

# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Integrita povrchu a měření zbytkových napětí**

**Surface integrity and residual stress measurement**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

**Daniel Holeš**

**Praha 2017**

zadání

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Integrity povrchu a měření zbytkových napětí vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....

## **Poděkování**

Rád bych chtěl především poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi, který mně věnoval dostatek svého času a byl mně při dané práci vždy oporou.

Dále bych chtěl také poděkovat své rodině, která mě celou dobu podporovala a řádně motivovala.

# Anotační list

Jméno autora: Daniel Holeš

Název BP: Integrita povrchu a měření zbytkových napětí

Anglický název: Surface integrity and residual stress measurement

Rok: 2017

Obor: Teoretický základ strojního inženýrství

Ústav: Technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Bibliografické údaje: Počet stran 41

Počet obrázků 25

Počet tabulek 7

Klíčová slova: Integrita povrchu, zbytkové napětí, drsnost, lopatky

Keywords: Surface integrity, residual stress measurement, hardness, blades

**Anotace:** Tato bakalářská práce je věnována integritě povrchu. V rešeršní části je detailně rozpracován rozbor jednotlivých složek integrity povrchu, metody jejich měření a hodnocení. Samostatná kapitola je věnována metodám měření zbytkových napětí. Experimentální část popisuje měření zbytkových napětí segmentů lopatek po balotinování s využitím mechanické metody vetknutého nosníku.

**Abstract:** I have devoted my bachelor thesis to surface integrity. The theoretical part of this thesis is about a detailed analysis of individual components of surface integrity, methods of their measurements and evaluation. Another part is devoted to the residual stress measurement methods. In the experimental part I describe measurements of the residual stress of the blade segments after balotimization using the mechanical method of the girder beams.

## Obsah

1	Úvod .....	7
2	Teoretická část .....	8
2.1	Integrita povrchu .....	8
2.1.1	Vliv na integritu povrchu .....	8
2.1.2	Charakteristika integrity povrchu .....	10
2.1.3	Drsnost povrchu .....	10
2.2	Analytické metody pro hodnocení integrity povrchu.....	11
2.2.1	Měření drsnosti .....	11
2.2.2	Mikrogeometrie povrchu po obrábění.....	12
2.2.3	Kapilární zkoušky .....	14
2.2.4	Strukturní změny v povrchové vrstvě po obrábění .....	14
2.2.5	Změny mechanických charakteristik .....	16
2.3	Zbytková napětí.....	18
2.3.1	Dělení zbytkového napětí.....	19
2.3.2	Důvod vnesení zbytkových napětí do součástí.....	20
2.4	Metody měření zbytkových napětí.....	22
2.4.1	Druhy metody měření zbytkových napětí .....	22
2.4.2	Zvolená metoda měření zbytkového napětí .....	24
3	Experimentální část .....	25
3.1.1	Popis a úprava vzorku.....	25
3.1.2	Zařízení pro měření zbytkového napětí.....	26
3.1.3	Postup měření .....	28
3.1.4	Výpočet.....	29
3.1.5	Popis experimentu.....	32
3.1.6	Závěr experimentu .....	37
4	Závěr .....	40
5	Literatura .....	41

# 1 Úvod

V dnešní době je velice důležité, aby všechny postupy při výrobě byly sledované a opakovatelné. Výsledný povrch součásti musí být vždy geometricky přesný a hlavně provozně spolehlivý, aby nedošlo ke zhroucení součásti či nízké životnosti vlivem únavy a dalších degradačních procesů působících na finální povrch součásti. To znamená, že dokončovací metody jsou velice důležité, protože mají velký vliv na výslednou dynamickou pevnost a požadovanou životnost.

V základní části mé bakalářské práce se zabývám stručným popisem integrity povrchu, složkami drsnosti a metodami měření zbytkových napětí. V rámci řešení jsou také identifikovány mechanismy s dopadem na kvalitu povrchu. Dále jsem se zaměřil na zbytkové napětí, které na konci své práce praktikuji v experimentální části.

Vzorky, které jsem použil při experimentální části jsou z titanové slitiny Ti6Al4V, která je velice rozsáhle používána v leteckém průmyslu. Jedná se o segmenty lopatek, které jsou určeny pro použití v turbovrtulových motorech. Tyto lopatky byly dokončeny ručním balotínováním.

## 2 Teoretická část

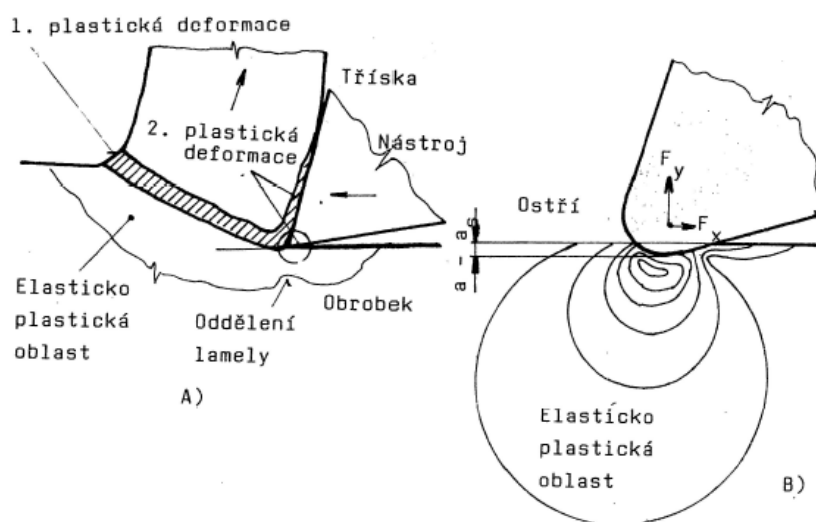
### 2.1 Integrita povrchu

Podle literatury můžeme definovat integritu povrchu následovně: „Soubor charakteristik, které popisují vliv povrchové vrstvy, může být různě široký, nejen s ohledem na použité výrobní technologie a na způsob zatěžování součásti v provozu, ale i se zřetelem na technické možnosti, ekonomické a organizační aspekty kontroly.“ [1]

U integrity povrchu zaznamenáváme zbytkové napětí, tvrdost a mikrostrukturu materiálu, které určujeme vztahem mezi fyzikálními a geometrickými vlastnostmi. [1]

#### 2.1.1 Vliv na integritu povrchu

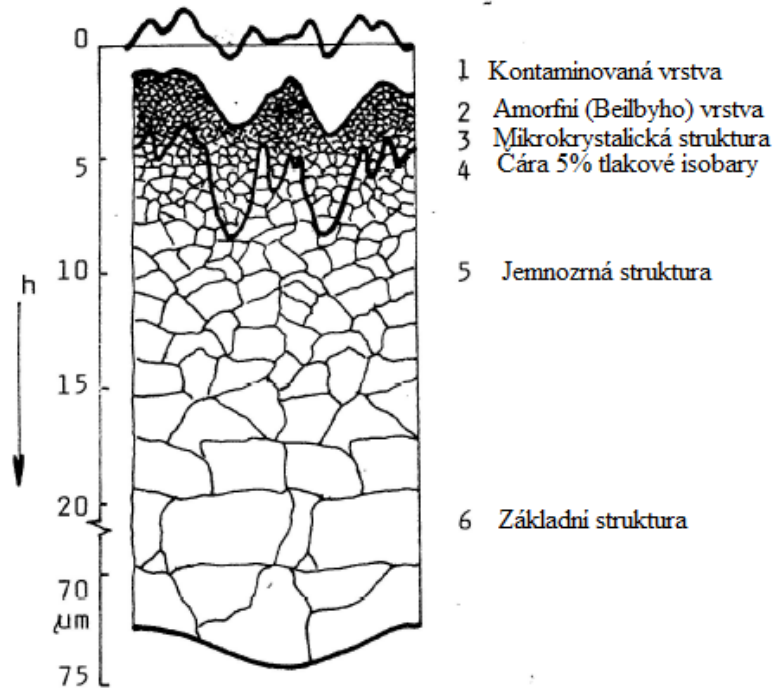
Jelikož každý má specifické požadavky při výrobě svého obrobku, je nutné dávat pozor na zvolení hloubky a správného charakteru narušení povrchové zóny. Musíme se tedy zabývat vysoce namáhanými součástmi, které jdou vyjádřit jak fyzikálním stavem povrchu, tak mechanickými vlastnostmi. Nejpoužívanější charakteristikou zjišťování kvality povrchu bylo a je měření drsnosti povrchu. Na obrázku si můžeme udělat základní představu o mechanismu tvorby třísky, která generuje mechanické napěťové a teplotní pole v povrchu obrobku. (Obr.1) [1]



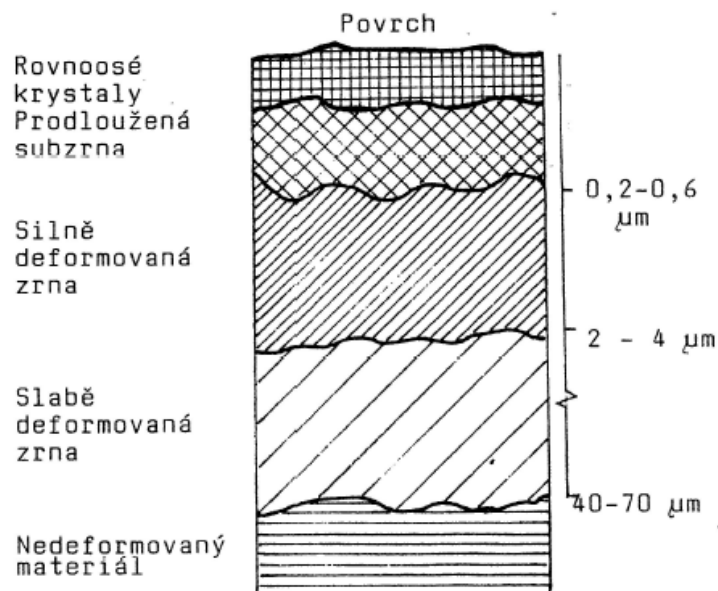
Obr.1 Primární a sekundární elasticko-plastická oblast vyvolaná mechanismem řezání [1]



Z daného obrázku můžeme říci, že při standartním obrábění dochází k intenzivní plastické deformaci do malé hloubky (několika  $\mu\text{m}$ ) povrchové vrstvy obrobku. Tohle tvrzení můžeme potvrdit následnými obrázky, které znázorňují vzhled struktury pod povrchem vrstev po daném obrobení nástrojem. (Obr.2 , Obr.3) [1]



Obr. 2 Kolmý řez povrchovou vrstvou nelegované oceli [1]



Obr. 3 Skladba různě ovlivněných povrchových vrstev při soustružení tvářené Al slitiny [1]

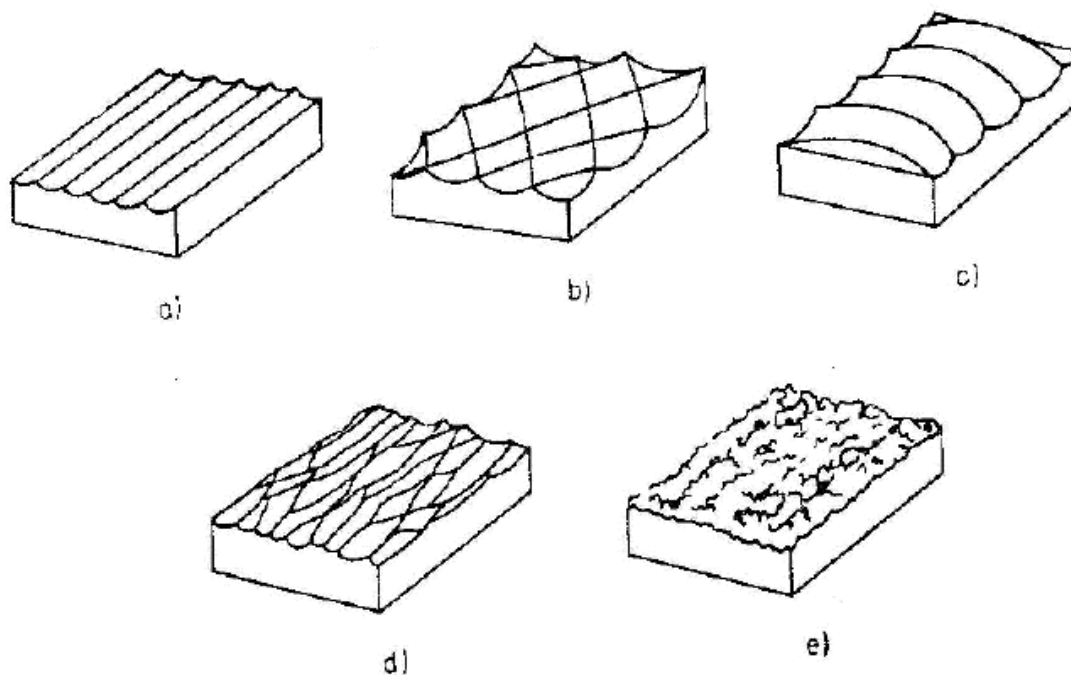
### 2.1.2 Charakteristika integrity povrchu

