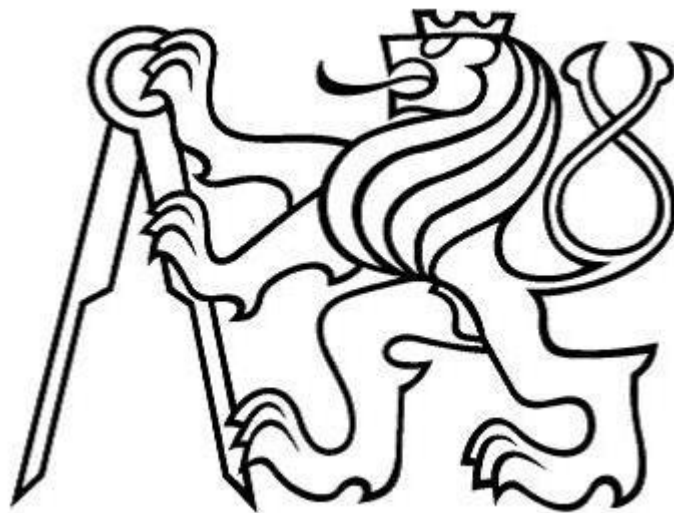


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Integrita povrchu

Praha 2015

Gordeyko Diana

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro Dianu Gordeyko

obor Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Integrita povrchu po obrábění

Název anglicky: Surface integrity after machining

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky.
2. Integrita povrchu a její ovlivnění.
3. Experimentální měření.
4. Vyhodnocení a závěr.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.


Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

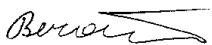
Termín odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

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


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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 28. 04. 2015


Diplomant


Vedoucí ústavu




Děkan

V Praze

dne 1. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Rázeku Vítězslavu, CSc. za trpělivost a poskytnutí cenných rad a připomínek k vypracování bakalářské práce.

ANOTACE

Gordeyko Diana: Integrita povrchu

Bakalářská práce se zabývá charakteristikou integrity povrchu, a posuzuje vlivy jednotlivých složek na stav obrobenej plochy. Teoretická část je zaměřena na základní pojmy a definice. V rámci této práce jsou charakterizovány jednotlivé metody obrábění a jejich vliv na stav povrchu obráběné plochy. Praktická část bakalářské práce se zabývá měřením drsnosti a tvrdosti povrchů na vybraných dílech. V závěru práce jsou jednotlivá měření ocelí statisticky zpracována a porovnána podle měřené metody.

Klíčová slova: struktura povrchu, drsnost, zbytková napětí, tvrdost

ABSTRAKT

Gordeyko Diana: Surface integrity

This thesis deals with measurement of surface integrity, and assesses the effects of the individual components on the state of the machined surface. The theoretical part is focused on basic concepts and definitions. There are characterized particular machining methods and their effect on the surface's quality of machined area in this study. The practical part measurement of roughness and surface hardness on chosen parts. At the end of theoretical part there is mentioned signage of surface roughness. In the end of the individual measurements of steel were statistically evaluated and compared by measuring methods.

Key words: surface texture, surface roughness, residual suspense, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE: GORDEYKO, D. Integrita povrchu. Praha: Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rázek Vítězslav CSc.

OBSAH

ÚVOD	8
I. Teoretická část	9
1. Základní pojmy a definice	10
1.1 Definice povrchu	10
1.2 Profil povrchu	11
1.3 Jakost povrchu	12
2. Integrita povrchu	13
2.1 Složky integrity povrchu	13
2.1.1 Zbytková napětí	14
2.1.2 Drsnost	18
2.1.3 Tvrdost	22
3. Tváření povrchové vrstvy	23
3.1 Dokončovací metody obrábění	23
3.1.1 Honování	23
3.1.2 lapování	24
3.1.3 Superfinišování	24
3.1.4 Leštění	25
3.1.5 Broušení	25
3.2 Speciální dokončovací metody tváření	27
3.2.1 Válečkování	27
3.2.2 Vyhlazování	30
3.2.3 Kalibrování	30
3.2.4 Kuličkování (Brokování)	31
3.2.5 Vibrační zpevňování	32

II. Praktická část	33
1. Cíl práce	34
2. Měření drsnosti	36
2.1 Diskuze výsledků	41
3. Měření mikrotvrdoměrem	41
3.1 Diskuze výsledků	46
ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49

Úvod

V současnou dobu má význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součásti. Tento mechanismus pomáhá pochopit vlastnosti vytvořeného povrchu, které jsou závislé na použité technologii, na stanovených a použitých řezných podmínkách, řezném prostředí při její tvorbě. Úkolem je povrchovou strukturu kvantifikovat a zhodnotit z hlediska požadovaných vlastností. Změny nastávající v povrchové vrstvě materiálu po obrábění lze posoudit jako změny jakosti. Jakost povrchu obroběných ploch zahrnuje: přesnost rozměru a tvaru, drsnost a mikrostrukturu, a vlastností povrchové vrstvy. Přesnost rozměru a tvaru je dána vlastní přesností stroje, tuhostí systému stroj-nástroj-obrobek a dalšími faktory. Drsnost a mikrostruktura povrchu je ovlivněna procesem řezání. Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturními změnami, stupněm zpevnění, které mohou se výrazně změnit vzhledem k vlastnostem materiálu a vzdálenosti od povrchu.

Pro hodnocení vlastností povrchové vrstvy nutné je dávat do souvislosti podmínky technologických operací s požadavky jakostí, spolehlivosti a životnosti součásti i zařízení. Dosažení požadované dokončované povrchové vrstvy je možné úběrem materiálu, vyvoláním plastické deformace nebo nekonvenčními technologiemi dokončování a nepříznivě ovlivněnou vrstvou nebo méně přesný rozměr je možné zlepšit předcházejícími operacemi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Základní pojmy a definice

1.1 Definice povrchu

Pro pevnou monokrystalickou látku, se lépe hodí definice odvozená od uspořádání molekul v látce, vedoucí ke dvěma pojmům:

povrch představuje poslední atomární rovinu

okraj (povrchová oblast, povrch) je ta část látky, která se liší od objemu svým uspořádáním nebo složením. [1]

Povrchem tělesa lze obecně vnímat obálku makroskopického tělesa, která tvoří hranici mezi základním materiálem a okolím. [2]



obr. č 1 Schéma změn v povrchové vrstvě [2]

Oblast	Hloubka	Funkční ovlivnění
horní monovrstva	0,1 nm	absorpce, chemická reaktiva
tenký	0,1-100 nm	odrazivost, tření, tepelná vodivost
Vnější povrch	0,1-10 μ m	Zpevnění, struktura zrn, aerosol
Silný film	>10 μ m	Antikorozní vrstvy, nátěry

Tab. č 1 Oblasti povrchu [2]

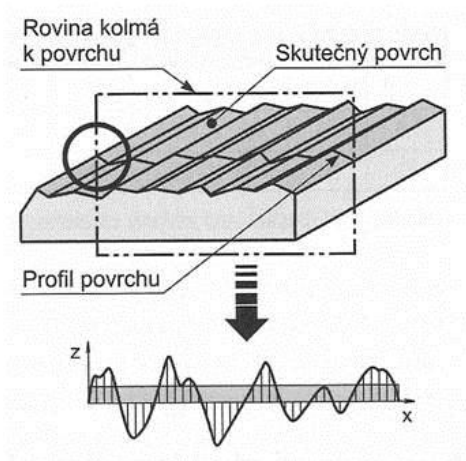
1.2 Profil povrchu

Profil povrchu je křivka vzniklá jako průsečnice skutečného povrchu a roviny kolmé k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem. Skutečný povrch omezuje těleso a odděluje jej od okolního prostředí. Na základě profilu povrchu se odvozují jednotlivé profily, na kterých jsou charakteristiky definovány. Těmito profily jsou základní profil, profil drsnosti a profil vlnitosti. Jsou profily dle ČSN EN ISO 4287. [3]

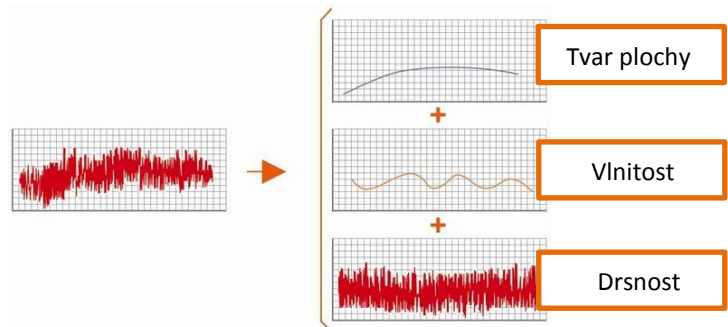
Základní profil – je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Základní profil získáme dotykovým snímáním povrchu. Tento profil je složený s tvarových odchylek, vlnitosti a drsnosti.

Profil drsnosti - jsou nepravidelnosti, které vznikly ve výrobním procesu vlivem vzájemného relativního pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Drsnost povrchu ovlivňuje mechanismus tvoření třísky, který se může projevovat například vytrháváním částic materiálu a tím ovlivnit náhodný charakter povrchu.

Profil vlnitosti - Na profilu vlnitosti je nanesen profil drsnosti. Vlnitost může být způsobena chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu, proto je považována za vliv stroje a soustavy. Příčinou bývá nevyváženost brousícího kotouče, nepřesnost vodících částí nebo malá tuhost. [3]



Obr. č 2 Profil povrchu [3]



Obr. č 3 Prvky profilu [4]

1.3 Jakost povrchu

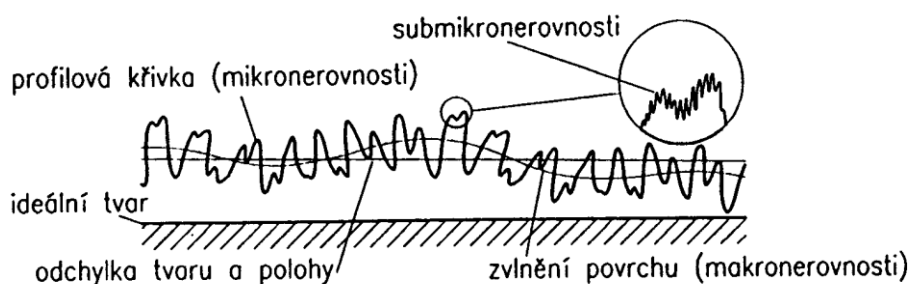
Výsledný povrch je ovlivněn především, jak jsem uvedla výše, technologií obrábění, řeznými podmínkami, materiálem a geometrií břitu řezného nástroje, tuhostí a pevností systému stroj-nástroj-obrobek-přípravek a řezným prostředím. Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat podle následujících hledisek:

- přesnost rozměru a tvaru,
- drsnost a mikrostruktury,
- vlastností povrchové vrstvy.

Přesnost rozměru a tvaru je dána vlastní přesností stroje a dalšími faktory, které nepřímo působí na technologický proces. Drsnost a mikrostruktura povrchu je ovlivněna procesem řezání. Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturními změnami, stupněm zpevnění, a mohou se výrazně měnit vzhledem k vlastnostem materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu. [5]

Povrch z geometrického hlediska

Z hlediska funkce součásti jsou geometrické vlastnosti povrchu velmi důležité. Odchylky od ideální rovinnosti mohou vznikat při přípravě povrchu nebo výrobě součástí. Po opracování je povrch zvlněn makronerovnostmi a nástrojem vytvářené rýhy považujeme za mikronerovnosti (obr. 4). Tyto údaje jsou na výrobních výkresech předepsány pomocí přípustných hodnot odchylek tvaru. Odchylky od geometrické přesnosti sledujeme jako rozdíly nejvyšších a nejnižších hodnot profilu.



Obr. č 4 Základní pojmy geometrie povrchu [6]

Odchylky povrchu	Příklady	Příčiny
1. řádu 	nerovinnost nekruhovitost	deformace při upnutí
2. řádu 	zvlnění	chvění při obrábění
3. řádu 	drsnost	rýhy s roztečí posuvu na 1 otáčku
4. řádu 		zdrsnění celého povrchu
		velký posuv nebo nevhodný nástroj
		nevhodný nástroj, nebo řezná rychlost

Obr. č 5 Odchylky povrchu od požadovaného tvaru [5]

2. Integrita povrchu

Z hlediska výroby má význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součásti, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti vytvořeného povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů.

“Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.“ [7]

Integrita povrchu je vztah mezi geometrickými vlastnostmi povrchu a fyzikálními vlastnostmi jako jsou zbytková pnutí, tvrdost a mikrostruktura materiálu.

2.1 Složky integrity povrchu

Na povrch součásti v procesu výroby, montáže působí mnoho vlivů. Ty lze rozdělit na vnější a vnitřní vlivy. Mezi **vnější vlivy** zahrnuty tyto vlivy:

- mechanické (provozní napětí); - chemické (koroze); - fyzikální (záření, bludné proudy apod.)
- kombinace více vlivů (koroze pod napětím, elektrochemická koroze, technologické procesy).

Vnitřní vlivy jsou tvořeny:

- zbytkovým napětím; - morfologií povrchu (drsnost, vlnitost); -materiálovými a mechanickými vlastnostmi povrchu (tvrdost, zpevnění, strukturní stav); - přítomnost povrchových a podpovrchových vad. [8]

Rozdílné soubory dat integrity povrchu:

- Minimální soubor údajů integrity povrchu (povrchová úprava, mikrotrhlina, sledování jejich stavu, mikrostruktura, plastická deformace, fázové přeměny, drsnost povrchu, chemické tepelné změny, mikrotvrdość)
- Standardní soubor údajů integrity povrchu (únavové zkoušky, korozní úrava, hodnocení zbytkového napětí)
- Rozšířený soubor údajů integrity (pevnost v tahu, zkoušky tečení, jiné zkoušky) [9]

2.1.1 Zbytková napětí

Každá jednotlivá složka integrity povrchu určuje vlastnosti obráběného povrchu. Posoudím problém každé složky vnitřního vlivu na povrch součásti. Prvním velmi důležitým prvkem integrity povrchu jsou zbytková napětí, která vyvolaný mechanickým a tepelným zatížením povrchu. Tyto napětí působí jak na dynamickou únosnost povrchu, tak i na životnost a jakost konstrukčních celků, ovlivňují odolnost proti opotřebení a rozměrovou stálost součásti.

