

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Kvalita povrchu po obrábění

Tomáš Bauer

Praha 2017



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Kvalita povrchu po obrábění“ jsem vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Vítězslava Rázka, CSc. Veškerou použitou literaturu jsem řádně označil a uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne .....

.....

Tomáš Bauer

## Anotační list

Jméno Autora: Tomáš Bauer  
Název bakalářské práce: Kvalita povrchu po obrábění  
Anglický název: The surface quality after machining

Rok: 2017  
Obor studia: Teoretický základ strojího inženýrství  
Ústav: 12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Bibliografické údaje: počet stran: 31  
Počet obrázků: 25  
Počet tabulek: 6  
Počet příloh: 0

Klíčová slova: Kvalita povrchu, přesnost, drsnost, mikrotvrdost zbytková napětí  
Key words: Surface quality, accuracy, roughness, microhardness, residual stress

### Anotace:

V práci jsou popsány základní parametry kvality povrchu, jejich vliv na životnost součástí, dosahované hodnoty těchto parametrů metodami obrábění a způsoby jejich měření. Dále jsou v práci uvedeny současné trendy pro zvyšování kvality a měření těchto parametrů.

### Abstract:

The thesis describes basic parameters of surface quality, their influence on life of components, values of these parameters produced by machining methods and methods of their measurement. The work also mentions current trends for improving quality and measuring these parameters.

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za cenné rady a vstřícnost při konzultacích během tvorby bakalářské práce.

## Obsah

Úvod .....	7
1 Přesnost obrábění .....	8
1.1 Vliv stroje .....	8
1.2 Vliv nástroje, upínače .....	9
1.3 Přesnost dosahovaná metodami obrábění.....	10
2 Drsnost povrchu .....	11
2.1 Parametry drsnosti .....	11
2.2 Měření drsnosti.....	12
2.2.1 Kvalitativní hodnocení povrchu .....	12
2.2.2 Měření dotykovými přístroji.....	13
2.2.3 Měření interferenční metodou.....	15
2.3 Drsnost dosahovaná metodami obrábění .....	16
3 Mikrotvrdost.....	18
3.1 Vrstvy vzniklé obráběním.....	18
3.1.1 Konvenční metody obrábění .....	18
3.1.2 Nekonvenční metody obrábění .....	19
4 Zbytková napětí .....	20
4.1 Rozdělení zbytkových napětí .....	20
4.2 Vznik napětí.....	20
4.3 Měření napětí .....	21
4.4 Ovlivnění průběhu napětí.....	21
4.4.1 Konvenční metody obrábění .....	21
4.4.2 Nekonvenční metody obrábění .....	24
4.4.3 Dokončovací metody .....	25
Závěr .....	27
Použitá literatura .....	28

## Úvod

Proces obrábění spočívá v úběru materiálu, ať už metodami konvenčními, nebo metodami nekonvenčními. Přitom každá z metod obrábění se vyznačuje svou vlastní kinematikou, řeznými podmínkami atd., což je příčinou rozdílných povrchových vrstev součástí získaných rozdílnými metodami obrábění.

Kvalitu povrchu součástí získaných za pomoci některé z metod obrábění lze hodnotit např. podle čtyř základních parametrů. Jsou jimi: přesnost, se kterou je součást vyráběna, drsnost povrchu, získaná obráběním zvolenou metodou, dále mikrotvrdość (vytvrzení povrchové vrstvy), která je důsledkem extrémních podmínek panujících při obrábění, a nakonec zbytková napětí vznikající z podobných důvodů.

Tyto parametry mohou mít zásadní vliv na funkčnost a délku života strojních komponent. Důležitost dosažení (popř. pravidelného dosahování) konkrétní výrobní přesnosti vyplývá např. z vypočtených rozměrových obvodů, které jsou klíčové pro smontovatelnost, správnou funkci sestav. Drsnost se může projevit např. jako součinitel vrubu, zejména při cyklickém zatěžování. Také tvoří stykovou plochu mezi součástmi a závisí na ni tedy i přestup tepla, nebo hlučnost stroje. Zpevnění povrchové vrstvy s sebou nese větší odolnost proti abrazivnímu opotřebení, je ale spojeno se strukturními změnami materiálu. Vliv zbytkových napětí zasahuje především do únavových vlastností součástí, je tedy zásadní při cyklickém namáhání. Nejčastěji se projevívá při tvorbě a růstu trhlin, přičemž tlaková napětí trhliny zavírají a tahová naopak otevírají a podporují jejich růst.

# 1 Přesnost obrábění

Přesnost obrábění je schopnost dosahování předepsaných rozměrů ve vymezených tolerančních polích. Toleranční pole bývají udávána na výkresové dokumentaci za jmenovitým rozměrem (popř. všeobecnými tolerancemi v rohovém razítku) a řadí se do tzv. skupin přesnosti IT (např. rozměr  $\text{Ø}40\text{h}6$  se řadí do skupiny IT6 a jeho toleranční pole má velikost  $16\ \mu\text{m}$ ).

Na přesnost obrobených ploch mají výrazný vliv tyto faktory: polotovár (vč. jeho přípravy), metoda obrábění, obráběcí stroj, řezný nástroj, upínač, provozní prostředí, manipulace s obrobkem [1].

## 1.1 Vliv stroje

U strojů je kladen důraz (z hlediska přesnosti) zejména na:

- Geometrickou přesnost funkčních prvků

Taková přesnost je udávána normou, např. pro hrotové brusky jsou vypsány minimální tolerance a podmínky zkoušek v normě ČSN ISO 2433 [1].

- Tuhost a tlumení konstrukce

K nedodržení stanovené přesnosti (rozměrové i tvarové) v tomto případě dochází za působení řezných sil, které deformují nástroj i obrobek, a tak upravují jejich vzájemnou polohu [4].

Hlavní podíl na celkové tuhosti a schopnosti tlumení stroje mají nosné části – lože a rámy. Dříve byly tyto části stroje konstruovány převážně z oceli, nebo litiny (popř. ve spojení s cementovým betonem). V poslední době se jako materiál pro lože používá ještě granit (přírodní žula), nebo polymerní beton (minerální litina), na které se připevní vodící lišta [5].

Pro zvýšení stability stolu (tedy i stroje) se využívá tzv. bezkontaktní hydrostatický systém, který automaticky upravuje tloušťku olejového filmu na vodících lištách v různých sekcích vedení [6].

- Teplotní stabilitu

Na přesnost obráběcího procesu z hlediska teplotní roztažnosti má zásadní vliv ohřev kuličkového šroubu v osách vedení. Délková změna tohoto šroubu může dosahovat až  $0,1\ \text{mm/m}$  během 20 minut obrábění [7].



Autor článku [7] uvádí, že poloha osy stroje může být sledována lineárním, nebo rotačním snímačem, přičemž rotační snímač polohy je méně přesný v důsledku nekompensovatelných chyb měření (např. teplotní roztažnost, opotřebení šroubu). Jde zde o nepřímou polohovou vazbu. V případě přímé polohové vazby je použit lineární snímač, který není zatížen nepřesnostmi rotačního snímače [7].

Obrázek č. 1 znázorňuje vliv teplotní roztažnosti kuličkového šroubu. A sice tak, že daná součást byla obrobena nejprve do poloviny hloubky polotovaru, následně nástroj vykonal 20 opakování (pro zahřátí šroubu) a nakonec byla obrobena i 2. polovina součásti. Naměřená odchylka od požadovaného rozměru dosahovala až 44  $\mu\text{m}$ . Při obrábění za použití lineárních snímačů byla odchylka přibližně čtvrtinová [8].



Obrázek č. 1: Nepřesnost nepřímé polohové vazby [8].

## 1.2 Vliv nástroje, upínače

Vliv nástroje na výslednou přesnost spočívá především v jeho upnutí a geometrii. Geometrie nástroje souvisí s řeznými silami, které ovlivňují celkovou tuhost a upnutí nástroje působí především na tuhost nástroje.

Při upínání nástroje se hledí nejvíce na jeho vyložení a na zvolený upínač (resp. jeho pevnost upnutí a obvodové házení při upnutí rotačních nástrojů).

Tabulka č. 1: Příklady obvodového házení vybraných upínacích systémů [9,10].