Pro úplnou charakteristiku povrchu je důležité prozkoumat hlubší vlastnosti povrchových vrstev. Jako základní charakteristiky, kterými můžeme posoudit integritu povrchu, jsou:

- **Topografie povrchu** – zabývá se geometrickými charakteristikami povrchu, jako jsou například měření drsnosti povrchu.
- **Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě** – strukturní změny kladou velký vliv na zbytkové pnutí, ale také na materiálové vlastnosti v povrchové vrstvě. Tento přístup umožňuje stanovit mechanické vlastnosti a strukturu povrchové vrstvy a její chemické složení.
- **Stupeň, hloubka a charakter zpevnění** – Zpevnění povrchové vrstvy nastává, když poloměr ostří způsobí deformaci řezu pod úroveň povrchu plochy řezu. Následkem toho dochází k změně mechanických vlastností povrchové vrstvy jako jsou tvrdost, pevnost, houževnatost.
- **Smysl, velikost a průběh zbytkových pnutí [2]**

### 2.1.3 Drsnost povrchu

Další složka, která má vliv na povrch součásti, je drsnost. „*Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu plochy, která je tvořena jistou technologickou metodou, je možné hodnotit ze dvou hledisek. První je prostorové uspořádání (textura, morfologie) povrchu, které je vyjadřováno především jeho drsností. Druhým hlediskem jsou fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy součásti.*“ [3] Stupeň drsnosti je určen mikro nerovnostmi, které vznikly při obrábění. Způsob obrábění poznáme podle vzhladu, který závisí hlavně na kinematice obrábění, kterou můžeme vidět na obrázku 4. „*Jedním z předpokladů řešení jakosti odpovídajícími ukazateli, závislými na jakosti povrchu, je objasňování mechanismu vytváření drsnosti povrchu, a to v závislostech na vlastnostech použitého materiálu, metodách dokončování, pracovních podmínkách, na nástrojích, obráběcích strojích a dalších konstrukčních i technologických parametrech.*“ [3]



Obr. 4 základní typy povrchu a,b, c – anizotropní, d – s méně výrazným směrem profilu, e – izotropní [3]

V příčném a podélném směru musíme rozlišovat drsnost obrobenej plochy povrchu. Příčný směr můžeme konstatovat jako kolmý ke směru řezného pohybu, a naopak podélný směr bude rovnoběžný s řezným pohybem. Základní délku při měření drsnosti si zvolíme pomocí funkce obrobenej plochy, která závisí na tvaru a rozměru tolerance. Musíme dát také pozor na to, jestli se plochy dotýkají napevno, nebo jsou ve fázi posuvné, otáčivé nebo zdali nejsou požadované zvláštní podmínky. [3]

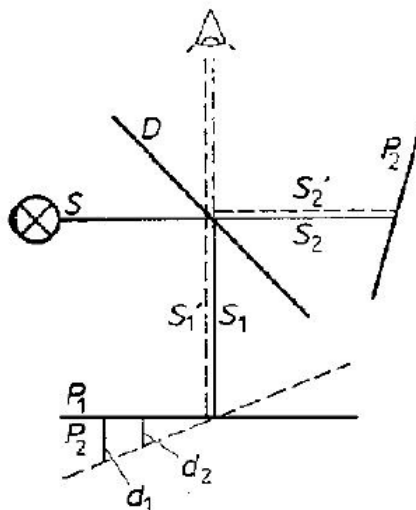
## 2.2 Analytické metody pro hodnocení integrity povrchu

### 2.2.1 Měření drsnosti

Měřit drsnost můžeme takzvaným kvalitativním hodnocením povrchu, které se hodnotí pomocí lidských smyslů. Použijeme k tomu hmat (někdy zrak, optiku), etalon a porovnávací vzorky. Pomocí světelného mikroskopu můžeme poznat přesnost  $1 \mu\text{m}$ , ale při značném tréninku můžeme pomocí hmatu rozpoznat rozdíl až  $0,1 \mu\text{m}$ . „Cvičným hmatem lze u dvou ploch obrobenejch stejným způsobem rozlišit rozdíl v drsnosti až  $0,1 \mu\text{m}$ .“ [3]

Přesnější měření drsnosti je ale pomocí dotkových přístrojů. Tento způsob metody měření funguje na principu rovnoměrného posuvu přístroje, který má na konci hrot, díky kterému přejíždí a zaznamenává celý povrch součásti. Ve většině případů se současně s posuvem hrotu pohybuje opěrná patka, se kterou ve výsledku zaznamená výsledný profil jako rozdíl hrotu a patky. „Po měřeném povrchu se posouvá rovnoměrnou rychlostí měřící dotek s velmi malým zaoblením hrotu, případně se posouvá kontrolovaná plocha pod měřícím hrotem.“ [3]

Další metoda měření drsnosti je interferenční metoda. Tento postup měření můžeme zařadit mezi optické metody. Optické metody mají obecně lepší výsledky měření než metody, které měří drsnost povrchu kontaktním způsobem. Tenhle fakt je způsoben tím, že hrot snímače je zaoblen, ale na druhou stranu je potřeba, aby povrch součásti byl značně vyčištěn.



Obr. 5 Schéma Michelsonova interferometru [3]

Princip metody spočívá v tom, že paprsek světla vyjde ze zdroje S a pokračuje na polopropustnou diodu, kde se rozdělí. Jedna část paprsku se rozdělí na měřenou součást a druhá část paprsku se přemístí na referenční zrcadlo. Poté se paprsky odrazí nazpátek a projdou skrze diodu do objektivu, kde se složí. Daný výstup objektivu můžeme vidět na obrázku 5. Můžeme použít různé druhy interferometrů, ale princip bude vždy stejný. [3]

### 2.2.2 Mikrogeometrie povrchu po obrábění

Jelikož u každého obrobku požadujeme určitý tvar, drsnost nebo přesnost povrchu, musíme provést více operací, protože prvním opracováním nebo vyrobením obrobku nedosáhneme potřebné kvality a zadaných požadavků. Daný obrobek několikrát obrobíme tak,

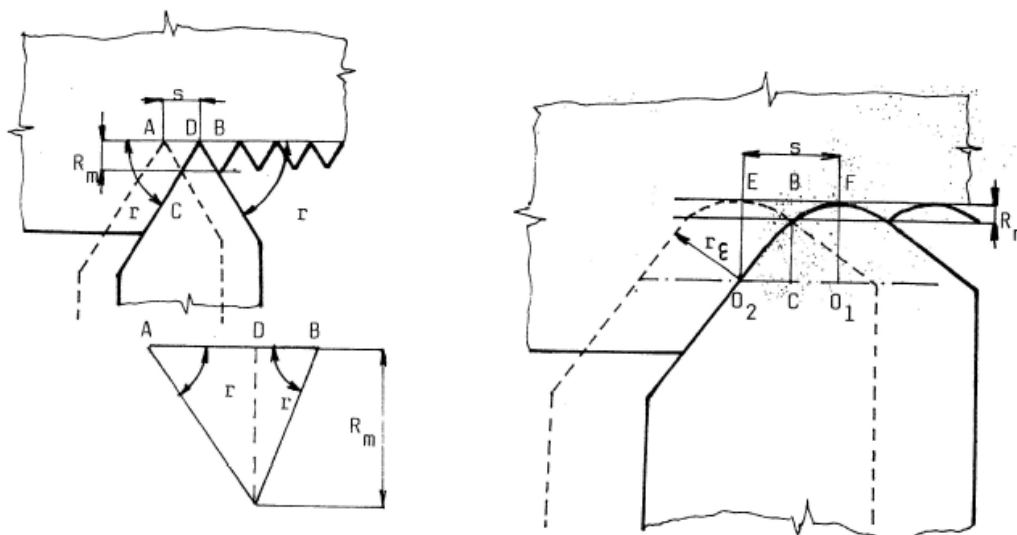
že břit řezného nástroje odebere ponechané přídavky. Z toho můžeme vyvodit, že mikrogeometrie povrchu závisí na tvaru břitu nástroje a jeho pohybu vůči obrobku.

„Mikrogeometrie povrchu je charakteristika prostorová, a proto ji nelze definovat jediným parametrem. Takto pojatá mikrogeometrie se nazývá drsnost povrchu a kvalitativně se klasifikuje vertikálními, horizontálními a doplňujícími údaji o profilu povrchu.“  
[1]

Z daného obrázku lze vyvodit rovnici, která nám vypočítá teoretickou výšku nerovnosti např. při soustružení. (Obr. 6)

$$R_m = \frac{s^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (\mu m)$$

Kde  $r_\epsilon$  je poloměr špičky břitu



Obr. 6 Schéma vzniku kinematické drsnosti povrchu při soustružení [1]

Hodnota, kterou změříme při nerovnosti povrchu po obrábění kovových materiálů, je ve skutečnosti větší. Důsledkem toho jsou fyzikální procesy, které narušují a zvětšují opotřebení břitu nástroje v průběhu operace.

Břit není sestrojen tak, aby byl dokonalý ke každé rovině čela a hřbetu. Je sestrojen a zaoblen tak jako v případě obrázku 1. Důležité je nejen dodržovat správně pružné a

plastické deformace v důsledku dobrého oddělení třísky, ale také tření a deformace, které vzniknou při styku zaobleného břitu s obrobeným povrchem. [1]

### 2.2.3 Kapilární zkoušky

Špatně zvolený postup obrábění, nástroj, stroj nebo pracovní podmínky může vést k opakovanému nebo nepravidelnému se tvoření vad na povrchu a v podpovrchových vrstvách. Uvedené vady nevznikají jen při konečné metodě zpracování, ale mohou vzniknout při kterékoli operaci před tím. Kvůli toho je nezbytné zjistit, jaký je typ poškození, velikost, četnost a rozložení dané deformace, abychom zajistili požadovanou kvalitu povrchu.

Hlavní metody zjišťování vad povrchu můžeme rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Z destruktivních metod se používá například metalografické hodnocení řezu povrchem, ale ve většině případů zvolíme metodu nedestruktivní. [1]

Nejčastěji používané nedestruktivní metody jsou:

**Vizuální** – povrch obrobku zkontrolujeme pouhým okem nebo použijeme různá optická zařízení. U některých případech můžeme povrchovou úpravou zvýraznit oxidací Al slitin.

**Kapilární** – pomocí vhodných vlastností kapalin využijeme penetrace kapaliny, která pronikne do trhlin obrobku. Správně zvolená kapalina dokáže také místo vady zvýraznit fluorescenční metodou.

**Magnetoinduktivní a elektroinduktivní** – „tato metoda používá budičů, které rozptylové pole indukují elektrickou cestou. Snímací čidla jsou zpravidla tvořena vhodně uspořádaným vinutím nebo speciální sondou. Metody jsou vhodné pro zjišťování povrchových i podpovrchových vad, zvláště plošného charakteru.“ [1]

**Ultrazvukové** – ultrazvuk funguje na bázi vln, které nám zaznamenávají výskyt defektů v daném obrobku. Zaznamená polohu a velikost vady nezávisle na tom, jestli je materiál magneticky nebo elektricky vodivý. [1]

### 2.2.4 Strukturní změny v povrchové vrstvě po obrábění

Při správném zvolení řezných podmínek u obrábění většinou nedochází k dosažení takových kritických teplot, aby se struktura povrchové vrstvy změnila. Značné

strukturní změny lze dosáhnout nesprávným broušením ušlechtilé oceli s martenzitickou strukturou. Použitím nesprávného principu broušení může způsobit dva základní typy podpovrchových struktur:

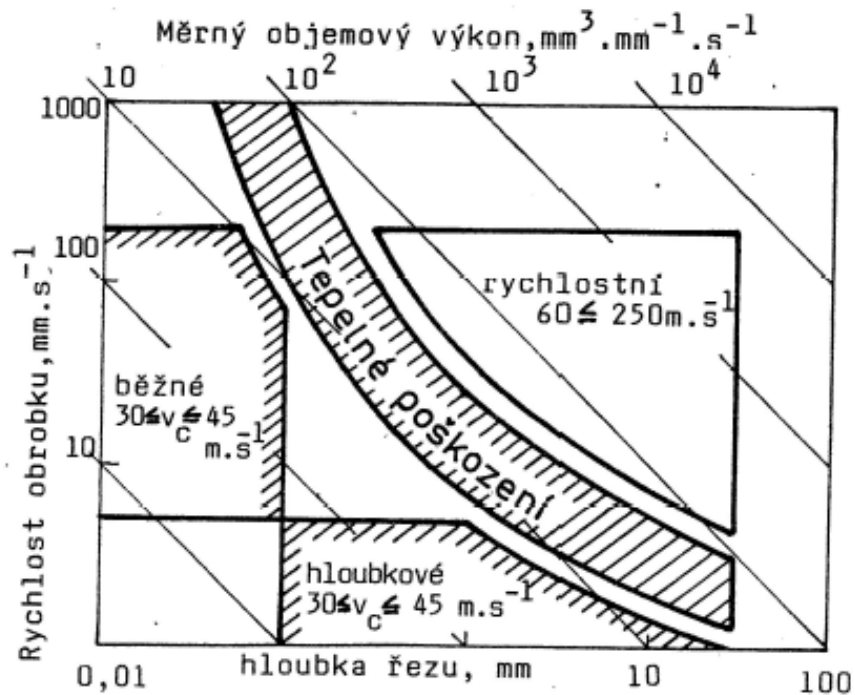
1) **Vysokopopuštěný martenzit** – tloušťka vrstvy a stupeň popuštění nám znázorní, jak dlouho působila styková teplota broušení na obrobek. Na povrchu můžeme vidět tzv. opaly, které mají barvu žluté a hnědomodré barvy díky vrstvě kysličníku.