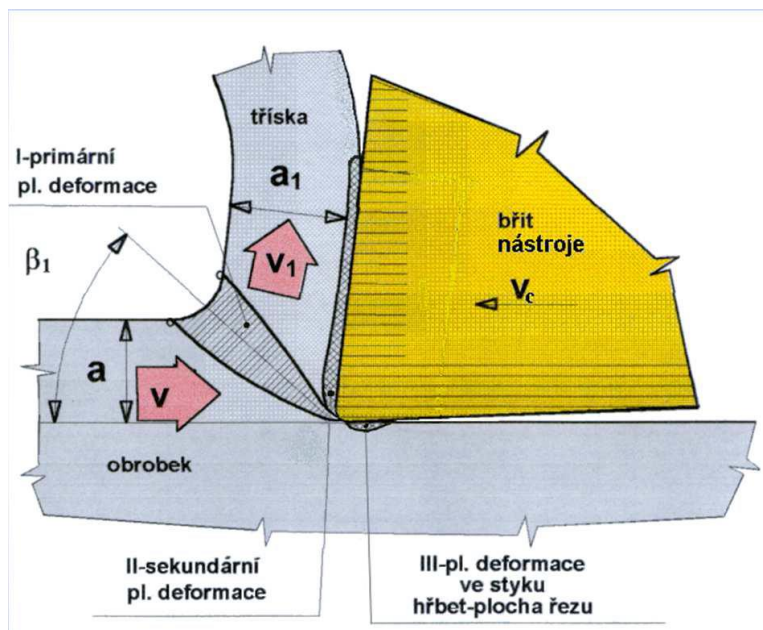
Plastická deformace je hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí. Tato deformace zahrnuje jen zónu řezání. Napětíové pole v zóně řezání se rozkládá na napětíové pole v obrobku a nástroji. Pružné deformace jsou rozloženy do celého objemu obrobku. Smyková napětí rostou do té míry, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje. Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k pěchování a posunu vrstev materiálu. Oddělováním třísky se ukončí proces plastické deformace. Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu, po dosáhnutí vyšší hodnoty, než je mez stříhu, a dojde k oddělení třísky pod úhlem stříhu. [11]

U kovů v procesu oddělování třísky následující oblasti:

-Oblast I – oblast primární plastické deformace, je tvořena postupným vnikáním břitu nože do obráběného materiálu, při kterém vznikají nejdříve pružné, později trvalé plastické deformace částic oddělovaného materiálu. Ovlivňuje velikost pěchování třísky.

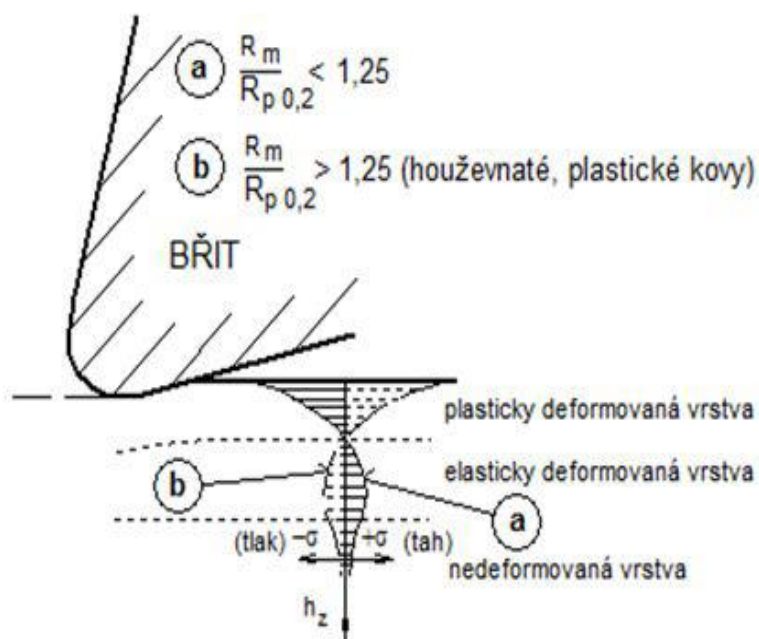
-Oblast II – oblast sekundární plastické deformace, je v povrchových vrstvách plochy styku třísky s čelem nástroje. Ovlivňuje velikost nárůstu.

-Oblast III - oblast terciálních plastických deformací [11]



Obr. č 6 Oblasti plastické deformace [11]

V důsledku nerovnoměrné plastické deformace vznikají v povrchové vrstvě zbytková napětí. Jestliže se materiál plastickou deformací zpevňuje, vznikají tlaková napětí, v případě, že plastická deformace vede ke změknutí, jsou napětí tahová. Tlaková pnutí – mez únavy zvyšují a tahová pnutí – mez únavy snižují a jsou příčinou únavových trhlin a lomů. [11]



Obr. č 7 Tahová a tlaková pnutí [11]

Druhy zbytkových napětí.

Třídění na základě délky silového pole a fyzikální povaze.

- 1) napětí prvního druhu – makronapětí (oblastmi, které jsou úměrné velikosti předmětů, a mají orientaci spojený s tvarem detailů)
- 2) napětí druhého druhu – micronapeti (přiděleny jednotlivým kovových zrn nebo skupiny zrn)
- 3) napětí třetího druhu – submikroskopické (zkreslení atomové mřížky kovu)

1. Napětí prvního druhu vznikají, když je stupeň plastické deformace je nestejnomořný v celém průřezu tělesa deformovaného tělesa. Když vnější zatížení odstraněno, oblast metalu, která rozvlekla nejvíce než ostatní oblasti, překáží okolním oblasti se vrátit do své původní polohy, a proto v sousedních oblastech existují pnutí různých značek (tahové a tlakové).

Hodnota určená hustotou dislokací a znaménko závisí na povaze rozložení dislokací homogenních vzhledem k povrchu obrobku. Tlaková zbytková napětí vznikají v případě povrchového umístění převládajících sad pozitivní dislokací skluzu na rovnoběžných rovinách, a v případě negativních dislokací se vyskytují zbytková tahová napětí. [11,12]

2. místní zbytková napětí druhého druhu. Vyskytují se v polykrystalických kovech ve velkém množství deformace při interakci zrn. K napětí druhého druhu taky patří napětí, které jsou v rámci jednoho zrna, díky své struktuře mozaiky - výsledek interakce mezi jednotlivými bloky. Tato napětí jsou důsledkem heterogenity fyzikálních vlastností jednotlivých složek polykrystalu a stísněných podmínek deformace jednotlivých zrn a anizotropie vlastností v něm. Hlavními důvody pro jejich výskyt jsou fázové přechody, změny teploty, anizotropie mechanických vlastností jednotlivých zrn, hranice zrn a zrn rozpad do fragmentů a bloků v průběhu plastické deformace.

Fázové transformace, zvýšení nebo snížení objemu jednotlivých zrn, vyvolávají značné pnutí.

Při změně teploty mohou vzniknout mikropnutí v důsledku přítomnosti různých kovových prvků s různou lineární roztažností a anizotropie vlastností jednotlivých zrn, (zvláště kovy s kubickou mřížkou), což vede k rozdílu v lineární expanzní velikosti v různých krystalografických osách. [12]

Místo určené pro výpočet rovnoměrného rozložení napětí z působení vnějšího zatížení je významným nerovnoměrnost napětí v jednotlivých zrnech. Rozdíl napětí je způsobeno nerovnostmi v modulech pružnosti různých konstrukčních prvků, schopnost deformovat a nerovnoměrný podél různých krystalografických os stejného zrna, která je určena hodnotou modulů pružnosti G a E. V polykrystale, dokonce s rovnoměrným pole napětí, plastická deformace je distribuován nerovnoměrně v mikroregionech, stupeň nerovnosti dosahuje 400 až 500%. [11]

3. Hromadění velkého počtu dislokací v okrajových vrstvách způsobuje řadu narušení atomové mřížky, a to vytváří napětí třetího druhu. Spolu s tím - hraniční pásmo (silové působení mezi jednotlivými zrny) vytváří pole mikropnutí, pokrývající celý povrch zrna.

Oddělení objemu zrna bloků tvoří zrna mikropnutí. Jsou příčinou nově vytvořené hranice mezi bloky. V mezní vrstvě mezi bloky a nahromaděné dislokací atomů nečistot, které narušují krystalovou mřížku a vznikají napětí.

Rozdíly makropnutí a mikropnutí je nejen v hodnotě jejich zobrazení.

Makropnutí

může se objevit v jakémkoliv pevném prostředí (homogenní izotropní)

Mikropnutí

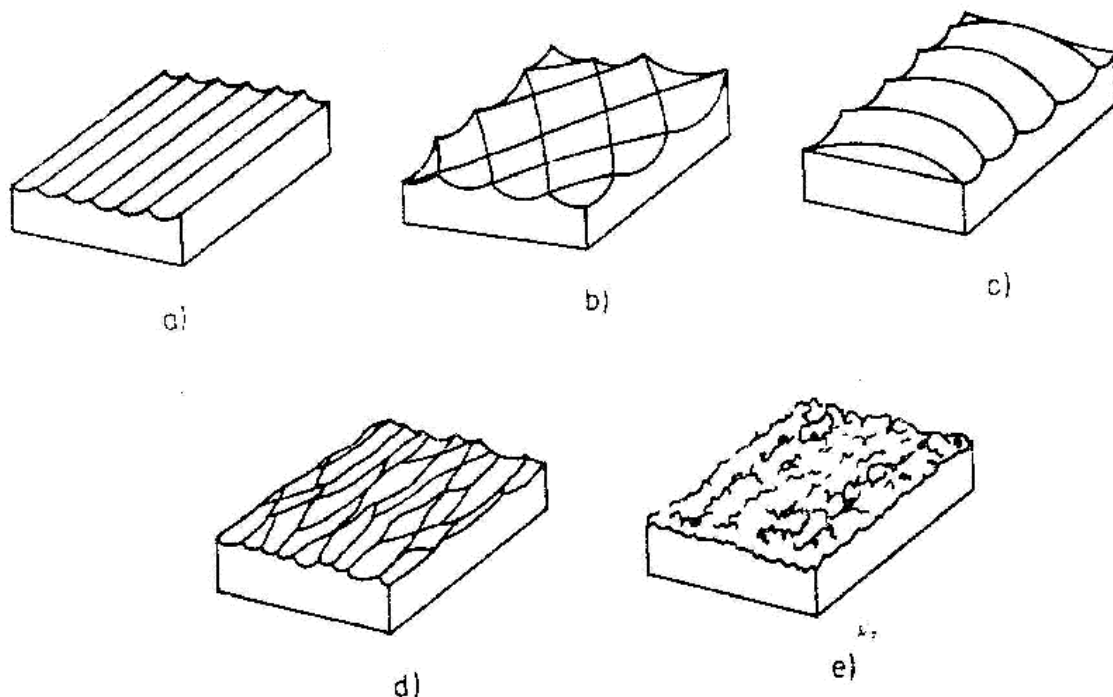
v takovém prostředí nemůže existovat, mohou být způsobeny nehomogenitou materiálu a jeho anizotropních vlastností.

Všechny tři druhy zbytkových napětí se vyskytují zpravidla současně, předpokládá se však, že největší vliv na kvalitu povrchové vrstvy obrobku budou mít především zbytková napětí 1. druhu. [12]

2.1.2 Drsnost

Drsnost je druhá složka vnitřního vlivu na povrch součástí. Drsnost povrchu, jak bylo uvedeno vyšší, je vykazuje vždy určitý stupeň drsnosti, který je určen mikronerovnostmi vzniklými při obrábění. Určuje se podle způsobu obrábění, vzhledu a závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech materiálu, na jakosti, tvaru a geometrii břitu a na řezných podmínkách.

Základní typy povrchů: anizotropní – mají výrazný směr nerovností, izotropní – s méně výrazným směrem nerovností



Obr. č 8 základní typy povrchu a, b, c – anizotropní, d- s méně výrazným směrem profilu, e- izotropní [5]

Drsnost povrchu obrobené plochy je různá v příčném a podélném směru.

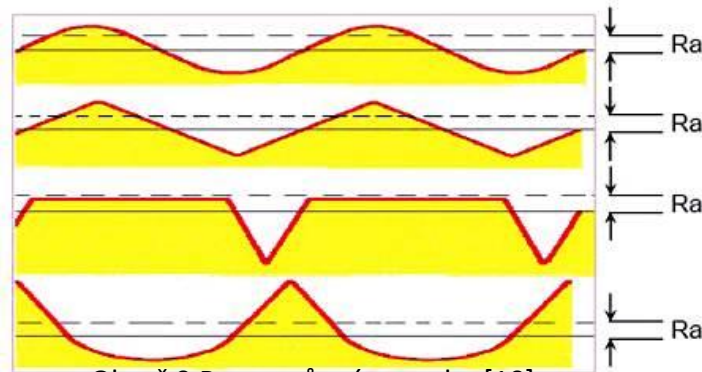
-příčný směr je kolmý ke směru řezného pohybu,

-podélný je s řezným pohybem rovnoběžný.

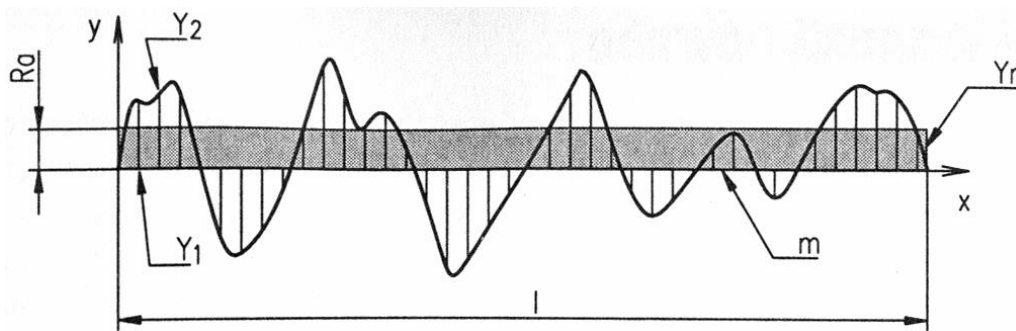
Stupeň drsnosti se volí podle funkce obrobené plochy a v závislosti na tvarové a rozměrové toleranci, a závisí na tom, zda jde o plochy dosedající na sebe ve spojení pevném, posuvném, otáčivém, nebo jsou-li to plochy se zvláštními požadavky. [13]

Parametry popisující drsnost:

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a - aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. "Samotná hodnota R_a neříká nic o charakteristice kontrolovaného povrchu součásti. Parametr R_a je vhodný pro řízení a regulaci výrobního procesu, neboť změna hodnoty R_a bývá výsledkem změny parametrů vstupujících do procesu, jako jsou břitové destičky, rychlost, posuv, mazivo atd." [10]



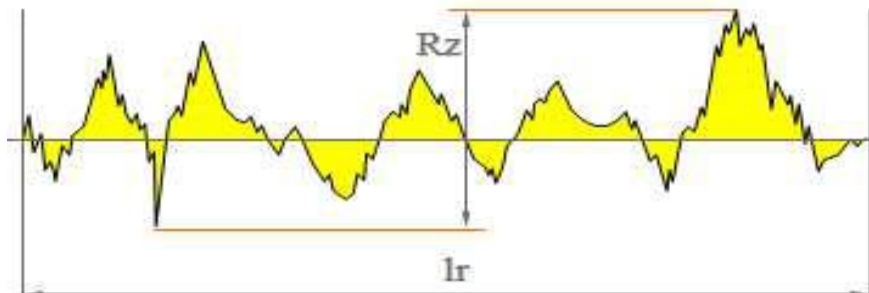
Obr. č 9 R_a pro různé povrchy [10]



