlivých variant na základě zvolených kritérií. Pro stanovení významnosti kritéria se používají expertní metody, tyto metody stanovují významnost kritéria pomocí váhy důležitosti. Nejčastěji používanými metodami jsou **metody pořadí**, **metoda bodovací** a **metody párového srovnání** [34].

Pro výběr optimální varianty jsem zvolil metodu bodovací. „Vybraný expert na základě vhodně zvolené bodovací stupnice ohodnotí jednotlivá kritéria podle bodovací stupnice, která je dána v určitém rozmezí, např. od 1 do 10. Vyšší hodnota bodovací stupnice se obvykle přiřazuje kritériu, které je podle názoru experta důležitější, přičemž platí, že stejnou hodnotu může expert přiřadit i více kritériím“ (34).

Tabulka 35: Parametry jednotlivých druhů tryskacích médií.

KRITÉRIUM		Drsnost povrchu [μm]	Cena média [Kč/kg]	Hustota média [g/cm <sup>3</sup> ]	Tvrdość média [HRC]
VARIANTA		K1	K2	K3	K4
ocelový sekaný drát	V1	<b>3,24</b>	<b>45</b>	<b>7,4</b>	<b>56</b>
ocelový granulát	V2	<b>2,99</b>	<b>18</b>	<b>7,8</b>	<b>40-52</b>

Tabulka 36: Ohodnocení kritérií experty. V případě E1 jsou kritéria hodnocena z pohledu výrobce. V případě E2 jsou kritéria hodnocena z pohledu spotřebitele.

KRITÉRIUM	K1	K2	K3	K4	Z <sub>er</sub>
EXPERT					
E1	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>15</b>
E2	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>9</b>

Drsnost povrchu je hodnocena z pohledu spotřebitele 4 body. Je to dáno tím, že drsnost povrchu jednotlivých zubů je spojena s hlučností celého mechanismu. V případě ceny tryskacího média je výrobce do jisté míry nucen konkurencí ke snižování nákladů, a proto je pro něj nižší cena tryskacího média výhodnější. V tomto případě je cena tryskacího média ohodnocena 5 body. Další dvě kritéria jsou hustota a tvrdost tryskacího média. Tato kritéria jsou důležitá především pro výrobce. Jak již bylo dokázáno v předchozí části této práce, vyšší hustota materiálu slibuje při stejném průměru zrna vyšší hmotnost a s ní související kinetickou energii. Tvrdość je veličina, ovlivňující především trvanlivost a tvarovou stálost jednotlivých tryskacích částic. Další pozitivní vlastností tryskacích částic s větší tvrdostí je jejich větší zpevňující efekt, jak dokazují materiály získané od firmy OSK-Kiefer GmbH [36].



Tabulka 37: Stanovení váhy důležitosti kritérií.

KRITÉRIUM	K1	K2	K3	K4	Z <sub>er</sub>
EXPERT					
E1	<b>0,133</b>	<b>0,333</b>	<b>0,267</b>	<b>0,267</b>	<b>1</b>
E2	<b>0,444</b>	<b>0,333</b>	<b>0,111</b>	<b>0,111</b>	<b>1</b>
p <sub>r</sub>	<b>0,289</b>	<b>0,333</b>	<b>0,189</b>	<b>0,189</b>	<b>1,000</b>
Pořadí kritérií	<b>2.</b>	<b>1.</b>	<b>3.</b>	<b>3.</b>	

Příklad výpočtu pro E1/K1:

$$\frac{K1}{Z_{er}} = \frac{2}{15} = 0,133$$

Tabulka 38: Ohodnocení variant pomocí metody pořadové funkce.

KRITÉRIUM	K1	K2	K3	K4
VARIANTA				
V1	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
V2	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Typ kritéria	N	N	V	V

Pořadí variant určujeme podle hodnot jednotlivých kritérií. V případě prvního kritéria (drsnost povrchu), dosahuje nejlepší drsnosti varianta číslo 2, proto ji přiřadíme nejvyšší pořadí 2.

