

Vysoká škola strojní a textilní  
nositelka Řádu práce

Liberec

Fakulta strojní

Katedra obrábění  
a montáže

VLIV OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ  
NA KVALITU SOUSTRUŽENÝCH POVRCHŮ

Kandidátská disertační práce

Vypracoval: Ing. Milan Vytlačil

Školitel: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Liberec, duben 1989

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA  
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146088260

## A N O T A C E

Zpracoval: Ing. Milan Vytlačil

MDT: 621.941.7

621.9.029

621.9.019:620.191

Vliv opotřebení řezných nástrojů na kvalitu soustružených povrchů

Práce vychází ze shrnutí současných poznatků o vzniku a kvalitě obrobených povrchů. Zjišťuje časové závislosti a morfologii opotřebení řezných nástrojů, charakteristiky mikrogeometrie povrchu, mikrotvrdość a zbytková pnutí. Výsledky z opotřebení řezných nástrojů a jeho vlivu na povrchové vrstvy po obrábění, rozšiřují úroveň poznatků z oboru integrity povrchu. Matematický model vytváří možnost praktického použití pro predikci zbytkových pnutí.

Počet stran: 109

Počet příloh: 12

Počet obrázků: 51



## Nejčastěji použité symboly

|       |                                                                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | <u>ÚVOD</u>                                                                                                                 | 1  |
| 2.    | <u>PŘEHLED SOUČASNÝCH POZNATKŮ O KVALITĚ<br/>OBROBENÉHO POVRCHU</u>                                                         | 2  |
| 2.1   | Mechanismus vzniku obrobené plochy                                                                                          | 4  |
| 2.1.1 | Analýza mechanismů vzniku povrchu při<br>řezání nástroje s negativním úhlem čela                                            | 6  |
| 2.2   | Hodnocení mikrogeometrie obrobeného povrchu                                                                                 | 10 |
| 2.3   | Zbytková pnutí po obrábění                                                                                                  | 16 |
| 2.3.1 | Technologické příčiny vzniku zbytkových<br>pnutí                                                                            | 16 |
| 2.3.2 | Vliv zbytkových pnutí na provozní vlastnosti<br>součástí                                                                    | 20 |
| 2.4   | Mikrotvrdost po obrábění                                                                                                    | 21 |
| 2.5   | Shrnutí současných poznatků o kvalitě obrobe-<br>ného povrchu                                                               | 22 |
| 3.    | <u>CÍL PRÁCE</u>                                                                                                            | 25 |
| 4.    | <u>ZVOLENÉ METODY VÝZKUMU CHARAKTERISTIK KVALITY<br/>SOUSTRUŽENÉHO POVRCHU S OHLEDEM NA OPOTŘEBENÍ<br/>ŘEZNÉHO NÁSTROJE</u> | 25 |
| 4.1   | Metodika experimentálního výzkumu kvality povr-<br>chu                                                                      | 27 |
| 4.1.1 | Výběr obráběných materiálů                                                                                                  | 29 |
| 4.1.2 | Výběr nástrojových materiálů                                                                                                | 32 |
| 4.1.3 | Podmínky obrábění a měření opotřebení řezných<br>nástrojů a měření řezných sil                                              | 33 |
| 4.1.4 | Měření mikrogeometrie, morfologie a struktur-<br>ních změn povrchu                                                          | 33 |

|       |                                                                                                            |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.5 | Měření zbytkových pnutí                                                                                    | 34  |
| 4.1.6 | Měření mikrotvrdosti                                                                                       | 34  |
| 5.    | <u>VÝSLEDKY KDP S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ</u>                                                             | 36  |
| 5.1   | Opotřebení řezných nástrojů                                                                                | 36  |
| 5.2   | Řezné síly a opotřebení řezného nástroje                                                                   | 59  |
| 5.3   | Vliv opotřebení řezných nástrojů při sou-<br>stružení na <b>vybrané</b> charakteristiky kvality<br>povrchu | 66  |
| 5.3.1 | Mikrogeometrie povrchu                                                                                     | 66  |
| 5.3.2 | Zbytková pnutí                                                                                             | 67  |
| 5.3.3 | Mikrotvrdost                                                                                               | 77  |
| 5.3.4 | Hodnocení měření                                                                                           | 81  |
| 5.4   | Návrh matematického modelu predikce zbytk-<br>kových pnutí                                                 | 91  |
| 5.4.1 | Ověření navrženého matematického modelu                                                                    | 97  |
| 6.    | <u>SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ KDP A DOSAŽENÉ PŘÍNOSY<br/>PRO SPOLEČENSKOU PRAXI</u>                                  | 103 |
| 7.    | <u>ZÁVĚR</u>                                                                                               | 109 |
|       | Literatura                                                                                                 |     |
|       | Příloha: Opotřebení řezných nástrojů a<br>charakteristiky kvality povrchu                                  |     |

# SEZNAM NEJČASTĚJI POUŽITÝCH SYMBOLŮ

- A - tažnost /%/
- b - šířka třísky /mm/
- D - průměr obrobků při zkouškách opotřebení řezných nástrojů /mm/
- d - průměr obrobků při měření řezných sil a mikrogeometrie povrchu /mm/
- F - výsledná řezná síla při soustružení /N/
- $F_c$  - složka řezné síly působící ve směru hlavního pohybu /N/
- $F_f$  - posuvová složka řezné síly /N/
- $F_p$  - přísmuvová složka řezné síly /N/
- h - hloubka řezu /mm/
- K - konstantní průběh mikrotvrdosti
- KT - hloubka žlábků /mm/
- L - délka obrobků při zkouškách opotřebení řezných nástrojů
- $l_o$  - **délka** obrobků při měření řezných sil a **mikrogeometrie** povrchu
- $N_R$  - normovaný počet rýh
- NS - zkratka nepatrného spojení při průběhu mikrotvrdosti
- OP - opotřebení řezných nástrojů v aditivním smyslu /mm/
- P - symbol vyjadřující zbytková pnutí v matematickém modelu /MPa/
- PKM - zkratka porušení krystalové mřížky
- PS - zkratka pevného spojení při průběhu mikrotvrdosti
- $P_t$  - profilová hloubka / $\mu$ m/
- R - drsnost povrchu v aditivním smyslu uvažovaných charakteristik povrchu / $\mu$ m/
- $R_a$  - střední aritmetická úchylka povrchu / $\mu$ m/
- $\overline{R_a}$  - průměr středních aritmetických úchylek profilu / $\mu$ m/

|                 |                                                                        |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|
| $R_m$           | - mez pevnosti v tahu /MPa/                                            |
| $R_{max}$       | - největší výška nerovnosti povrchu / $\mu m$ /                        |
| $R_p$           | - hladkost povrchu / $\mu m$ /                                         |
| $R_{pm}$        | - střední hloubka hladkosti povrchu / $\mu m$ /                        |
| $R_q$           | - kvadratická střední hodnota drsnosti / $\mu m$ /                     |
| $RzDIN$         | - střední hodnota drsnosti / $\mu m$ /                                 |
| $RzISO$         | - desetibodová výška / $\mu m$ /                                       |
| $R_{32}$        | - zprůměrovaná hloubka drsnosti / $\mu m$ /                            |
| $R_{32m}$       | - maximální hloubka drsnosti / $\mu m$ /                               |
| $r_\epsilon$    | - poloměr zaoblení špičky nástroje /mm/                                |
| $s$             | - posuv nástroje na otáčku /mm/                                        |
| SK              | - zkratka slinutých karbidů                                            |
| $S20_B$         | - zkratka vyměnitelné břitové destičky S20 DNMM 150408<br>bez utvařeče |
| $S20$           | - zkratka vyměnitelné břitové destičky S20 DNMM 150408                 |
| $S20CN$         | - zkratka vyměnitelné břitové destičky S20CN DNMM 150408               |
| $T$             | - trvanlivost břitu /min/                                              |
| $v$             | - řezná rychlost / $m \cdot min^{-1}$ /                                |
| $VB$            | - šířka opotřebení na hřbetě /mm/                                      |
| $\overline{VB}$ | - průměr šířek opotřebení na hřbetě /mm/                               |
| $VBD$           | - zkratka vyměnitelných břitových destiček                             |
| $VC$            | - šířka opotřebení na špičce nástroje /mm/                             |
| $\overline{VC}$ | - průměr šířek opotřebení na špičkách nástrojů /mm/                    |
| $VI$            | - šířka primární rýhy /mm/                                             |
| $VI_T$          | - šířka sekundární rýhy /mm/                                           |
| $VT_H$          | - hloubka primární rýhy /mm/                                           |
| $VT_T$          | - hloubka sekundární rýhy /mm/                                         |
| $\lambda_t$     | - hloubka vlny / $\mu m$ /                                             |
| $Z$             | - kontrakce /%/                                                        |

$\alpha_0$  - ortogonální úhel hřbetu  $^{\circ}$

$\beta_1$  - úhel střížné roviny  $^{\circ}$

$\varepsilon_r$  - nástrojový úhel špičky  $^{\circ}$

$\gamma_0$  - ortogonální úhel čela  $^{\circ}$

$\kappa_r$  - úhel nastavení hlavního ostří  $^{\circ}$

$\lambda_s$  - úhel sklonu ostří  $^{\circ}$

$\sigma$  - zbytkové pnutí /MPa/



## 1. Úvod

Úkoly XVII. sjezdu KSČ zvýrazňují význam urychleného zavádění principů intenzifikace ekonomiky při omezené spotřebě energií, materiálů a výrobních kapacit. Státní programy rozvoje bezobslužných obráběcích strojů (BOS) s možností vytvářet pružné výrobní systémy, formují předpoklady pro nezbytné strukturální změny ve strojírenské výrobě.

Automatizace technologických procesů staví před nauku o obrábění nové a složité úlohy. V podmínkách automatizované výroby je velmi důležité naučit se řídit pracovní proces, zabezpečit jeho vysokou spolehlivost a stabilitu, a vyloučit vliv náhodných jevů.

Intenzita řezných podmínek, která je charakteristická pro automatizovaný obráběcí proces, vyvolává intenzivnější proces opotřebení řezných nástrojů. Rozšiřující se snahy o obrobení součástí na jedno upnutí při zvyšujících se požadavcích na kvalitu obrobených povrchů, kladou vysoké nároky na spolehlivost a stabilitu řezného procesu. Zvláště pak na řezný nástroj, který podléhá nejrychlejší degradaci funkčních vlastností v systému SPID.

Z uvedených protikladných požadavků na automatizovaný obráběcí proces i na kvalitu vytvářených obrobků, pak vyvstává řada úloh, které je třeba z hlediska automatizovaného technologického procesu řešit.

Za jednu z nejvýznamnějších úloh, které je nutné z hlediska automatizace obrábění řešit, lze považovat ověření vlivu opotřebení řezných nástrojů na kvalitu vytvářených povrchů. Vedle verifikace vlivu opotřebení řezných nástrojů na kvalitu soustružených povrchů, předkládaná práce také ověřuje vliv opotřebení na řezné síly, což je další významná úloha, kterou se musí nauka o obrábění zabývat.

Předkládaná kandidátská disertační práce byla řešena jako součást státního úkolu III-1-6/1 "Vliv povrchových vrstev na porušování těles při složitém namáhání" a úlohy "Výzkum opotřebení břitových destiček ze slitutých karbidů" pro s.p. Framet a VÚPM v Šumperku.



## 2. Přehled současných poznatků o kvalitě obrobeného povrchu

Na základě prostudované literatury lze problém kvality povrchu charakterizovat dvěma přístupy:

- kvantifikací jednotlivých charakteristik kvality povrchů je určen první přístup,
- vzájemnými souvislostmi mezi charakteristikami kvality povrchů a vlastnostmi vytvořených povrchů ve vztahu k provozním zatížením, je charakterizován přístup druhý.

Je zaveden termín integrita povrchu / 7, 13, 25, 28, 29, 31/ jako poměrně nový pojem, který souhrnně vyjadřuje povahu plochy, která byla vytvořena při její výrobě, tj. stanoví vlastnosti povrchové vrstvy ve vztahu k funkci, pro kterou je určena. Jinými slovy, tedy integrita povrchu je soubor takových charakteristik povrchu a povrchové vrstvy, které jsou vytvářeny nebo mohou být ovlivněny technologickými procesy, které současně mají vliv na funkční vlastnosti součástí.

Pro názornost je v tabulce 1. uveden návrh souboru charakteristik určující integritu povrchu /13/.

### Minimální soubor údajů:

1. Topografie povrchu - drsnost povrchu,
  - kontrola existence trhlinek,
  - kontrola řádkovací mikroskopií.
2. Metalurgická kontrola povrchu (1 000 násobné zvětšení):
  - mikrostrukturní změny,
  - mikrotrhlínky, vměstky,
  - mikrokystalická koroze, oxidace,
  - průběh mikrotvrdosti.

### Standardní soubor:

1. Minimální soubor údajů.
2. Velikost, smysl a rozložení zbytkových pnutí.
3. Mez vysoko cyklové únavy při souměrném střídavém ohybu.
4. Sklon ke korozi pod napětím.

Současná metodika hodnocení kvality povrchové vrstvy je částečně ovlivněna možnostmi měřicí techniky.

Mezi nejsledovanější charakteristiky kvality povrchu patří /5, 22, 24/:

1. topografie a morfologie obrobeného povrchu,
2. smysl, velikost a gradient zbytkových pnutí,
3. stupeň a hloubka zpevnění,
4. změny struktury,
5. změny fyzikálních vlastností,
6. změny chemické.