2) **Martenziticko-austenitická vrstva** – vznikne, když styková teplota broušení překročí určitou teplotu oceli v danou kritickou dobu. Díky tomu vznikne austenit, který se při tomhle sekundárním zakalení těžko rozpadá a tvoří až 50% obsahu. Struktura je hodně jemná a přiléhající vrstvy obsahují martenzit s nižším stupněm tetragonality než ten, který je obsažen v jádře. Povrch opalu je silně modrý.

Jestli se vyskytnou nějaké zmíněné změny, tak to vše závisí hlavně na režimu broušení. Nejdůležitějším aspektem je řezná rychlost, která výrazně ovlivňuje teplotu a stupeň deformace v místě styku abrazivních zrn s obrobkem. Podstatné je také, jak dlouho působí tyto faktory. Na obrázku číslo 7 můžeme vidět, jaký mají vliv řezné podmínky na tepelné působení povrchu. [1]

Na obrázku číslo 7 můžeme určit, že je důležité, abychom zvolili správnou kombinaci pracovních podmínek, aby nedošlo k tepelnému poškození povrchových vrstev.

U těžkoobrobitelných, žárupevných a žáruvzdorných slitin, u materiálů odolných vůči korozi, u titanových slitin o kterých víme, že mají špatnou tepelnou vodivost, je velké riziko poškození povrchové vrstvy při tepelném řezání. U titanových slitin je riziko, že při nevhodném obrábění se může změnit struktura složky fáze  $\alpha$  a  $\beta$ , která bude mít za následek špatné funkční vlastnosti povrchové součásti. [1]



Obr. 7 Oblasti vhodných pracovních podmínek pro konvenční, hloubkové a rychlostní broušení [1]

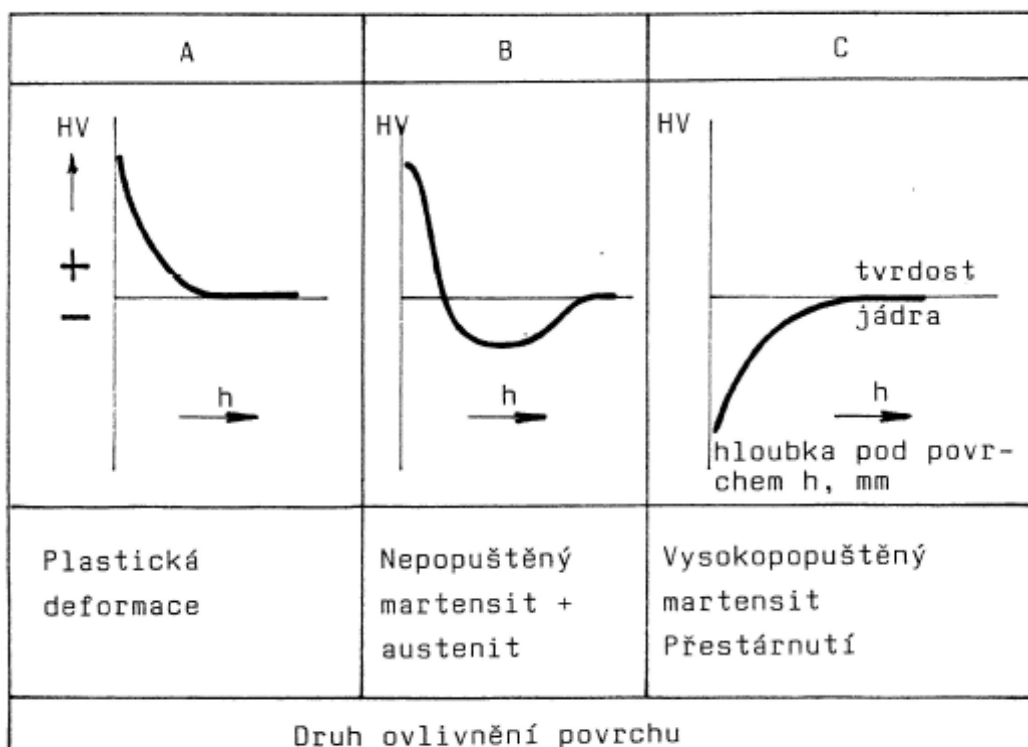
## 2.2.5 Změny mechanických charakteristik

„Intenzita tepelných, mechanických nebo chemických vlivů doprovázejících obráběcí proces určuje velikost případných změn mechanických vlastností nově vytvořené povrchové vrstvy.“ [1]

Dané charakteristiky povrchové vrstvy posuzujeme hlavně podle změn tvrdosti. Jelikož se většinou změny nachází ve velmi tenkých vrstvách, hodnotíme je podle průběhu mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pod povrchem.

V praxi nejčastěji používáme tři charakteristické průběhy, které můžeme vidět na obrázku 8. V grafu A můžeme vidět zpevnění a v grafu C můžeme vidět odpevnění. V grafu B se jedná o zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra. To nastává, když je např. sekundární zakalení způsobeno broušením nebo laserem. [1]





Obr. 8 Nejběžnější průběhy mikrotvrlosti v ovlivněných povrchových vrstvách [1]

U materiálů jako jsou měkké a tvárné kovy dochází při metodě řezání ke zpevňování povrchu z důvodu, že krystalová mřížka byla narušena a vznikla tak její přestavba. Tohle zpevnění se nám projeví na větší pevnosti, mezí kluzu a tvrdosti materiálu. Naopak to sníží tažnost a vrubovou houževnatost. Díky plastické deformaci můžou působit vyšší teploty při obrábění v závislosti na řezných podmínkách. V souvislosti s délkou působení může v povrchové vrstvě nastat nezávisle na hloubce proces zotavování a odpevňování.

Zhodnocení mechanických charakteristik pro měření tvrdosti nejčastěji využíváme ostrá vnikací tělíska podle Vickerse nebo Knoop a malá zatížení. Když používáme měření podle Vickerse, je hloubka vtisku 1/7 délky úhlopříčky vtisku. Vzniklý vtisk vložíme do hodnoceného povrchu nebo také do jeho kolmého či šikmého řezu a poté ho vyhodnotíme mikroskopicky. [1]

## 2.3 Zbytková napětí

Zbytkové napětí je jedno z hlavních témat integrity povrchu. Jeho působení na životnost a únavu materiálu je zásadní, a proto by se nemělo brát na lehkou váhu.

Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí je plastická deformace. Daná deformace je součástí zóny řezu. Pole napětí se rozloží v obrobku a nástroji, které je v místě řezání. Do celého objemu obrobku je rozložená pružná deformace. Před tím, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku, smykové napětí vzroste do určité míry. Poté nástroj pokračuje a plastická deformace roste a nastává pětování, což má za následek posun vrstev materiálu. Jak se oddělí tříška, tak se plastická deformace ukončí. Napětí v materiálu se zvětšuje při každém dalším pohybu nástroje a dosahuje vyšší hodnoty, než je mez stříhu. Nakonec se tříška oddělí pod úhlem stříhu. „*Pnutí v povrchových vrstvách obrobku následkem obrábění má značný vliv na vlastnosti obrobku – především je ovlivněna mez únavy*“ [4]

Jestli na soustavu působí vnější síly nebo momenty, začnou vznikat napětí, která označujeme jako vložená. Právý opak je zbytkové napětí. Protože součást nepotřebuje, aby na ní působily nějaké síly nebo momenty z důvodu toho, že v součásti neustále setrvávají. Z toho můžeme vyvodit, že rozdělení napětí dělíme na okamžitá nebo trvalá. Okamžitá napětí zaniká z důvodu, že jsme odstranili příčiny, které byly způsobeny např. rozdílem teplot v různých místech součásti. V silové nebo momentové rovnováze je součást, která má trvalé zbytkové napětí. Změna nastane, pokud se součást naruší. Tím dojde ke změně zbytkových napětí a vznikne zdeformování součásti. [4]

Pro každou součást je ideální stav zbytkového napětí rozdílný, protože např. tlakové zbytkové napětí se používá při dynamicky namáhané součásti z důvodu, že zabraňuje šíření trhlin, mikrotrhlin v povrchu a tím navýší únavovou pevnost materiálu. Únavovou pevnost materiálu můžeme vylíčit těmito způsoby:

- Nerovnoměrná plastická deformace způsobená mechanickými silami (silové účinky rezných sil při obrábění).
- Nerovnoměrný ohřev nebo ochlazení teploty v součásti.
- Nerovnoměrná fázová transformace nebo vylučování nových strukturních složek, které vznikají při procesu řezu.
- Absorpce nových látek do povrchové vrstvy. [2]

### 2.3.1 Dělení zbytkového napětí

Zbytkové napětí dělíme podle objemu, ve kterém jsme dosáhli rovnováhy.

#### • **Zbytkové napětí I. druhu**

➤ Makroskopické napětí vznikne, když stupeň plastické deformace je různorodý vůči průřezu tělesa zdeformované části. Když se vnější zatížení odstraní, oblast materiálu, která se rozpíná mezi ostatní oblasti, se opět vrátí do své předešlé polohy, a proto v přilehlých oblastech existují pnutí jak tahové, tak tlakové.

➤ Jestli že přerušíme silové a momentové rovnováhy, docílíme toho, že se vždy změni makroskopické rozměry tělesa.

#### • **Zbytkové napětí II. druhu**

➤ Mikroskopické napětí vzniká při interakci zrn v polykrystalických kovech. K napětí druhého druhu také můžeme přiřadit napětí jednoho zrna, které díky své struktuře patří mezi interakce jednotlivých bloků. Důsledek těchto napětí je heterogenita fyzikálních vlastností daných složek polykrystalu, kde byly stísněné podmínky deformace jednotlivých zrn, což mělo za následek anizotropii vlastností. Nejpodstatnější příčinou pro výskyt jsou fázové přechody, změny teploty nebo anizotropie mechanických vlastností jednotlivých zrn.

➤ Časové změny, které zvýší nebo sníží velikost jednotlivých zrn, mají za důsledek značné pnutí.

➤ Když náhle změníme teplotu, může vypuknout makroskopické napětí v konsekvenci s různými kovovými prvky, které mohou mít jinou lineární roztažnost, a to způsobí rozdíl v lineární expanzi velikosti krystalografických os.