Upínací systém	Házivost		
Sklíčidlo	< 40 $\mu\text{m}$	Polygonální	$\leq 3 \mu\text{m}$
Kleština	10 – 20 $\mu\text{m}$	Tepelný	$\leq 3 \mu\text{m}$
Weldon	15 – 20 $\mu\text{m}$	Hydraulický	$\leq 3 \mu\text{m}$

Hodnoty radiálního házení uvedené v tabulce č. 1 jsou spíše informativní, protože takové házení je uváděno výrobcem vždy ve vzdálenosti x-násobku průměru nástroje od čela upínače (např. 2,5 D) a nelze tedy jistě určit házivost konkrétního nástroje [9].

### 1.3 Přesnost dosahovaná metodami obrábění

Tabulka č. 2: Přesnost dosahovaná vybranými metodami obrábění [2,3].

Metoda obrábění	Dosahované přesnosti				
Soustružení	IT 8	Broušení obvodem	IT 6	Elektrochemické	IT 9
Frézování	IT 8			Elektroerozivní	IT 8
Vrtání	IT 12	Honování	IT 7		
Vyhrubování	IT 9	Lapování	IT 4		
Vystružování	IT 7	Superfinišování	IT 5		
Vyvtávání	IT 8				

V tabulce jsou uvedeny hodnoty dosahovaných přesností vybranými metodami při obrábění na čisto. Při obrábění jemném je dosahováno vyšších přesností.

## 2 Drsnost povrchu

Drsnost je další z měřítek kvality povrchu a je přímo spojena s přesností (např. v literatuře [11] je uvedena maximální povolená hodnota  $R_a$  pro vybrané stupně přesnosti IT, v literatuře [12] jsou pak uvedeny doporučené hodnoty  $R_a$  pro tyto přesnosti). Dále je drsnost také označována dle [13] jako: „Soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě.“

### 2.1 Parametry drsnosti

Struktura povrchu je rozlišována dle použití filtrů na základě normy ČSN EN ISO 4287 do tří základních částí. A sice na základní profil, vlnitost povrchu a drsnost povrchu [14].

Tato norma dále rozlišuje parametry drsnosti povrchu na výškové (výstupky a prohlubně / průměrná hodnota pořadnic), délkové, tvarové a křivky a odpovídající parametry (viz. tabulka č. 3) [15].

Tabulka č. 3: Vybrané parametry drsnosti dle ČSN EN ISO 4287 [15].

Skupina	Název	Označení	Jednotka
Výškové (výstupky a prohlubně)	Největší výška výstupku profilu	$R_p$	$\mu\text{m}$
	Největší hloubka prohlubně profilu	$R_v$	$\mu\text{m}$
Výškové (průměrné hodnoty pořadnic)	Průměrná aritmetická úchylka profilu	$R_a$	$\mu\text{m}$
	Špičatost posuzovaného profilu	$R_{ku}$	-
Délkové	Průměrná šířka prvků profilu	$R_{Sm}$	mm
Tvarové	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	$R_{\Delta q}$	-
Křivky a odpovídající parametry	Materiálový poměr profilu (nosný podíl)	$R_{mr}(c)$	-

Další norma zkoumající texturu povrchu je norma ČSN EN ISO 25178-2. Spravuje definice (filtrů a textury povrchů) související s plochou, nebo objemem. Definuje také tzv. parametry pole, které rozděluje do pěti skupin, podobně jako norma ČSN EN ISO 4287 [16].

Tabulka č. 4: Vybrané parametry pole dle ČNS EN ISO 25178-2 [16].

Skupina	Název	Označení	Jednotka
Výškové	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	<i>Sa</i>	μm
Prostorové	Činitel podélnosti struktury	<i>Str</i>	-
Hybridní (tvarové)	Kvadratický průměr sklonu posuzovaného topografického povrchu	<i>SΔq</i>	-
Funkční a související	Plošný materiálový poměr topografického profilu	<i>Smr (c)</i>	-
	Prázdný objem prohlubně topografického povrchu	<i>Vvv</i>	ml/m <sup>2</sup>
Smíšené	Výška povrchu z deseti bodů	<i>S10z</i>	μm

Z výše zmíněných parametrů je nejvíce rozšířený parametr *Ra*, který se uvádí na výkresové dokumentaci, avšak je necitlivý vůči extrémním výškám a prohlubním (rýhám) profilu [14]. Pro vyšší vypovídající hodnotu je třeba znát i parametr nosného podílu.

## 2.2 Měření drsnosti

Potřeba kontroly obrobené drsnosti vzniká zejména na funkčních plochách, které mají přímý vliv na funkčnost součásti. Takové jsou v kontaktu s dalšími součástmi a tvoří sestavu.

Kvalifikace metod měření drsnosti (dle literatury [17]) je uvedena v tabulce č. 5 (na následující straně). Dále budou uvedeny pouze vybrané metody.

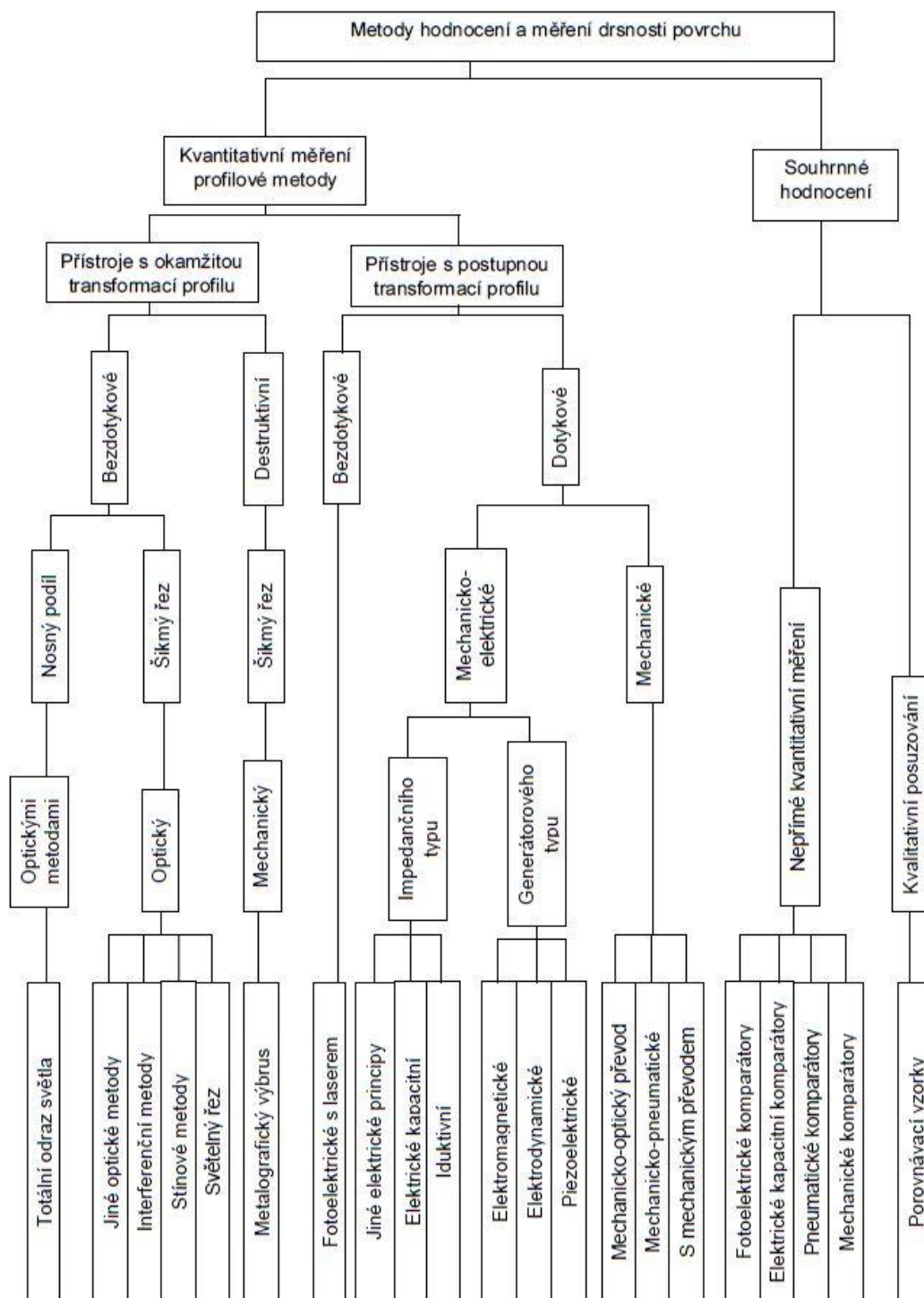
### 2.2.1 Kvalitativní hodnocení povrchu

Takto se kvalifikuje hodnocení povrchu za použití lidských smyslů a je založeno na porovnávání obrobené součásti s etalonem za pomoci hmatu, popř. zraku (a jednoduchých optických pomůcek) [17].