Topografie povrchu zahrnuje makro a mikro geometrický tvar plochy vytvářeného povrchu. Umožňuje posoudit provozní vlastnosti povrchu pomocí údajů získaných statistickou analýzou mikrogeometrie povrchu /6/.

Morfologie obrobených povrchů hodnotí elektronovým rád-  
kovacím mikroskopem vady a poruchy, které lze rozdělit do dvou skupin /46/.

1. Hrubé poruchy - změny vzniklé jako důsledek plastických deformací, projevují se ve tvaru stupňů, jazyků, převalků, částic nalepeného materiálu, jako stopy po chvění a trhliny.
2. Jemné poruchy - stopy po nástroji ve tvaru rýh, drážek ve směru pohybu nástroje a mikrotrhlinky v důsledku nedokonalého tvaru nástroje.

Ostatní charakteristiky jsou spojeny s určitým objemem materiálu pod vlastní plochou povrchu. Tato vrstva má jiné vlastnosti než neovlivněný materiál ve větší hloubce. Jsou to změny, které jsou důsledkem vlastního mechanismu vzniku nového povrchu. Mezi nejvýznamější veličiny, které ovlivňují povrchové vrstvy patří, /25/:

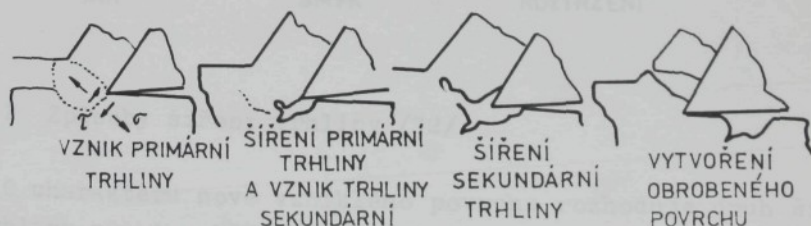
- vliv teploty,
- vliv plastické deformace,
- vliv opotřebení řezného nástroje,
- vliv únavy,
- vliv difuze,
- vliv koroze.

## 2.1 Mechanismus vzniku obrobené plochy

Obrábění je technologický proces, kdy nový povrch vzniká oddělením částic materiálu ve tvaru třísek řezáním. Řezání je procesem plastické deformace, jejíž průběh je ovlivňován vlastnostmi obráběného materiálu a podmínkami, za kterých probíhá. Za nejvýznamější jsou považovány rychlost a teplota.

Oddělení třísky, které probíhá jako poslední fáze plastických deformací v procesu obrábění, lze posuzovat jako lomovou plochu /46/.

Materiál se odstraňuje buď štěpným lomem nebo lomem tvárným. Výslednou lomovou plochu je nutno hodnotit z hlediska napětí, respektive síly, které působily při jejím vzniku. Při vzniku nového povrchu má prioritu způsob šíření trhliny před břitem nástroje /6, 46/. Je prokázáno, že tato trhlina se šíří ve směru maximálních smykových napětí. Při malých řezných rychlostech směřuje do materiálu, při zvyšování rychlosti se tento směr mění, trhlina se natáčí ve směru hodinových ručiček a směřuje do třísky. Vznik a směr šíření této trhliny se mění v závislosti především na řezné rychlosti a je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Schéma šíření trhliny a vznik nového povrchu při řezání /46/

Percy a Ueda /32/ využívají pro vznik nového povrchu lomové mechaniky. Lomová mechanika vychází z principu, že trhlina v materiálu se začíná šířit, jestliže potenciální energie uvolňovaná při šíření je větší než energie potřebná na vytváření nového povrchu.

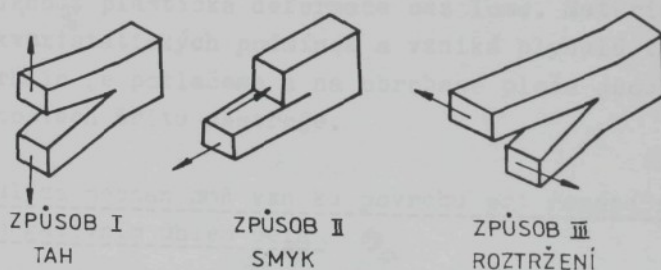
Rychlost uvolňování potenciální energie  $G$  je dána výrazem:

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} \quad (1)$$

$U$  ... potenciální energie soustavy

$A$  ... plocha trhliny

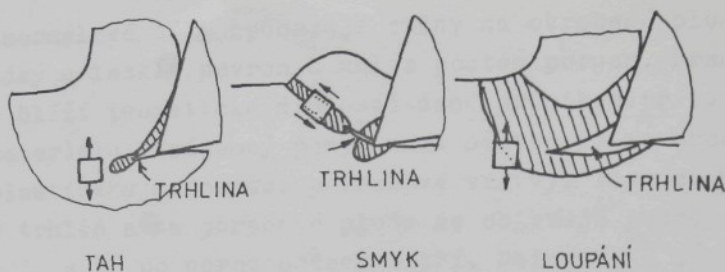
Existují tři způsoby, jimiž se trhlina může šířit, podle směru největšího napětí. Tyto tři způsoby jsou na obr. 2.



Obr. 2 Způsoby šíření trhliny /32/

O charakteru nově vzniklého povrchu rozhoduje druh šíření trhliny při tvorbě třísky, při kterém dochází k lomu. Na obr. 3 jsou schématicky znázorněny způsoby vzniku tvářené třísky v souvislosti s šířením trhliny.





Obr. 3 Tři typy vzniku třísky s různým šířením trhliny /32/

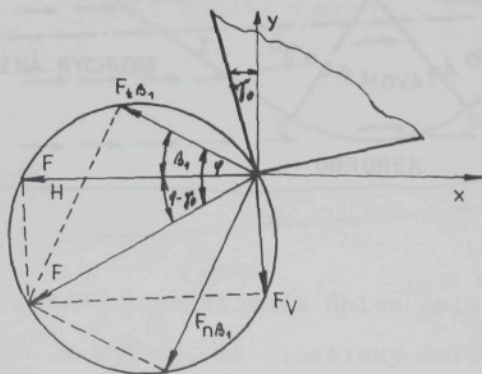
U tahového a smykového způsobu je šíření trhliny nestabilní. Při vzniku trhliny loupáním je šíření stabilní, její rychlost je řízena plastickou deformací materiálu.

Zvyšování řezné rychlosti vyvolává růst teploty v oblasti plastické deformace. V případě, že teplota je dostatečně vysoká, může vzniknout plastická deformace bez lomu. Materiál se odděluje za kvazistatických podmínek a vzniká plynulá tříska.

Tvorba trhlin je potlačena a na obrobené ploše jsou pouze stopy po nerovnostech bříty nástroje.

#### 2.1.1 Analýza mechanismů vzniku povrchu při řezání nástrojem s negativním úhlem čela

Zmenšování úhlu čela způsobuje růst normálové a pokles tangenciální síly ve střižné rovině. Na obr. 4 je rovnovážný diagram řezných sil ve střižné rovině.



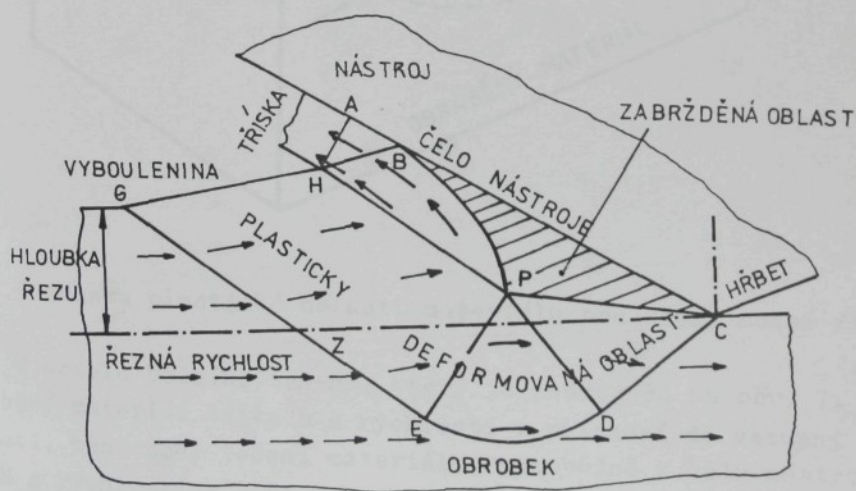
Obr. 4 Rovnovážný diagram sil ve střižné rovině.



Velké normálové síly způsobují změny na obrobené ploše, která má hladký a lesklý povrch s malým počtem poruch. Drsnost povrchu se blíží teoretické drsnosti dané průnikem břitu a obrobeného materiálu. Vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem vyvolává plastickou deformaci povrchové vrstvy, dochází k potlačení tvorby trhlin a na obrobené ploše se objevují pouze stopy po nástroji, a to po nerovnostech ostří. Deformační zóna je podstatně větší a deformační model je odlišný než při řezání nástrojem s pozitivním úhlem čela /1/. Mechanismus vzniku nového povrchu řezáním nástroje s negativním úhlem čela je vysvětlen dvěma modely, a to:

- řezným modelem
- modelem boční plastické deformace.

Z hlediska analýzy vzniku nového povrchu je účelné zkoumat oba modely odděleně. Reálný proces vzniku nové plochy je kombinací obou uvedených modelů, přičemž jejich podíl je determinován velikostí úhlu čela nástroje. Schéma řezného modelu je na obr. 5.

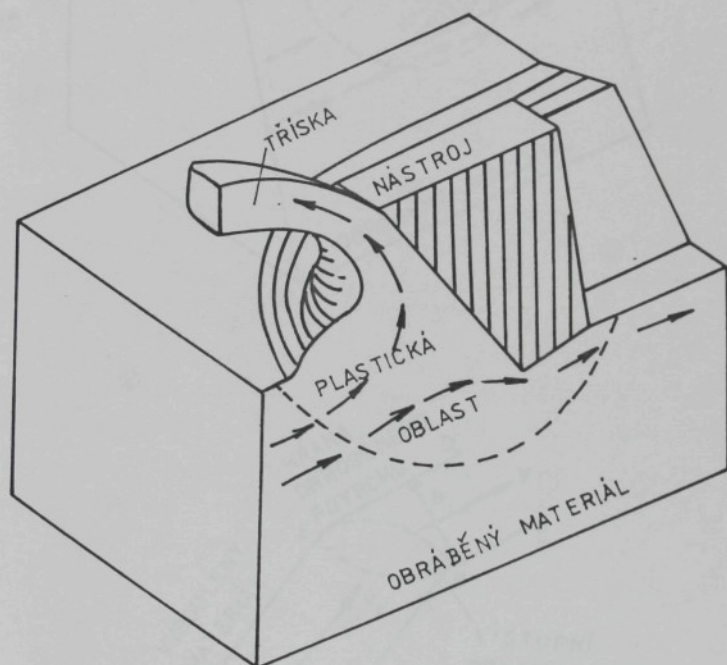


Obr. 5 Model řezání s negativním úhlem čela nástroje /1/

Z obrázku je patrné, že plasticky deformovaná oblast je velmi výrazná, spojnice bodů G a H představuje vybouleninu, která je důsledkem velké deformační zóny. Tríska vychází z

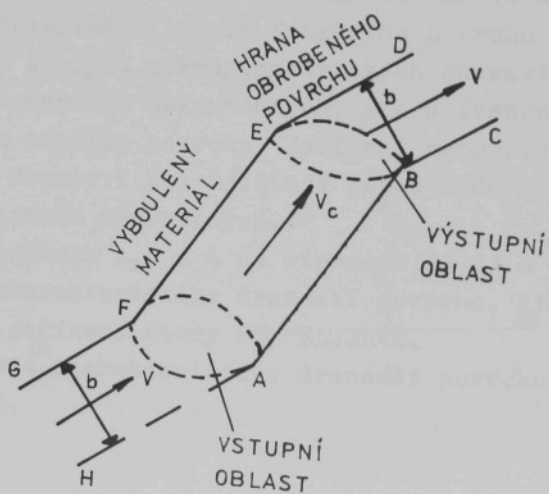
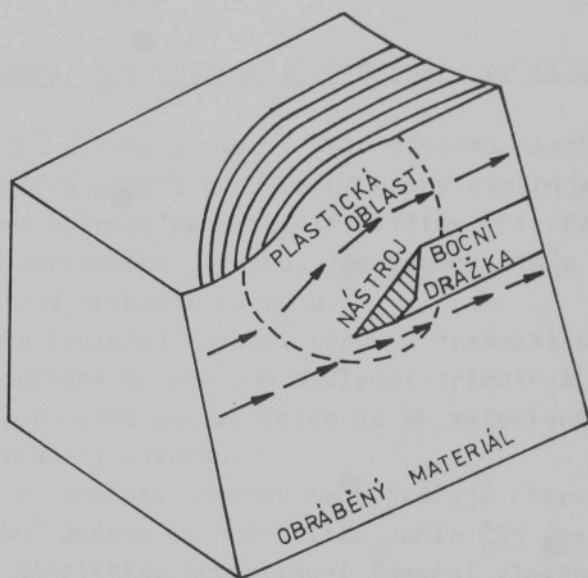
plasticky deformované oblasti s nulovým napětím podél povrchu A - H. Bod P zřetelně zabržděné oblasti tvoří mezní místo, ve kterém se deformovaný materiál rozděluje v třísku a materiál, který se připojuje k obrobenému povrchu.