Tabulka 39: Určení agregovaného kritéria a výsledného pořadí variant.

KRITÉRIUM	K1	K2	K3	K4	w <sub>t</sub>	Pořadí variant
VARIANTA						
V1	<b>0,133</b>	<b>0,333</b>	<b>0,267</b>	<b>0,533</b>	<b>1,267</b>	<b>2.</b>
V2	<b>0,889</b>	<b>0,667</b>	<b>0,222</b>	<b>0,111</b>	<b>1,889</b>	<b>1.</b>
p <sub>r</sub>	<b>0,259</b>	<b>0,343</b>	<b>0,199</b>	<b>0,199</b>		

Příklad výpočtu pro V1/K1:

$$K1 \cdot \text{pořadí} = 0,133 * 1 = 0,133$$

## 11.6 Vyhodnocení

Z výsledků vícekritériálního rozhodování vyšla jako lepší varianta číslo 2 (ocelový granulát). Tato varianta byla upřednostňována i mnou. Nepřehlédnutelnou výhodou ocelového granulátu je jeho nízká cena ve spojení s lepší dosahovanou drsností povrchu, mezi jeho slabiny patří především velký rozptyl tvrdosti od 40 do 52 HRC.

## 12. Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na technologii pevnostního tryskání ozubených kol převodovky DQ 200 v závodě Škoda Auto ve Vrchlabí. Práce se detailně věnovala optimalizaci tryskání ozubených kol. V teoretické části práce byly blíže specifikovány technologie zpevňování povrchu. Následující kapitola se věnovala integritě materiálu, kde jsem se zabýval především drsností povrchu, tvrdostí a zbytkovým napětím. Poslední kapitola, která byla zařazena do teoretické části byla kapitola s názvem mechanismus tvorby zbytkového napětí, kde jsem se detailně zabýval interakcí tryskacího média s tryskaným povrchem.

Praktická část práce byla složena z pěti kapitol (7, 8, 9, 10, 11), přičemž každá z kapitol pohlížela, na již výše zmiňovanou optimalizaci z jiného úhlu pohledu.

V kapitole 7 se jednalo o problematiku nerovnoměrně otryskaných dílů v rámci jednoho tryskacího trnu. Bylo zjištěno, že díly, které se nacházejí na tryskacím trnu níže disponují větším zbytkovým napětím než díly, které jsou umístěny výše. V rámci této kapitoly byly provedeny celkem tři experimenty 7.1, 7.2 a 7.3. V rámci experimentu 7.1 bylo naměřeno nejvíce vzorků a tento experiment sloužil ke komplexnímu popsání celého procesu. Měření zbytkového napětí probíhalo ve všech třech hloubkách. V závěru bylo zjištěno, že hodnoty zbytkového napětí se liší podle toho, zdali je tryskaný díl v první vrstvě (dole) anebo v páté vrstvě (nahore). Dalším poznatkem bylo zjištění, že hodnota variačního rozpětí zbytkového napětí se liší v závislosti na hloubce, ve které je toto napětí zjišťováno. V reakci na tato zjištění byla navržena dvě opatření. První z nich doporučovalo snížit počet kol na tryskacím trnu. To bylo ale vzhledem k velikosti výroby zamítnuto. Druhé doporučení spočívalo v upravení geometrie metacích lopatek a bylo podrobněji diskutováno v rámci experimentu 7.3. Podkapitola 7.2 se oproti výše zmíněným (7.1 a 7.3) nezabývala primárně měřením zbytkového napětí, nýbrž zkoumala vliv doby tryskání na stupeň pokrytí. Pro provedení tohoto experimentu bylo nezbytné zvolit vhodnou povrchovou úpravu tryskaných kol, která měla sloužit jako indikace, ze které se vyhodnocovala velikost stupně pokrytí. V závěru bylo zjištěno, že vyššího stupně pokrytí dosáhneme delší dobou tryskání.