$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| = \frac{|y_1| + |y_2| + |y_3| + \dots + |y_n|}{n} \qquad R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

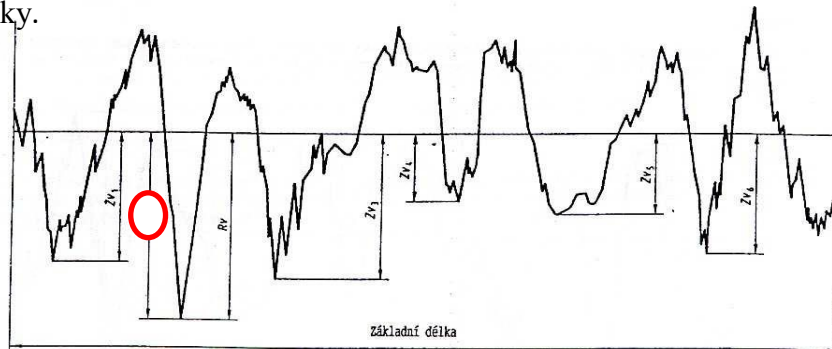
Obr. č 10 Statistická metoda určení R_a a integrální metoda určení R_a

Největší výška profilu R_z - součet největší výšky Z_p a nejnižší hloubky Z_v v rozsahu základní délky



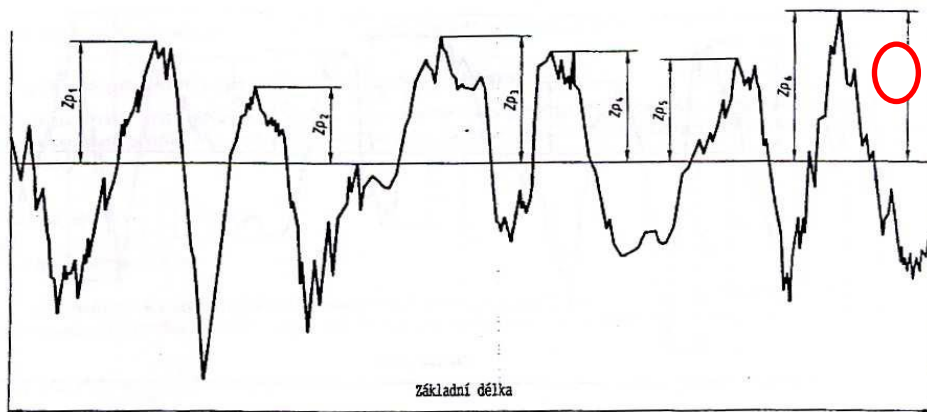
Obr. č 11 Největší výška profilu R_z [13]

Největší hloubka prohlubní profilu R_v - je největší hloubka prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



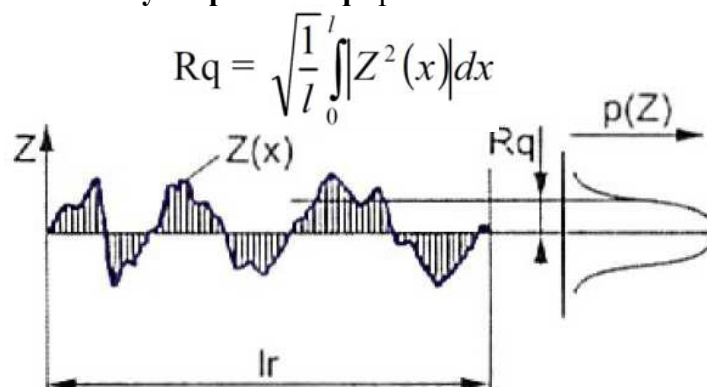
Obr. č 12 Největší hloubka prohlubní profilu R_v [11]

Největší výška profilu R_p - je největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky.



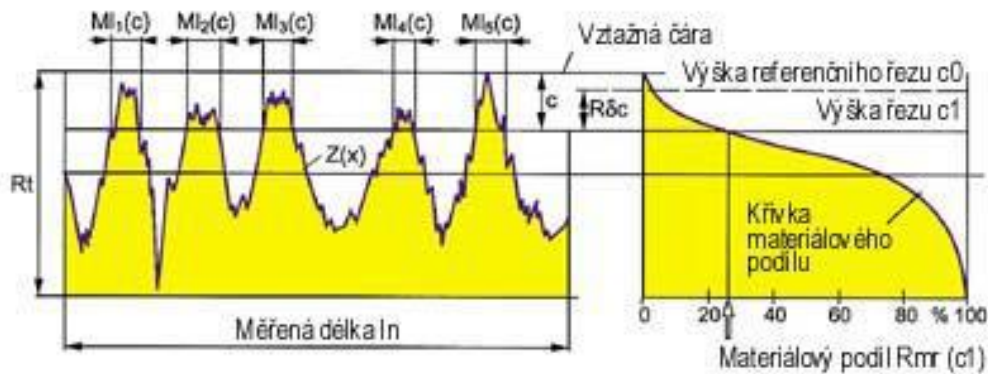
Obr. č 13 Největší výška profilu R_p [11]

Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q - průměrná kvadratická hodnota drsnosti R



Obr. č 14 Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q [11]

Materiálový poměr profilu $R_{mr}(c)$ – poměr délky materiálu elementů profilu $Ml(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce l_n v procentech. Křivka materiálového podílu udává podíl materiálu jako funkci (výšky) řezu.

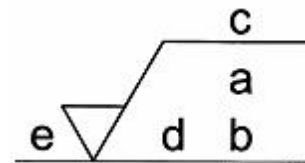


Obr. č 15 Materiálový poměr profilu [9]

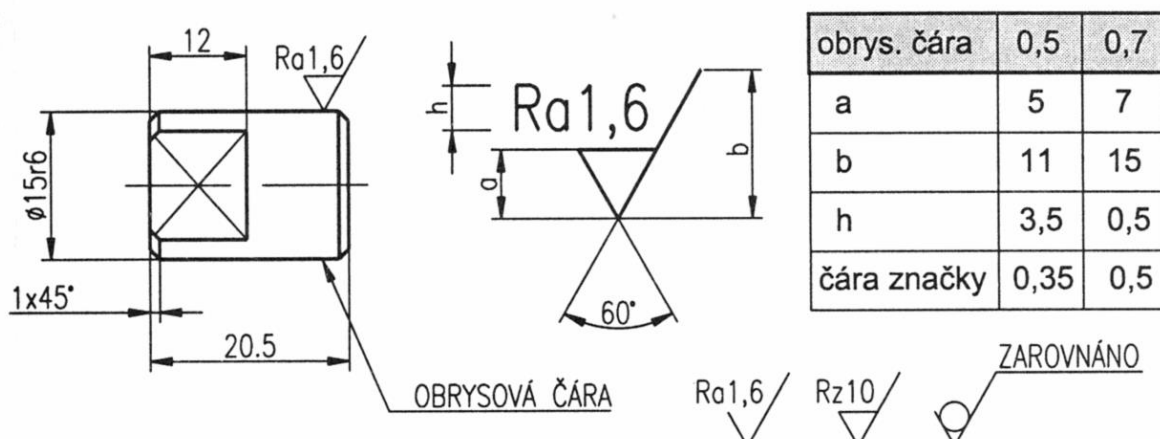
Způsoby předepisování drsnosti povrchu

Podle normy ISO ČSN 1302:1992 se předepisuje drsnost povrchu na výkrese a vyjadřuje se pomocí značky a připojených parametrů

- a – značka parametru drsnosti R_a , R_z nebo R_y a hodnota drsnosti (μm)
- b – hodnota dvoustranné specifikace drsnosti (μm)
- c - výrobní proces nebo konečná úprava povrchu
- d – značka směru nerovností (stopy po nástroji)



Obr č. 16 Označení drsnosti[14]



Obr. č 17 Označení drsnosti na výkrese [14]

Značka drsnosti má tři varianty

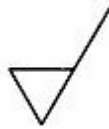
Povrch obrobený i neobrobený. Používá se v závorce nad popisovým polem. Obr. č 18.

Povrch obrobený. Značka se nemá používat bez doplňkových údajů. Obr. č 19.

Povrch neobrobený. Vyjadřuje požadavek zákazu odebrání materiálu. Obr č 20.



Obr. č 18 [14]



Obr. č 19 [14]



Obr. č 20 [14]

2.1.3 Třetí vnitřní vliv integrity povrchu:

Tvrdot – mechanická vlastnost vyjadřující odpor materiálu proti vnikání geometricky definovaného vnikacího tělesa (indentoru) při dané teplotě. Změna tvrdosti v povrchové vrstvě je dána jak mechanickým, tak tepelným zatížením povrchu při obrábění. V praxi se vyskytují tři základní průběhy tvrdosti v povrchové vrstvě:

- a) **Vysoká tvrdost povrchu** s poklesem na tvrdost jádra (zakalení povrchové vrstvy, plastická deformace, vznik chemických sloučenin),
- b) **Vysoká tvrdost povrchu s poklesem** tvrdosti pod tvrdost jádra s následným růstem na tvrdost jádra součásti (sekundární zakalení, popouštění následující vrstvy, příp. zpevnění vrstvy jako MTZ a následné popouštění),
- c) **Nízká tvrdost povrchu**, která postupně roste na tvrdost jádra (popouštění vrstvy).

Tvrdot je uváděna bez jednotek, např. v případě zkušebních metod podle Brinella, Rockwella nebo Vickerse, kdy se hodnoty tvrdosti určují jako podíl síly a skutečné plochy vtisku, nebo mají jednotku MPa, když se hodnota určuje z podílu síly a projekce plochy vtisku. [15]

Podle způsobu porušení povrchu se dělí zkoušky tvrdosti na:

- 1) **Statické** (vnikací) – indentor se vtlačuje klidnou silou ve směru kolmém ke zkoušenému povrchu. Jsou nejčastější pro svoji přesnost, jednoduchost a dobrou reprodukovatelnost.
- 2) **Dynamické** (rázové zkoušky) – indentor proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo
- 3) Porušení je dosaženo pohybem ostrého nástroje rovnoběžně s povrchem zkoušeného kovu tak, aby se vytvořil vryp. Tento způsob zatížení se volí u křehkých materiálů, zvláště u minerálů.

3. Tváření povrchové vrstvy

Speciální dokončovací metody obrábění a tváření

Účelem tohoto obrábění je dosažení dokonalé jakostní plochy, vysoké pevnosti při dodržení geometrických tvarů a zvýšení únavové pevnosti, zvětšení odolnosti proti opotřebení a korozi.

3.1 Dokončovací metody obrábění jsou metody s úběrem materiálu, tj. přídatku na dokončovací operaci, to jsou metody:

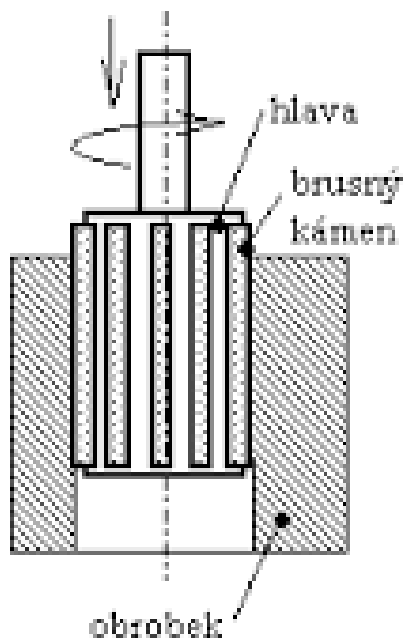
-honování; -lapování; -superfinišování; -leštění; -broušení.

3.1.1 Honování používáme na obrábění vnitřních válcových ploch. Díra se musí před honováním jemně vyvrtat nebo vybrousit. Nástroj je honovací hlava s honovacími kmeny. U kmenu se určuje brusivo, zrnitost, tvrdost a pojivo. Honovací stroje mají svislý vřeteník. Je broušení honovacími kameny upnutými v honovací hlavě, a jsou přitlačovány malým tlakem na obráběnou plochu. Pro různé materiály se používají různé brousící kameny. [16]

	IT	Ra
Předběžné honování	6 -7	0,4 - 0,8
Jemné honování	5	0,1 – 0,2

Tab. č 2 Parametry povrchu po honování

Cílem honování je odstranění vlnitosti povrchu, odstranění ovality a kuželovitosti.



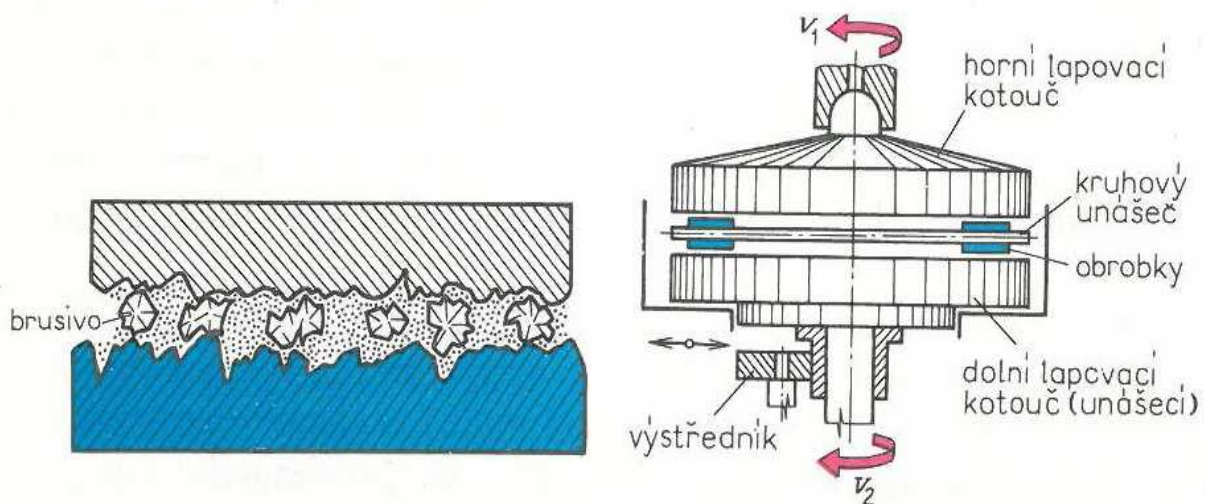
Obr. č 21 Princip honování [16]

3.1.2 lapování používáme na vnější a vnitřní válcové plochy, rovinné a tvarové plochy. Nástroj je kotouč, trn nebo kroužek, který má negativní tvar obráběné plochy. Mezi nástrojem a obrobkem je přiváděna kapalina s jemně rozptýleným brusivem, a dochází k nepravidelnému pohybu mezi nástrojem a obrobkem, při němž zrna brusiva vyhlazují nerovnosti povrchu. Princip: lapovací kolo pohání kolo lapované, je mezi ně přiváděna kapalina a obrobek koná podélný posuv. [16], [17]

Brusivem může být:

1. Karborundum a korund, pro jemné lapování
2. Vídeňské vápno – $MgCO_3$, pro velmi jemné lapování
3. Diamant a karbid bromu, pro obrábění slinutých karbidů

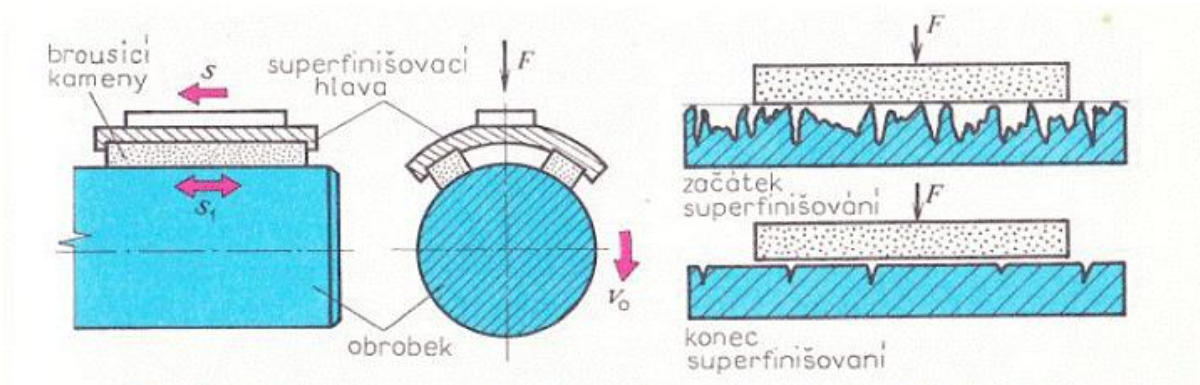
Rozměrová přesnost lapováním je IT 1 až IT 3, drsnost povrchu $R_a = 0,02 \mu m$ až $0,05 \mu m$.