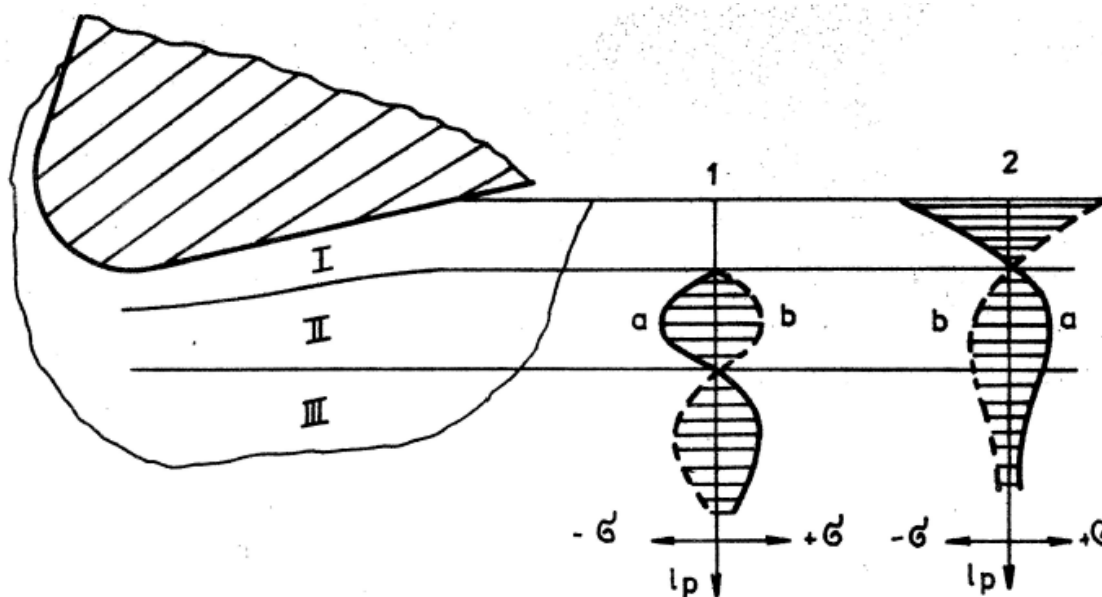
#### • **Zbytkové napětí III. druhu**

➤ Submikroskopická napětí způsobují hromadění velkého počtu dislokací v okrajových vrstvách. To má za následek porušení atomové mřížky a tím se vytváří napětí třetího druhu. Vzniká tam silové působení mezi jednotlivými zrny, které nám vytváří pole mikropnutí (pokryje celý povrch zrna).

[4] [5]

### 2.3.2 Důvod vnesení zbytkových napětí do součásti

Pokud zatížíme povrchovou vrstvu mechanicky, způsobí to mechanické zatížení. Když budeme obrábět při nízkých teplotách, v povrchu bude probíhat plastická deformace, a proto pod daným povrchem bude materiál namáhaný elasticky. To si můžeme názorně ukázat na obrázku. (Obr. 9)



Obr. 9 Mechanicky zatížená vrstva a průběhy napětí [2]

Ke snížení hustoty a zvýšení měrného objemu dochází při plastické deformaci. Jednotlivá zrna materiálu jsou deformovaná neboli prodloužená s následkem předešlých vlivů plastické deformace, u kterých mohou nastat dva případy meze kluzu a meze pevnosti. [2]

#### 1. $R_m / R_{p0,2} < 1,25$

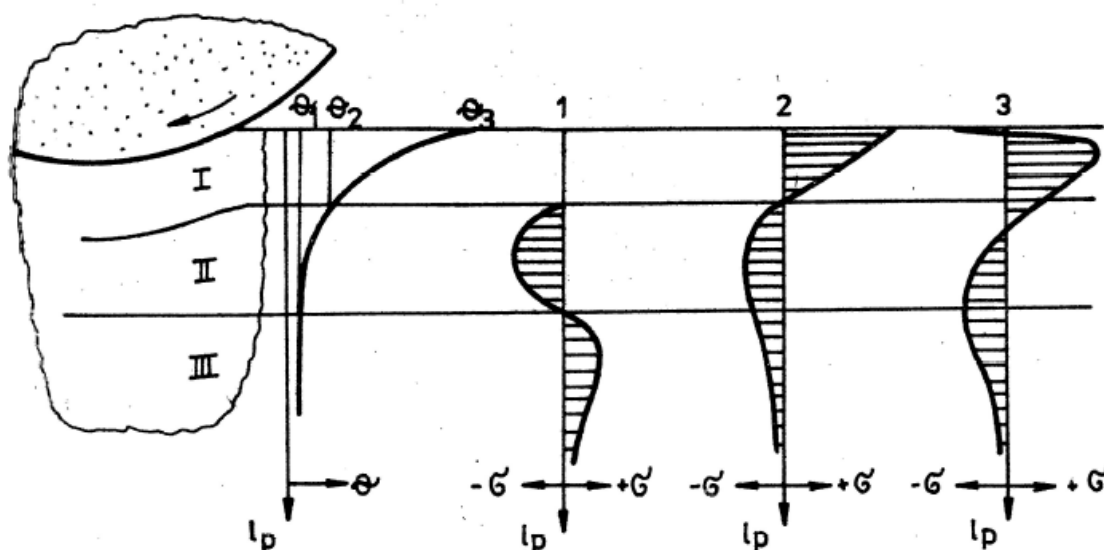
➤ “Prodlužují se zrna ve směru vzniklého povrchu v důsledku tření na hřebtu i v důsledku prodloužení deformované vrstvy I na obrázku 9 pod břitem řezného nástroje. Toto prodloužení se přičítá k předchozímu mechanismu růstu objemu materiálu v důsledku plastické deformace. Výsledkem působení těchto činitelů dojde k celkovému prodloužení vrstvy I. V důsledku působení břitu na elasticky deformovanou vrstvu II dochází též k jejímu prodloužení. Pokud by

tato vrstva II nebyla spojena se spodní nedeformovanou vrstvou III, vznikl by v ní tah. Tomu však brání ve skutečnosti vrstva III. Proto se vytvoří ve vrstvě II tlak, který se vyrovnává tlakem ve vrstvě III – pozice 1, graf a.“ [2]

## 2. $R_m / R_p 0,2 > 1,25$

➤ Když budeme obrábět houževnaté a plastické kovy, dojde k protažení zrn v povrchu až do kolmého směru na obráběný povrch. Díky tomu se zkrátí tato vrstva. Způsobená plastická deformace a změna hustoty materiálu většinou převáží tento vliv.

Pokud je povrchová vrstva zatěžována mechanicky a tepelně např. při broušení, vzniká pnutí tahové následným způsobem. (Obr. 10) Při vysokých řezných rychlostech se většinou povrch vrstvy pod nástrojem silně ohřeje. Znázorněný obrázek 10 ukazuje průběh teplot  $\Theta$  v povrchové součásti. Když zjistíme, že teplota  $\Theta_2$  byla přesažena, můžeme předpokládat, že vrstva I je v plastickém stavu, tzn. že vrstva II je bez napětí a vlivu na vrstvu I. To znamená, že vrstva II se prodlužuje elasticky a neovlivní vrstvu III. Poté, co nástroj přejede povrch, zchladne. Sotvaže se teplota přesune pod  $\Theta_2$ , materiál se dostane z plastického stavu a bude se snažit smrštít. Bohužel v tom mu zabrání vrstva II a III graf 2. Ve skutečnosti nám graf 2 neodpovídá přesnému zbytkovému pnutí. Zaznamenaný pokles napětí v povrchu bude nastaven změnou struktury chemického složení viz. Obr. 10 graf 3. [2]



Obr. 10 Povrchová vrstva mechanickým a tepelným zatížením [2]

## 2.4 Metody měření zbytkových napětí

### 2.4.1 Druhy metody měření zbytkových napětí

V dnešní době je velké množství metod, jak změřit zbytkové napětí. Většinou zvolíme metodu, která má společnou charakteristiku, ale neměříme přímo zbytkové napětí. Zaměříme se na měření deformace součásti nebo změření fyzikálních veličin jako například šíření vln nebo mechanické změny, jako je uvedené v Tab. 1. Dané metody můžeme také dělit podle míry poškození změřené součásti na:

- **Destruktivní metody měření** – při těchto metodě měření dochází k poškození součásti. Ve většině případů zahrnují destruktivní metody mechanické, protože účel měření je zjistit velikost deformace, kterou zjistíme po odstranění určitého objemu materiálu.

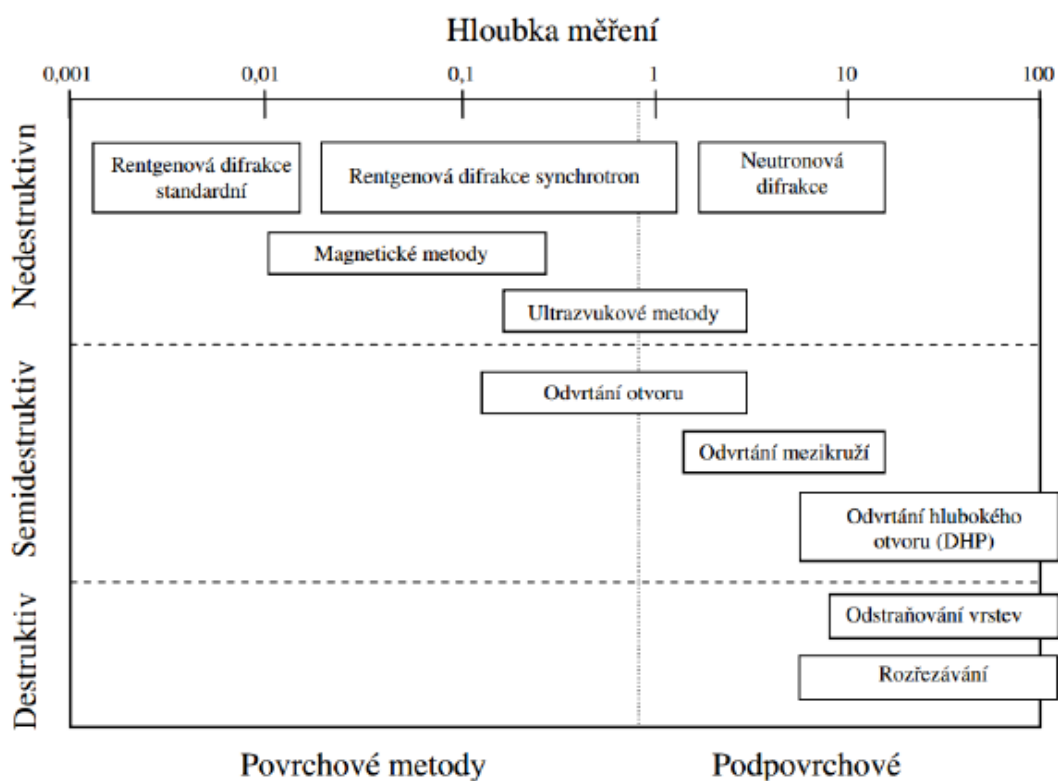
- **Polodestruktivní metody měření** – operace se uskuteční přidáním určité části materiálu, kterou na konci měření odebereme. Nejznámější prováděnou zkouškou je vrtání otvoru. Tato zkouška je založena na přerozdělení napětí v povrchu části materiálu po odvrtání.

- **Nedestruktivní metody měření** – z názvu již můžeme poznat, že se nebude jednat o žádný zásah do povrchu součásti, ale budou sem patřit např. metody fyzikální, jako je třeba difrakční tenzometrická analýza. [6] [7]

Tab. 1 Metody zjišťování zbytkových napětí [7]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součástí	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
		kroužek	odstranění vnitřní vrstvy
			rozříznutí
			změna křivosti
	obecný tvar	podélné pásy z kroužků	
		metoda sítě	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
		křehké modely	vznik trhlin
Fyzikální RTG		difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk	obecný tvar	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

Způsobů měření zbytkového napětí je velké množství a popis každého z nich by byl nad obsahový rámec mé práce. Proto si je shrneme na obrázku 11 a podrobněji se budu věnovat jedné metodě, kterou jsem využil při svém měření.



Obr. 11 Rozdělení metod pro měření zbytkového napětí [8]

#### 2.4.2 Zvolená metoda měření zbytkového napětí

Vzorek, na kterém jsme měřili zbytkové napětí, byl část lopatky, která byla ze slitiny Ti6Al4V. Z důvodu dostupnosti jsme k měření použili laboratoř Ústavu obrábění, projektování a metrologie. Aplikovali jsme metodu mechanickou. Mechanická metoda byla zaměřena na elektrolytické odleptávání vrstev, můžeme ji také nazvat postupné elektrolytické rozpouštění vrstev.

Tahle metoda byla zpracována doc. Ing, Ferdinandem Neckářem, CSc. Na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Postupně jí vyvinul i doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.

Jak dokončím odleptávání povrchu proudem v roztoku, využiji deformaci součásti, která obsahuje zbytkové napětí. Pokud docílím odleptání povrchové vrstvy se zbytkovým napětím, dojde k vyrovnání vzniklého nerovnovážného stavu. To se projeví na deformaci ohnutím. Tohle měření jde provést několika způsoby, ale já jsem zvolil bezdotykový indukční snímač, kterým zaznamenáváme deformaci v daném čase. [9]

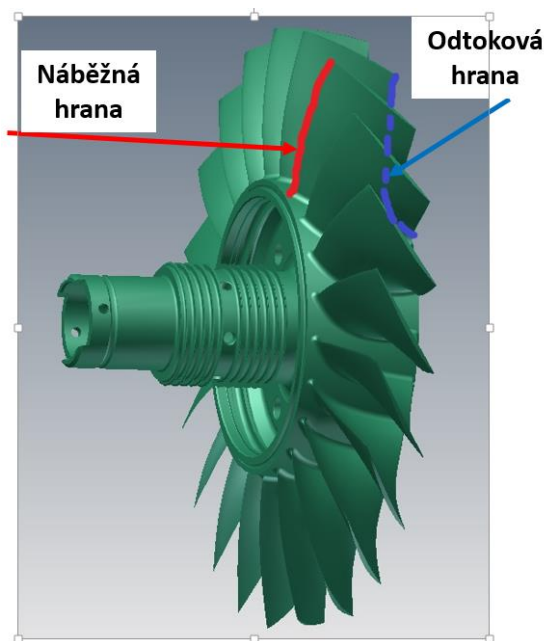
V experimentální části je daná metoda popsána do větších detailů.