V kapitole 8 byla zkoumána problematika rozdílných hodnot zbytkového napětí po obvodu ozubeného kola. Řešení bylo rozděleno do tří podkapitol (experimentů). V experimentu 8.1 bylo předpokládáno, že rozdíl v hodnotách zbytkového napětí je způsoben pootáčením kol na tryskacím trnu během tryskání. Vzhledem k tomu, že získané výsledky byly v rozporu s tímto tvrzením o otáčení kol během tryskání byl navržen experiment 8.2. V tomto experimentu jsem přistoupil ke zúžení intervalu pro hloubku leptání z 10  $\mu\text{m}$  na pouhé 2  $\mu\text{m}$ . Ačkoli bylo dodržení tohoto intervalu velmi složité. Výsledky slibovaly o poznání menší rozpětí hodnot. Měření zbytkového napětí v takto úzkém intervalu by však bylo při množství dílů, které jsou denně měřeny obtížně proveditelné, a to především kvůli vyšší časové

náročnosti. V experimentu 8.3 byla zkoumána mikrotvrдость u dílů před a po tryskání. Jak se ukázalo, vedl tento experiment k zajímavým výsledkům. Hlavním cílem experimentu bylo zjistit nehomogenitu ozubeného kola, jelikož bylo předpokládáno, že rozdílná tvrdost v různých místech na povrchu ozubeného kola má vliv na rozdílné hodnoty zbytkového napětí. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že rozpětí naměřených hodnot se pohybuje v intervalu od 40 do 50 HV, což byly vzhledem k přesnosti měření hodnoty zanedbatelné. Zajímavým poznatkem však bylo srovnání mikrotvrđosti u tryskaného a netryskaného dílu, kdy rozdíl činil 100 HV ve prospěch tryskaného dílu. Toto zjištění mě přimělo prozkoumat vliv mikrotvrđosti na velikost zbytkového napětí (viz kapitola 10).

Kapitola číslo 9 byla zaměřena na zvýšení minimální hodnoty zbytkového napětí, a to konkrétně z 600 MPa na 800 MPa pro hloubku (50-60)  $\mu\text{m}$  pod povrchem. V rámci této kapitoly byly navrženy tři experimenty (9.1, 9.2, 9.3), které si dávaly za cíl tento požadavek naplnit. První experiment zkoumal vliv různých otáček stroje (2000, 2300, 2600) na hodnotu zbytkového napětí při konstantní době tryskání (10 sekund). Z výsledků tohoto experimentu vyšlo, že při 2000 ot/min nebylo dosaženo požadované minimální hodnoty zbytkového napětí. Další experimenty proto zkoumaly velikost zbytkového napětí při 2300 ot/min a době tryskání 3, 5 a 7 sekund (experiment 9.2) a dále při 2150 ot/min a době tryskání 3, 5 a 7 sekund (experiment 9.3). Závěrem bylo konstatováno, že ze tří provedených experimentů jsou jedinými vyhovujícími otáčkami 2150 ot/min a doba tryskání 7 sekund, a to jak z hlediska požadavku na minimální hodnotu zbytkového napětí, tak z hlediska vyššího stupně pokrytí v porovnání s časy 3 a 5 sekund.

Kapitola číslo 10 se zabývala zkoumáním spojitosti mezi mikrotvrđostí a zbytkovým napětí. Pro tento experiment byly použity díly z předchozích experimentu. Konkrétně se jednalo o díly tryskané při čtyřech různých stupních otáček (1700, 2000, 2300, 2600) a době tryskání 10 sekund. Hlavní motivací bylo zjistit, zdali by nemohlo být nahrazeno komplikované měření zbytkových napětí měřením mikrotvrđosti, které je dle mého soudu jednodušší a rychlejší. Závěrem bylo vyřčeno tvrzení, že by to teoreticky možné bylo, avšak pouze při nižších otáčkách stroje, protože s rostoucími otáčkami byl pozorován růst směrodatné odchylky naměřených hodnot.