Na etalony jsou kladeny tyto požadavky: stejný materiál (jaký má zkoumaná součást), shodná výrobní metoda a shodný tvar (plochý, vydutý, vypuklý). Při porovnávání se součástí pak musí být dodrženy stejné podmínky pozorování (osvětlení) [18].

Přesnost této metody při porovnávání zrakem – za použití světelného mikroskopu – se prakticky uvažuje 1 μm. Hmatem je možné (po získání praxe) rozpoznat rozdíl až 0,1 μm [17].

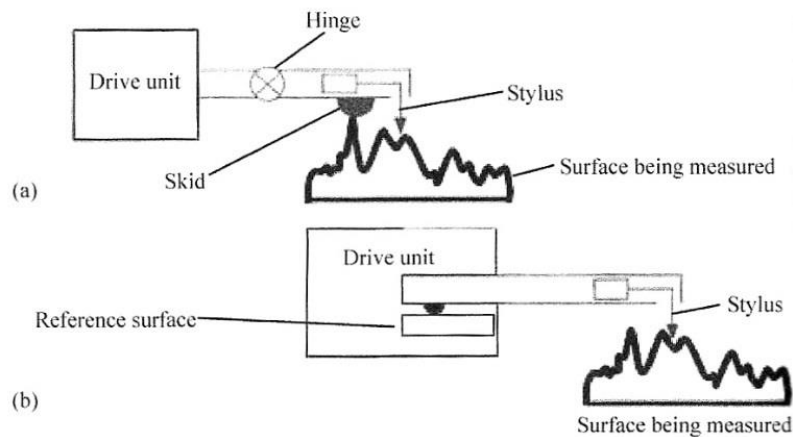
Tabulka č. 5: Kvalifikace metod obrábění [17].



### 2.2.2 Měření dotykovými přístroji

Jde o způsob měření, kdy se po povrchu součásti rovnoměrnou rychlostí posouvá hrot měřícího přístroje, jehož pohyb je zaznamenáván a následně je z něj tvořen profil povrchu součásti. Často se po součásti posouvá vedle hrotu ještě opěrná patka a výsledný profil je změřen jako rozdíl výšek hrotu a patky (relativní snímač) [17].

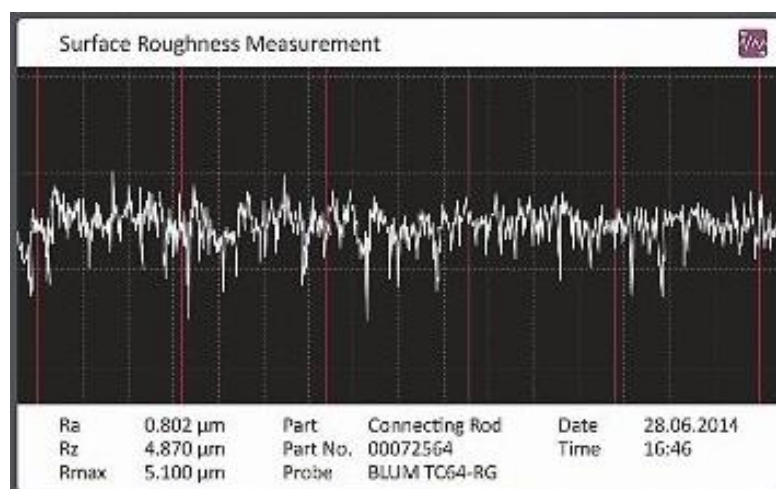
Pro měření se využívají diamantové hroty s vrcholovým úhlem  $90^\circ$  a zaoblenou špičkou, která má poloměr zaoblání (2, 5, popř. 10)  $\mu\text{m}$ . Přičemž při použití hrotu s poloměrem zaoblání špičky 2  $\mu\text{m}$  je možné měřit až do hodnot  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ , než se projeví (nežádoucí) efekt zaoblání [17].



Obrázek č. 2: Příklad konstrukčního řešení kontaktních snímačů.

Na obrázku č. 2 jsou zobrazena dvě z mnoha možných konstrukčních provedení kontaktních snímačů. V případě (a) se opěrná patka posouvá vedle hrotu po měřené součásti, v případě (b) opěrná patka kluže po referenčním povrchu, který musí mít shodný tvar se součástí a hrot se posouvá po zkoumaném povrchu [11].

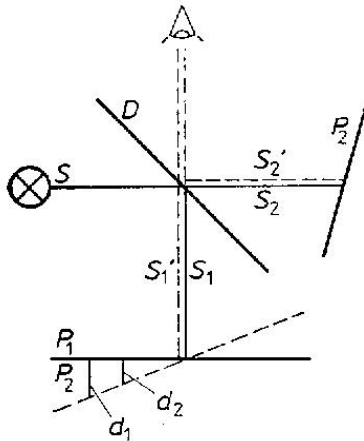
Autor článku [19] informuje o vzniku měřicí sondy, která slouží k vyhodnocování drsnosti povrchu kontaktním způsobem přímo v obráběcím stroji. Sonda je upnuta v zásobníku nástrojů číslicově řízeného stroje a je tedy navržena s odpovídajícím (vysokým) stupněm krytí (IP 68). Dle autora je sonda schopna během několika vteřin změřit parametry  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{\text{max}}$ . Hodnoty drsnosti může zobrazit pomocí grafického uživatelského rozhraní [19].



Obrázek č. 3: Výstupní protokol kontaktního snímače TC64-RG (popisované sondy) [19].

### 2.2.3 Měření interferenční metodou

Měření drsnosti pomocí interference světla se řadí mezi optické metody. Tyto metody dosahují přesnějších výsledků, než metody využívající kontaktní způsob měření (z důvodu zaoblení hrotu snímače), ale jejich použití vyžaduje značnou čistotu povrchu součásti [17].

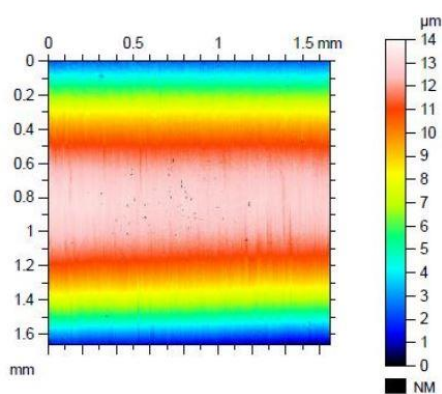


Obrázek č. 5: Schéma Michelsonova interferometru [17].



Obrázek č. 4: Zobrazení výstupu objektivu interferometru [18].

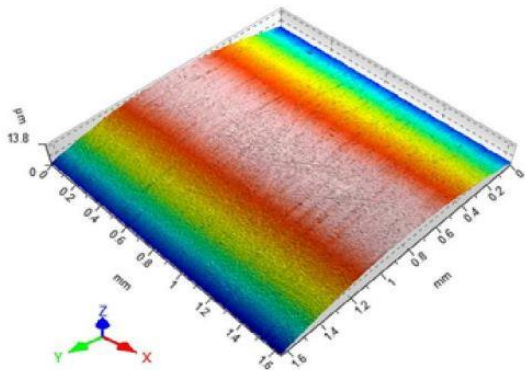
Princip metody je zobrazen na obrázku č. 4. Paprsek světla vychází ze zdroje S a pokračuje na polopropustnou diodu, kde se dělí. Část paprsku pokračuje na referenční zrcadlo a část paprsku se odrazí na měřenou součást. Od obou povrchů se paprsek odrazí zpět a přes diodu se dostane do objektivu, kde se skládá (interferuje). Výstup objektivu je zobrazen na obrázku č. 5, kde nerovnost přímých čar značí drsnost povrchu (vychýlení součásti zobrazené na obrázku č. 4 čárkovanou čarou). Existují různá provedení interferometrů, avšak princip metody je vždy zachován [17].