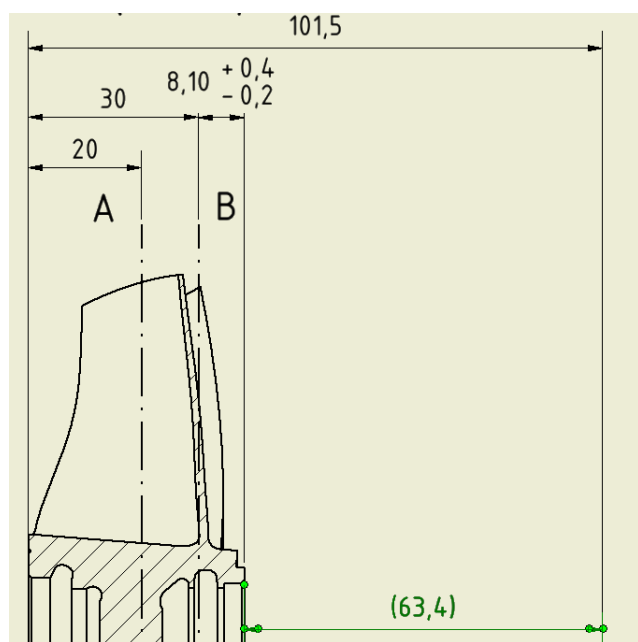
## 3 Experimentální část

### 3.1.1 Popis a úprava vzorku

Vzorek, který jsme zvolili, je z titanové slitiny Ti6Al4V. Jelikož vezmeme v potaz vlastnosti titanových slitin, musíme postupovat bezsilovým vyřezáním vzorku. K vůli rozměrům bylo zvoleno drátové řezání z důvodu ovlivnění vlastností vzorků. Uchovali jsme část lopatky s náběžnou hranou a také část disku se dvěma rovnoběžnými hranami k vůli upevnění do měřicího stojanu. Pokusný vzorek vznikne kolmým řezem k ose ve vzdálenosti 30 mm od dosedací plochy čela a následnými radiálními řezy.



Obr. 12 Disk s lopatkami

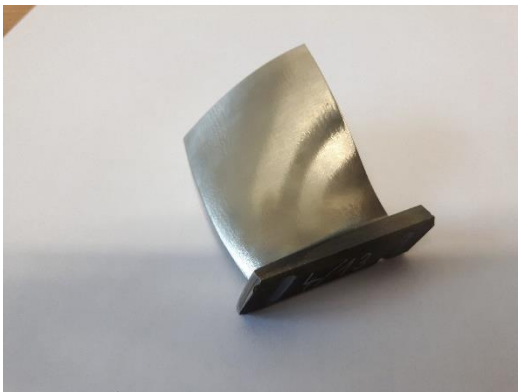


Obr. 13 Řez části lopatky

Finální řez lopatky jsem provedl na metalografické pile Struers Lambotom – 15.(Obr.14), kde jsem správně položil a zabezpečil lopatku, aby v případě řezu neulítla a nezlomila kotouč. Lopatku můžete vidět na Obr. 15. Při řezu je důležité dávat pozor na rychlost řezu z důvodu, aby nevznikl zápal a vzorek nebyl zbytečně narušen. Konečný vzorek který jsem poté měřil, můžete spatřit již po odleptání povrchu na Obr. 16.



*Obr.14 Struers Lambotom – 15 [10]*



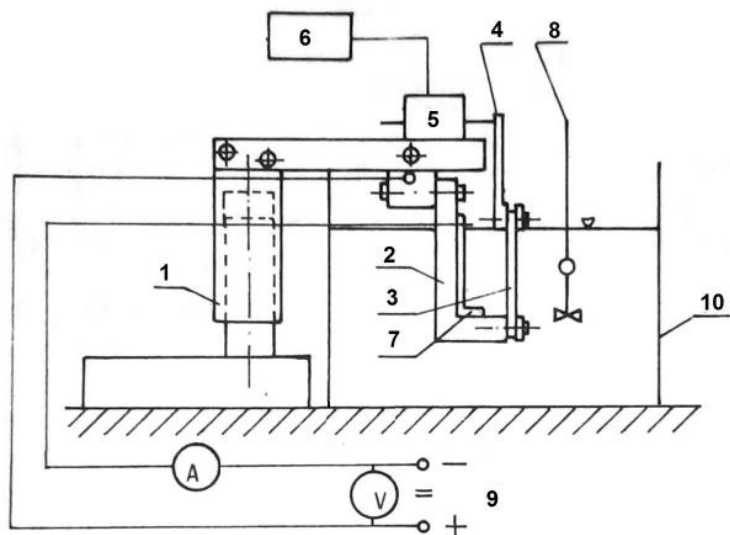
*Obr. 15 Lopatka před řezem*



*Obr. 16 Leptaný kousek lopatky*

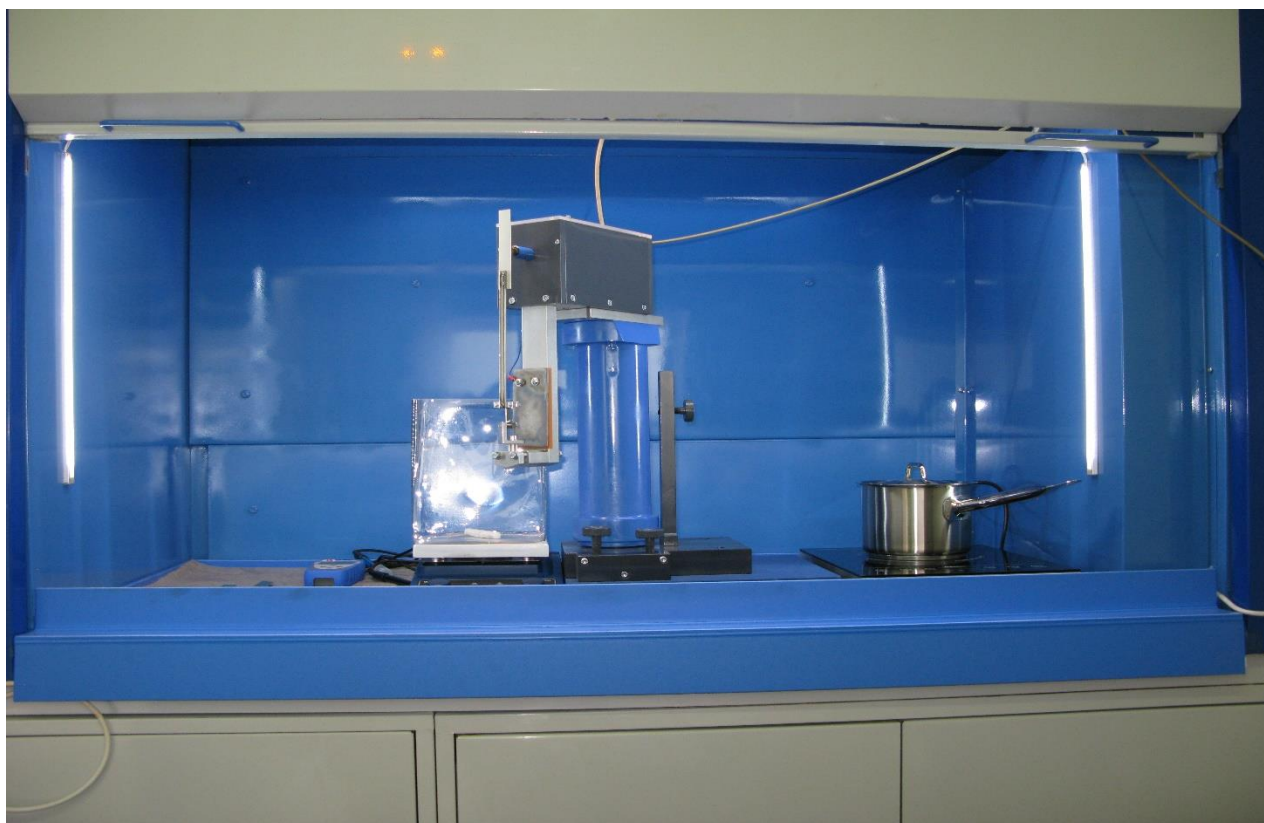
### 3.1.2 Zařízení pro měření zbytkového napětí

Celé zařízení se nachází v laboratořích Ústavu obrábění, projektování a metrologie. Schéma zařízení můžete vidět na Obr. 17 a skutečné zařízení na Obr. 18. Zařízení se neustále vylepšuje hlavně v oblasti bezkontaktního indukčního odměřování, kde citlivost dosahuje až  $0,1 \mu\text{m}$ . Nesmíme zapomenout, že pracujeme s kyselinami, které se při procesu leptání vypařují, proto je celé zařízení umístěné pod velkou digestoř.



Obr. 17 Schéma zařízení

Schéma zařízení: 1 – stojan, 2 – držák s upínacím třmenem, 3- zkoušený vzorek, 4 - třmen s ramenem, 5 – snímač vzdálenosti, 6 – zaznamenávání hodnot, 7 - katoda, 8 – míchadlo, 9 – regulovaný zdroj napětí, 10 – nádoba s elektrolytem.



Obr. 18 Skutečný vzhled zařízení

Pro postup měření zbytkového napětí jsem zvolil metodu elektrolytického odleptávání vzorku vyvinutou v Laboratoři obrábění FS ČVUT v Praze doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. Zbytkové napětí vyhodnocujeme z deformace uvolněné při odleptávání z vymezené plochy. Elektrolytické rozpouštění probíhá kontinuálně na jedno upnutí za současného snímání deformace. Hloubky, kterých dosáhneme po rozpouštění, se určují dobou trvání. Závislost deformace v čase  $\varepsilon=\varepsilon(t)$  je nejprve převedena na průběh deformace v závislosti na hloubce pod povrchem  $\varepsilon=\varepsilon(H)$ . Výpočet deformace na zbytková napětí zjistíme pomocí vztahů pružnosti a pevnosti.

Jak jsem již zmínil, vzorek je ze slitiny titanu, proto jsem zvolil jako elektrolyt kombinaci lihu, kyseliny chlorovodíkové a fluorovodíkové. Kvůli tomu je nutné správně postupovat při bezpečnosti práce, jako je v tomhle případě správné opláchnutí, zapnutí digestoře a také použití ochranných pomůcek.

Třmen s ramenem (Obr. 17 č.4) se pohybuje zároveň s prodlužováním vzorku. Musím ho nastavit tak, aby byl kolmo k čidlu a na vzdálenost asi 1,5 mm. Vzorek ke stojanu uchytím tak, aby byl dostatečně tuhý a splnil elektrickou vodivost. Natočím vzorek tak, aby byl rovnoběžně s katodou, to znamená, že deformace bude kolmá k leptané ploše.

Vzorek musím řádně oblepit a zalít voskem tak, aby zůstala čistá pouze leptaná plocha. Okraje leptané plochy oblepím lepicí páskou, čím docílím docela přesného vymezení plochy. Vše ostatní zaliju voskem.

Celý průběh měření je zaznamenáván přes indukční snímač do počítače. V počítači poté můžu vidět, jak mi vykresluje průběh deformace v reálném čase.

### 3.1.3 Postup měření

- 1) Zvážení vzorku. Zaznamenaný rozdíl hmotnosti mezi součástmi před a po deformaci použijeme k výpočtu hloubky leptání.
- 2) Změření tloušťky a šířky vzorku.
- 3) Oblepení leptané plochy lepicí páskou.
- 4) V průběhu přípravy vzorku zapneme míchání elektrolytu na vhodné otáčky.
- 5) Upevnění do třmenů na součást (páska zde nemůže být z důvodu vodivosti).
- 6) Voskem zalijeme celou zbylou součást mimo leptanou plochu.
- 7) Upevnění součásti do stojanu.
- 8) Změření osové vzdálenosti (středů leptané plochy a indukčního čidla).
- 9) Celkové zalití všech součástí.