Obr. č. 22 Princip lapování [17]

3.1.3 Superfinašování používáme na obrábění vnějších válcových ploch. Nástroj je superfinašovací hlava s brousícími kameny, u kterých se určuje brusivo, zrnitost, tvrdost a pojivo. Kameny jsou přitlačovány tlakem na obráběnou plochu, který se s časem zmenšuje. Superfinašovací hlava koná kmitavý a přímočarý pohyb, a obrobek vykonává rotační pohyb. Mezi nástrojem a obrobkem je přiváděna kapalina, která odplavuje třísky a na konci superfinašování vytvoří souvislý povlak.

Superfinašováním se odstraňují mikroskopické nerovnosti povrchu. Rozměrová přesnost dosažená superfinašováním je IT 1 až IT 3, drsnost povrchu $R_a = 0,012 \mu\text{m}$ až $0,1 \mu\text{m}$, přídavek na superfinašování je cca 5 mm. [16], [17]



Obr. č. 23 Princip superfinašování [17]

3.1.4 Leštění

Cílem leštění je zlepšit vzhled povrchu výrobků. Při leštění dochází k odstraňování povrchových nečistot a zvyšování jakosti povrchu. Nedochozí ke zvýšení tvarové a rozměrové přesnosti. Nástrojem při leštění jsou textilní nebo plstěné kotouče, na jejichž povrch je nanášeno velmi jemné brusivo ve formě emulze nebo pasty. Mezi styčné plochy brousících kamenů a obrobku se přivede kapalina. R_a po leštění je $0,25 \mu\text{m}$ až $1 \mu\text{m}$. [17]

3.1.5 Broušení

Broušení je charakterizováno jako obrábění mnohobřitým nástrojem tvořeným zrny brusiva, spojených pojivem. V současnosti je broušení využíváno jako hlavní metoda dokončovacího obrábění ve strojírenské výrobě. Drsnost je ovlivňována řeznými podmínkami, podmínkami orovnění kotouče, geometrií brousících zrn. [17]

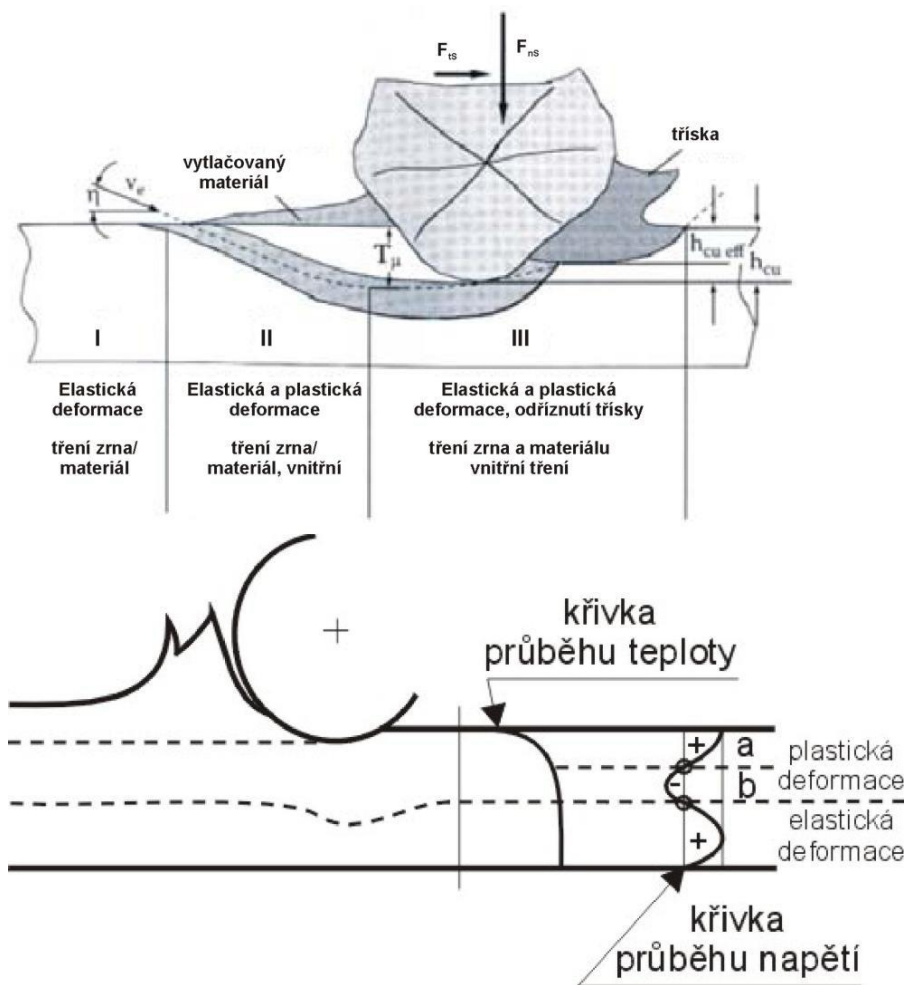
Všechna zbytková napětí po broušení jsou relativně povrchová a nezasahují v průměru do větších hloubek pod povrchem, než je 150 μm .

Bezprostředně na povrchu broušené součásti z kalené oceli vzniká většinou zbytkové napětí tlakové, které při normálním a hrubém broušení přechází velmi rychle v malé hloubce (okolo 5 mm) ve značně vysoké napětí tahové, jehož maximální hodnota dosahuje i 100 MPa v hloubce asi 10 až 30 mm pod povrchem. Při velmi jemném broušení zůstává tlakové zbytkové napětí zachováno v celé hloubce zasažené vrstvy; v hloubce 5 až 10 mm pod povrchem dosahuje hodnot okolo 20 MPa a se zvětšující se hloubkou rychle zaniká.

Broušením lze obrábět rovinné plochy, rotační, závit, ozubená kola, a různé tvary obrobků, které kopírují tvar brousícího kotouče. Technologie má uplatnění při obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů (IT 3 až 11) a jakost povrchu (R_a 0,05 μm až 3,2 μm).

Zbytková napětí dojdou k rozdělení oblasti plastické deformace na dvě části (viz. Obr. 25)

V oblasti označené písmenem a dochází k velkému smrštění, dojde ke zkrácení vláken. V oblasti b k tomuto smrštění nedojde, vlákna jsou trvale protlačena. V oblasti elastické deformace se vlákna snaží vrátit do původního stavu. Na povrchu obrobku vzniká tahové napětí, které může vyvolat vznik trhlin a koroze. [19]



Obr. č 24 Vznik a průběh zbytkových napětí při broušení [19]

3.2 Speciální dokončovací metody tváření jsou metody bez úběru materiálu, kde dochází k přetváření povrchové vrstvy součásti, to jsou metody:

- valečkování
- kalibrování
- kuličkování
- vyhlazování
- vibrační zpevňování

Charakteristika dokončovacích metod tvaření:

Plastické deformace povrchových vrstev – zatlačení nerovností (zlepšení drsnosti, přesnosti, vzhledu); za studena – změna struktury povrchu, zpevnění povrchové vrstvy ($\uparrow R_m$, tvrdost, mez únavy, životnost, odolnost proti korozi, otěru); (není nutný dražší kvalitnější materiál).

3.2.1 Válečkování

Válečkování je beztržisková metoda obrábění, která zlepšuje kvalitu povrchu bez jakéhokoliv úběru materiálu. Válečkované obrobky se vyznačují přesností a kvalitním a zpevněným povrchem.

Princip: přitlačování jednoho nebo více kalených tvářecích tělísek (válečky, kužele, kotouče) na povrch součásti. tvářecí tělíska jsou otočně uložena v přípravku, přitlačování na součást je zajištěno pružinami nebo hydraulicky,

velikost přitlačné síly $500 \div 5\,000$ N; obvodová rychlost součásti $50 \div 100$ m.min⁻¹,

posuv nástroje na otáčku součásti $0,2 \div 1,0$ mm; do místa tváření se přivádí procesní kapalina; vřetenový olej nebo olejová emulze [17]

válečky: náběhový kužel, válcová část, výběhový kužel

Výsledný efekt závisí na průměru válečku:

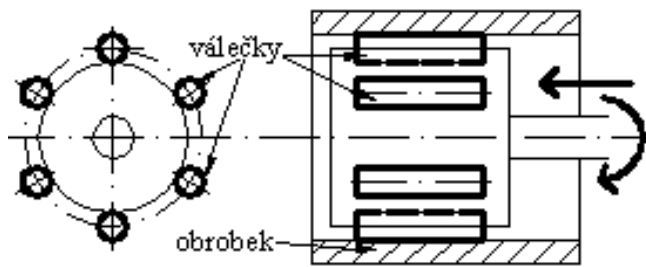
Menší průměr – vyšší hloubka zpevnění

Větší průměr – nižší drsnost

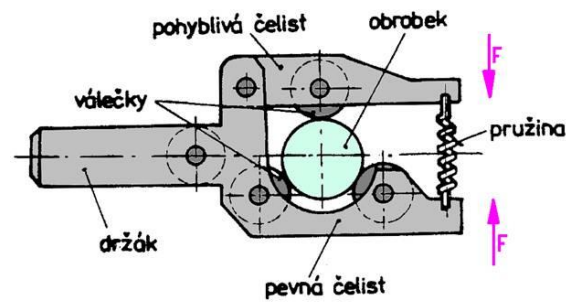
Drsnost povrchu soustruženého dílu se pohybuje kolem 3,2 Ra. Válečkovací nástroje dokážou dosáhnout drsností od $0,1 \mu\text{m}$ do $0,35 \mu\text{m}$ Ra na jedno přejetí. Na bronzu nebo hliníku lze dosáhnout Ra $0,1 \mu\text{m} - 0,15 \mu\text{m}$, na oceli Ra $0,15 \mu\text{m} - 0,2 \mu\text{m}$ a na kalené oceli Ra $0,2 \mu\text{m} - 0,4 \mu\text{m}$. [23]

Použití: vnější i vnitřní rotační plochy, drážky, zápichy, rovinné plochy, příruby, válce motorů, hřídele, čepy, trubky.

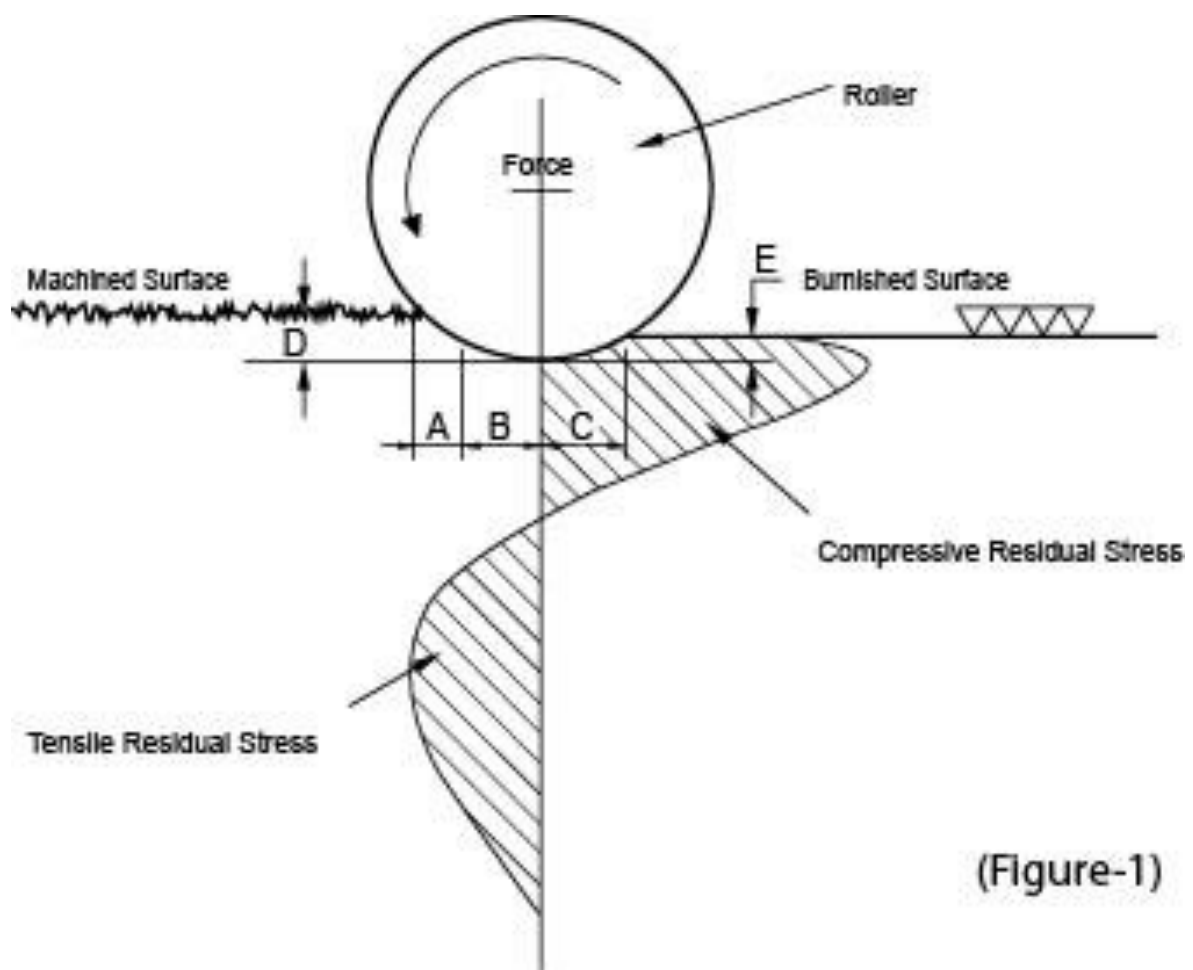
Snižuje riziko únavy materiálu. Odvalování nástroje stlačuje zrna struktury kovu, čímž se zvyšuje jeho povrchová tvrdost o 50 - 100 %. Povrchy, které byly válečkovány, mají mnohem větší únosnost a otěruvzdornost. [20]