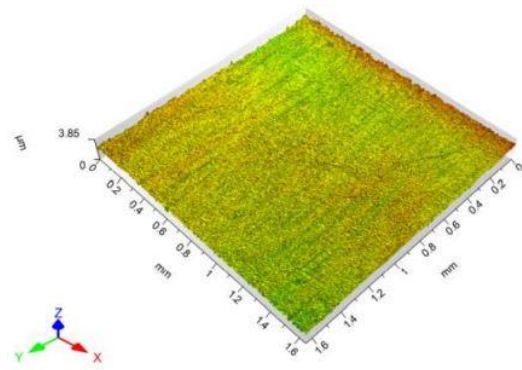
Obrázek č. 6: Nasnímaný povrch součásti [20].

Na obrázcích č. 6-9 je popsán průběh měření, podle zdroje [20], na přístroji Taylor Hobson Talysurf CCI Lite (dále jen Taylor), který pracuje na principu interference světla (koherentní korelační interference, CCI). Přístroj je připojen k počítači s nainstalovaným softwarem TalyMap Gold v. 6, který umožňuje úpravy naměřeného povrchu. Součástí v tomto případě byl lapovaný vzorek ze vzorkovnice o údajné drsnosti  $R_a$   $0,05 \mu\text{m}$  [20].

Nejprve byl povrch součásti nasnímán přístrojem Taylor (obrázek č. 6) a data exportována do počítače, kde byl vytvořen model povrchu (obrázek č. 7). Následně byl modelu odebrán vlastní tvar součásti (obrázek č. 8) [20].

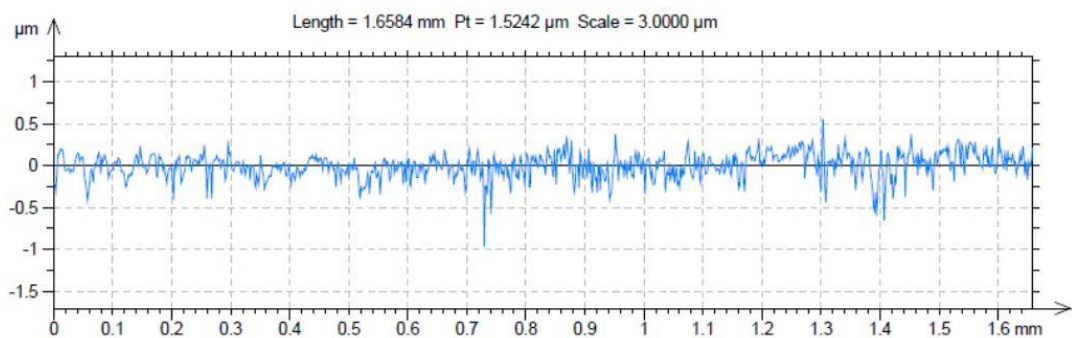


Obrázek č. 7: Model povrchu součásti [20].



Obrázek č. 8: Model povrchu součásti po odebrání tvaru [20].

Z modelu na obrázku č. 8 byl softwarem extrahován charakteristický profil součásti (obrázek č. 9) a je možné z něj vytvořit i ostatní profily ( $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_{Sm}$ ...) [20].



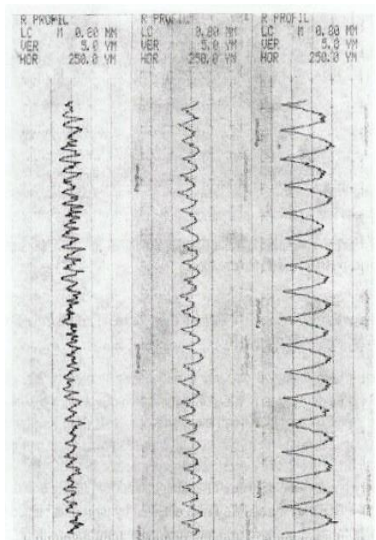
Obrázek č. 9: Charakteristický profil povrchu součásti [20].

### 2.3 Drsnost dosahovaná metodami obrábění

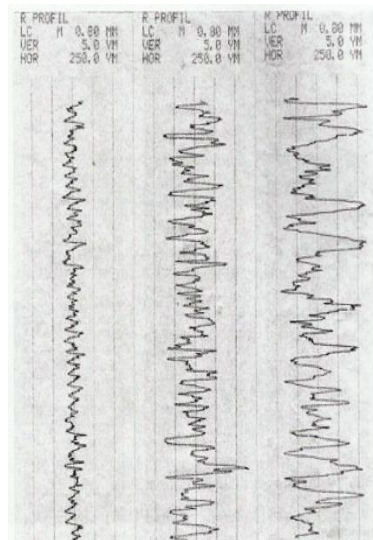
Vzhled povrchu součásti se liší u každé metody obrábění. Záleží především na kinematice obráběcí metody, a také na geometrii nástroje (nástroje s definovanou, popř. nedefinovanou geometrií). Výsledný profil součásti ale záleží především na řezných podmínkách, kterými jsou, v případě konvenčního obrábění, velikost posuvu, řezná rychlost a hloubka řezu [11].

Na obrázcích č. 10, 11 a 12 je znázorněno, jak se mění profil drsnosti při soustružení vzhledem k řezným podmínkám (v uvedeném pořadí). Obrázek č. 10 znázorňuje, že při zvyšování posuvu se rovnoměrně zvětšuje i profil drsnosti. Při zvyšování řezné rychlosti (obrázek č. 11) se profil drsnosti zvětšuje relativně nahodile a z obrázku č. 12 je patrné, že nejméně profil drsnosti ovlivní hloubka řezu. Hodnoty byly stanoveny pro obrábění uhlíkové oceli AISI 12L13 (ČSN 11 109) [11].

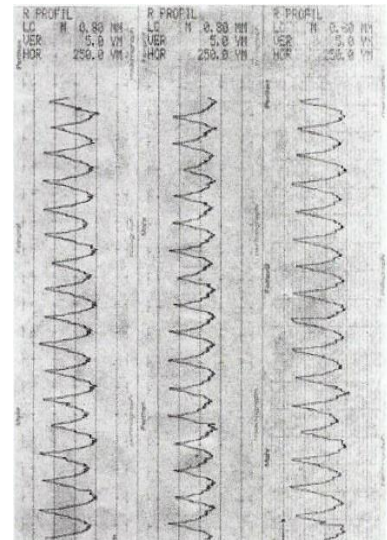




Obrázek č. 10: Vliv posuvu [11].



Obrázek č. 11: Vliv řezné rychlosti [11].



Obrázek č. 12: Vliv hloubky řezu [11].

Za účelem zlepšení kvality povrchu po obrábění byly vyvinuty vyměnitelné břitové destičky speciálních tvarů, doslovným překladem se stěračem (angl. wiper inserts), které lépe kopírují budoucí tvar součásti. Tyto destičky dosahují stejných drsností povrchu přibližně při dvojnásobných hodnotách posuvu, což zvyšuje produktivitu obrábění [39].

U metody elektroerozivního obrábění jsou řeznými podmínkami počet pulzů a pulzní proud. Platí, že pokud se zvyšuje alespoň jedna z podmínek, zvyšuje (zhoršuje) se i drsnost obrobené plochy [11].

V tabulce č. 6 jsou opět uvedeny běžně dosahované parametry obrábění na čisto. Při jemném obrábění je možné dosáhnout lepších výsledků (např. při soustružení nástrojem z kubického nitridu boru je možné dosáhnout drsnosti Ra až 0,2  $\mu\text{m}$ ).

Tabulka č. 6: Dosahované drsnosti Ra, jednotky v  $\mu\text{m}$  [1, 2].

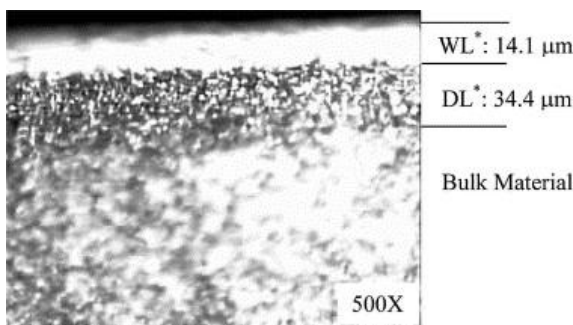
Metoda obrábění	Dosahované drsnosti Ra				
Soustružení	1,6	Broušení obvodem	0,4	Elektrochemické	1,6
Frézování	1,6			Elektroerozivní	1,6
Vrtání	12,5	Honování	0,4		
Vyhrubování	6,3	Lapování	0,2		
Vystružování	1,6	Superfinašování	0,1		
Vyvtávání	3,2				

### 3 Mikrotvrдость

Mikrotvrđostí nazýváme tvrđost povrchu součásti, která se zjišťuje za použití velmi malých zkušebních zatížení (u Vickersovy metody jde o zatížení do 2 N). Tato měření se využívají pro zjišťování tvrđosti tenkých vrstev, kdy je zapotřebí vyloučit vliv základního materiálu. Jde o vrstvy získané např. chemicko – tepelným zpracováním [21].