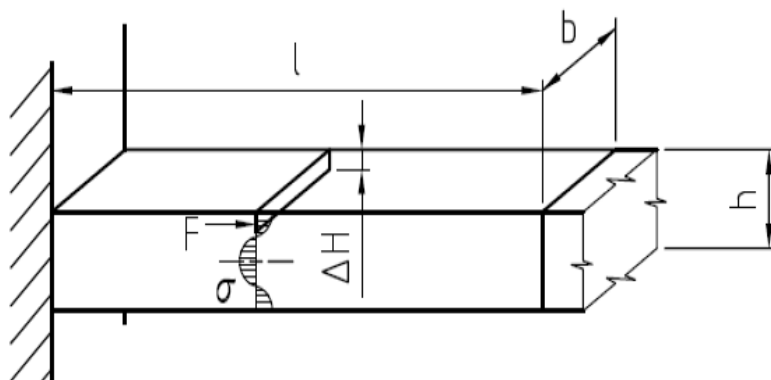
- 10) Vychladnutí vosku na pokojovou teplotu.
- 11) Nastavení indukčního čidla na vzdálenost 1,5 mm.
- 12) Spuštění sestavy do elektrolytu.
- 13) Zapnutí a zavření digestoře.
- 14) Spuštění záznamu v PC a vyčkání, dokud se záznam neustálí.
- 15) Nařizení správného napětí na zdroji a zapnutí.
- 16) Vypnutí proudu v čase pro žádanou hloubku.
- 17) Vypnutí záznamu deformace v PC.
- 18) Vyndání z elektrolytu a následné opláchnutí ve vodě.
- 19) Odmontování sestavy ze stojanu a opláchnutí.
- 20) Odstranění vrstev vosku a pásky ze vzorku.
- 21) Změření konečné výšky leptané plochy.
- 22) Zapsání všech hodnot a vypracování výsledků.

### 3.1.4 Výpočet

U výpočtu zvolíme vetknutý prizmatický nosník obdélníkového průřezu jako vzorek. Při výpočtu zbytkového napětí se řídíme vztahy z oboru pružnosti a pevnosti, které nám vyjádří dané napětí v jednotlivých vrstvách. Pro vypočtení napětí je třeba stanovit dva základní předpoklady:

- 1) Ve vrstvě tloušťky  $\Delta H$  je zbytkové napětí  $\sigma = \text{konstantní}$ ,
- 2) Odebraní vrstvy  $\Delta H$  se vytvoří deformace, která způsobí takové zbytkové napětí, které by zapříčinilo stejnou deformaci při působení vnější síly  $F$  na tuto vrstvu.

$$F = \Delta H \cdot b \cdot a$$



Obr. 19 Schéma napětí v leptaném vzorku

Pro výpočet napětí jsme zavedli tyto veličiny:

$a$  = délka měřicího třmenu (vzdálenost od leptané plošky po snímač)

$\varphi$  = úhel pootočení koncového průřezu

$\Delta y$  = měřená hodnota deformace

$\Delta y'$  = průhyb nosníku

$\Delta y''$  = pootočení měřicího třmenu v rovině měření

$l$  = délka leptané plochy

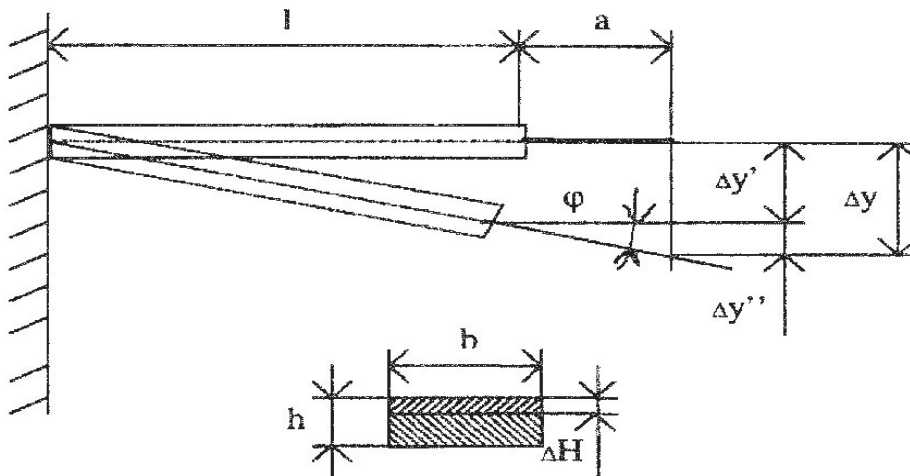
$b$  = šířka leptané plochy

$h$  = tloušťka leptané plochy

$E$  = modul pružnosti v tahu

$I$  = kvadratický moment průřezu (moment setrvačnosti průřezu)

$M_o$  = ohybový moment



Obr. 20 Schéma pro výpočet zbytkového napětí z deformace

$$\Delta y' = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o^2 \cdot l}{2}$$

$$\Delta y'' = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a$$

$$M_o = F \cdot \frac{h}{2} = \sigma \cdot \Delta H \cdot b \cdot \frac{h}{2}$$

$$l = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\Delta y = \Delta y' + \Delta y'' = \frac{M_o \cdot l}{E \cdot I} \cdot \left( \frac{l}{2} + a \right) = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{4 \cdot E \cdot I} \cdot \left( \frac{l}{2} + a \right)$$

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot K \cdot h^2, \text{ kde } K = \frac{E}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot (l + 2a)}$$

Pro výpočet v n – vrstvě

$\Delta y_n$  – deformace vzniklá odebráním vrstvy n, měřená v místě snímače

$\Delta H_n$  – tloušťka odebrané vrstvy n

$h_n$  – tloušťka vzorku po odebrání vrstvy n

$$h_n = h_o - \sum_1^n \Delta H_n$$

$$\sigma_{vn} = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot h_n^2$$

Tenhle vztah počítá skutečné napětí, nevztahuje se na předešlé vrstvy:

$$\sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_1^n \sigma_{v(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n}$$

### 3.1.5 Popis experimentu

#### 1) Značení vzorků

Měření vzorků proběhlo v 50 % výšky lopatky vzhledem k lepší možnosti maskování. V místě měření byl stanoven náhradní průřez (tloušťka vzorku „h“). Výška leptané plochy „l“ byla volena v rozmezí 1,5 až 2,5 mm.

K dispozici jsem měl lopatky, které byly obrobené pouze frézováním na pětiosém centru a poté jsem obdržel čtyři lopatky, které byly ručně balotinovány dvěma operátory. Cílem bylo v prvním přiblížení zjistit, zda skleněná balotina je schopna vyvodit v povrchu tlaková napětí do větších úrovní a hloubek. K dispozici byly 4 lopatky frézované a 4 lopatky balotinované.

#### 2) Výsledky měření

U všech vyšetřovaných vzorků byl zjištěn tlakový charakter průběhu zbytkových napětí v blízkosti povrchu po frézování. Zbytková napětí jsou měřena v radiálním směru.



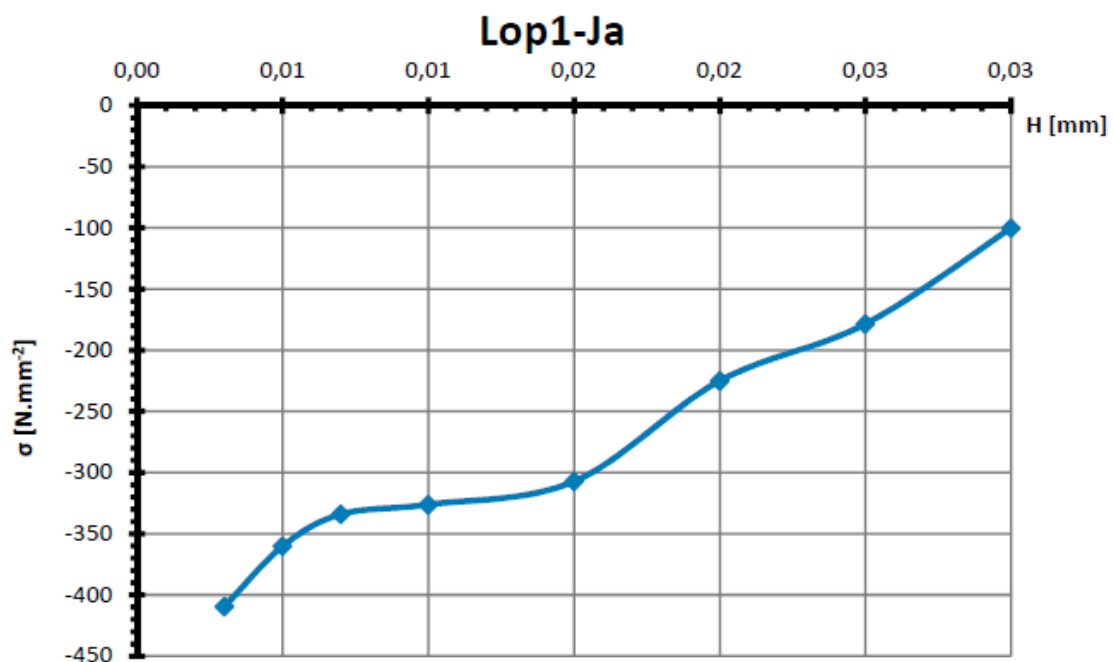
## Výsledky jednotlivých vzorků:

Lopatka č.1

Tab. 2 Výpočty průběhů lopatky 1

<b>Název vzorku:</b>	<b>Lop1-Ja</b>
l= 2,6	výška odleptané plochy [mm]
a= 235	délka měřicího třmenu(rameno) [mm]
H= 0,03	celková odleptaná hloubka [mm]
E= 113000	modul pružnosti [N.mm <sup>-2</sup> ]
h= 0,6535	tloušťka vzorku(původní) [mm]
mx= 0,00017143	podíl odleptané hloubky ku délce zápisu
konstanta= 30,6542097	
Vstupní hodnoty - šedé	

ze záznamu		přírůstky		výpočet				
poř. číslo odečtu	deformace [mm]	Δ deformace [mm]	Δ hloubky [mm]	hloubka H [mm]	ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]	korekce [N.mm <sup>-2</sup> ]	suma korekcí [N.mm <sup>-2</sup> ]	skutečné ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]
1.	-0,2842	-0,00553	0,00017	0,003	-418,1	-0,447	-8,578	-409,5
2.	-0,3413	-0,00496	0,00017	0,005	-373,4	-0,398	-13,172	-360,2
3.	-0,3989	-0,00471	0,00017	0,007	-351,8	-0,374	-17,766	-334,0
4.	-0,4787	-0,00473	0,00017	0,010	-350,2	-0,373	-24,080	-326,1
5.	-0,6221	-0,00470	0,00017	0,015	-342,6	-0,370	-35,356	-307,3
6.	-0,7459	-0,00377	0,00017	0,020	-270,2	-0,296	-45,092	-225,1
7.	-0,8441	-0,00327	0,00017	0,025	-231,3	-0,252	-52,732	-178,5
8.	-0,9371	-0,00230	0,00017	0,030	-160,0	-0,190	-59,948	-100,1
9.	#####	#####	#####	0,050	#####	#####	#####	#####
10.	#####	#####	#####	0,070	#####	#####	#####	#####
11.	#####	#####	#####	0,100	#####	#####	#####	#####
12.	#####	#####	#####	0,150	#####	#####	#####	#####
13.	#####	#####	#####	0,200	#####	#####	#####	#####
14.	#####	#####	#####	0,250	#####	#####	#####	#####
15.	#####	#####	#####	0,300	#####	#####	#####	#####