V poslední kapitole (kapitola číslo 11) byly porovnávány dva typy tryskacích médií. Jednalo se o arondovaný sekaný drát (frakce G3) a ocelový granulát. Porovnávání probíhalo z hlediska drsnosti povrchu, ceny tryskacího média, hustoty materiálu, a tvrdosti tryskacího média. Pro výběr lepší z obou variant bylo použito vícekriteriálního rozhodování, které bylo sestaveno jednak z hlediska výrobce a jednak z hlediska spotřebitele. Z vícekriteriálního rozhodování vyšel lépe ocelový granulát.

Vzhledem ke všem výše uvedeným závěrům lze konstatovat, že cíle diplomové práce byly splněny.

## Seznam použité literatury

- [1] VAJSKEBR, Jiří a Zdeněk ŠPETA. *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*. Praha: SNTL, 1984. Knižnice technických aktualit.
- [2] Laser Peening vs. Shot Peening: engineering of residual stresses, surface roughness and cold working. *Metal Improvement Company* [online]. Francie, 2012, (8), 226-231 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2014080.pdf>
- [3] Řízené kuličkování. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2011, (4), 40 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [4] Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials (Basel)* [online]. 2014, **7**(12), 7925–7974 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5456420/>
- [5] CHAMPAIGNE, Jack. *Shot Peening Overview* [online]. 2001, 1-35 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2001012.pdf>
- [6] BLASTING TECHNICAL INFORMATION. In: *M. C. Finishing* [online]. USA: M. C. Finishing, 2015 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://mcfinishing.com/resources/blastingtech.pdf>
- [7] CWTS [online]. Anglie: Curtis-Wright, 2015 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://www.cwst.co.uk/wp-content/uploads/2015/08/czech-shot-peening-1.pdf>
- [8] H.J. Plaster, Technical aspects of shot-peening machinery and media, Proc. 1st Int. Conf. Shot Peening, Paris, Sept. 1981, Pergamon, Oxford, 1981, pp. 83--94.
- [9] *Wheelabrator* [online]. USA: Wheelabrator group, 2017 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/en-us/my-application/application-by-process/what-is-shot-blasting>
- [10] The application of airless wheel blasting systems. *Metal Finishing* [online]. 2010, **12**(108), 14-22 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0026057610000383>
- [11] Measurement of residual-stress distribution by the incremental hole-drilling method. *Science Direct* [online]. 1985, **11**(2), 167-188 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/0378380485900233>
- [12] Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování. *MM Spektrum* [online]. 2007, (5), 28 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>

- [13] Jan Mádl, F. H. (2008). Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností. Ústí nad Labem: Universita J.E. Purkyně, FVTM, Ústí nad Labem. ISBN 978-80- 7414-095- 2.
- [14] RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ TECHNIKA MĚŘENÍ MAKROSKOPICKÝCH ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ. *Materials Structure* [online]. 2002, 9(2), 82-83 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
- [15] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [16] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [17] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R. a BENEDIKT, V. Základní zkoušky kovových materiálů. Plzeň: [s.n.], 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [18] Poznání nehmotného světa zbytkových napětí. In: *Slideplayer* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2433305/>
- [19] F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Grant. NPL - National Physical Laboratory. A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection. [Online] 2001. [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: [http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc4.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc4.pdf). ISSN 1473-2734.
- [20] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. Hodnocení mikrotvrlosti struktur materiálů [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2006, 41 s. [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrlost.pdf>
- [21] BERÁNEK, Libor. Strojírenská metrologie. [přednáška]. Praha: ČVUT, prosinec 2015.
- [22] Holešovský František. Speciální technologie obrábění. [přednáška]. Praha: ČVUT, duben 2016.
- [23] ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ. In: *HomeL* [online]. Ostrava: Technická Univerzita Ostrava, 1999 [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_12.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf)
- [24] Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening. *International Journal of Fatigue*[online]. 1998, 20(5), 351-357 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112398000024>