Na obr. 6 je schema plastické oblasti materiálu v rovině, která prochází hlavní oblastí tečení.



Obr. 6 Schema plastické oblasti materiálu pro řezný model /1/

V modelu bočního tečení, který je znázorněn na obr. 7, obráběný materiál šířky  $b$  a rychlosti  $v$  přichází do vstupní oblasti, mění směr tečení materiálu rovnoběžně k čelu nástroje A - B s rychlostí  $v_c$ . Na konci nástroje, kde je výstupní oblast, materiál opět změni směr tečení v (bod B) původní směr rychlosti  $v$ . Materiál vycházející z výstupní oblasti má šířku  $b$ . Předpokládá se, že změna rychlosti nastává ve vstupní a výstupní oblasti, které jsou uvažovány jako plastické zóny. B - C je hrana boční drážky vytvořená nástrojem, G - F - E - D je místo povrchu materiálu, který se rozšiřuje z části před nástrojem.



Obr. 7 Model bočního tečení materiálu /1/

## 2.2 Hodnocení mikrogeometrie obrobeného povrchu

Obrobená plocha se tvoří jako obalová plocha trajektorií pracovních pohybů bodů řezné hrany nástroje.

Pokud se rozebírají geometrické příčiny vytvoření mikrogeometrie obrobeného povrchu, jde v podstatě o problém určení teoretické drsnosti povrchu.

Přestože se skutečná drsnost nerovná drsnosti teoretické, slouží výpočtové vzorce pro základní orientaci při vzájemné regulaci parametrů podílejících se na vytvoření předepsané hodnoty drsnosti povrchu.

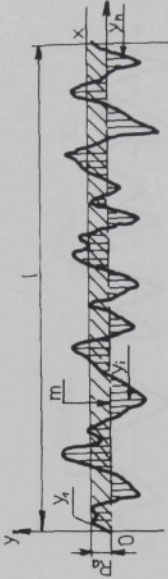
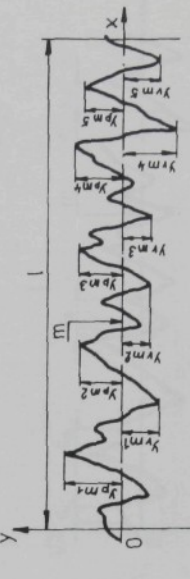
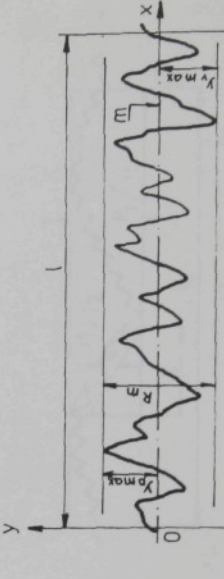
Požadavky na drsnost povrchu se vyjadřují charakteristikami povrchu, buď jednou nebo několika podle ČSN 014450 a 014451. Tyto charakteristiky nevystihují funkční vlastnosti povrchu uspokojivě, ale nezajišťují ani dokonalý popis profilu povrchu. Základní údaje vybraných charakteristik podle ČSN 014450 a 014451 jsou v tabulkách 2 a 3 na straně 11 a 12.

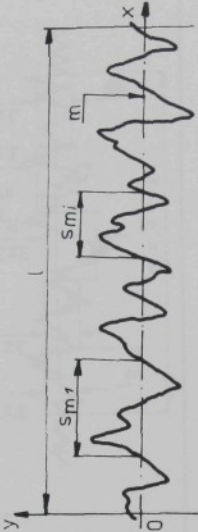
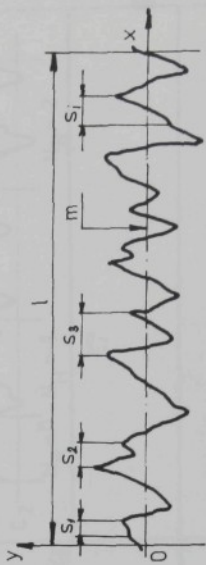
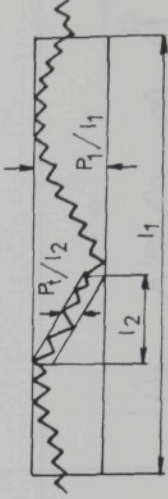
Pro detailnější popis funkčního povrchu je třeba provést přesnější analýzu mikrogeometrických charakteristik drsnosti povrchu v normách nezahrnutých, ale užívaných z důvodů lepšího popisu profilu povrchu. Zařízení renomovaných firem pro určování drsnosti pak zjišťují celou řadu charakteristik v našich normách neuvedených.

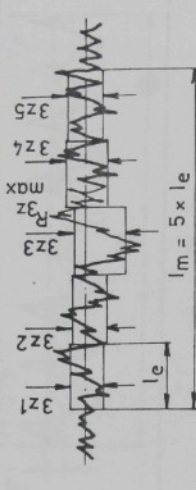
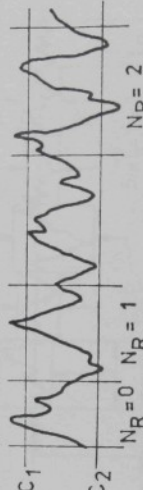
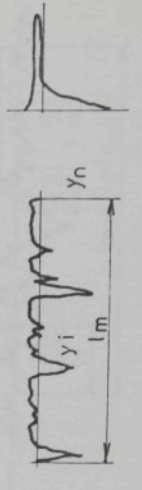
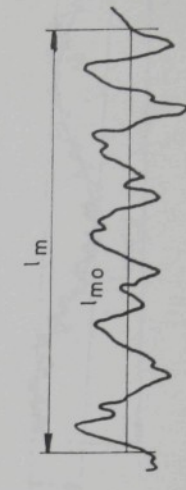
V tabulkách 4, 5 a 6 na stranách 13, 14 a 15 jsou uvedeny některé charakteristiky drsnosti povrchu, které se určují na použitém zařízení firmy HOMMELWERKE.

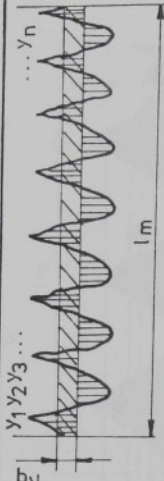
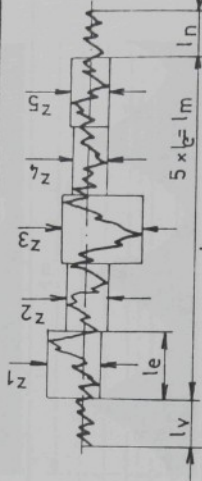
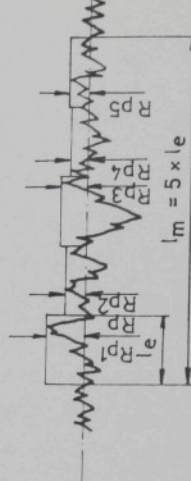
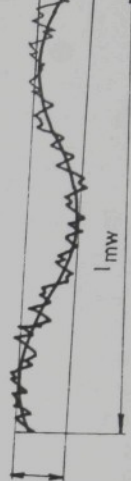
Vybrané charakteristiky drsnosti povrchu jsou dle norem ISO a DIN.



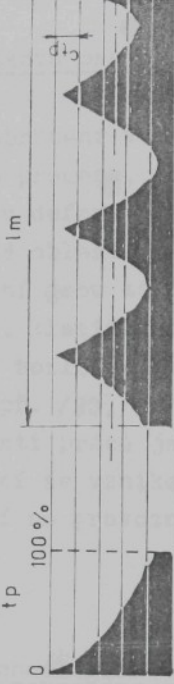
| Značka | Veličina                                  | Definice                                                        | Znázornění                                                                       |
|--------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $R_a$  | střední hodnota<br>drsnosti               | $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) / dx$                          |  |
| $R_z$  | výška nerovností profilu<br>z deseti bodů | $R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_{pmi} + \sum_{i=1}^5 y_{vmi}$ |  |
| $R_m$  | největší výška<br>nerovností profilu      | $R_m = y_{pmax} + y_{vmax}$                                     |  |

| Značka | Veličina                                                         | Definice              | Znázornění                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------|------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_m$  | střední odstup rýh<br>/ střední rozteč nerov-<br>ností profilu / | $S_m = \frac{l_m}{D}$ |  <p>The diagram shows a surface profile with a vertical axis 'y' and a horizontal axis 'x'. The origin '0' is at the start of the profile. A horizontal line segment of length 'l' is marked above the profile. Below the profile, four vertical double-headed arrows indicate the average spacing between peaks: 'S<sub>m1</sub>', 'S<sub>m2</sub>', 'S<sub>m3</sub>', and 'S<sub>m</sub>'. A horizontal double-headed arrow labeled 'm' indicates the distance between two peaks.</p>                                                              |
| S      | střední rozteč místních<br>výstupků profilu                      |                       |  <p>The diagram shows a surface profile with a vertical axis 'y' and a horizontal axis 'x'. The origin '0' is at the start of the profile. A horizontal line segment of length 'l' is marked above the profile. Below the profile, four vertical double-headed arrows indicate the average spacing between peaks: 'S<sub>1</sub>', 'S<sub>2</sub>', 'S<sub>3</sub>', and 'S<sub>i</sub>'. A horizontal double-headed arrow labeled 'm' indicates the distance between two peaks.</p>                                                                 |
| $P_t$  | profilová hloubka                                                |                       |  <p>The diagram shows a surface profile with a vertical axis 'y' and a horizontal axis 'x'. A horizontal line segment of length 'l<sub>1</sub>' is marked above the profile. Below the profile, two horizontal double-headed arrows indicate the average spacing between peaks: 'P<sub>t</sub>/l<sub>2</sub>' and 'P<sub>t</sub>/l<sub>1</sub>'. A vertical double-headed arrow labeled 'P<sub>t</sub>/2' indicates the average peak height. A horizontal double-headed arrow labeled 'l<sub>2</sub>' indicates the distance between two peaks.</p> |

| Značka                      | Velikost                                   | Definice                                                          | Známkování                                                                        |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{3Z}$                    | zprůměrovaná hloubka drsnosti              | $R_{3Z} = \frac{1}{5} \frac{3z_1 + 3z_2 + 3z_3 + 3z_4 + 3z_5}{5}$ |   |
| $N_R$                       | normovaný počet rýh / hustota /            |                                                                   |   |
| D                           | počet rýh                                  |                                                                   |                                                                                   |
| $S_k$                       | posuv rozdělení amplitud                   | $S_k = \frac{1}{R_q} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^3$  |   |
| $l_{mo}$<br>$/L_o$<br>$l_o$ | rozvinutá profilová délka<br>délka profilu | $l_o = \frac{l_{mo}}{l_m}$                                        |  |

| Značka            | Veličina                                              | Definice                                                        | Znázornění                                                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| $R_q$             | kvadratická střední hodnota drsnosti                  | $R_q = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2 / x / dx$                 |  |
| $R_z$ DIN         | střední hodnota drsnosti                              | $R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$               |  |
| $R_p$<br>$R_{pm}$ | hladkost povrchu<br>střední hloubka hladkosti povrchu | $R_{pm} = \frac{1}{5} \cdot (R_{p1} + R_{p2} + \dots + R_{p5})$ |  |
| $W_t$             | hloubka vlny                                          |                                                                 |  |



| Značka | Veličina               | Znázornění                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | Abbottova nosná křivka |  <p>The diagram illustrates Abbott's bearing curve. It consists of two parts. The top part is a cumulative distribution curve (S-curve) with the vertical axis labeled <math>t_p</math> (ranging from 0 to 100%) and the horizontal axis labeled <math>l_m</math>. The bottom part is a probability density curve (bell-shaped) with the vertical axis labeled <math>\% \sum y_i</math> and the horizontal axis labeled <math>x_p</math> and <math>x_v</math>. A vertical dashed line connects the peak of the density curve to the S-curve.</p> |
|        | Křivka četnosti        |  <p>The diagram shows a frequency curve, which is a probability density curve (bell-shaped). The vertical axis is labeled <math>\% \sum y_i</math> and the horizontal axis is labeled <math>x_p</math> and <math>x_v</math>. A vertical dashed line indicates the peak of the distribution.</p>                                                                                                                                                                                                                                                  |

### 2.3 Zbytková pnutí po obrábění

Při obrábění vzniká nový povrch jako výsledek poměrně složitého procesu, charakterizovaného zpravidla intenzivní plastickou deformací, doplněnou složitou tepelnou kinetikou v zasažené oblasti. Výsledkem těchto změn v povrchové vrstvě po obrábění jsou zbytková pnutí.

Rozdělení, klasifikace, mechanismy vzniku a vliv různých příčin na rozložení zbytkových pnutí je možno nalézt v literatuře např. /23, 28/.

V této části práce jsou uvedeny některé podstatné aspekty, související se vznikem zbytkových pnutí a dále vliv zbytkových pnutí na provozní vlastnosti součástí.

#### 2.3.1 Technologické příčiny vzniku zbytkových pnutí

Zbytková pnutí mohou vzniknout v povrchové vrstvě především tehdy, dojde-li k její plastické deformaci. Smysl zbytkových pnutí /tah či tlak/ závisí na tom, jak deformace vznikla.