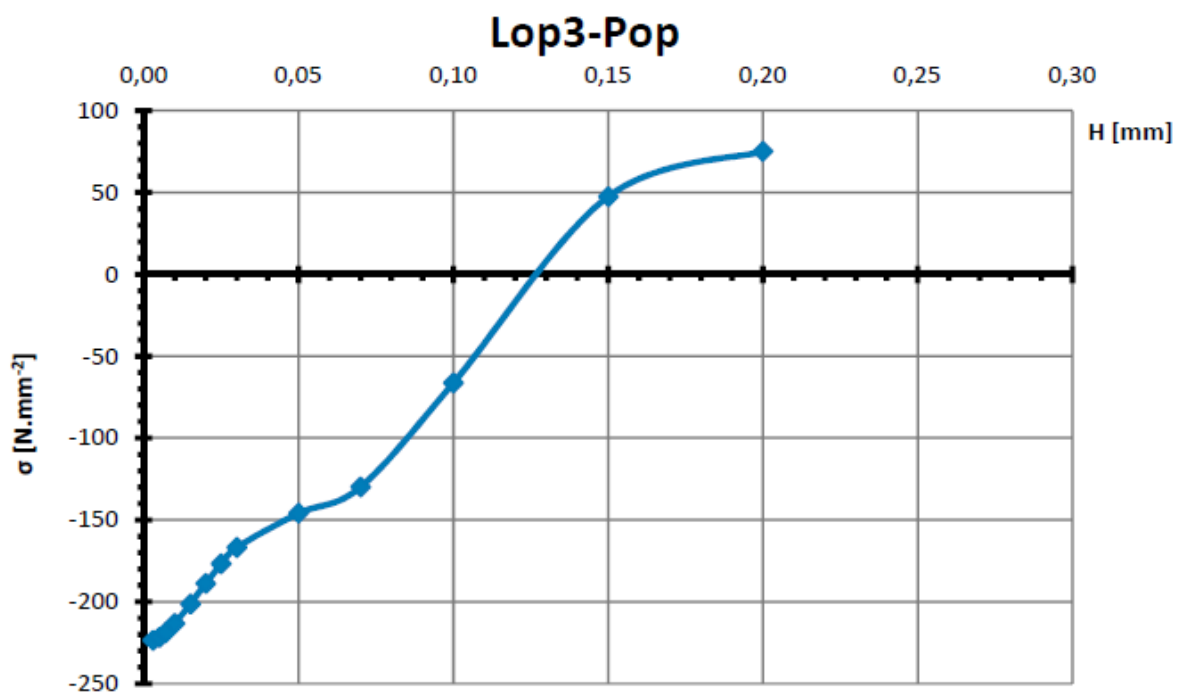
Obr. 21 Graf lopatky č.1

Lopatka č.3

Tab. 3 Výpočty průběhů lopatky 3

<b>Název vzorku:</b>	<b>Lop3-Pop</b>
l= 2,2	výška odleptané plochy [mm]
a= 236	délka měřicího třmenu(rameno) [mm]
H= 0,226	celková odleptaná hloubka [mm]
E= 113000	modul pružnosti [N.mm <sup>-2</sup> ]
h= 0,85	tloušťka vzorku(původní) [mm]
mx= 0,00027901	podíl odleptané hloubky ku délce zápisu
konstanta= 36,1054663	
Vstupní hodnoty - šedé	

ze záznamu		přírůstky		výpočet				
poř. číslo odečtu	deformace [mm]	Δ deformace [mm]	Δ hloubky [mm]	hloubka H [mm]	ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]	korekce [N.mm <sup>-2</sup> ]	suma korekcí [N.mm <sup>-2</sup> ]	skutečné ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]
1.	-0,0590	-0,00244	0,00028	0,003	-226,4	-0,298	-2,963	-223,5
2.	-0,0761	-0,00245	0,00028	0,005	-226,8	-0,300	-5,057	-221,7
3.	-0,0933	-0,00246	0,00028	0,007	-226,2	-0,300	-7,155	-219,0
4.	-0,1203	-0,00245	0,00028	0,010	-223,7	-0,298	-10,440	-213,2
5.	-0,1641	-0,00241	0,00028	0,015	-217,1	-0,291	-15,737	-201,4
6.	-0,2069	-0,00235	0,00028	0,020	-209,6	-0,282	-20,893	-188,7
7.	-0,2487	-0,00230	0,00028	0,025	-202,8	-0,275	-25,902	-176,9
8.	-0,2899	-0,00227	0,00028	0,030	-197,7	-0,269	-30,793	-166,9
9.	-0,4527	-0,00236	0,00028	0,050	-195,8	-0,273	-49,842	-145,9
10.	-0,6303	-0,00254	0,00028	0,070	-200,0	-0,286	-70,085	-129,9
11.	-0,8940	-0,00227	0,00028	0,100	-165,6	-0,247	-99,285	-66,3
12.	-1,2140	-0,00135	0,00028	0,150	-85,5	-0,137	-133,004	47,5
13.	-1,4104	-0,00097	0,00028	0,200	-52,8	-0,091	-152,237	75,0
14.	#####	#####	#####	0,250	#####	#####	#####	#####
15.	#####	#####	#####	0,300	#####	#####	#####	#####



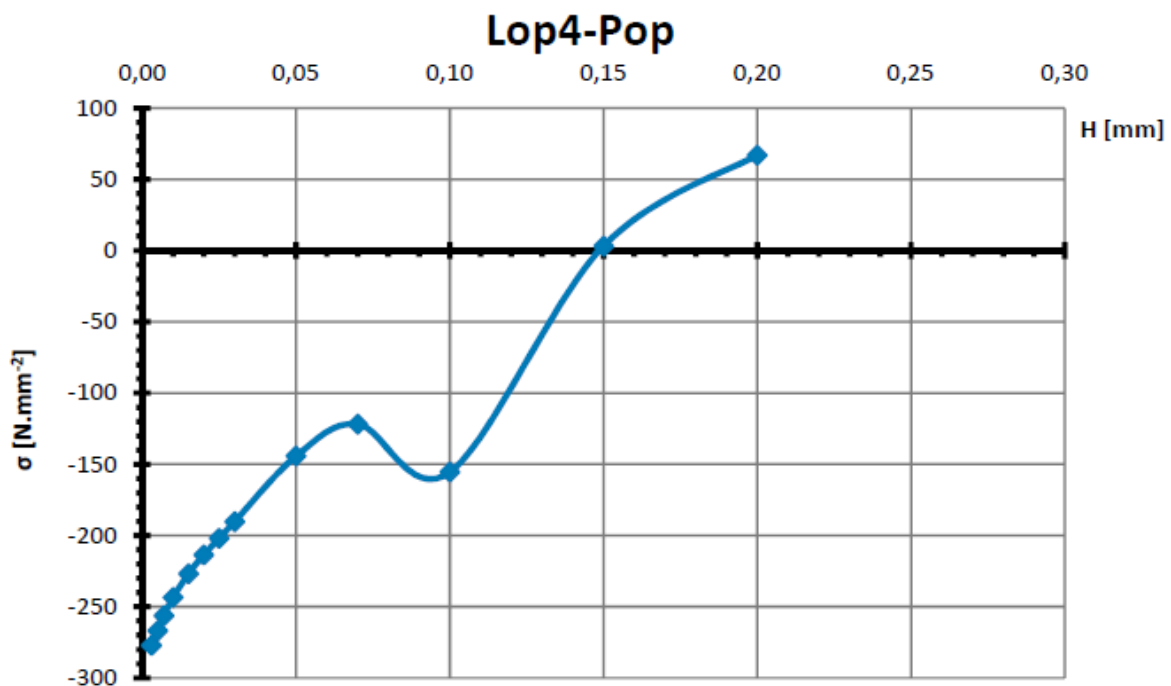
Obr. 22 Graf lopatky č.3

Lopatka č.4

Tab. 4 Výpočty průběhů lopatky 4

**Název vzorku:** Lop4-Pop  
 l= 2,2      výška odleptané plochy [mm]  
 a= 235      délka měřicího třmenu(rameno) [mm]  
 H= 0,2      celková odleptaná hloubka [mm]  
 E= 113000      modul pružnosti [N.mm<sup>-2</sup>]  
 h= 0,88      tloušťka vzorku(původní) [mm]  
 mx= 0,00030769      podíl odleptané hloubky ku délce zápisu  
 konstanta= 36,2583908  
 Vstupní hodnoty - šedé

ze záznamu		přírůstky		výpočet				skutečné ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]
poř. číslo odečtu	deformace [mm]	Δ deformace [mm]	Δ hloubky [mm]	hloubka H [mm]	ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]	korekce [N.mm <sup>-2</sup> ]	suma korekcí [N.mm <sup>-2</sup> ]	
1.	-0,0715	-0,00310	0,00031	0,003	-280,7	-0,396	-3,635	-277,1
2.	-0,0899	-0,00302	0,00031	0,005	-272,9	-0,386	-5,973	-266,9
3.	-0,1107	-0,00295	0,00031	0,007	-265,0	-0,375	-8,629	-256,4
4.	-0,1398	-0,00287	0,00031	0,010	-255,8	-0,363	-12,312	-243,5
5.	-0,1848	-0,00278	0,00031	0,015	-244,9	-0,349	-17,996	-226,9
6.	-0,2288	-0,00272	0,00031	0,020	-237,1	-0,340	-23,500	-213,6
7.	-0,2719	-0,00268	0,00031	0,025	-230,9	-0,333	-28,878	-202,0
8.	-0,3171	-0,00264	0,00031	0,030	-224,8	-0,326	-34,476	-190,3
9.	-0,4827	-0,00245	0,00031	0,050	-198,9	-0,296	-54,676	-144,3
10.	-0,6414	-0,00253	0,00031	0,070	-195,3	-0,296	-73,548	-121,7
11.	-0,9374	-0,00367	0,00031	0,100	-263,0	-0,414	-107,518	-155,5
12.	-1,5212	-0,00268	0,00031	0,150	-168,4	-0,285	-171,707	3,3
13.	-1,8493	-0,00254	0,00031	0,200	-138,4	-0,240	-205,406	67,0
14.	#####	#####	#####	0,250	#####	#####	#####	#####
15.	#####	#####	#####	0,300	#####	#####	#####	#####



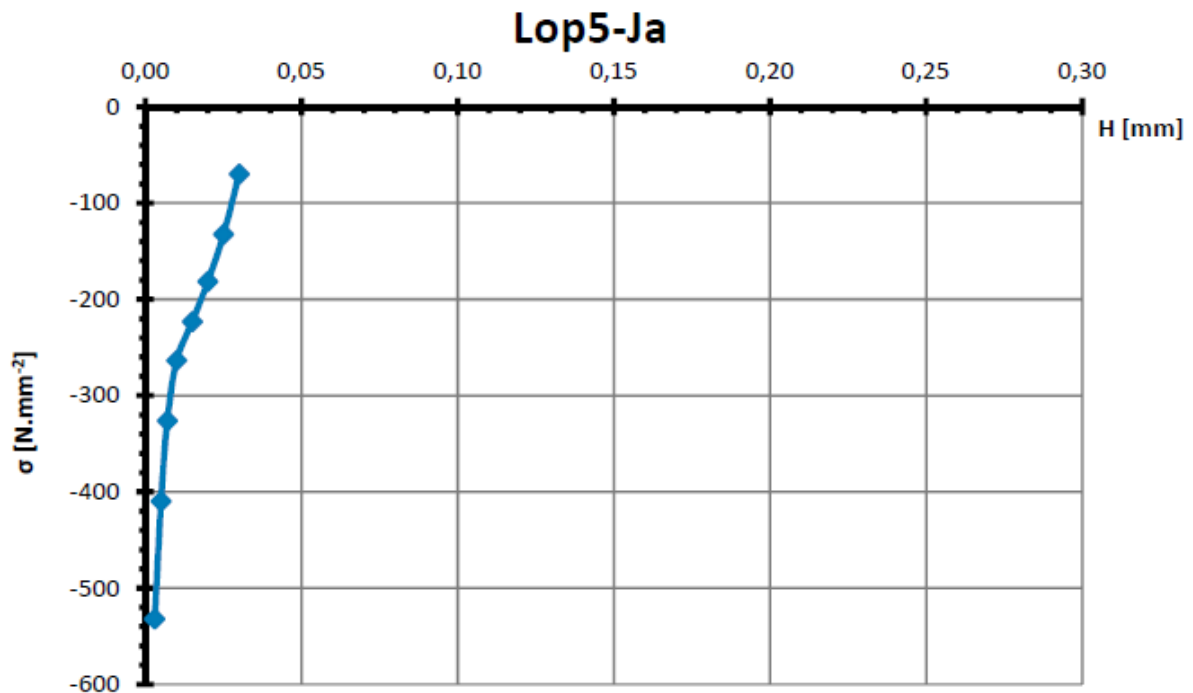
Obr. 23 Graf lopatky č.4

Lopatka č.5

Tab. 5 Výpočty průběhů lopatky 5

**Název vzorku: Lop5-Ja**  
 $l = 1,7$  výška odleptané plochy [mm]  
 $a = 235$  délka měřicího třmenu(rameno) [mm]  
 $H = 0,043$  celková odleptaná hloubka [mm]  
 $E = 113000$  modul pružnosti [N.mm<sup>-2</sup>]  
 $h = 1,27$  tloušťka vzorku(původní) [mm]  
 $mx = 5,4777E-05$  podíl odleptané hloubky ku délce zápisu  
konstanta= 46,9723611  
Vstupní hodnoty - šedé

ze záznamu		přírůstky		výpočet				
poř. číslo odečtu	deformace [mm]	$\Delta$ deformace [mm]	$\Delta$ hloubky [mm]	hloubka H [mm]	ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]	korekce [N.mm <sup>-2</sup> ]	suma korekcí [N.mm <sup>-2</sup> ]	skutečné ZN [N.mm <sup>-2</sup> ]
1.	-0,0157	-0,00039	0,00005	0,003	-538,2	-0,094	-6,101	-532,1
2.	-0,0281	-0,00031	0,00005	0,005	-419,0	-0,073	-9,073	-410,0
3.	-0,0382	-0,00025	0,00005	0,007	-337,8	-0,059	-11,486	-326,3
4.	-0,0504	-0,00020	0,00005	0,010	-278,0	-0,048	-14,387	-263,6
5.	-0,0677	-0,00018	0,00005	0,015	-241,6	-0,042	-18,479	-223,1
6.	-0,0828	-0,00015	0,00005	0,020	-203,5	-0,036	-22,038	-181,5
7.	-0,0951	-0,00012	0,00005	0,025	-157,3	-0,028	-24,941	-132,4
8.	-0,1040	-0,00007	0,00005	0,030	-96,8	-0,017	-27,017	-69,7
9.	#####	#####	#####	0,050	#####	#####	#####	#####
10.	#####	#####	#####	0,070	#####	#####	#####	#####
11.	#####	#####	#####	0,100	#####	#####	#####	#####
12.	#####	#####	#####	0,150	#####	#####	#####	#####
13.	#####	#####	#####	0,200	#####	#####	#####	#####
14.	#####	#####	#####	0,250	#####	#####	#####	#####
15.	#####	#####	#####	0,300	#####	#####	#####	#####