#### 3.1 Vrstvy vzniklé obráběním

Při obrábění (zejména tzv. tvrdém) je generováno velké množství tepla během krátkých intervalů. Toto má za důsledek vznik tepelně ovlivněné oblasti v součásti, ve které dochází ke strukturním změnám materiálu, k zakalení (tzv. hardening) [11].

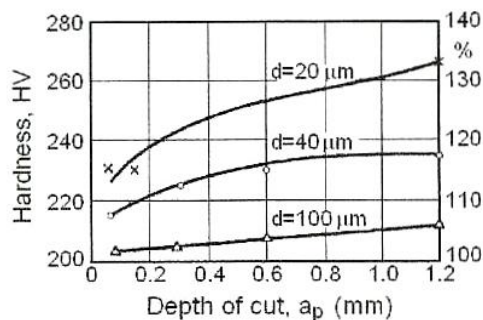


Obrázek č. 13: Vrstvy na povrchu součásti vzniklé obráběním [22].

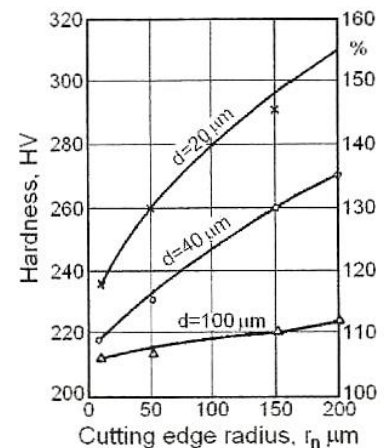
Tepelně ovlivněná oblast je složena (v tomto případě) ze dvou vrstev, kterými jsou: vrstva tvrdší, než základní materiál (White Layer, světlá vrstva<sup>1</sup>) a vrstva měkčí, než základní materiál (Dark Layer, tmavá vrstva<sup>2</sup>), která bývá několikanásobně hlubší než světlá vrstva [11].

#### 3.1.1 Konvenční metody obrábění

Na obrázcích č. 14 a 15 je zobrazena tvrđost světlé vrstvy pro tvrdé soustružení v závislosti na řezných parametrech ve třech vzdálenostech od povrchu součásti. Závislosti byly vytvořeny při řezné rychlosti  $v_c = 3$  m/s pro ocel AISI 52100 (ČSN 14 109) [11].



Obrázek č. 15: Vliv hloubky řezu na vznikající tvrđost [11].



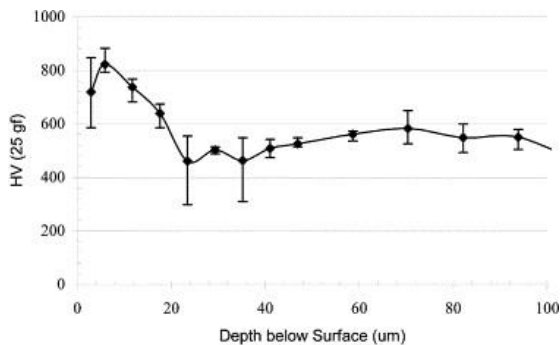
Obrázek č. 14: Vliv poloměru zaoblení špičky nástroje na tvrđost světlé vrstvy (White layer) [11].

<sup>1</sup> Vrstva (Layer) se označuje jako světlá (popř. White) z důvodu bílé barvy při zobrazení mikroskopem [11].

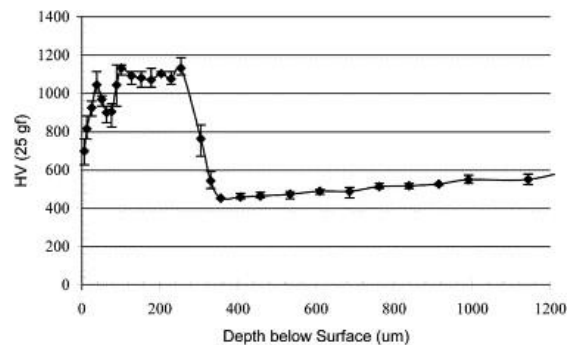
<sup>2</sup> Podobně jako u poznámky 1.

Obecně lze tedy říci, že tvrdost povrchové vrstvy roste se zvyšujícími se řeznými podmínkami spolu s teplotou v místě obrábění [11].

Obrázky č. 16 a 17 nabízejí porovnání průběhu tvrdosti v závislosti na vzdálenosti směrem do středu součásti pro výše zmíněnou ocel obrobenou tvrdým soustružením (obrázek č. 17) a broušením (obrázek č. 18). Z obrázků je patrné, že hloubka tepelně ovlivněné oblasti (plynoucí z teploty v místě řezu) je při broušení několikrát vyšší, což je způsobeno např. větší stykovou plochou nástroje s obrobkem, vyššími otáčkami atd. [22].



Obrázek č. 16: Průběh mikrotvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu součásti po tvrdém soustružení [22].



Obrázek č. 17: Průběh mikrotvrdosti v součásti po broušení [22].

### 3.1.2 Nekonvenční metody obrábění

Při elektroerozivním obrábění tloušťka vznikajících vrstev v součásti závisí např. na volbě elektrod (sloužících jako nástroj), nebo na schopnosti dielektrika odvádět teplo z pracovního prostoru. Přímou závislost na tloušťku vrstev má také délka jednoho impulsu, kdy platí, že se zvyšující se délkou impulsu se zvětšují i tloušťky jednotlivých vrstev [11].

V průběhu elektrochemického obrábění nevzniká na povrchu součásti příliš vysoká teplota. Z tohoto důvodu nejsou na součástech pozorovány žádné strukturální změny [11].

## 4 Zbytková napětí

Tato napětí jsou napětí, která zůstávají v součásti i bez působení vnějšího zatížení. Nejčastěji bývají vytvářena jako důsledek technologické operace (např. po odlévání, kdy vznikají při chlazení odlitků, nebo při obrábění v zóně elasticko-plastické deformace) a vyskytují se v součástech jako nesoulad mezi různými částmi materiálu [23, 24].

Zbytková napětí mají vliv na pevnostní, korozní nebo (zejména) únavové vlastnosti materiálu (součásti), přičemž mohou být buďto tahová nebo tlaková. Pokud jsou výsledná napětí (součet napětí zbytkových a od vnějšího zatížení) tahová, přispívají k šíření trhlin po povrchu součásti, proto bývají nežádoucí. Naopak napětí tlaková trhliny zavírají a jsou žádoucí [25].

### 4.1 Rozdělení zbytkových napětí

Z hlediska charakteristické délky (kontrolního objemu) lze zbytková napětí rozdělit na napětí I., II. a III. druhu [26].

- Napětí I. druhu jsou napětí, která zasahují alespoň podstatnou část součásti. Označují se jako makroskopická.
- Napětí II. druhu jsou napětí, která zasahují objem několika krystalových zrn. Označují se jako mikroskopická.
- Napětí III. druhu jsou napětí, která zasahují pouze v několika atomových vzdálenostech. Označují se jako submikroskopická [24, 26].

### 4.2 Vznik napětí

Příčin vzniku zbytkových napětí, jak je již výše zmíněno, může být celá řada. Také je možné příčiny rozdělit podle mnoha subjektivních kritérií, dále je uvedeno rozdělení podle literatury [11] s příkladem příčiny.