V podstatě ji mohou způsobit tyto příčiny:

- 1/ nerovnoměrná plastická deformace vyvolaná mechanickými silami /silový účinek řezných sil při obrábění/
- 2/ nerovnoměrný ohřev a ochlazování způsobené např. oddělováním třísky, ochlazováním obrobené plochy prostředím spod.
- 3/ nerovnoměrné změny struktury - pokud dochází ke změně hustoty /měrných objemů/ původní a nově vzniklé struktury - - vyvolané spolupůsobením teploty a napjatosti při řezání
- 4/ chemické procesy - absorpce, difuze a s nimi spojené chemické reakce pronikajících částí /a prostředí, chladících a mazacích prostředků, nástroje/. Např. C, O, H, NS aj., vyvolávající změny krystalické mřížky některých fází.

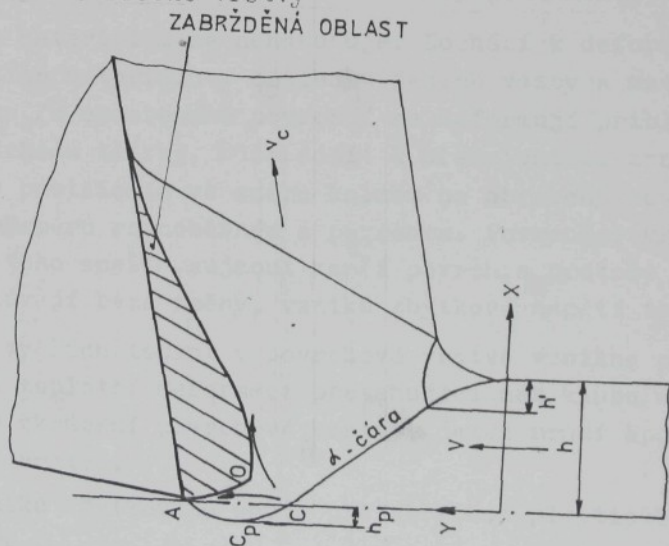
Průběh plastické deformace ovlivňují:

- mechanické vlastnosti /mez kluzu, mez pevnosti v tahu a tlaku, modul pružnosti, tažnost, kontrakce, tvárnost, houževnatost i křehkost materiálu/
- fyzikální vlastnosti /hustota, tepelná vodivost, teplotní roztažnost, tepelný obsah, teploty tání i teploty překrystalizace a rekrytalizace/

Zbytková pnutí vzniklá z technologických příčin jsou určena charakterem technologické operace, působením některé z výše uvedených příčin, nejčastěji jejich kombinací /28,29/.

Při obrábění kovových materiálů je možno vznik zbytkových prutů přiřadit těmto důvodům:

- 1/ Při oddělování třísky dochází v oblasti zóny řezání k intenzivní celkové deformaci. Tato pružně plastická deformace zasahuje i pod obrobený povrch, navíc zde působí pěchování povrchové vrstvy způsobené:
- a/ tím, že břit není ideálně ostrý a část nastavené hloubky třísky se neodřízne
  - b/ existencí zadržované vrstvy



Obr. 8 Schema oblasti plastické deformace pro ortogonální řezání /1/

Na obrázku 8 je schema oblasti plastické deformace určené pomocí kluzových čar, kde v bodě O na povrchu zabrzděné oblasti je rychlost obráběného materiálu nulová. Plasticky deformovaný materiál v části  $C_p - C$  má nejprve směr odcházející třísky, posléze tento směr mění a spojuje se s obrobenou plochou v úseku  $A - C$ . Jiná část plasticky deformovaného materiálu v části  $C_p - C$  směřuje rovněž k bodu O a již tento směr nemění, odchází ve formě třísky.

- 2/ Při obrábění materiálů, kde  $\frac{R_m}{R_{p0,2}} < 1,25$  se tvoří elementární tříska.

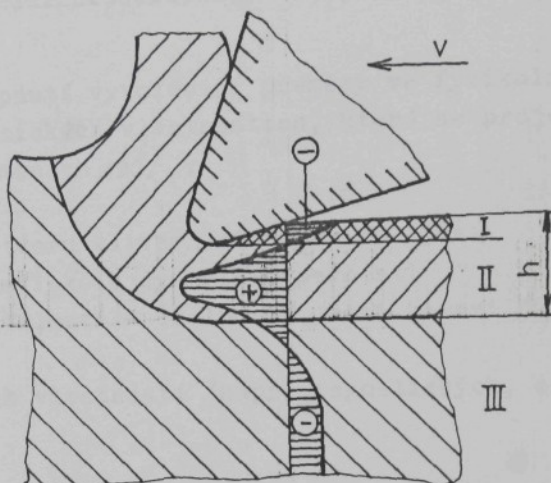
Při tvoření jednotlivých elementů se narušuje spojení mezi třískou a obráběným materiálem, takže doplňující účinek napětového pole třísky se do obrobeného povrchu nepřenáší. Třecí síly na hřbetě se snaží prodloužit zrna v povrchové vrstvě a zvětšit tak povrch, čemuž brání níže položené vrstvy. V povrchové vrstvě tedy vznikne napětí tlakové.

- 3/ Při obrábění houževnatých a plastických kovů a slitin, kdy  $\frac{R_m}{R_{p0,2}} > 1,25$  vzniká plynulá tříska a spojení mezi třískou a obráběným materiálem se nenarušuje. Dochází k deformaci zrn základního materiálu v důsledku jejich vazby s materiálem třísky; zrna /u obrobeného povrchu/ se deformují přibližně ve směru odchodu třísky. Může dojít k přeorientaci zrn povrchových vrstev protažením ve směru kolmém na obrobený povrch a stlačení ve směru rovnoběžném s povrchem. Povrchová vrstva se v důsledku toho snaží zaujmout menší povrch, a protože spodní vrstvy zůstávají beze změny, vzniká zbytkové napětí tahové.

- 4/ Při vzniku vyšších teplot v povrchové vrstvě vznikne pnutí tahové, při teplotní deformaci přesahující mez kluzu dojde k plastickému zkrácení povrchové vrstvy, čemuž brání spodní ne-deformované vrstvy.

Příklad vzniku zbytkového pnutí při obrábění plastického materiálu /  $\frac{R_m}{R_{p0,2}} > 1,25$  / je na obrázku 9.





Obr. 9 Schema vzniku zbytkového napětí v povrchové vrstvě při obrábění plastických kovů /28/

- I - oblast tlakových zbytkových pnutí vyvolaných třením hříbetu o obrobenou plochu
- II - oblast tahových pnutí vznikajících plastickým stlačováním materiálu
- III - neovlivněná oblast

Z uvedeného vyplývá, že závislost rozložení zbytkových pnutí po obrábění je ovlivňována /23/ :

- 1/ vlastnostmi obráběného materiálu a možnostmi jejich změny v procesu obrábění /zejména strukturní a chemické změny/
- 2/ silovými účinky vyvolanými působením rezných sil v povrchové vrstvě obrobku
- 3/ teplotním polem vznikajícím přeměnou mechanické práce deformace a třecí v teplo při oddělování třísek

### 2.3.2 Vliv zbytkových pnutí na provozní vlastnosti součástí

Zbytková pnutí vyvolávají přeměny ve fyzikálních, mechanických a chemických vlastnostech, které se projevují v následujících změnách /23/ :

- 1/ rozměrů a tvaru vlivem deformace součástí
- 2/ hodnoty statické a dynamické pevnosti
- 3/ chemické stálosti - odolnosti proti korozi /korozi pod napětím/
- 4/ fyzikálních vlastností /např. magnetických, elektrických apod./

Statickou pevnost ovlivňují zbytková pnutí zejména v případech, když působí v dostatečně velké části průřezu /tváření za studena/. Vyvolání zbytkových pnutí mechanickým předpětím má za následek zvýšení kluzu /zpevnění/ materiálu.

Dynamická pevnost materiálu závisí na průběhu zbytkových pnutí výrazně proto, že únavová odolnost je ovlivňována především úzce lokálními vlastnostmi materiálu v nejnamáhanějším místě průřezu zatěžované součásti. Při obvyklých způsobech vnějšího zatížení /ohyb, krut/ dosahuje namáhání maximálních hodnot právě v povrchové vrstvě, kde také většinou působí zbytková pnutí.

Dochází k superpozici těchto napjatostí a tím vzrůstá pravděpodobnost urychlení únavových procesů v případě tahových zbytkových pnutí.

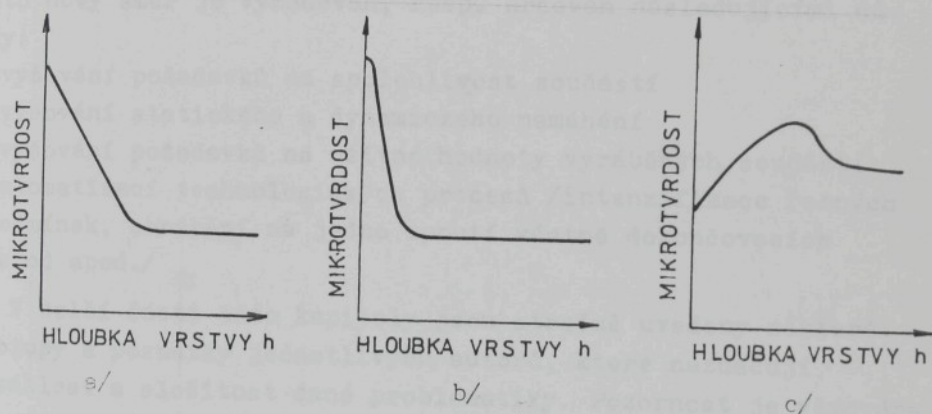
Závěry všech hypotéz, zkušenosti z praxe i výsledky experimentálního výzkumu se shodují v tom, že tahová zbytková pnutí únavovou pevnost snižují, tlaková zbytková pnutí naopak zvyšují. Zvýšení odolnosti proti koroznímu napadení u součástí s tlakovým pnutím v povrchové vrstvě je vysvětlováno obtížnějším pronikáním aktivních částic do zpevněné struktury, a také šíření poruchy při korozi pod napětím je tlakovým zbytkovým pnutím zpomalováno /23/.

## 2.4 Mikrotvrдость po obrábění

Důsledkem plastické deformace povrchových vrstev při obrábění jsou jejich vyšší mechanické vlastnosti /pevnost, tvrđost/ než vlastnosti původního materiálu.

Jako míra zpevnění se nejčastěji uvažuje mikrotvrđost povrchové vrstvy obroběného povrchu.

Mikrotvrđost povrchové vrstvy se do hloubky mění dle obrázku 10.



Obr. 10 Typické rozložení mikrotvrđosti v povrchové vrstvě obroběné plochy /36/

- a/ mikrotvrđost je největší na povrchu a postupně se snižuje až na tvrđost základního materiálu /pevný spoj se základním materiálem/
- b/ mikrotvrđost je konstantní v tenké povrchové vrstvě, potom prudce klesá až na tvrđost základního materiálu /nepatrné spojení povrchové vrstvy se základním materiálem/
- c/ mikrotvrđost se směrem od povrchu zvětšuje až na maximální hodnotu a potom klesá /porušení krystalické mřížky v povrchové vrstvě/



## 2.5 Shrnutí současných poznatků o kvalitě obrobeného povrchu

V předchozích kapitolách byly zavedeny základní charakteristiky kvality obrobených povrchů a některé další návaznosti, související se vznikem a hodnocením obrobených povrchů.

Rozvojem poznatků o kvalitě obrobených povrchů, ale i požadavky na tyto povrchy ve vztahu k provoznímu zatížení, je determinován nový studijní směr v oblasti strojírenské technologie nazývaný i n t e g r i t a p o v r c h u .

Tento nový směr je vyžadován, resp. určen následujícími důvody:

- zvyšování požadavků na spolehlivost součástí
- zvyšování statického a dynamického namáhání
- zvyšování požadavků na užité hodnoty vyráběných součástí
- automatizaci technologických procesů /intenzifikace řezných podmínek, obrábění na jedno upnutí včetně dokončovacích metod apod./

V další části této kapitoly jsou stručně uvedeny některé přístupy a poznatky jednotlivých autorů, které naznačují rozsáhlost a složitost dané problematiky. Pozornost je věnována jak výzkumu jednotlivých faktorů, které ovlivňují mechanismus vzniku nového povrchu, tak i jednotlivým charakteristikám kvality povrchu.

Vedle studia výše uvedených faktorů podtrhuje Bátora /3 / význam budování středisek, která umožňují komplexní kontrolu obrobených povrchů. Jedná se zejména o profilograf na měření drsnosti povrchu, přístroj na měření nosného podílu povrchu, řádkovací elektronový mikroskop, Vickersův tvrdoměr, mikrotvrdoměr, zařízení na měření zbytkových pnutí a tribotestor. Nejreálnější představu o podmínkách tření povrchů poskytují právě tribotestory. Z hlediska širokého použití vyhovují tribotestory univerzálního typu, které umožňují co nejpřesněji simulovat podmínky tření sdružených částí v provozu.



Leskovar a Peklenik /25/ uvádějí, že je důležité rozlišovat změny, které se objeví v povrchové vrstvě jako důsledek primárního obráběcího procesu, a změny způsobené sekundárními obráběcími procesy.

Neckář /28/ zdůrazňuje vliv rychlosti deformace a teploty řezání při tvorbě nového povrchu, resp. vliv řezných podmínek, které nejvíce ovlivňují rychlost deformace a teplotu řezání. Vedle těchto faktorů je vznik obráběného povrchu doprovázen vznikem řady poruch na obrobené ploše, které ovlivňuje i použitá metoda obrábění. A dále to jsou poruchy vzniklé chvěním systému SPID.