Obr. č 25 Vnitřní válečkování [19]



Obr. č 26 Vnější válečkování [19]



(Figure-1)

Obr. č 27 Průběh deformaci [20]

Zóny napětí:

A: tlaková zóna

Valíček přichází do styku s obráběnou plochou a postupně zvyšuje se tlakové napětí

B: zóna plastické deformace

Tlakové napětí přerůstá hranici pružné deformace a způsobuje trvalou deformaci

C: vyhlazovací zóna

Valíček opouští pracovní plochu a po vyhlazení nastává jen velmi malé uvolnění pružnou deformaci

D: velikost stlačení

Nejvíce je materiál stlačen přímo pod válečkem

E: pružná deformace

Po válečkování se pružnost materiálu znovu obnoví [20]

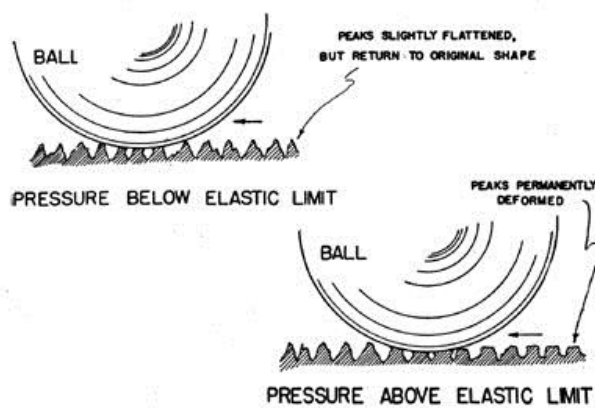


Fig. 1. Action of burnishing ball on high points of the work

Obr. č 28 Působení válečkování [21]

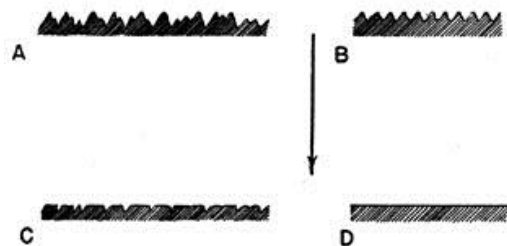


Fig. 2. Type of surfaces obtained by burnishing (diagramatic)

- A, Coarse surface before burnishing
- B, Smoother surface before burnishing
- C, A after burnishing
- D, B after burnishing and work hardening

Obr. č 29 Typ povrchu po válečkování[21]

3.2.2 Vyhlazování

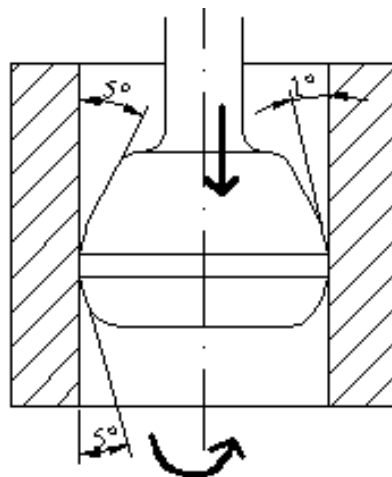
Princip: k povrchu rotující součásti je konstantní silou přitlačován nástroj s kuželovou špičkou, která má definovaný poloměr zaoblení; -na obrobeném povrchu vzniká plastická deformace; -nerovnosti na povrchu obrobené součásti vytvářejí výstupky a prohlubně působením tlaku „tečou“ výstupky do prohlubní; -materiál nástroje: CBN, diamant; -mezi nástrojem a tvářenou součástí působí menší síly než při válečkování; - do místa tváření se přivádí procesní kapalina; - povrch součásti je třeba chladit.

Nástrojem vyhlazování: pracovní tělíska různého tvaru upnuté v držáku z konstrukční oceli
Dosahované parametry: - tahové povrchové napětí se změní na tlakové; - drsnost povrchu Ra 0,1 μm až 0,4 μm ; - zvýšení meze únavy; - větší odolnost součástí proti opotřebení a proti korozi.[22]

3.2.3 Kalibrování

Protlačování slouží pro dokončování vnitřních válcových ploch. Nástrojem je protlačovací (kalibrovací) trn zvaný protlačovák, který je o několik tisícín milimetru větší než požadovaný rozměr otvoru. Nástroj je pouze jeden nebo se použije více nástrojů. Výsledkem protlačování je zlepšení drsnosti povrchu a zpevnění materiálu, čímž se zvýší tvarová a rozměrová přesnost součásti.

Dosahovaná kalibrováním drsnost povrchu Ra = 0,6 μm až 0,8 μm [22]



Obr. č 30 Princip kalibrování[22]

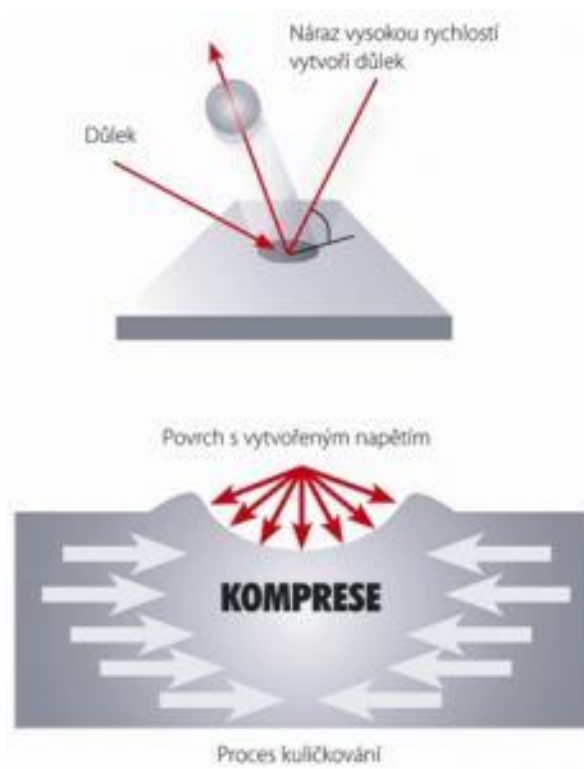
3.2.4 Kuličkování (Brokování)

Princip kuličkování je v metání tělísek z tvrdého materiálu na obrobený povrch; - využívá se plastické deformace vznikající v důsledku dopadu tělísek na upravovaný povrch, čímž dochází ke zlepšování jeho funkčních charakteristik; - pracovní tlak nosného média (vzduch, voda) se volí 0,1 až 2 MPa, v závislosti na velikosti elementů a na požadovaném účinku. [21]

Dosahované parametry

- odchylka od kruhovitosti a válcovitosti je 0,004 mm až 0,006 mm a drsnost povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ až $0,8 \mu\text{m}$; - proud částic odstraňuje z povrchu nežádoucí povlaky, korozi, nečistoty, oleje apod. [17] - tahové zbytkové napětí se mění na tlakové;- dochází ke zpevnění povrchu součásti;

Kuličkování se od klasického tryskání liší především tím, že zde jsou používána kulatá zrna tryskacího prostředku. Již malý obsah nekulatých částic může negativně ovlivnit výsledný efekt. Částice urychlené pneumaticky nebo mechanicky dopadají velkou rychlostí na povrch součásti. Během velmi krátkého času nárazu působí lokální velmi vysoká síla, která způsobuje plastické přetvoření povrchu. Při dopadu vytvoří částice v povrchu malou prohlubeň, pod kterou dochází k plastickému toku a natahování povrchových vláken.



Obr. č 31 Proces kuličkování [24]

3.2.5 Vibrační zpevňování

Princip je v úpravě povrchové vrstvy u tvarově složitějších součástí; - plastické deformace vznikají v důsledku dopadu kuliček; - materiál kuliček: ocel nebo litina. Částice jsou urychlovány vibracemi, které se vyvolávají mechanický nebo ultrazvukem. [25]

Mechanické vyvolané částice: jsou (litinové, ocelové kuličky) by měly mít co nejvyšší hmotnost, jejich průměr je limitován poloměrem přechodů mezi obráběnými plochami. Často se také urychlování vibracemi používá u technologie omílání.

Ultrazvukové vyvolané částice: pevný nástroj tvoří nástavec zdroje ultrazvukových kmitů a opírá se o upravovaný povrch – vyhlazování. Pevně upnutý obrobek je v zásypu ocelových kuliček, které přenášejí vibrace z nástavců uložených na stěnách zařízení. [25]

metoda	Drsnost R_a [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovliv. vrstvy [μm]	Úběr [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	Měrná spotř. energie [$\text{kWh} \cdot \text{cm}^{-3}$]
Elektrojiskrové obrábění	50 až 0,1	6 až 12	10 až 300	10^{-4} až 2	0,1 až 1
Obráb. paprskem laseru	50 až 6,3		100	10^{-4}	8 až 13
Obráb. paprskem elektronů	50 až 6,3		beze změn	10^{-2} až 0,4	
Obráb. paprskem plazmy			500 až 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 až 1,6	9 až 12	beze změn	0,05 až 0,5	0,1 až 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 až 0,2	6 až 9	beze změn	10^{-2}	0,04 až 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 až 0,4	7 až 9	beze změn	10^{-2} až 10	0,07 až 0,8

Tab. Č 3 Technologické parametry nekonvenčních metod obrábění [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

1. Cíl práce

Cílem první části praktické práce bylo změřit a zhodnotit drsnost u vybrané oceli – 12060, která byla zpracovaná různými způsoby.

Byly zhotoveny několik vzorků z oceli 12 060.

První vzorek je obráběn vysokými rychlostmi - metodou HSC. Při tomto obrábění se mění podmínky vzniku třísky v místě řezu. Teplota třísky se blíží teplotě tavení obráběného materiálu. Při zvyšování rychlostí platí výrazné snížení řezných sil. Kapaliny se při HSC nepoužívají (suché obrábění).

Druhý vzorek je obráběn nekonvenční metodou – EDM. Vzorek byl kálen, a obráběn Cu elektrodou. Princip EDM spočívá v úběru materiálu vyvoláním periodicky se opakujícími elektrickými nebo obloukovými výboji, které statisticky rozložený po celé ploše.

Třetí vzorek – obráběn podle EDM a následně byl žíhaný na snížení pnutí. Stejný vzorek, jako vzorek číslo 2 je kalený a obráběn Cu elektrodou.

Vzorky byly vyrobeny technologií soustružení na CNC soustruhu,

- konstantní řeznou rychlostí V_c 115 [m.min⁻¹],
- hloubkou řezu a_p 0,3 [mm],
- parametr posuvu je 0,07 [mm/ot]



Obr. č 32 Použité vzorky

Zvolený testovací materiál a jeho charakteristika

12 060.4

Ocel vhodná k zušlechťování, Ocel je vhodná na hřídele turbokompresorů karuselů, zalomené a jiné hřídele, ozubená kola, ozubené věnce, vřetena, čepy, lamely, spojky, pojistky, západky, páky, různé spojovací součásti apod. Optimálních vlastností se dosahuje tepelným zpracováním.

Způsob	Teplota °C
Kování -volné	800-1100 °C
Normalizační žíhání	810-840 °C
Žíhání na měkko	680-720 °C
Kalení do vody	790-830 °C
Kalení do oleje	800-840 °C
Popouštění	530-670 °C

Tab. č 4 Doporučené teploty pro tváření a zpracování

Označení oceli			Chemické složení tavby (hmotnostní podíl v %)								
EU	ČSN	C	Si max	Mn	Pmax	S	Cr	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni
C55E	12060	0,52-0,60	0,40	0,60-0,90	0,035	MAX 0,035	MAX 0,40	MAX 0,40	MAX 0,40	-	MAX 0,63

Tab. č 5 Chemické složení

Označení oceli		d ≤ 16 mm					16 mm < d ≤ 40 mm					40 mm < d ≤ 100 mm				
EU	ČSN	Re min	Rm	A min	Z min	KV min	Re min	Rm	A min	Z min	KV min	Re min	Rm	A min	Z min	KV min
C55E	12060	580	800-950	12	30	-	490	750-900	14	35	-	420	700	15	40	-

Tab. č 6 Mechanické vlastnosti

2. Měření drsnosti

Použité zařízení

Snímač drsnosti Mitutoyo SJ 201.

Přístroj je plně digitální, přenosný a lehký. Oproti podobným zařízením se vyznačuje lepší provozuschopností, vysokou funkčností a výkonností. Drsnoměrem SJ-201 lze měřit drsnost povrchu v každém pracovním prostředí, je určen především pro dílenské, využití ale najde i v laboratoři.

Drsnoměr měří dle norem ISO, JIS, ASME, VDA, DIN a MOTIF. Drsnoměr je vybaven automatickou, dynamickou kalibrační funkcí. Maximální posuv 17,5 mm tak i rozsah snímače, tj. 350 μm . Snímací hrot je tvořen z diamantu a jeho poloměr je 2 μm . Měřicí síla hrotu je 0,75 mN.



Obr. č 33



Obr. č 34

Princip měření

1 – měřená součást

2 – snímací hlavice s měřicím hrotem

3 – posuvový mechanismus

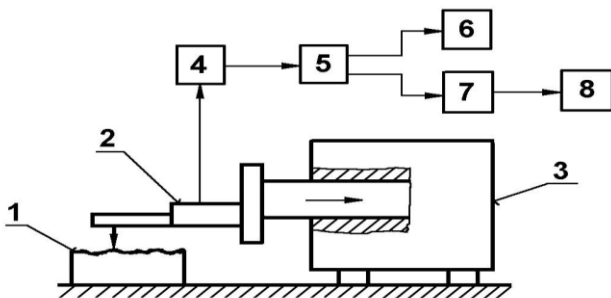
4 – zesilovač

5 – filtr

6 – registrační jednotka

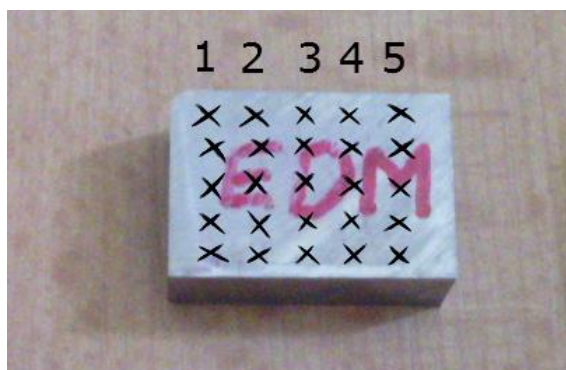
7 – jednotka zpracovávající měřicí signál

8 – zobrazovací jednotka



Obr. č 35 Schéma měření [27]

Na každém vzorku byla měřena drsnost povrchu Ra, Rq a Ry. Měření parametrů drsnosti povrchu bylo u vzorků realizováno vždy na pěti místech po 5 řádků (podle obr.37) a v každém místě bylo 2x zopakováno a výsledky statisticky zpracovány.