Zbytkové napětí způsobeno:

- Materiálem – vícefázové systémy, vměstky, mřížkové vady
- Pracovními podmínkami:
  - o Mechanickými – důsledek historie zatěžování (plastická deformace, únava)
  - o Tepelnými – nehomogenní teplotní pole
  - o Chemickými – elektrochemická koroze

- Procesy spojené s výrobou součástí:
  - o Odléváním – nerovnoměrné ochlazování
  - o Tvářením – plastická deformace
  - o Obráběním – broušení, soustružení
  - o Napojováním – svařování
  - o Povlakováním – CVD<sup>3</sup>, PVD<sup>4</sup> povlaky
  - o Tepelným zpracováním – kalení, nitridování

### 4.3 Měření napětí

O výběru metody pro měření zbytkových napětí rozhoduje především druh zkoumaného materiálu, geometrie součásti, polohy měření, požadovaná hloubka vyhodnocování a dostupnost metod. Nejčastěji se měřící metody řadí podle dvou kritérií (dále v závorkách uvedeny příklady metod) [24].

#### 1) **Dle míry narušení celistvosti součásti**

- Nedestruktivní: nedochází k narušení celistvosti součásti (neutronová difrakce)
- Polodestruktivní / Semidestruktivní: malá míra narušení celistvosti, narušení nemá vliv na funkčnost, popř. následuje oddělení vrubu od součásti (metoda vrtání otvoru)
- Destruktivní: dochází ke znehodnocení součásti (metoda šikmých řezů) [24]

#### 2) **Dle principu měření**

- Mechanické: zahrnují polodestruktivní a destruktivní metody
- Fyzikální (vč. elektrických, akustických, magnetických): zahrnují nedestruktivní metody
- Chemické: využívají chemických procesů [24]

### 4.4 Ovlivnění průběhu napětí

Jak již bylo výše zmíněno, v povrchové vrstvě jsou preferována napětí tlaková, což vede ke snahám o ovlivnění jeho průběhu. Z faktorů ovlivňujících výsledné zbytkové napětí (viz. výše) se zkoumá především napjatost povrchu součásti po obrábění danou metodou za daných rezných podmínek.

#### 4.4.1 Konvenční metody obrábění

Důvodem vzniku zbytkových pnutí při tradičním obrábění jsou zejména: plastická deformace vznikající působením rezného nástroje na součást, teplota v místě řezu a strukturní změny v materiálu způsobené extrémními teplotami a časy jejich výdrže [11].

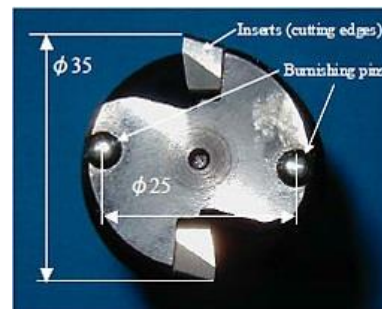
<sup>3</sup> Povlak CVD (chemical vapor deposition) způsobuje tahová napětí [27].

<sup>4</sup> Povlak PVD (physical vapor deposition) způsobuje tlaková napětí [27].

## Frézování

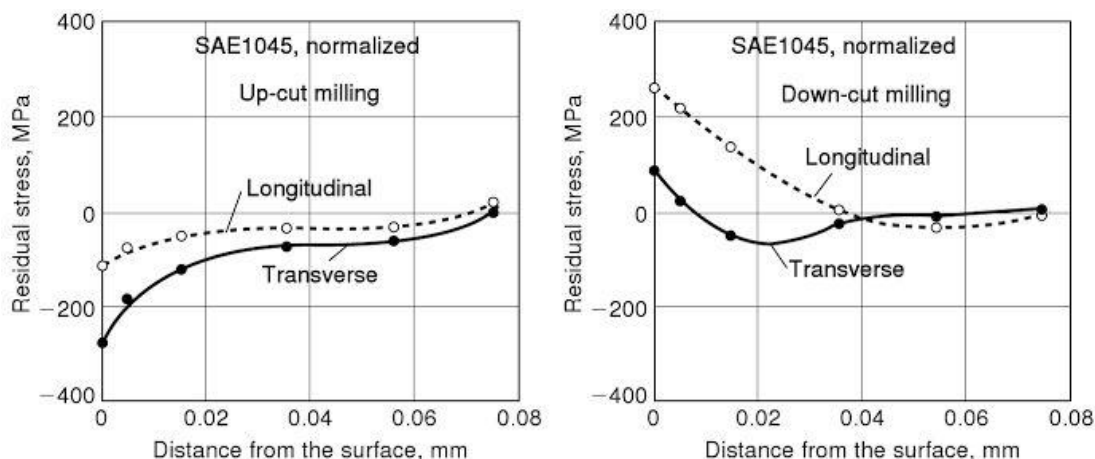
Způsobu ovlivnění průběhu zbytkových napětí po frézování se věnuje např. literatura [27], která porovnává průběhy napětí v závislosti na řezné rychlosti s využitím, nebo nevyužitím chlazení. Dále např. literatura [29] porovnává průběhy napětí po frézování monolitním nástrojem, nebo nástrojem s vyměnitelnými břitovými destičkami.

Snahy o vyvolání tlakových napětí po frézování vedly k vývoji nástroje pro čelní frézování, který konstrukcí zajistí stlačení materiálu na povrchu po odebrání požadované třísky. Kuličky po obvodu nástroje jsou k povrchu přitlačovány talířovými pružinami. Napětí v součásti po použití nástroje mají skutečně tížený průběh [11].



Obrázek č. 18: Speciální nástroj pro čelní frézování [30].

Na obrázku č. 18 je porovnání průběhů napětí po frézování (sousedném a nesousedném) oceli SAE1045 (ČSN 12 050). Na obrázku je vidět, že při nesousedném frézování bylo dosaženo tlakových zbytkových napětí, přičemž při obrábění sousledném bylo dosaženo napětí tahových. Tento jev je způsoben tím, že při frézování sousledném je dominantní faktor výsledného napětí teplota v místě řezu (která způsobuje napětí tahová) a naopak při frézování nesousedném je dominantním faktorem plastická deformace (způsobuje napětí tlaková) [28].



Obrázek č. 19: Průběhy zbytkových napětí po frézování, vlevo sousledném, vpravo nesousledném [28].

## Soustružení

V průběhu soustružení obvykle bývá na povrchu součásti dominantním faktorem teplota a pod povrchem plastická deformace. Napětí tedy zpravidla směřují z tahových k tlakovým. Tento jev ale není směrodatný, podle [11] bývá opačného průběhu dosahováno např. po tvrdém soustružení [28].

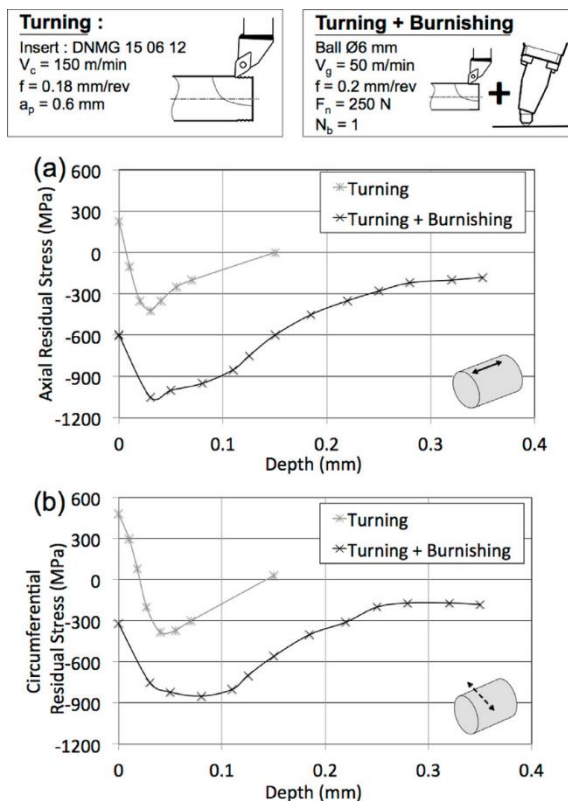
Obecně lze průběh napětí ovlivnit podobnými způsoby jako při frézování, např. změnou posuvu (viz. [28]), nebo, jak je uvedeno v [31], změnou poloměru zaoblení nástroje. Na průběh napětí má také poměrně zásadní vliv opotřebení nástroje, kdy by se dalo říci, že v případě opotřebeného nástroje je dosahováno extrémnějších hodnot (např. vyšších tahových napětí na povrchu a nižších tlakových napětí pod povrchem ve větší hloubce). Dále je v literatuře [11] uveden i vliv materiálu nástroje, příp. vliv povlakování [11].