Hrubý /17/ uvádí, že při vzniku a formování nového povrchu participují faktory interní (metalurgické) i externí (např. silové ovlivnění povrchu).

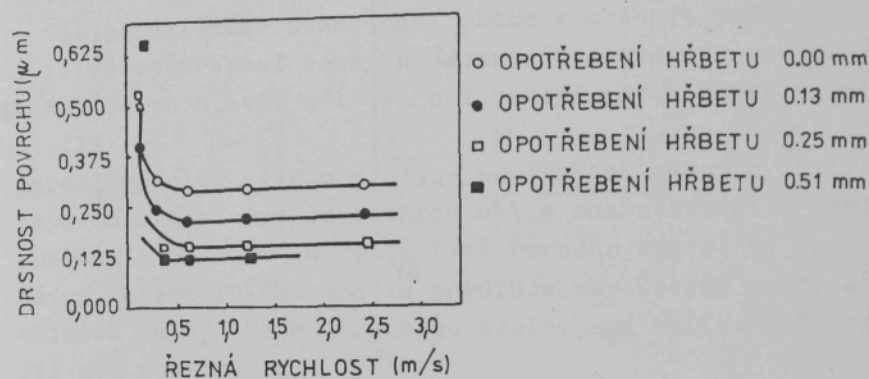
Bumbálek /7/ rozděluje faktory, které ovlivňují vznik nového povrchu na technologické a materiálové. Technologické faktory je možné vidět ve chvění nástroje i obráběné součásti, v nerovnostech ostří řezného nástroje v jeho opotřebení i v případné změně řezného prostředí. Mezi základní materiálové faktory patří: krystalická stavba materiálu, rozměr zrn a chemické složení, vměstky a nečistoty.

Příčiny nejvíce ovlivňující vznik nového povrchu lze v podstatě shrnout do tří skupin /31/. Jsou to příčiny spojené s geometrií řezného nástroje (geometrické příčiny), s plastickou deformací obráběného materiálu a s vibracemi řezného nástroje vzhledem k obráběnému povrchu. Nový povrch je vytvářen skutečnou řeznou hranou nástroje, která je určována procesem opotřebení. Při vzájemné interakci řezný nástroj - obrobek dochází ke změnám jednotlivých charakteristik kvality povrchu, jejichž velikost vyplývá ze změn tvaru břitů.

Leskovar a Peklenik /25/ při výzkumu charakteristik integrity povrchu s ohledem na opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení, dospěli k závěrům, že opotřebení na hřebě zvyšuje velikost mikrotvrdosti i zbytkových pnutí. Nejvýraznější zvýšení mikrotvrdosti a zbytkových pnutí bylo zjištěno při  $VB > 0,3$  a menších rychlostech (20 m/min).

Bailey a kol. /2/ dospěli k závěrům, že opotřebení řezných nástrojů při soustružení ocele ovlivňuje velikost plastické deformace a tím dochází i k ovlivnění větší hloubky povrchu.

Dochází k výraznému zvýšení mikrotvrdosti. Dále autoři článku /2/ uvádějí, že s rostoucím opotřebením hřbetní plochy probíhá intenzivnější vývoj teploty, která ovlivňuje povrchovou vrstvu, ale drsnost povrchu je příznivější. Na obr. 11 je vliv řezné rychlosti, při různých hodnotách VB, na drsnost povrchu.



Obr. 11 Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu /2/

Mori a kol. /24/ ověřovali závislost mezi opotřebením VBD, při soustružení a drsností  $R_a$  obrobené plochy při různých řezných rychlostech a posuvech. Zjišťovali se korelační koeficienty u opotřebení VC, VB, VN.

Např. při  $v = 200 \text{ m/min}^{-1}$ ,  $s = 0,2 \text{ mm/ot}^{-1}$  byl korelační koeficient  $r \text{ (VB)} = 0,829$ ,  $r \text{ (VC)} = 0,815$  a  $r \text{ (VN)} = 0,778$ .

Při změně řezných podmínek byly zjištěny jiné hodnoty, ale zásadně lze říci, že se jednalo o velmi silnou závislost.

Závěrem k přehledu poznatků o kvalitě obrobených povrchů nezbyvá než konstatovat, že bude potřebné vybrat a sjednotit kritéria, která charakterizují integritu povrchu, pro konkrétní podmínky obrábění a obráběné materiály. Z uvedeného přehledu vyplývá, že významný úkol spočívá i v objasnění souvislostí mezi opotřebením řezných nástrojů při různých podmínkách obrábění. Ověření vlivu opotřebení na základě charakter. kvality obrobených povrchů nebylo zatím provedeno. V budoucnu bude patrně nezbytná systematická kompilace dat o integritě povrchu, která musí tvořit integrální část technologické databanky.

### 3. Cíl práce

Protože je tato problematika značně široká, je v souladu s názvem disertace pozornost zaměřena na charakteristiky kvality povrchu s ohledem na opotřebení VBD ze slinutých karbidů, používaných při kopírovacím soustružení.

Cíl předkládané disertační práce v obecném pojetí je ověření vlivu opotřebení řezných nástrojů na kvalitu soustružených povrchů. Tento hlavní cíl byl při řešení práce rozdělen do dílčích cílů:

- 1/ Experimentální výzkum procesu opotřebení řezných nástrojů.
- 2/ Experimentální výzkum řezných sil a charakteristik kvality povrchu s ohledem na opotřebení řezného nástroje.
- 3/ Návrh matematického modelu predikce zbytkových pnutí s ohledem na opotřebení řezného nástroje a velikost řezných sil při soustružení.

Vlastní řešení KDP vychází ze shrnutí současných poznatků o vzniku povrchu a jednotlivých charakteristik kvality povrchu. Analýza jednotlivých mechanismů opotřebení řezných nástrojů je obsahem písemné části odborné zkoušky.

Disertační práce bude vhodným podkladem pro seznámení výrobní praxe s otázkami kvality obrobených povrchů, i s jejich hodnocením s ohledem na opotřebení řezných nástrojů. Výsledky opotřebení ŘN budou vhodným materiálem pro VÚPM v Šumperku při vývoji VBD ze slinutých karbidů. Matematický model predikce zbytkových pnutí bude podnětným materiálem, pro další výzkum v oblasti matematického modelování charakteristik kvality obrobených povrchů.

### 4. Zvolené metody výzkumu charakteristik kvality soustruženého povrchu s ohledem na opotřebení řezného nástroje

Metody použité v disertační práci vycházejí z cílů práce, specifikovaných v kapitole 3. Hlavní metodou poznávání objektivní reality je pozorování, experiment a jeho objektivní studium a zhodnocení. V literární části práce jsou shrnuty teoretické poznatky mechanismů tvorby nového povrchu se zaměřením na mechanismus vzniku nového povrchu s negativním úhlem čela. Dále jsou v literární části uvedeny poznatky o charakteristikách kvality obrobených povrchů.



Experimentální část KDP byl rozdělena na dvě části:

- 1/ experimentální výzkum opotřebení řezných nástrojů,
- 2/ experimentální výzkum řezných sil a charakteristik kvality obrobeného povrchu.

Konkrétní náplň obou částí tvoří řešení dílčích úkolů:

- a) výzkum opotřebení VBD ze slinutých karbidů při podélném soustružení,
- b) opotřeбенými VBD byly při soustružení měřeny řezné síly,
- c) na takto obrobených plochách byly pak určovány jednotlivé charakteristiky kvality obrobeného povrchu.

Ke zpracování naměřených hodnot, kreslení, grafických závislostí i při výpočtech hodnot v matematickém modelu, byly použity prostředky malé výpočetní techniky. Pro grafické závislosti některých experimentálních údajů byly použity regresní polynomy čtvrtého a pátého stupně.



#### 4.1 Metodika experimentálního výzkumu kvality povrchu

Z rozboru problematiky hodnocení charakteristik kvality povrchu po obrábění byla navržena metodika experimentů tak, aby byla v kontextu s cíli KDP.

Dále bylo nutné určit podmínky prováděných experimentů a navrhnout zařízení ke sledování jednotlivých měřených veličin. Do podmínek experimentů byl zahrnut:

- výběr obráběných materiálů a příprava experimentálních vzorků
- výběr nástrojových materiálů, určení nožového držáku a vyměnitelných břitových destiček
- podmínky obrábění a měření

Přehled jednotlivých experimentů je v tabulce 7.

Rezné podmínky byly pro všechny kombinace obráběných a nástrojových materiálů shodné.

V první části experimentu byly zjištěny pro každou kombinaci nástrojového a obráběného materiálu čtyři časové závislosti průběhu opotřebení.

V druhé části experimentu bylo soustružení provedeno opotřebovanými břitovými destičkami VBD /48 ks/ i novými /12 ks/.

K řešení bylo použito těchto experimentálních metod:

a/ měření opotřebení VBD

- kvantifikace jednotlivých kritérií pomocí dílenského mikroskopu ZEISS

- morfologie opotřebovaného nástroje pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu BS 300 Tesla Brno

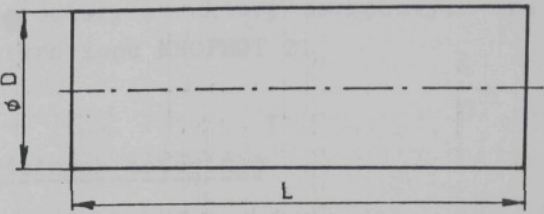
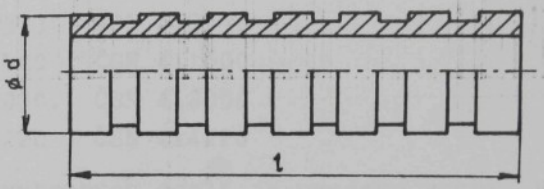
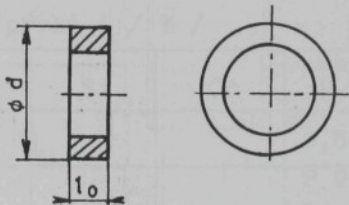
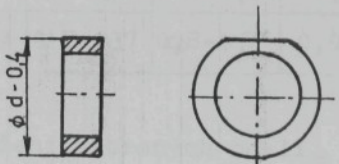
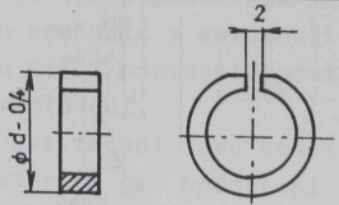
b/ měření složek rezných sil tříslložkovým tenzometrickým dynamometrem

c/ měření charakteristik mikrogeometrie povrchu pomocí drsnoměru HOMMELTESTER T20-DC

d/ zjišťování zbytkových pnutí- mechanickou metodou při elektrolytickém odleptávání povrchových vrstev materiálu

e/ měření mikrotvrdosti tvrdoměrem ZWICK

f/ hodnocení morfologie povrchu pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu BS 300 Tesla Brno

|                      | EXPERIMENTÁLNÍ VZOREK                                                               | MĚŘENÁ VELICINA                  |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| I. ČÁST EXPERIMENTU  |    | OPOTŘEBEN<br>ŘEZNÝCH<br>NÁSTROJŮ |
| II. ČÁST EXPERIMENTU |    | ŘEZNÉ SÍLY                       |
|                      |    | MIKROGEO-<br>METRIE              |
|                      |   | MIKROTVR -<br>DOST               |
|                      |  | ZBYTKOVÁ<br>PNUTÍ                |
|                      | MIKROSTRUKTURA, MORFOLOGIE POVRCHU                                                  |                                  |

Tab. 7 Přehled provedených experimentálních měření

g/ metalografické rozborů struktury povrchových vrstev pomocí optického mikroskopu NEOPHOT 21

#### 4.1.1 Výběr obráběných materiálů

K provedení experimentálního výzkumu byly vybrány tyto oceli:

- ocel 11 373 ČSN 413730
- ocel 11 600 ČSN 411600
- ocel 12 050.1 ČSN 412050
- ocel 14 220 ČSN 414220

Chemické složení vybraných ocelí je uvedeno v tab. 8.

| Označení<br>dle<br>ČSN | Obsah prvků / % / |         |           |          |                    |         |         |
|------------------------|-------------------|---------|-----------|----------|--------------------|---------|---------|
|                        | C                 | Mn      | Si        | Cr       | max<br>P,S         | Ni      | Cu      |
| 11 373                 | max 0,22          |         |           |          | 0,050              |         |         |
| 11 600                 | max 0,50          |         |           |          | P 0,055<br>S 0,050 |         |         |
| 12 050.1               | 0,42-0,5          | 0,5-0,8 | 0,17-0,37 | max 0,35 | 0,04               | max 0,3 | max 0,3 |
| 14 220                 | 0,14-0,19         | 1,1-1,4 | 0,17-0,37 | 0,8-1,1  | 0,035              |         |         |

Tab. 8 Chemické složení vybraných ocelí

Vybrané materiály se často používají při výrobě staticky i dynamicky namáhaných součástí v automobilovém průmyslu, pro součásti s požadovanou větší odolností proti opotřebení a na strojní součásti k cementování.

Ocel 12 050.1 je mimo své určení jako konstrukční ocel používána jako etalonový materiál pro hodnocení trvanlivosti řezných nástrojů. Výchozí průměr polotovarů byl v rozmezí 150 + 200 mm, povrchová kůra byla předem odstraněna jiným nástrojem téhož typu, se kterým byly zkoušky prováděny.