- [25] An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. International Journal of Fatigue [online]. 2002, 24(8), 877-886 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112301002055>
- [26] STRAUB, John C. Special performance of transmission parts by shot peening. 1. New York: Society of Automotive Engineers, 1973.
- [27] Measuring shot peening media velocity by indent size comparison. Journal of materials procesing technology [online]. 2016, 235(9), 143-148 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0924013616301029>
- [28] Kuhmichel [online]. Německo: Kuhmichel Abrasiv, 2017 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.kuhmichel.com>
- [29] Nekola, Z. (20. 8 2013). Broušení ozubených kol. Mladá Boleslav, Česká Republika.
- [30] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081- 4.
- [31] MIKULČÁK, Jiří. Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [32] Systém měření drsnosti: parametry drsnosti. In: Hommel-etamic [online]. Karoliny Světlé 2546, 415 01 Teplice [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: [http://www.hommel-etamic.cz/files/094\\_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf](http://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf)
- [33] HOMMEL-ETAMIC C8000 Profiloměr: Měřicí pracoviště pro měření profilu povrchu [online]. In: . s. 1 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: [http://www.hommel-etamic.cz/files/products/mereni-drsnosti-a-profilu-povrchu/produkt\\_hommel-etamic-c8000-profilomer.pdf](http://www.hommel-etamic.cz/files/products/mereni-drsnosti-a-profilu-povrchu/produkt_hommel-etamic-c8000-profilomer.pdf)
- [34] ZRALÝ, Martin. Management a ekonomika podniku: úlohy. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04401-8.
- [35] Nástrojová ocel 1.2379 [online]. Česká republika: Bolzano, 2012 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/1.2379\\_cesky.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/NO/1.2379_cesky.pdf)
- [36] Shot peening of gear wheels. In: OSK Kiefer GmbH [online]. Germany: OSK Kiefer [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: [https://osk-kiemer.de/wp-content/uploads/09-shot\\_peening\\_of\\_gears.pdf](https://osk-kiemer.de/wp-content/uploads/09-shot_peening_of_gears.pdf)
- [37] TL 4227. Germany: Volkswagen, 2013.
- [38] VW 50019. Germany: Volkswagen, 2015.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>Symbol</b>	<b>Popis</b>	<b>Jednotka</b>
$\varepsilon^{m\ddot{r}}$	relativní změna meziatomové vzdálenosti	[m]
$d_0$	meziatomová vzdálenost (nenapjatý stav)	[m]
$d$	meziatomová vzdálenost (napjatý stav)	[m]
$\theta_0$	velikost Braggova úhlu (napjatý stav)	[°]
$\theta$	velikost Braggova úhlu (nenapjatý stav)	[°]
$E_k$	kinetická energie	[J]
$m$	hmotnost tělesa	[kg]
$v$	rychlost tělesa	[m/s]
$\Delta \sigma_z$	rozpětí naměřených hodnot	[MPa]
$R_z$	maximální výška profilu	[ $\mu$ m]
$l_n$	měřená délka	[mm]
$l_r$	základní délka	[mm]
$z_{er}$	součet váhy důležitosti kritérií	[1]
$p_r$	váhy kritérií	[1]
$W_t$	vážený součet pořadí	[1]

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
DQ 200	automatická převodovka s typovým označením DQ 200
HRC	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
HB	tvrdost dle Brinella
G3	ocelový sekaný drát (arondované zrno)
S110	ocelový granulát s nominálním průměrem zrna 0,3 mm
V	označení varianty
K	hodnotící kritérium
E1/E2	ohodnocení z hlediska výrobce/spotřebitele

## Seznam příloh

Příloha 1      Protokoly měření drsnosti povrchu. Kapitola 11.1, tabulka 34.