Obr. č 36 Měřené řádky

Naměřené hodnoty drsnosti povrchů

1.1	0,39	2.1	0,29	3.1	0,23	4.1	0,32	5.1	0,28
1.2	0,37	2.2	0,3	3.2	0,22	4.2	0,26	5.2	0,23
1.3	0,34	2.3	0,2	3.3	0,3	4.3	0,31	5.3	0,26
1.4	0,32	2.4	0,21	3.4	0,26	4.4	0,3	5.4	0,28
1.5	0,34	2.5	0,26	3.5	0,28	4.5	0,25	5.5	0,27
1.6	0,4	2.6	0,30	3.6	0,21	4.6	0,32	5.6	0,28
1.7	0,36	2.7	0,30	3.7	0,23	4.7	0,21	5.7	0,27
1.8	0,4	2.8	0,21	3.8	0,22	4.8	0,3	5.8	0,24
1.9	0,33	2.9	0,21	3.9	0,3	4.9	0,28	5.9	0,29
1.10	0,33	2.10	0,24	3.10	0,25	4.10	0,31	5.10	0,28

Tab. č 7 Naměřené parametry Ra vzorku č.1

1.1	0,24	2.1	0,17	3.1	0,16	4.1	0,32	5.1	0,22
1.2	0,24	2.2	0,18	3.2	0,21	4.2	0,27	5.2	0,26
1.3	0,31	2.3	0,2	3.3	0,24	4.3	0,2	5.3	0,26
1.4	0,26	2.4	0,24	3.4	0,2	4.4	0,19	5.4	0,24
1.5	0,29	2.5	0,23	3.5	0,24	4.5	0,25	5.5	0,26
1.6	0,27	2.6	0,16	3.6	0,17	4.6	0,24	5.6	0,28
1.7	0,3	2.7	0,19	3.7	0,21	4.7	0,25	5.7	0,27
1.8	0,26	2.8	0,25	3.8	0,24	4.8	0,19	5.8	0,25
1.9	0,29	2.9	0,22	3.9	0,21	4.9	0,22	5.9	0,23
1.10	0,24	2.10	0,31	3.10	0,23	4.10	0,28	5.10	0,26

Tab. č 8 Naměřené parametry Rq vzorku č.2

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

1.1	2,19	2.1	1,62	3.1	1,87	4.1	1,86	5.1	2,36
1.2	1,98	2.2	1,69	3.2	3,5	4.2	1,94	5.2	1,70
1.3	2,21	2.3	1,89	3.3	1,73	4.3	1,93	5.3	1,73
1.4	2,24	2.4	1,88	3.4	1,73	4.4	1,73	5.4	1,78
1.5	2,31	2.5	1,88	3.5	3,28	4.5	1,99	5.5	1,92
1.6	2,16	2.6	1,73	3.6	1,79	4.6	1,95	5.6	1,74
1.7	2,24	2.7	1,68	3.7	3,49	4.7	1,91	5.7	1,79
1.8	2,28	2.8	1,87	3.8	1,72	4.8	1,90	5.8	1,73
1.9	2,24	2.9	1,89	3.9	1,79	4.9	1,99	5.9	1,74
1.10	2,22	2.10	1,98	3.10	1,86	4.10	1,97	5.10	1,92

Tab. č 9 Naměřené parametry Ry vzorku č.1

1.1	0,21	2.1	0,17	3.1	0,17	4.1	0,32	5.1	0,41
1.2	0,19	2.2	0,2	3.2	0,2	4.2	0,25	5.2	0,27
1.3	0,19	2.3	0,23	3.3	0,21	4.3	0,23	5.3	0,25
1.4	0,18	2.4	0,18	3.4	0,19	4.4	0,18	5.4	0,23
1.5	0,19	2.5	0,23	3.5	0,22	4.5	0,29	5.5	0,28
1.6	0,21	2.6	0,18	3.6	0,16	4.6	0,18	5.6	0,56
1.7	0,22	2.7	0,21	3.7	0,2	4.7	0,19	5.7	0,28
1.8	0,18	2.8	0,16	3.8	0,19	4.8	0,24	5.8	0,26
1.9	0,19	2.9	0,17	3.9	0,17	4.9	0,25	5.9	0,26
1.10	0,20	2.10	0,20	3.10	0,23	4.10	0,28	5.10	0,26

Tab. č 10 Naměřené parametry Ra vzorku č.2

1.1	0,18	2.1	0,25	3.1	0,2	4.1	0,24	5.1	0,36
1.2	0,16	2.2	0,22	3.2	0,21	4.2	0,32	5.2	0,38
1.3	0,19	2.3	0,13	3.3	0,16	4.3	0,22	5.3	0,4
1.4	0,21	2.4	0,14	3.4	0,13	4.4	0,23	5.4	0,51
1.5	0,26	2.5	0,22	3.5	0,16	4.5	0,24	5.5	0,36
1.6	0,18	2.6	0,23	3.6	0,19	4.6	0,24	5.6	0,37
1.7	0,14	2.7	0,24	3.7	0,27	4.7	0,35	5.7	0,37
1.8	0,17	2.8	0,1	3.8	0,15	4.8	0,25	5.8	0,4
1.9	0,19	2.9	0,1	3.9	0,17	4.9	0,19	5.9	0,49
1.10	0,24	2.10	0,24	3.10	0,16	4.10	0,24	5.10	0,35

Tab. č 11 Naměřené parametry Rq vzorku č.2

1.1	1,68	2.1	1,08	3.1	2,48	4.1	2,24	5.1	2,96
1.2	2,23	2.2	1,18	3.2	2,07	4.2	2,85	5.2	1,43
1.3	1,79	2.3	1,05	3.3	2,17	4.3	1,43	5.3	2,92
1.4	1,73	2.4	1,84	3.4	2,17	4.4	1,36	5.4	3,02
1.5	1,78	2.5	1,59	3.5	2,1	4.5	2,34	5.5	1,91
1.6	1,73	2.6	1,10	3.6	2,58	4.6	2,24	5.6	2,95
1.7	1,74	2.7	1,10	3.7	2,13	4.7	2,89	5.7	2,98
1.8	1,71	2.8	0,91	3.8	2,13	4.8	1,73	5.8	2,95
1.9	1,74	2.9	1,92	3.9	2,28	4.9	1,47	5.9	3,05
1.10	1,93	2.10	1,84	3.10	2,15	4.10	2,06	5.10	1,93

Tab. č 12 Naměřené parametry Ry vzorku č.2

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

1.1	0,23	2.1	0,24	3.1	0,21	4.1	0,17	5.1	0,16
1.2	0,22	2.2	0,22	3.2	0,25	4.2	0,15	5.2	0,15
1.3	0,28	2.3	0,2	3.3	0,32	4.3	0,3	5.3	0,22
1.4	0,17	2.4	0,18	3.4	0,16	4.4	0,28	5.4	0,12
1.5	0,27	2.5	0,14	3.5	0,26	4.5	0,21	5.5	0,2
1.6	0,23	2.6	0,21	3.6	0,21	4.6	0,15	5.6	0,16
1.7	0,2	2.7	0,18	3.7	0,2	4.7	0,15	5.7	0,14
1.8	0,28	2.8	0,22	3.8	0,26	4.8	0,28	5.8	0,18
1.9	0,13	2.9	0,17	3.9	0,16	4.9	0,31	5.9	0,22
1.10	0,23	2.10	0,16	3.10	0,25	4.10	0,15	5.10	0,20

Tab. č 13 Naměřené parametry Ra vzorku č.3

1.1	0,24	2.1	0,15	3.1	0,16	4.1	0,11	5.1	0,20
1.2	0,19	2.2	0,14	3.2	0,15	4.2	0,09	5.2	0,22
1.3	0,26	2.3	0,21	3.3	0,2	4.3	0,16	5.3	0,17
1.4	0,2	2.4	0,26	3.4	0,15	4.4	0,22	5.4	0,38
1.5	0,19	2.5	0,28	3.5	0,2	4.5	0,23	5.5	0,34
1.6	0,21	2.6	0,14	3.6	0,14	4.6	0,11	5.6	0,26
1.7	0,15	2.7	0,15	3.7	0,15	4.7	0,15	5.7	0,15
1.8	0,18	2.8	0,21	3.8	0,17	4.8	0,16	5.8	0,24
1.9	0,22	2.9	0,23	3.9	0,13	4.9	0,25	5.9	0,26
1.10	0,18	2.10	0,28	3.10	0,21	4.10	0,28	5.10	0,23

Tab. č 14 Naměřené parametry Rq vzorku č.3

1.1	1,49	2.1	0,77	3.1	1,09	4.1	0,62	5.1	1,08
1.2	1,22	2.2	1,38	3.2	1,16	4.2	0,69	5.2	0,5
1.3	1,72	2.3	0,68	3.3	0,92	4.3	2,29	5.3	1,15
1.4	1,68	2.4	0,66	3.4	1,42	4.4	2,61	5.4	1,15
1.5	1,65	2.5	0,7	3.5	2,04	4.5	3,79	5.5	1,13
1.6	1,57	2.6	0,93	3.6	1,19	4.6	0,68	5.6	0,48
1.7	1,57	2.7	0,92	3.7	0,66	4.7	0,59	5.7	0,45
1.8	1,4	2.8	0,58	3.8	1,19	4.8	3,35	5.8	0,83
1.9	1,58	2.9	0,73	3.9	0,91	4.9	2,22	5.9	1,14
1.10	1,68	2.10	1,34	3.10	2,07	4.10	3,12	5.10	1,46

Tab. č 15 Naměřené parametry Ry vzorku č.3

Statistické a grafické upravené hodnoty

Vzorek	Ra [μm]	Ra [μm]	S [μm]	V [%]	Rq [μm]	Rq [μm]	S [μm]	V [%]	Ry [μm]	Ry [μm]	S [μm]	V [%]
HSC	0,358	0,283	0,031	0,109	0,270	0,238	0,031	0,128	2,207	2,010	0,243	0,121
	0,252				0,215							
	0,250				0,211							
	0,286				0,241							
	0,268				0,253							

Tab. č 16 Statistické upravené hodnoty HSC

Parametr Ra u oceli HSC je 0,283 μm . Parametr Rq je 0,238 μm . Parametr Ry je 2,010 μm .

Vzorek	Ra [μm]	Ra [μm]	S [μm]	V [%]	Rq [μm]	Rq [μm]	S [μm]	V [%]	Ry [μm]	Ry [μm]	S [μm]	V [%]
EDM	0,196 0,193 0,194 0,241 0,306	0,226	0,039	0,177	0,192 0,187 0,180 0,252 0,399	0,242	0,046	0,188	1,806 1,361 2,226 2,061 2,610	2,013	0,358	0,178

Tab. č 17 Statistické upravené hodnoty EDM

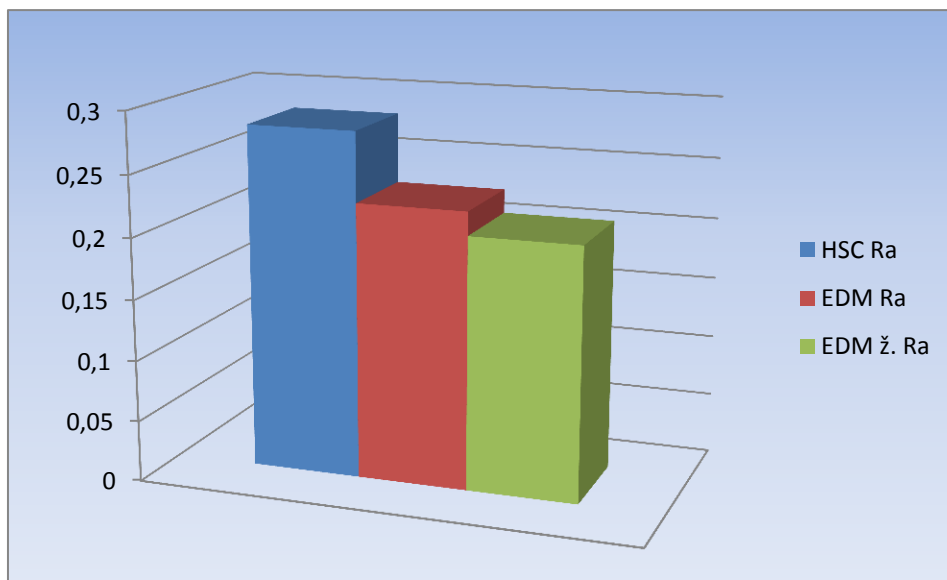
Parametr Ra u oceli EDM je 0,226 μm . Parametr Rq je 0,242 μm . Parametr Ry je 2,013 μm .

Vzorek	Ra [μm]	Ra [μm]	S [μm]	V [%]	Rq [μm]	Rq [μm]	S [μm]	V [%]	Ry [μm]	Ry [μm]	S [μm]	V [%]
EDM Žih.	0,224 0,192 0,228 0,215 0,175	0,207	0,044	0,213	0,202 0,205 0,166 0,176 0,245	0,199	0,048	0,241	1,556 0,869 1,265 1,996 0,937	1,324	0,475	0,358

Tab. č 18 Statistické upravené hodnoty EDM(+žihání)

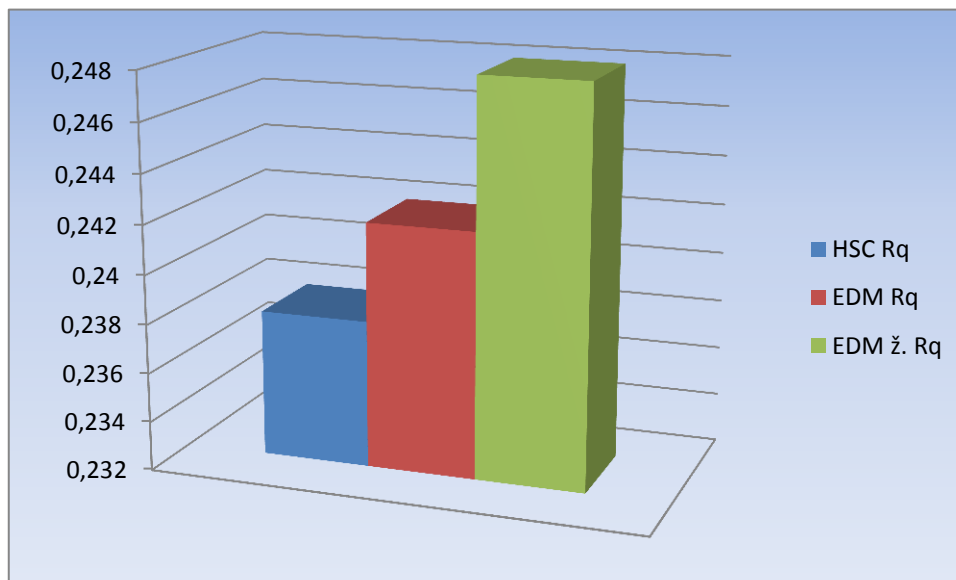
Parametr Ra u oceli EDM je 0,207 μm . Parametr Rq je 0,199 μm . Parametr Ry je 1,324 μm .