Materiál 12 050.1 byl v normalizačně žíhaném stavu, ostatní materiály jsou v přírodním stavu.

V tab. 9 jsou uvedeny hodnoty fyzikálně-mechanických vlastností ocelí, zjištěné na základě zkoušky tahem.

| Obráběný<br>materiál | $R_m$<br>/MPa/ | $R_{p0,2}$<br>/MPa/ | A<br>/%/ | Z<br>/%/ |
|----------------------|----------------|---------------------|----------|----------|
| 11 373               | 382            | 224                 | 37,1     | 60       |
| 11 600               | 688            | 428                 | 20,9     | 48,1     |
| 12 050.1             | 586            | 300                 | 24,3     | 51       |
| 14 220               | 734            | 550                 | 17,3     | 56,4     |

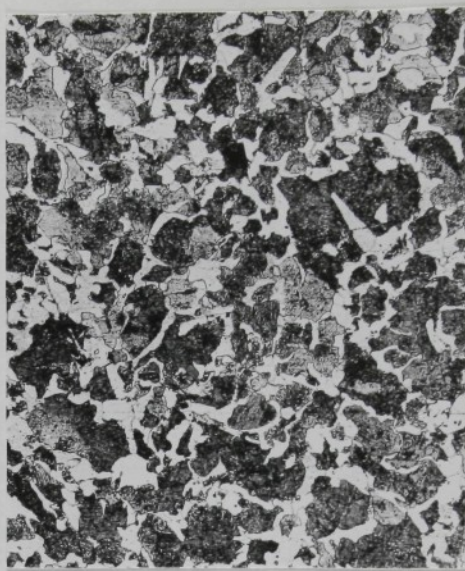
Tab. 9 Fyzikálně-mechanické vlastnosti ocelí zjištěné zkouškou tahem

Při výběru obráběných materiálů bylo mimo četnost používání v automobilovém průmyslu přihlédnuto také k jejich dostupnosti.

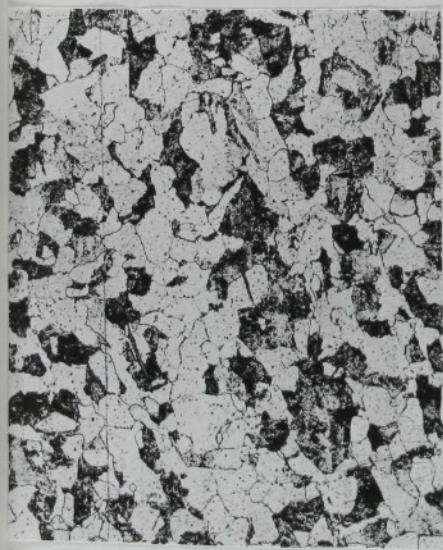




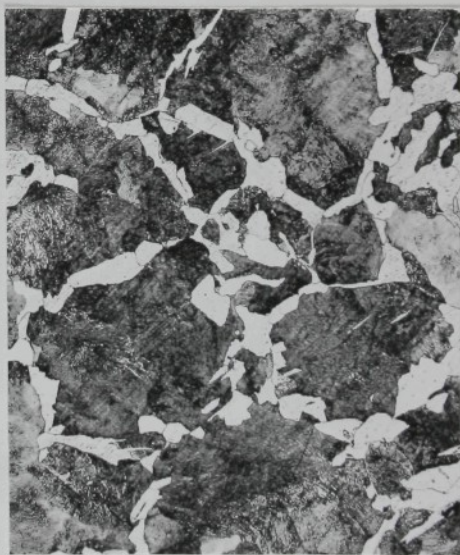
ocel 11 373



ocel 12 050.1



ocel 14 220



ocel 11 600

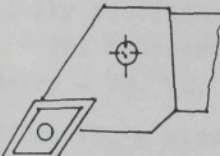
Obr. 12 Struktury vybraných ocelí / zvětšení 250x, Nital 3%

#### 4.1.2 Výběr nástrojových materiálů

Zaměření disertační práce na soustružení kopírovacími nástroji, určilo druhy nástrojových materiálů a nožového držáku. Pro soustružení vnějších ploch jsou často používány základní druhy držáků průřezu 25 x 25 mm s VBD s předliso-  
vaným utvařečem, upnutou za otvor:

- nůž kopírovací stranový ON 220528 s břitovou destičkou DNMM 150408

Přehled základní geometrie vybraného nože a břitové destičky jsou uvedeny v tab. 10.

| Tvar břitu nože                                                                  | Označení držáku a břitové destičky     | $\alpha_r$<br>/°/ | $\epsilon_r$<br>/°/ | $r_\epsilon$<br>/mm/ | $\alpha_o$<br>/°/ | $\beta_o$<br>/°/ | $\lambda_s$<br>/°/ |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------------|------------------|--------------------|
|  | ON 220528                              | 93                | 55                  | 0,8                  | 6                 | -6               | -6                 |
|                                                                                  | DNMM150408<br>S 20 CN                  |                   |                     |                      |                   |                  |                    |
|                                                                                  | S 20                                   |                   |                     |                      |                   |                  |                    |
|                                                                                  | S 20 <sub>B</sub><br>/bez<br>utvařeče/ |                   |                     |                      |                   |                  |                    |

Tab. 10 Vybrané břitové destičky a nožový držák

Byly použity břitové destičky ze slinutého karbidu P20/S20/ s utvařečem i bez utvařeče / břitová destička byla otočena /. Dále byly použity VBD s povlakem <sup>karbo -</sup>nitridu titanu, označené S20 CN. Slinutý karbid S20 je dostatečně otěruvzdorný a dosahuje tvrdosti minimálně 90 HRA při značné houževnatosti /30/. Je vhodný pro soustružení ocelí o pevnosti 500 ÷ 1 200 MPa středními průřezy třísky a vyššími řeznými rychlostmi. Zvláště je doporučován pro polohrubování, kopírování a hlazení soustružením.

#### 4.1.3 Podmínky obrábění a měření opotřebení řezných nástrojů a měření řezných sil

---

Experimentální výzkum opotřebení břitových destiček byl realizován na soustruhu SR 315, s plynulou změnou otáček vřetene. Řezná rychlost byla v průběhu všech experimentů řízena prostřednictvím čítače BM 520.

Řezné podmínky /  $v=200 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $s = 0,25 \text{ mm.ot}^{-1}$ / byly stejné pro všechny experimenty.

Měření složek řezných sil bylo provedeno na soustruhu SU 50. Jednotlivé složky řezných sil byly měřeny třísložkovým tenzometrickým dynamometrem, který byl vyvinut na Katedře obrábění a montáže VŠST v Liberci. Měřicí soupravu dále tvoří tenzometrická aparatura M 1000, která byla doplněna smyčkovým oscilografem LFS.

Na základě předchozího oceňování byly potom hodnoty každé složky odečítány z grafického záznamu.

Při hodnocení opotřebení VBD byly měřeny základní parametry - VB, VC, KT, VN a dále hloubka primární rýhy  $VT_H$ , šířka  $VN_N$  a hloubka  $VT_N$  oxidační rýhy na vedlejší hřbetě VBD.

Kvantifikace základních i zavedených kritérií opotřebení VBD byla zjišťována pomocí dílenského mikroskopu ZEISS.

Morfologie vybraných opotřebovaných VBD byla sledována pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu.

#### 4.1.4 Měření mikrogeometrie, morfologie a strukturních změn povrchu

---

Na všech vzorcích obrobených opotřebovanými i novými VBD byly změřeny jednotlivé charakteristiky mikrogeometrie povrchu drsnoměrem HOMMELTESTER T20-DC. Morfologie povrchů byla u vybraných vzorků sledována na elektronovém mikroskopu BS 300 Tesla Brno. Strukturní změny v povrchových vrstvách i metalografické rozborů základní struktury byly zjištěny pomocí optické mikroskopie.



#### 4.1.5 Měření zbytkových pnutí

K měření zbytkových pnutí byla použita destruktivní metoda, založená na principu elektrolytického odstraňování povrchových vrstev. Tato metoda patří mezi nejpřesnější a zároveň k technicky méně náročným /23/.

Metodika měření včetně odvození vztahů pro výpočet zbytkových pnutí je popsána v literatuře /např. 23, 28, 46 /.

Princip metody spočívá v tom, že z vyšetřované plochy jsou postupně elektrolyticky odebrány vrstvy materiálu konstantními podmínkami. Odstraněním vrstvy dochází k deformaci, ze které je možno stanovit napětí, úměrné této změně rovnováhy vnitřních sil. Přesnost měření je závislá na možnosti odebrání vrstvy konstantní tloušťky po celé sledované ploše, přesnosti deformace, složitosti výpočtu a hlavně na ovlivnění původních zbytkových napětí podmínkami úběru. Známe-li tloušťku odstraněné vrstvy, deformaci vzorku a modul pružnosti materiálu, můžeme na základě klasické teorie pružnosti vypočítat hodnotu pnutí v jedné, popř. v dalších postupně odebíraných vrstvách.

Pro měření zbytkových pnutí bylo použito zařízení, které bylo zkonstruováno ve spolupráci s Katedrou nauky o obrábění ČVUT Praha. Použité zařízení je na obr. 13.

Použitý elektrolyt měl následující složení:

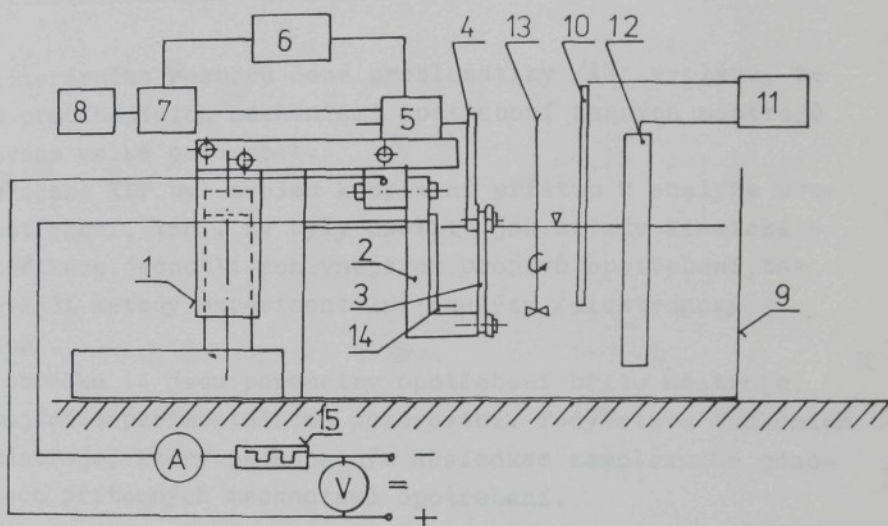
metylalkohol 80%, HCl 5%, HF 5%, H<sub>2</sub>O 10%.

Proudová hustota  $\zeta_I = 0,35 + 0,40 \text{ A/cm}^2$ .

#### 4.1.6 Měření mikrotvrdosti

Pro měření mikrotvrdosti byla použita metoda šikmých řezů /21/. Plochy vytvořené postupným zapichovacím broušením miskovitým kotoučem byly dále leštěny na metalografických papírech. Na takto vzniklých plochách byla mikrotvrdost měřena mikrotvrdoměrem ZWICK 2312 s grafickým záznamem. Zatěžující síla  $F = 2 \text{ N}$ .





- |                                               |                           |
|-----------------------------------------------|---------------------------|
| 1 - stojan                                    | 8 - registrační přístroj  |
| 2 - upínací třmen                             | 9 - nádoba s elektrolytem |
| 3 - zkušební vzorek                           | 10 - kontaktní teploměr   |
| 4 - měřicí třmen                              | 11 - aut. spínací relé    |
| 5 - indukční snímač                           | 12 - topné tělísko        |
| 6 - napájecí obvody                           | 13 - míchadlo             |
| 7 - obvod pro el. nastavení<br>polohy snímače | 14 - katoda               |
|                                               | 15 - variátor             |

Obr. 13 Schema zařízení na měření zbytkových pnutí

## 5. Výsledky KDP s uvedením nových poznatků

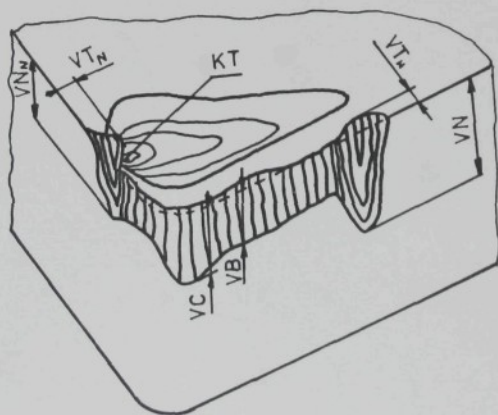
### 5.1 Opotřebení řezných nástrojů

Z literárního rozboru dané problematiky /47/ vyplývá, že výzkumu probíhajících mechanismů opotřebení řezných nástrojů je věnována velká pozornost.

V předkládané KDP byl zvolen komplexní přístup k analýze procesu opotřebení, tzn., že byly použity jak metody klasické -  
- kvantifikace jednotlivých vnějších projevů opotřebení, tak i nejnovější metody experimentální analýzy /elektronový mikroskop/.

Na obrázku 14 jsou parametry opotřebení břitu nástroje, odpovídající experimentálnímu pozorování. Tedy stavu funkčních ploch nástroje, který je konečným důsledkem komplexního působení všech přítomných mechanismů opotřebení.