Obr. 24 Graf lopatky č.5

### 3.1.6 Závěr experimentu

Měření frézovaných povrchů vykazuje přijatelnou opakovatelnost. Tlaková pnutí v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm dosahují hodnot -192 až -128 MPa (průměrná hodnota -168 MPa). Tlaková špička nebyla pozorována. S rostoucí hloubkou zbytková napětí s výrazným gradientem klesají na hodnoty -75 až -62 MPa (průměrná hodnota -69 MPa) v hloubce 0,015 mm. Do velmi nízkých vyrovnávacích tahových napětí přecházejí v hloubce 0,025 až 0,050 mm pod povrchem (průměrně 0,045 mm). V hloubce 0,15 mm byla zjištěna zbytková napětí v rozmezí +13 až +18 MPa (průměrně +16 MPa).

Balotinované lopatky vykazují značné navýšení tlakových zbytkových napětí. Zrovna tak do větších hloubek. Tlaková pnutí v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm dosahují hodnot -222 až -410 MPa (průměrná hodnota -315 MPa). Tlaková špička nebyla pozorována. S rostoucí hloubkou zbytková napětí s výrazným gradientem klesají na hodnoty -201 až -307 MPa (průměrná hodnota -240 MPa) v hloubce 0,015 mm. Do velmi nízkých vyrovnávacích tahových napětí přecházejí v hloubce 0,070 až 0,2 mm pod povrchem (průměrně 0,135 mm). V hloubce 0,15 mm byla zjištěna zbytková napětí v rozmezí +3 až +48 MPa (průměrně +25 MPa).

V současném uspořádání napětí nebylo možné přesně stanovit průběhy, jelikož tenké lopatky vykazovaly tak výraznou deformaci při odleptávání, že rozsah čidla byl nedostatečný. Pro lepší výsledky a přesnost měření bych navrhl osazení čidla s rozsahem minimálně 4 mm a snížení délky měřícího třmenu.

V měření balotinovaných vzorků byly zaznamenány značné rozptyly, což je způsobeno 2 faktory. První faktor je, že bylo nevhodně sestaveno zařízení, jak se již zmiňuji ve třetím odstavci a druhý faktor je ten, že lopatky byly balotinovány ručně dvěma operátory, což vnáší variabilitu na stranu vzorků.

Tab. 6 Suma průběhů zbytkového napětí lopatek balotinovaných

v 50% výšky lopatky balotinované

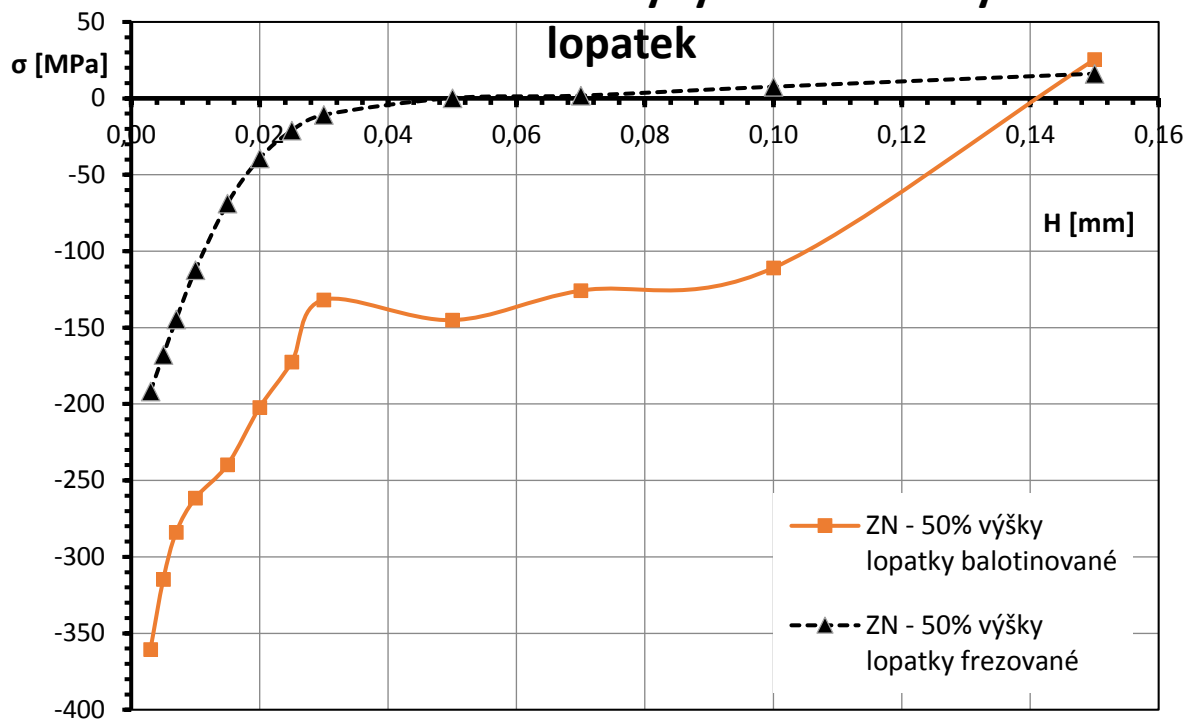
Lopatka	Lop1	Lop3	Lop4	Lop5					
hloubka H [mm]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	průměr [N.mm-2]	sx [N.mm-2]	$v_{\sigma}$ [%]	MIN [N.mm-2]	MAX [N.mm-2]
0,003	-410	-224	-277	-532	-361	139	38	-532	-224
0,005	-360	-222	-267	-410	-315	86	27	-410	-222
0,007	-334	-219	-256	-326	-284	56	20	-334	-219
0,010	-326	-213	-244	-264	-262	48	18	-326	-213
0,015	-307	-201	-227	-223	-240	46	19	-307	-201
0,020	-225	-189	-214	-182	-202	21	10	-225	-182
0,025	-179	-177	-202	-132	-172	29	17	-202	-132
0,030	-100	-167	-190	-70	-132	56	43	-190	-70
0,050	#####	-146	-144	#####	-145	1	1	-146	-144
0,070	#####	-130	-122	#####	-126	6	5	-130	-122
0,100	#####	-66	-156	#####	-111	63	57	-156	-66
0,150	#####	48	3	#####	25	31	123	3	48
0,200	#####	75	67	#####	71	6	8	67	75

Tab. 7 Suma průběhů zbytkového napětí lopatek frézovaných

v 50% výšky lopatky frézované

Lopatka	1 M	2 M	4 M	5 M					
hloubka H [mm]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	skutečné ZN [N.mm-2]	průměr [N.mm-2]	sx [N.mm-2]	$v_{\sigma}$ [%]	MIN [N.mm-2]	MAX [N.mm-2]
0,003	-197	-142	-211	-217	-192	34	18	-217	-142
0,005	-170	-128	-192	-182	-168	28	17	-192	-128
0,007	-147	-115	-168	-148	-145	22	15	-168	-115
0,010	-117	-97	-126	-109	-112	12	11	-126	-97
0,015	-75	-70	-68	-62	-69	5	8	-75	-62
0,020	-46	-48	-32	-31	-39	9	22	-48	-31
0,025	-25	-30	-15	-14	-21	8	37	-30	-14
0,030	-12	-17	-9	-5	-11	5	45	-17	-5
0,050	4	0	-2	-1	0	3	1296	-2	4
0,070	6	-4	3	3	2	4	218	-4	6
0,100	10	6	9	6	8	2	29	6	10
0,150	18	13	17	17	16	2	15	13	18

## Srovnání ZN balotinových a frezovaných lopatek



Obr. 25 Graf sumy lopatek

## 4 Závěr

Tato bakalářská práce podrobně rozpracovává témata integrity povrchu, která jsem rozdělil do čtyř základních bodů osnovy. V první části své práce se zaměřuji na vliv integrity povrchu, kde upřesňuji postup tvorby povrchu a jeho drsnost. V charakteristice povrchu jednotlivě vyjmenovávám různé druhy zkoumání vrstev. Závěr téhle kapitoly jsem věnoval drsnosti povrchu, kde pojednávám o vlivu drsnosti na mechanické vlastnosti.

V tématu analytické metody pro hodnocení integrity povrchu popisují jednotlivá měření, podle kterých se dají zaznamenat různé výsledky nebo změny v integritě povrchu. V kapitole měření drsnosti popisují jednotlivé druhy měření pomocí lidských vlastností, ale také se soustředím na měření interferometrem. Kapilární zkoušky obsahují destruktivní a nedestruktivní metody, kde se zaměřuji na nejčastěji používané nedestruktivní metody. V kapitole Struktura změn v povrchových vrstvách po obrábění pojednávám o tom, co vše může nastat při nesprávném broušení.

V kapitolách zbytkového napětí a měření zbytkového napětí se zabývám jeho vznikem a různými metodami jeho měření. Popisují jednotlivé druhy zbytkového napětí, kde konkrétně líčím všechny tři druhy napětí. V metodách měření zbytkového napětí popisují tři základní metody, které se dále větví, ale z důvodu malého rozsahu této práce je detailně popsán jen jeden postup měření, který následně vysvětluji ve svém experimentu.

V experimentální části mé práce se zabývám vyhodnocováním zbytkového napětí lopatek z titanové litiny kompresoru, kde odleptávám část lopatky, která se nachází asi v 50 % výšky vzorku. Následně porovnávám dva druhy zpracování lopatek, kde jedny jsou frézované a druhé jsou balotinované. U balotinovaných lopatek jsme nedokázali přesně stanovit průběhy z důvodu, že tenké lopatky způsobili tak velkou deformaci při odleptání, kterou rozsah čidla nedokázal zaznamenat. Pro opravu a úspěšnější výsledky bych zvolil vhodnější čidla s větší citlivostí a lepší balotinování vzorku.



## 5 Literatura

- [1] NECKÁŘ, Ferdinand. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1991.
- [2] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [4] KUBÍČEK, Miroslav. *Inovace a zkvalitnění výuky prostřednictvím ICT* [online]. , 7 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z:  
[http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY\\_32\\_INOVACE\\_19-06.pdf](http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-06.pdf)
- [5] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [6] KOLAŘÍK, Kamil a Nikolaj GANEV. *DIFRAKÈNÍ A TENZOMETRICKÁ ANALÝZA POVRCHÙ OCELÍ PO NEKONVENÈNÍCH METODÁCH OBRÁBÌNÍ* [online]. 2006, , 4 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: <https://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>
- [7] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [8] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA, Petr BOHDAN a Otakar WEINBERG. *APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ* [online]. Seč, 2012, , 8 [cit. 2017-07-15]. Dostupné z:  
[http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271\\_p.pdf](http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf)
- [9] KANDIL, F. A., J. D. LORD, A. T. FRY a P. V. GRANT. *A Review of Residual Stress Measurement Methods -A Guide to Technique Selection* [online]. 2001, , 45 [cit. 2017-07-15]. ISSN 1473-2734. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/profile/Antony\\_Fry/publication/236860729\\_A\\_review\\_of\\_residual\\_stress\\_measurement\\_methods--a\\_guide\\_to\\_technical\\_selection/links/56499ff208aef646e6d26d98.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Antony_Fry/publication/236860729_A_review_of_residual_stress_measurement_methods--a_guide_to_technical_selection/links/56499ff208aef646e6d26d98.pdf)
- [10] Labotom-15. In: *Struers Ensuring Certainty* [online]. [cit. 2017-07-15]. Dostupné z:  
[http://old.struers.dk/default.asp?doc\\_id=252&admin\\_language=19](http://old.struers.dk/default.asp?doc_id=252&admin_language=19)