Grafické znázornění naměřených hodnot



Graf č.1 Porovnání naměřené hodnoty Ra mezi metodami obrábění oceli

Z výsledků měření bylo zjištěno, že nejvyšší parametr (Ra 0,283 μm) má metoda obrábění vysokými rychlostmi. Nejnižší parametr u metody EDM tepelně zpracovaného vzorku (Ra 0,207 μm). Uprostřed je hodnota u metody elektrojiskrového obrábění (0,226 μm).



Graf č.1 Porovnání naměřené hodnoty Rq mezi metodami obrábění oceli

Závislost naměřených hodnot má opačně uspořádání naměřených hodnot Rq. Nejvyšší parametr tady je u metody elektrojiskrového obrábění tepelně zpracovaného vzorku. Nízká hodnota je u metody HSC. Parametr Rq metody obrábění Cu elektrodou je mezi parametrem Rq vzorku HSC a parametrem Rq vzorku obráběného metodou EDM tepelně zpracovaného vzorku.

2.1. Diskuze výsledků

V první praktické části bakalářské práce byla změřená drsnost povrchu oceli 12 060. Naměřené údaje byly statisticky spočítány, (s - směrodatná odchylka μm , v – variační koeficient %, průměrná hodnota parametru Ra, parametru Rq) a graficky znázorněny, veškeré hodnoty byly zadány do tabulky.

Při porovnání výsledků naměřených hodnot parametrů Rq jsou výrazné rozdíly mezi jednotlivými metodami obrábění. Nejmenší hodnota u povrchů obráběných vysokými rychlostmi. Nejvyšší parametr Rq má vzorec, který je elektrojiskrově obráběn následně žíhaný. V porovnání hodnoty Ra má vysoký parametr vzorec obráběný HSC. Opačný význam má nekonvenční metoda obrábění tepelně zpracovaného vzorku, mezi nimi je parametr Ra metody elektrojiskrového obrábění.

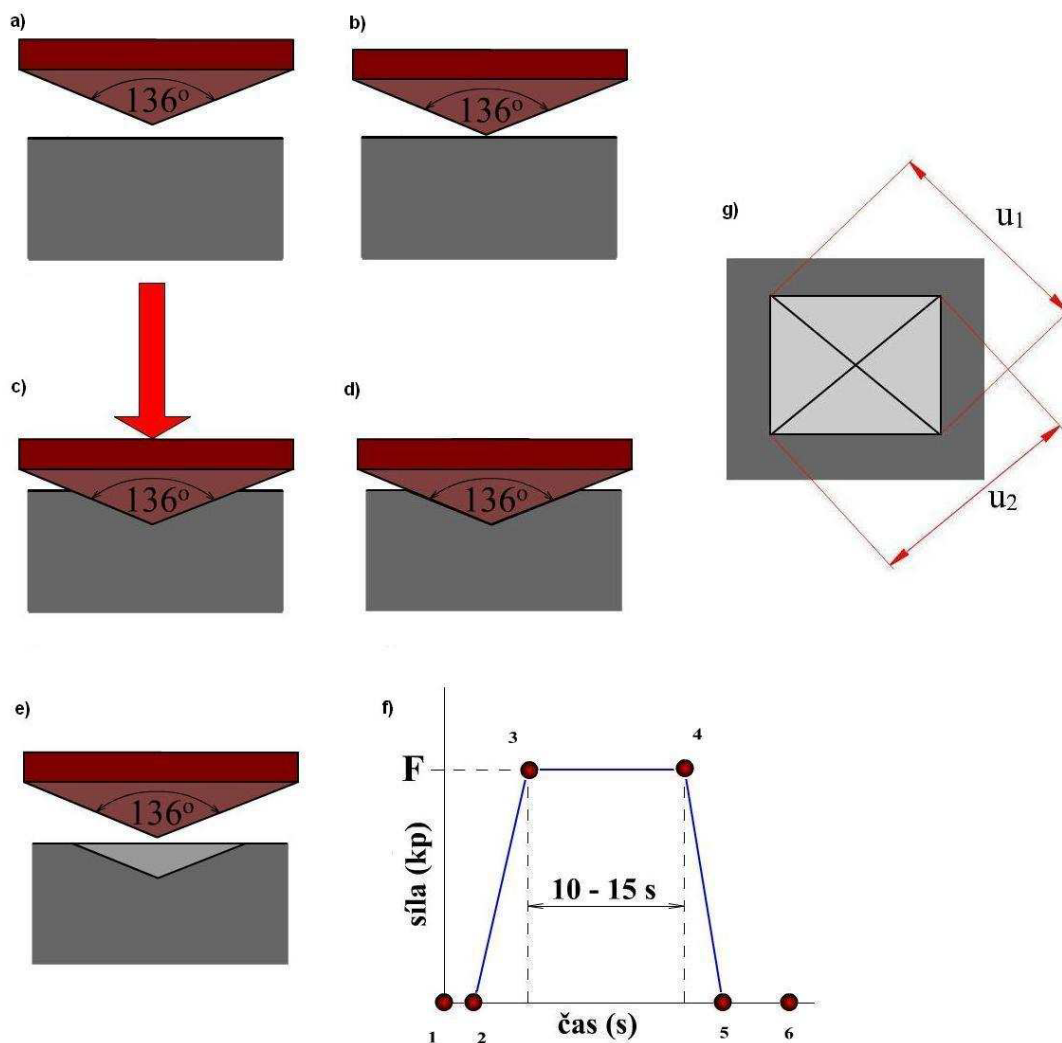
3. Měření mikrotvrdoměrem

Cíl a postup práce

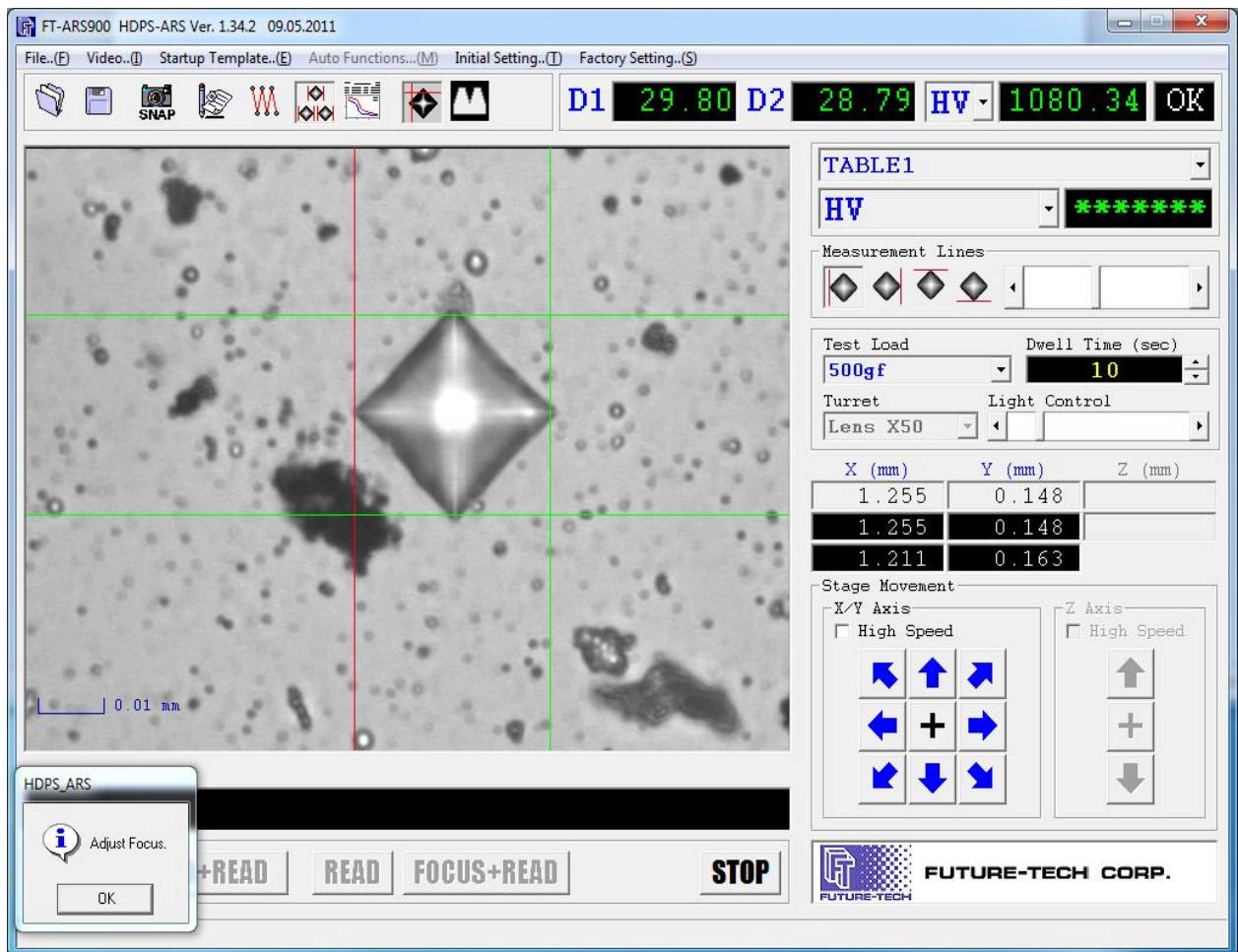
Cílem druhé části praktické práce bylo změřit a zhodnotit tvrdost u vybrané oceli – 12060, která byla zpracovaná různými způsoby.

Byly zhotoveny 6 vzorků z oceli. První vzorek je obráběn metodou HSC, a druhý vzorek je obráběn stejnou metodou, a následně byl broušen; třetí vzorek je obráběn metodou EDM, a čtvrtý má stejnou metodu obrábění a následně broušený; vzorec obráběný metodou EDM a následně tepelně zpracován, a poslední šestý vzorec navíc byl broušen. Měření každého vzorku bylo provedeno v 100 bodech.

Měření tvrdosti bylo prováděno metodou Vickerse ČSN EN ISO 6507-1. Na zvoleném stroji, FM-100, se nastavila požadovaná zkušební síla a zkoušený vzorek byl položen na tuhou podložku. Diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° se nastaví nad zkoušeným vzorkem a zatíží kolmo k měřenému povrchu po stanovenou dobu 15s. Indentor zanechá na ploše vtisk s jasně patrným tvarem odpovídajícím jeho konstrukci. Následně je nad něj přesunuto optické zařízení a následně vyobrazí na monitoru. Pomocí suportů se nastaví měřicí přímky úhlopříček, pomocí nich určujeme hodnotu tvrdosti. (zjišťuje se aritmetický průměr obou změřených úhlopříček u_1, u_2).



Obr. č 37 Postup metody Vickerse v zjednodušené formě [28]

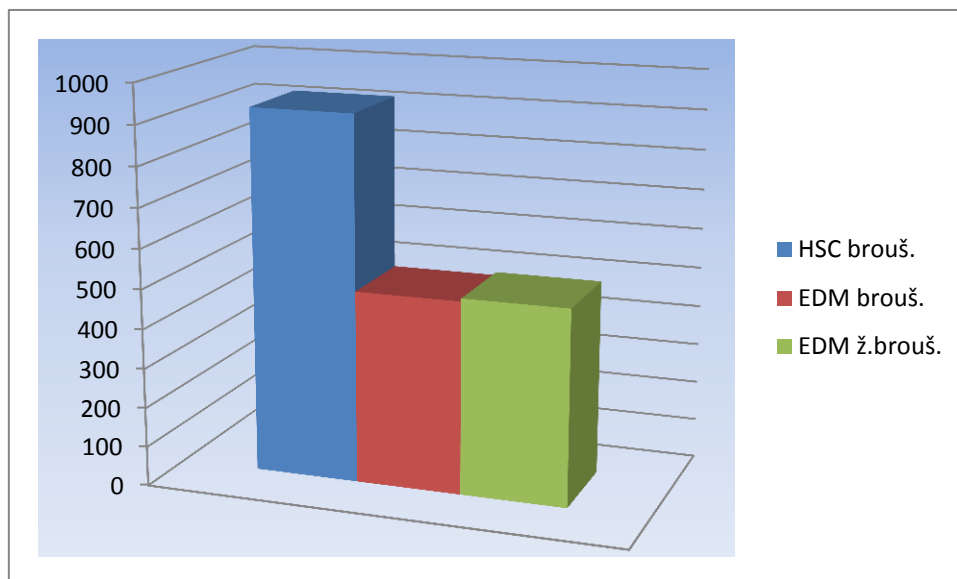


Obr. č 38 Fotografie jako příklad nastavených měřicích přímek úhlopříček u vzorku - HSC



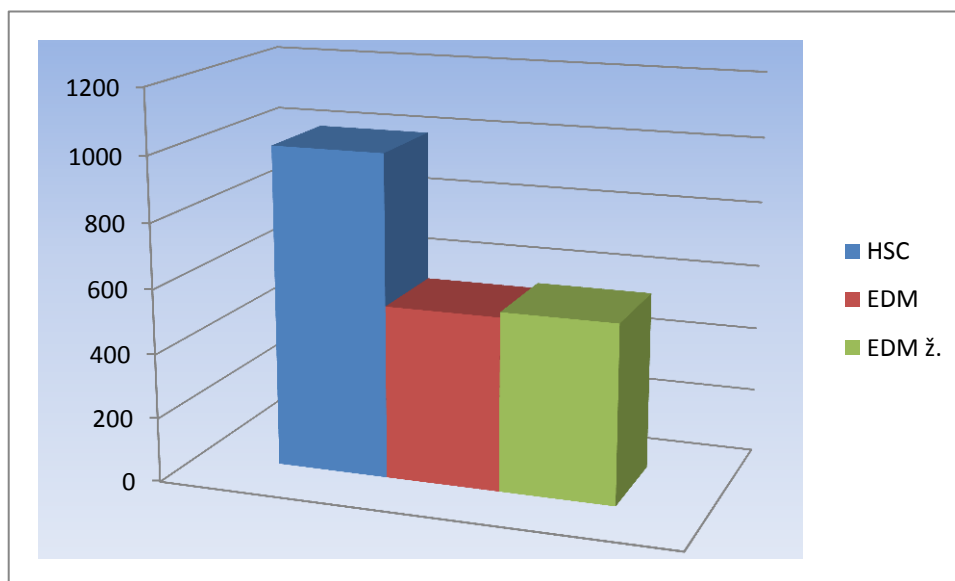
Obr. č 39 Použité zařízení na měření tvrdosti - FM 100

Z naměřených výsledků mikrotvrdomosti byla sestavený grafické závislosti hodnot:



Graf č.3 Porovnání naměřené hodnoty tvrdosti mezi vzorky broušeného materiálu

Z výsledků měření bylo zjištěno, že výrazně největší hodnota tvrdosti u broušené oceli obráběnou metodou vysokými rychlostmi. Nejnižší tvrdost má broušená ocel, která je obráběna elektrojiskrovou metodou. Druhý vzorek podle velikosti tvrdosti je ocel obráběna metodou EDM a byla tepelně zpracovaná. (graf č. 3 ukazuje této porovnání).