Kvantifikace jednotlivých kritérií, téměř výhradně se používá VB a KT, nepostihuje skutečný stav řezného nástroje ve vztahu plnit požadovanou funkci, tj. vytváření nového povrchu v požadované kvalitě.



Obr. 14 Parametry opotřebení břitu kopírovací břitové destičky DNMM 150408

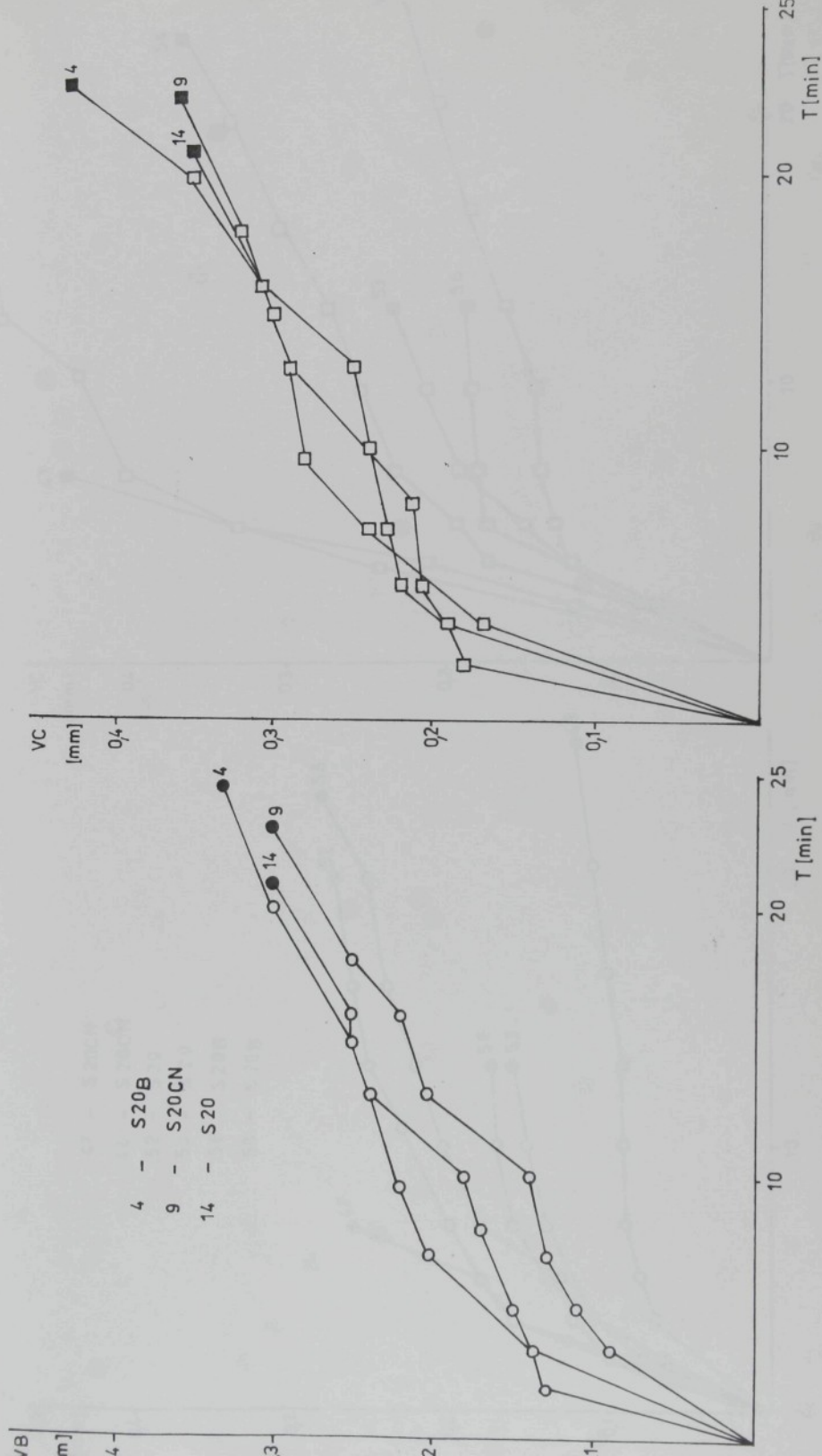
Houdek/15. 16/ upozorňuje, že způsob, kterým řeší otázku kritéria norma ISO 3685, přináší značné problémy při hodnocení VBD ze slinutých karbidů s předlisovanými utvařeči. Neboť kritéria uváděná v této normě nezajišťují skutečnost, že před dosažením čelního nebo hřbetního kritéria je zhoršena kvalita povrchu tím, že převládajícím opotřebením je vznik např. sekundární oxidační rýhy.

V další části předkládané práce jsou uvedeny některé výsledky experimentů a jejich hodnocení.

Vedle časových závislostí průběhu opotřebení jsou také uvedeny fotografie z výzkumu morfologie opotřebení VBD.

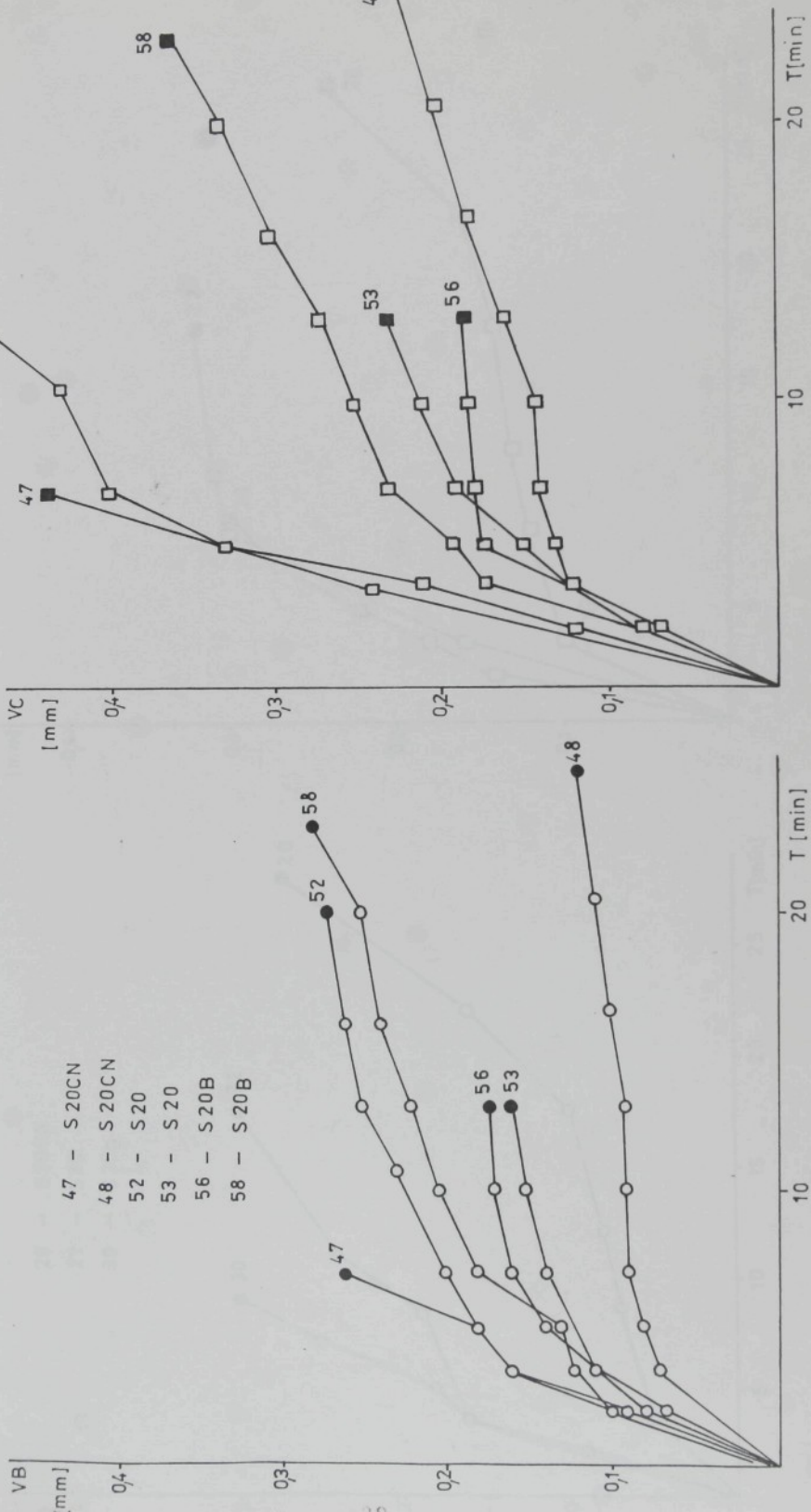
V příloze této práce jsou pak uvedeny všechny parametry opotřebení uvedené na obrázku 14 pro jednotlivé VBD.

Obř. 15 Časová závislost průběhu opotřebení VB a VC pro jednotlivé VBD, obráběný materiál 12050.1