Podobně jako při frézování vedly snahy o dosažení tlakových napětí v povrchu k vyvinutí speciálního nástroje, přidává se po soustružení další operace válečkování. Na obrázku č. 20 je porovnání průběhu napětí po soustružení a po soustružení s následným válečkováním v axiálním a tangenciálním směru [11].

## Broušení

Při broušení má zásadní vliv na výsledný průběh napětí volba abrazivního materiálu. Nejlepších výsledků (téměř zaručeně tlakových napětí na povrchu) dosahují materiály, jako kubický nitrid boru (KNB), nebo diamant. Snahy o dosažení tlakových napětí za použití řezné keramiky vedou ke snížení řezných podmínek (aby se generovalo méně tepla).

Na obrázku č. 21 je znázorněna závislost povrchového napětí jako funkce objemu odebíraného materiálu pro kotouč z řezné keramiky (A80K6V) a kotouč z KNB (CBN, B64VSS). Materiál vzorku byla ocel 100Cr6 (ČSN 14 109). U kotouče z keramiky je vidět razantní nárůst napětí, z důvodu rychle se zvyšující teploty v místě řezu. Naopak

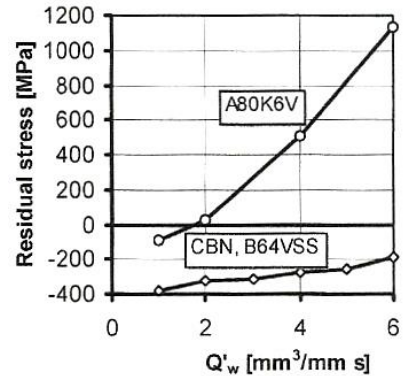


Obrázek č. 20: Porovnání průběhů napětí po soustružení a po soustružení s následným válečkováním [32].

u kotouče z nitridu boru se teplota zvyšuje o poznání pomaleji (z důvodu vysoké tepelné vodivosti), proto si „dokáže udržet“ tlaková napětí [11].

#### 4.4.2 Nekonvenční metody obrábění

Jak již bylo zmíněno v kapitole mikrotvrdosti, materiál obráběný těmito technologiemi je vystaven především tepelnému namáhání, a protože při elektrochemickém obrábění není materiál vystaven přílišné teplotě, není ovlivněna ani tvrdost, ani není pozorováno zbytkové napětí v součásti [11].

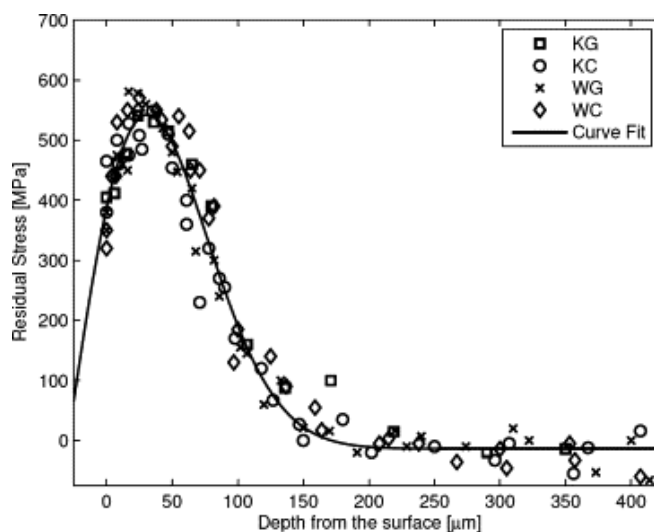


Obrázek č. 21: Průběh zbytkového napětí pro různé materiály brousících kotoučů [11].

#### Elektroerozivní obrábění

Po této obráběcí metodě zůstávají v součásti tahová napětí, která se dají zmírnit např. zkrácením doby trvání jednoho pulzu. Z pohledu dynamicky namáhané součásti jde tedy o nevhodně zvolenou dokončovací operaci [11].

Na obrázku č. 22 je zobrazen průběh napětí ovlivněný volbou elektrod a dielektrik. V popiscích dat vždy první písmeno znamená zvolené dielektrikum a druhé elektrodu. Dielektrika byla použita kerosin (K) a deionizovaná voda (W), jako elektrody uhlíková (G) a měděná (C). Obráběný materiál byl DIN 1.2738 a můžeme pro něj vyzorovat z obrázku, že největších tahových napětí bylo dosaženo u vzorku WG a naopak nejnižších pro vzorek KG, i když jen s malými rozdíly. Tlaková napětí byla naměřena ve vzdálenosti 250 až 400  $\mu\text{m}$  od povrchu součásti [33].



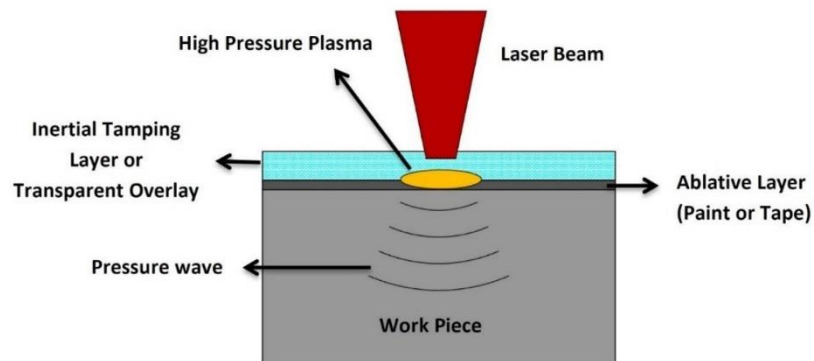
Obrázek č. 22: Průběhy zbytkových napětí pro různá dielektrika a různé elektrody [33].



#### 4.4.3 Dokončovací metody

##### Laser peening

LP (laser peening), neboli také LSP (laser shock peening) je dokončovací technologie, při které nedochází k úběru materiálu. Jde o mechanický proces, kdy laserem generované pulzy (paprsky) dopadají na povrch součásti, ve které způsobují rázové vlny. Tyto vlny plasticky deformují povrch a zapříčiňují vznik tlakových napětí [35].



Obrázek č. 23: Schématické zobrazení technologie laser peening [35].

Cílový povrch je pokryt ablační vrstvou, která se po zasažení paprsku vypařuje, utváří plazmu a chrání povrch před tepelným ovlivněním. Tato vrstva může být tvořena např. černou barvou (která dokáže nejlépe absorbovat energii laseru), nebo vinylovou páskou. Další vrstva je pěchovací (doslovně překrývací). Slouží k udržení plazmy na povrchu součásti. Může být tvořena např. vodou, nebo sklem [35, 36].

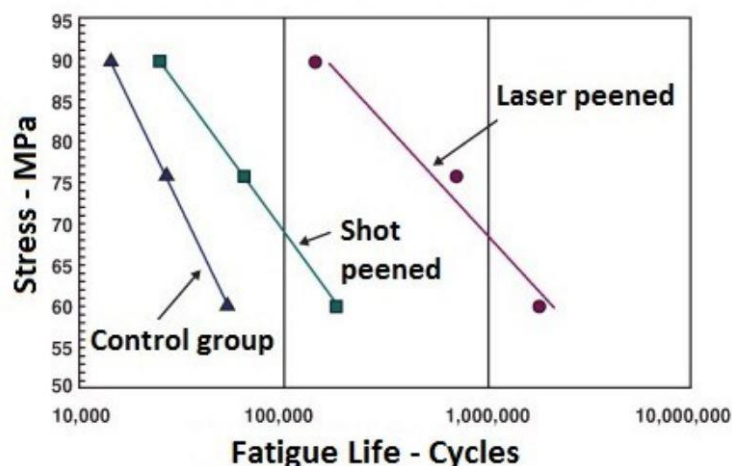
V závislosti na parametrech stroje je možné nastavit kolikrát a jakou intenzitou paprsek bude materiál zpevňovat, přičemž oba parametry zpevnění zesílí. Naopak zeslabení zpevnění dojde při nastavení většího paprsku laseru, popř. dojde k nepředvídatelnému zpevnění, pokud se laser vychýlí o určitý úhel [35, 36].

Dle literatury [35] již byly stanoveny nejvýhodnější nastavení strojů (výkon laseru, délka pulzu) pro vybrané materiály. Také byly testovány jednotlivé možné vrstvy pokrývající součást pro zjištění ideálních vlastností.