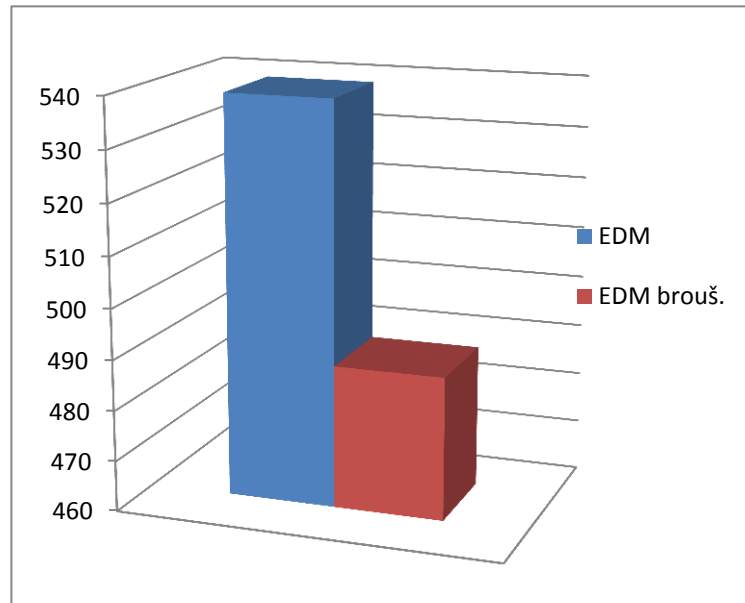


Graf č.4 Porovnání naměřené hodnoty tvrdosti mezi vzorky (bez broušení)

Bylo zjištěno, že tvrdost u naměřených vzorků, u kterých se neprovádělo broušení, mají vyšší hodnotu tvrdosti v porovnání s tvrdostí broušených vzorků. Závislost ukazuje graf. č 4.

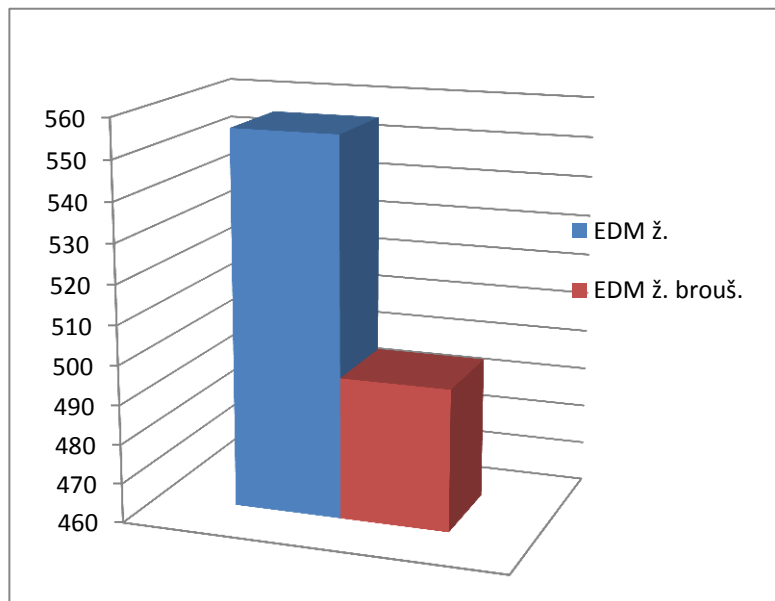
A tady máme stejně pořadí hodnot v závislosti s grafem č. 3: nejvyšší hodnotu má ocel HSC, nejnižší – ocel obráběná metodou EDM.

Graf. č 5 Porovnání oceli mezi sebou:



Graf 5a. Elektrojiskrové obrábění

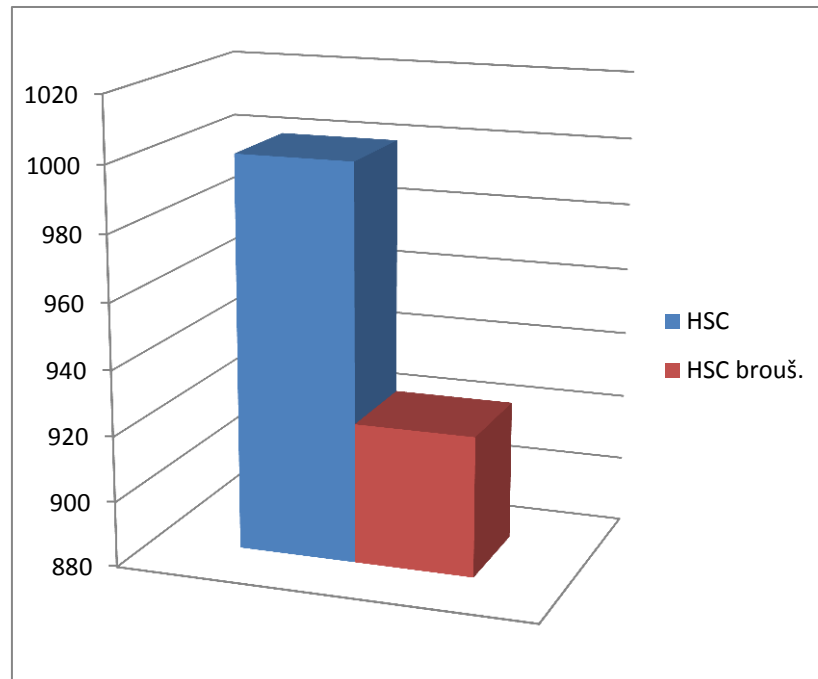
Ocel 12 060 má stejnou nekonvenční metodu obrábění, ale má výrazně rozdíly v tvrdosti. Broušená ocel má menší hodnotu tvrdosti. Ocel nebroušená má větší odpor proti vnikání zkušebního tělesa do povrchu (graf č. 5a).



Graf 5b. Elektrojiskrové obrábění (+žihání)

Graf č.5b porovnává tvrdost oceli nekonvenční metody obrábění, která měla tepelné zpracování. Výsledky ukazují, že nebroušená ocel má větší odpor proti vnikání zkušebního tělesa, na rozdíl od broušeného vzorku s nižší hodnotou tvrdosti.

V porovnání s grafem č.5a vidíme, jak tepelné zpracování povrchu ovlivňuje tvrdost. Daný zkušební vzorek byl skutečně tepelně zpracován a tím došlo ke změně jeho původní struktury. Žíhaná ocel udává vyšších hodnot, než oceli bez tepelného zpracování.



Graf č.5c Porovnání tvrdosti HSC vzorků

V porovnání oceli obráběnou metodou vysokými rychlostmi, vidíme: broušený povrch má nízký odpor proti vnikání cizího tělesa, na rozdíl od vysokých hodnot tvrdosti nebroušené oceli.

3.1 Diskuze výsledků

V druhé experimentální části byly provedeny zkoušky tvrdosti u broušené oceli, tepelně a elektrojiskrové zpracované oceli a u oceli obráběnou vysokými rychlostmi. Měření tvrdosti bylo realizováno Vickersovou zkouškou. Na každém upraveném zkušební vzorku bylo vždy provedeno 100 měření (vtisků) zkoušky tvrdosti. Výsledky měření byly zpracovány a grafiky vyhodnoceny. Bylo zjištěno, že tepelným zpracováním povrchu dostáváme vyšších hodnot tvrdosti než u povrchu původního stavu bez tepelného zpracování.

Měření bylo prokázáno, že nejměkčích hodnot bylo dosaženo u broušeného materiálu EDM. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u zkušební vzorku, který byl obráběný vysokými rychlostmi – HSC.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit faktory, které ovlivňují integritu povrchu. Vlivy integrity povrchu jsou rozděleny na vnější a vnitřní vlivy. Bylo zjištěno, že způsob obrábění a tím způsobené ovlivnění povrchových vrstev, včetně morfologie povrchu, drsnosti a tvrdosti, má vliv na integritu povrchu.

Praktická část bakalářské práce je rozdělena na 2 části. První praktická část bakalářské práce je věnovaná měřením parametrů drsnosti povrchu. Pro měření drsnosti byly vybrány vzorky oceli 12 060, kdy tento materiál byl tepelně zpracován a obráběn nekonvenční metodou Cu elektrodou, obráběn HSC, poslední vzorek byl tepelně nezpracován a obráběn nekonvenční metodou Cu elektrodou. Naměřené parametry jsou statisticky zpracovány a graficky znázorněny. Měření ukázala, že parametr R_q má vykazující výrazné rozdíly mezi jednotlivými metodami obrábění. Nejmenší hodnotu R_q má vzorek obráběný metodou HSC, nejvyšší má metoda EDM vzorku tepelně zpracovaného. Vysoký parametr R_a ukazuje metoda obrábění vysokými rychlostmi, nejnižší parametr R_a ukazuje naopak metoda EDM tepelně zpracovaného vzorku. Druhá praktická část věnovala pozornost tvrdosti povrchu u šesti typů různých vzorků oceli 12 060, které byly přepraveny ve tvaru kvádrů. První tři jsou stejně obráběné jako v první praktické části, ostatní tři byly navíc následně broušeny. Měření tvrdosti bylo realizováno Vickersovou zkouškou. Na každém upraveném zkušebním vzorku bylo vždy provedeno 100 měření (vtisků) zkoušky tvrdosti. Naměřené výsledky byly zaznamenány do grafů a porovnány mezi sebou. Z graficky znázorněných hodnot bylo zjištěno, že broušený povrch má nízký odpor proti vnikání cizího tělesa, na rozdíl od vysokých hodnot tvrdosti nebroušené oceli. Jeden vzorek byl tepelně zpracován a tím došlo ke změně jeho původní struktury. Žíhaná ocel vykazuje vyšších hodnot tvrdosti, než oceli bez tepelného zpracování. Měření tvrdosti bylo prokázáno, že nejmenších hodnot bylo dosaženo u broušeného materiálu EDM. Nejvyšších hodnot – u vzorku HSC. Naměřené výsledky byly graficky znázorněny.

Pro další rozbor problematiky integrity povrchu je potřeba věnovat pozornost i zbytkovým napětím v povrchové vrstvě a jejich změně, které mají vliv na mez únavy a vznik trhlin.

Seznam použité literatury

- [1] TOMKOVÁ E.: Učební texty - Struktura povrchu. *Fyzika povrchů*. Katedra elektroniky a vakuové fyziky. MFF UK Praha [online]. 2002, [cit. 2010-1-25]. Dostupný z WWW: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/Fyzika_povrchu/1_Struktura_povrchu.pdf>
- [2] BUMBÁLEK, L.: Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu. Brno, 2004.
- [4] ŠPERKA, Petr. FSI VUT V BRNĚ. Struktura povrchů vybraných strojních součástí. Brno, 2009. Dostupný z WWW: <http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tehnologii_obrazeni.pdf>
- [4.1] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [3]. ČSN EN ISO 4287: 1997, Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – *Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*.
- [5] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; ODŠTÁL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, 1989
- [6] KRAUS, V.: *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň, 2000.
- [7] BUMBÁLEK, L.. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM*. Dostupný z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>
- [8] HOLEŠOVSKÝ, F. *Jakost obráběných povrchů. první*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
- [9] DAVIM, J.P.: *Surface integrity in Machining*. Springer, 2009.
- [10] NOVÁK, Z. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *MM Průmyslové spektru* [online]. Vydáno: 22.11.2011. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com>>
- [10] JERSÁK, J.. *DRUHY A UTVÁŘENÍ TRÍSEK*. Dostupný z: <<http://educom.tul.cz/educom>>
- [12] ZARUCKIJ, A.B. *Analyza ostatochnych naprazhenij posle uprochneniya otverstija metodom barjernogo odzhatija*. 2013. УДК 629.7.1
- [11] KUBÍČEK, M.. *Deformace obrobené plochy ,zbytková pnutí*. 2006
- [13] POSPÍŠILOVÁ, E.. *Integrta obráběného povrchu*. 2014. Dostupný z WWW: <<http://slideplayer.cz>>

- [14] KLETEČKA, J. a FOŘT, P.. Technické kreslení. Vyd. 1. Brno: CP Books, 2005, 252 s. ISBN 80-251-0498-2. technické kresl.
- [15] Měřicí přístroje. Dostupný z WWW: <<http://www.merinitvrlosti.cz/definice-tvrlosti.html>>
- [16] HAMERNIK, J. 2003. Dostupný z WWW: <<http://jhamernik.sweb.cz/Dokoper.htm>>
- [17] NĚMEC, Dobroslav a kol. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění. 2.*, opr. vyd. Praha SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982. Dostupný z WWW: <<http://eluc.cz/verejne/lekce/1385>>
- [18] PUTZOVÁ, I. *Modelování a procesu řezání se zaměřením na broušení a integritu obrobené plochy aplikací NS a FL. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie"*. Brno: VUT-FS, Ústav strojírenské technologie. 2004
- [19] NOVÁK, M. a HOLEŠOVSKÝ, F. *Studium integrity broušeného povrchu*. [online]. [cit. 2011-28-09]. Dostupný z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-11-13.pdf>>.
- [20] YAMATO. 2015. Available from <<http://www.yamato.com.tr/documents/en/176/176/art-of-roller-burnishing>>
- [21] KOHLER, A., FREDERICK., Inc. July 12, 1954. Available from <<http://www.nmfr.org/subs/history/sep1954c.cfm>>
- [23] KURCIK, J.. 21. *Dokončovací metody*. Dostupný z WWW: <<http://techstroj.g6.cz/>>
- [24] BENEŠOVÁ, D. 13.04.2011 v rubrice Komerční příloha. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>>
- [25] MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění. 3. díl. České vysoké učení technické v Praze*.
- [26] KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění. 1. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2
- [27] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie část 1: měření drsnosti povrchu dotykovými profilometry*. Ostrava, 2004.
- [28] KRYŠTŮFEK, P.. 2002 Dostupný z WWW: < <http://www.ped.muni.cz> >