##### Kuličkování

Metoda kuličkování pro dosažení tlakových napětí v povrchu součásti využívá plastické deformace způsobené vystřelenými kuličkami proti součásti. Kuličky nesmí mít ostré hrany, aby nezpůsobovaly úběr materiálu a více ho nenarušovaly. Vyrábí se z oceli (která může zapříčinit vměstky v materiálu), skla, popř. keramiky [36].

Kuličkují se např. radlice orných strojů, jejichž životnost se kuličkováním až zdvojnásobila [37].



Obrázek č. 24: Porovnání životností součástí kuličkových a součástí ošetřených pomocí laser peeningu [35].

Na obrázku č. 24 je znázorněna únavová pevnost slitiny hliníku 6061-T6 používané např. v letectví, nebo jako rámy jízdních kol. V diagramu je porovnání životnosti součástí ošetřené kuličkováním a stejné součásti ošetřené laser peeningem. Součást ošetřena metodou LP dosahuje až desetinásobné životnosti oproti kuličkové, což je způsobeno většími tlakovými napětími v povrchu [35].

#### Zpevňování v pracovním prostoru číslicově řízeného stroje

Literatura [38] hovoří o metodě mechanického zpevňování povrchu přímo v obráběcím stroji, kdy je na místo obráběcího nástroje upnut speciální nástroj pro toto zpevňování. Dle autora článku je tento proces schopen dosahovat kvalit zpevnění povrchu, kterých se dosahuje kuličkováním.



Obrázek č. 25: Ukázka práce speciálního nástroje pro vytvrzování v CNC stroji [38].

## Závěr

V současné době existuje mnoho metod zjišťování parametrů kvality povrchu a další se stále vyvíjejí, jak se současně s nimi zdokonalují i metody obrábění. V případě kontroly drsnosti je jednou z relativně nových metod kontaktní měření sondou v prostoru obráběcího stroje. Její využití bude pravděpodobně velmi omezené z důvodu malého množství zjištěných parametrů. Na druhou stranu, velmi přesné a rozsáhlé výsledky poskytují přístroje pracující na principu interference světla, což je vykoupeno přísnými podmínkami při měření.

Pokud bychom se zaměřili na technologie výroby těchto parametrů, došli bychom pravděpodobně také k závěru, že se stále vyvíjejí nové a alespoň v jednom požadavku, na technologii kladeném, dokonalejší. Jako názorný příklad se zde jeví technologie tvořící žádaný průběh zbytkových napětí na povrchu součástí, a sice laser shock peening, který je - alespoň v jistých oblastech použití - nástupcem kuličkování (řízeného kuličkování). Naopak jako metoda vyvinuta pro specifický trh (použití) se prozatím jeví metoda zpevňování povrchu v obráběcím stroji.

Na základě práce lze parametry vyhodnotit také podle vlivu na životnost a opotřebení součástí. Za tohoto rozdělení by mělo nejvýznamnější vliv na životnost součástí zbytkové napětí. Na opotřebení součástí by nejvýznamněji působila mikrotvrdost, které se případně dosahuje i tepelným (chemicko – tepelným) zpracováním.

## Použitá literatura

[1] BUMBÁLEK, Bohumil a Jaroslav PROKOP. *VYSOCE PŘESNÉ METODY OBRÁBĚNÍ*. Brno, 2010. Dostupné také z:

[http://cpoint.fme.vutbr.cz/akce/kurzy/Bumbalek\\_Prokop\\_15\\_stran.pdf](http://cpoint.fme.vutbr.cz/akce/kurzy/Bumbalek_Prokop_15_stran.pdf)

[2] *Technologie obrábění: 1. díl*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2000.

[3] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

[4] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Výrobní stroje obráběcí* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-80-248-2941-8. Dostupné z:

<https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/VSO.pdf>

[5] Nové technologie při výrobě nosných dílů obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, (4), Strana 16 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-technologie-pri-vyrobe-nosnych-dilu-obrabecich-stroju.html>

[6] Broušení s vysokou přesností. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/novinka/brouseni-s-vysokou-presnosti.html>

[7] Vliv odměřování na přesnost obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, (11), Strana 26 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-odmerovani-na-presnost-obrabecich-stroju.html>

[8] Secrets of Accurate Machining: Linear encoders keep their accuracy when things start to heat up. *Machine Design* [online]. 2008 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/archive/secrets-accurate-machining>

[9] *Současné trendy středění nástrojů pro výrobu přesných děr*. Plzeň, 2015. Dostupné také z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16132/1/Rehor.pdf>

[10] *Katalog držáků SECO TOOLS: ER collet chuck*. Dostupné také z: <http://www.directindustry.com/prod/seco-tools/product-5699-764643.html>

[11] DAVIM, J. Paulo. *Surface integrity in machining*. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-873-5.

[12] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-718-3312-6.

[13] *METROLOGICKÁ KONFIRMACE MĚŘIDLA* [online]. In: . Brno, 2011 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41432](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432)

[14] *Měření drsnosti povrchu* [online]. In: . [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3721093/>

[15] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS): Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu..* Český normalizační institut, 1999.

[16] ČSN EN ISO 25179-2: *Bezpečnost strojních zařízení - Základní pojmy, všeobecné zásady pro konstrukci -Část 2: Technické zásady*. Český normalizační institut, 2004.

[17] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.

[18] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-X.

[19] Integrace měření drsnosti povrchu do obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, (10), Strana 74 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/integrace-mereni-drsnosti-povrchu-do-obrabecich-stroju.html>

[20] *Hodnocení drsnosti povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou: Bakalářská práce* [online]. In: . Brno, 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

[https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/60947/2016\\_BP\\_Spackova\\_Magda.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/60947/2016_BP_Spackova_Magda.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[21] *Měření tvrdosti kovů* [online]. In: . Zlín, 2011 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16296/eli%C3%A1%C5%A1ov%C3%A1\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16296/eli%C3%A1%C5%A1ov%C3%A1_2011_bp.pdf?sequence=1)

[22] SAHNI, J. A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, (44), Strany 135–145 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.10.009>

[23] WITHERS, P J. Residual stress and its role in failure. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2007, (12) [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/70/12/R04?fromSearchPage=true>

[24] CIVÍN, Adam. *Komplexní teoretická analýza metody sloupku pro zjišťování zbytkových napětí* [online]. In: . Brno, 2012 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59574](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59574)

[25] Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, (5), Strana 28 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>

[26] URBAN, Josef. *Integrita povrchu: Základní pojmy* [online]. In: . [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita\\_Urban1.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_Urban1.pdf)

[27] BUMBÁLEK, Bohumil. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI* [online]. In: . 2005 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)

[28] TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, OH: ASM International, c2002.

[29] Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování [online]. 2007, (5), Strana 28 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>

[30] *Development of cutting-burnishing combined tool and its basic performance* [online]. In: . 2008 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<http://www.lm-foundation.or.jp/english/abstract-vol40/abstract/79.html>

[31] SHARMAN, A. R. C. The effect of tool nose radius on surface integrity and residual stresses when turning Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, , 123–132 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<https://doi.org.ezproxy.techlib.cz/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.002>

[32] CHOMIENNE, V., et al. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2016, 13, 90-96 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.12.003. ISSN 17555817. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581716000031>

[33] Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied Surface Science* [online]. 2007, 253, 90-96 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433207007404>

[34] DING, Wenfeng, et al. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 88(9-12), 2939-2968 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.1007/s00170-016-8998-1. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-8998-1>

[35] GUJBA, Abdullahi, et al. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials* [online]. 2014, 7(12), 7925-7974 [cit. 2017-05-11]. DOI: 10.3390/ma7127925. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/7925/>

[36] VONDRÁK, Tomáš. *Integrita povrchu po dokončovacích zpevňovacích operáciach: Diplomová práca* [online]. In: . 2016 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66315/F2-DP-2016-Vondrak-Tomas>

[37] Tryskací zařízení pro zvýšení životnosti radlic. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, (9), 136 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tryskaci-zarizeni-pro-zvyseni-zivotnosti-radlic.html>

[38] Rakouské multifunkční stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, (6), 24 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rakouske-multifunkcni-stroje.html>

[39] SANDQVIST, Henrik. *PCBN Chip Breaker Inserts – A New Generation of PCBN Inserts* [online]. In: . 2013 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://cbnexpert.blogspot.cz/2013/03/pcbn-chip-breaker-inserts-new.html>