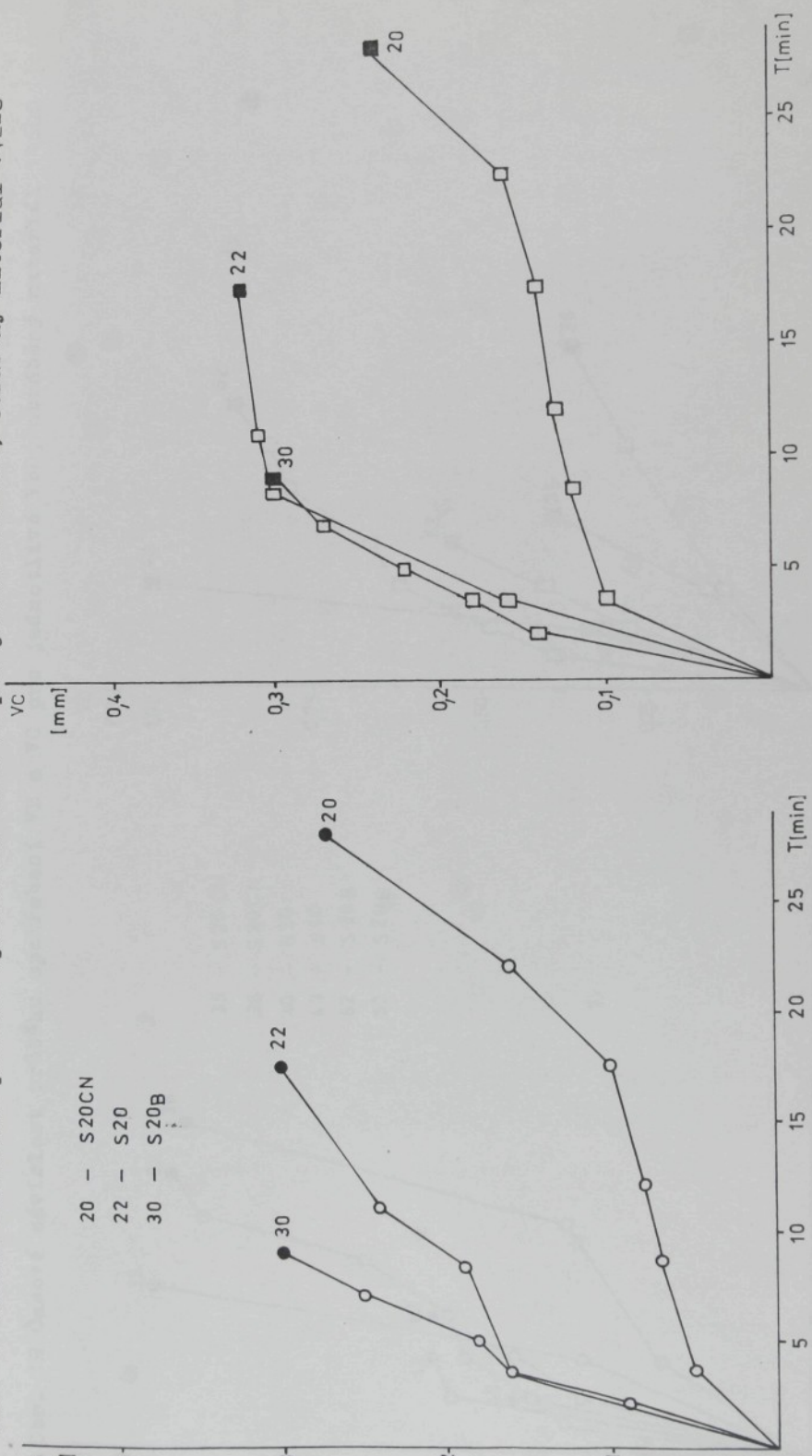




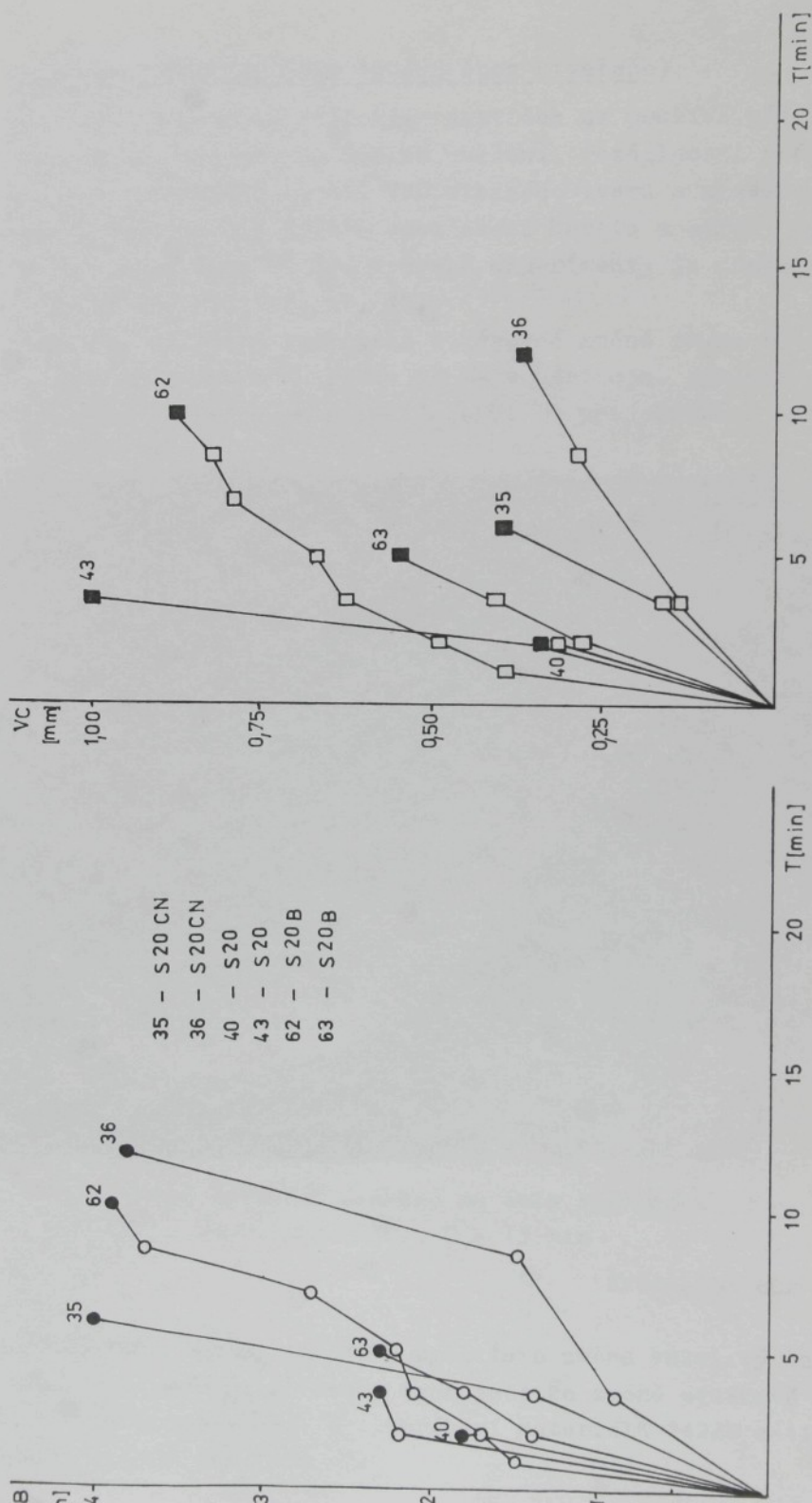
47 - S 20CN  
48 - S 20CN  
52 - S 20  
53 - S 20  
56 - S 20B  
58 - S 20B



Obr. 17 Časová závislost průběhu opotřebení VB a VC pro jednotlivé VBD, obráběný materiál 14220



Obr. 18 Časová závislost průběhu opotřebení VB a VC pro jednotlivé VBD, obráběný materiál 11600



Opotřebení VBD S20 DNMM 150408 (bez utvařeče)

Přestože tento druh břitových destiček se používá při obrábění litiny, byl zkoumán za účelem ověření, rozdílnosti vnějších projevů opotřebení oproti VBD stejného tvaru s předlisovaným utvařečem. Časový průběh opotřebení hřbetu a špičky podle naměřených hodnot VB a VC pro vybrané experimenty je uveden v diagramech na obr. 15, 16, 17, 18.

V průběhu obrábění docházelo k výrazné změně druhu třísek, což lze vysvětlit vznikem žlábků na čele nástroje. Výrazný tvar žlábků na čele nástroje je patrný z obr. 19 při obrábění materiálů 11373.



Obr. 19 Opotřebení výrazným žlábkem na čele nástroje.

Vzorek č. 56, 11373, S20<sub>B</sub>, T = 13 min

Zvětšeno: 60x

U materiálů 12050.1 a 11373 byla tato změna velmi výrazná a po 1 + 2 minutách soustružení docházelo ke změně stužkové třísky v třísku elementní. Při obrábění materiálů 14220 a 11600 tyto změny nebyly tak výrazné.



Největší hloubka žlábků KT byla naměřena v bezprostřední blízkosti vedlejší řezné hrany.

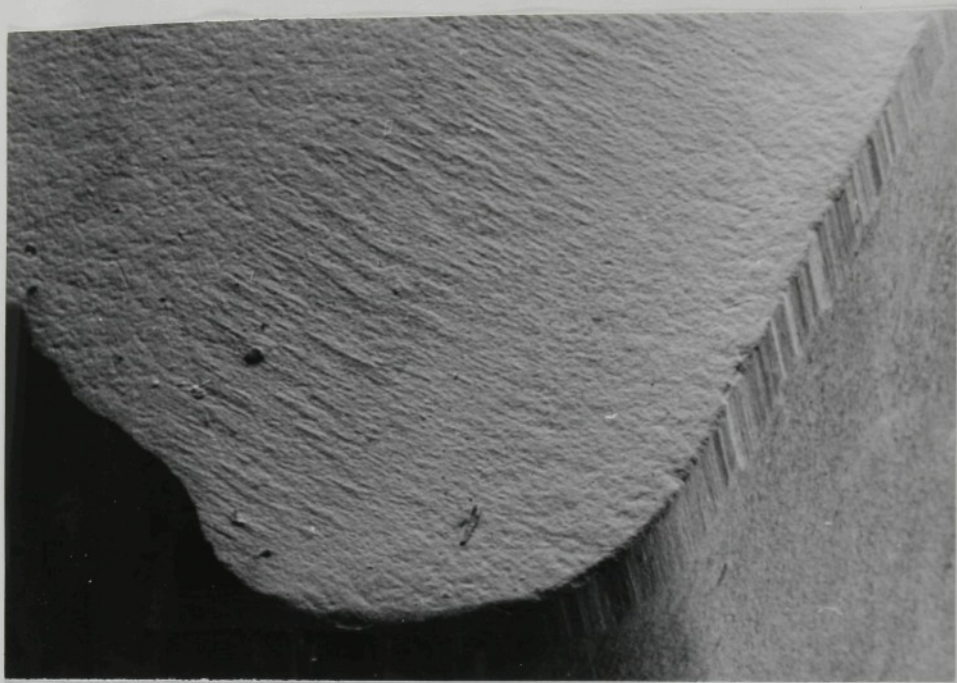
Opotřebení hlavního hřbetu bylo rovnoměrné bez stop mikrolomu. Dále je z obr. 19 patrný náznak oxidační rýhy na vedlejším hřbetě. Z obr. 20 je vidět fazetku na hlavním břitu, která byla zřejmě způsobena adhezním mechanismem jako důsledek postupného zeslabování průřezu břitu při zvyšování úhlu čela vlivem výmolu na čele.



Obr. 20 Fazetka na hlavním břitu

Vzorek č. 56, 11373, S20<sub>B</sub>, T = 13 min

Zvětšeno: 190 x



Obr. 21 Lom na vedlejším břitu, opotřebení hřbetu  
Vzorek č. 30, 14220, S20<sub>B</sub>, T = 9 min

zvětšeno: 69 x



Obr. 22 Katastrofální opotřebení  
Vzorek č. 62, 11600, S20<sub>B</sub>, T = 12 min

zvětšeno: 61 x

Z obr. 21 je patrné, že opotřebení čelní plochy je velmi nepatrné, hřbetní opotřebení je rovnoměrné. Při obrábění vznikala plynulá tříska. Charakteristickým opotřebením je lom na vedlejším hřbetu.

Na obr. 22 je vidět poškození katastrofálním opotřebením, výsledkem je ztráta funkčních vlastností břitu.

#### Opotřebení VBD S20 DNMM 150408

Při výzkumu opotřebení těchto břitových destiček je velmi obtížné měření hloubky žlábků na čele nástroje, vlivem předlišovaného utvařeče. Časový průběh opotřebení hřbetu a špičky podle naměřených hodnot VB a VC pro vybrané VBD je uveden v diagramech na obr. 15, 16, 17, 18.



Obr. 23 Výrazná primární rýha.

Vzorek č. 52, 11373, S20, T = 20 min

Zvětšeno: 44 x

Z obr. 23 je patrný tvar žlábků na čele nástroje. Největší hloubka žlábků na čele nástroje byla změřena v bezprostřední blízkosti vedlejšího hřbetu. Velmi výrazná je primární rýha. Z charakteru vzhledu lze jednoznačně přisoudit mechanismus ved-

lejšího hřbetu i špičky nástroje je charakterizováno výraznými rýhami. Tyto rýhy jsou zřejmě způsobené heterogenitou obráběného materiálu a nekompaktním stavem VBD. Z obr. 23 je zřetelně vidět vliv těchto rýh na vydrolování špičky VBD.

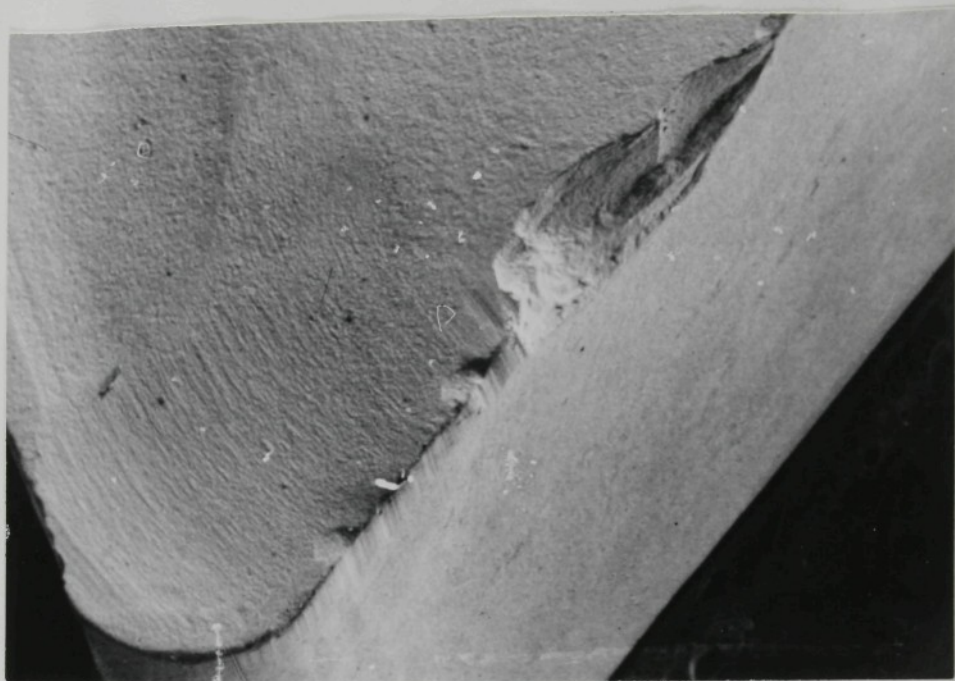


Obr. 24 Vliv rýh na špičce VBD.

Vzorek č. 52, 11373, S20, T = 20 min

Zvětšeno: 108 x

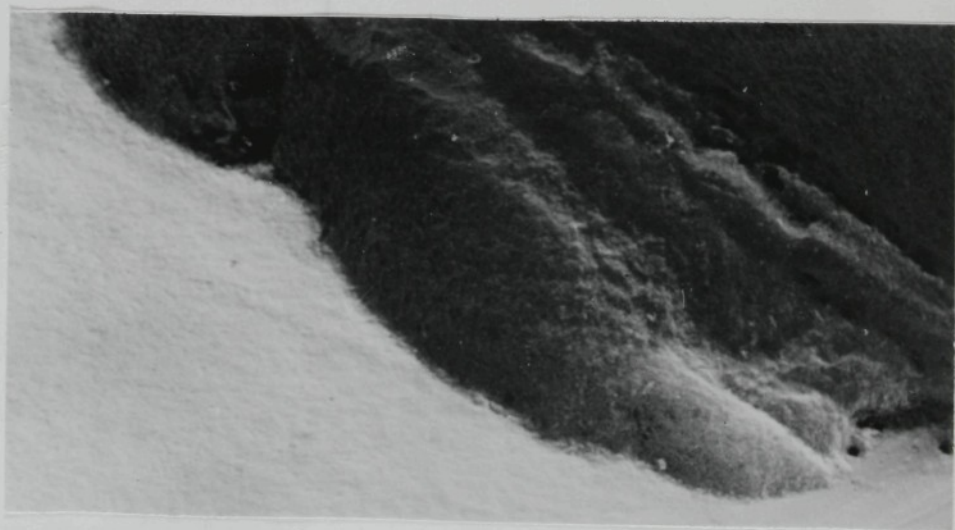




Obr. 25 Primární rýha ve formě makrolomu.

Vzorek č. 22, 14220, S20, T = 17,5 min

Zvětšeno: 36 x



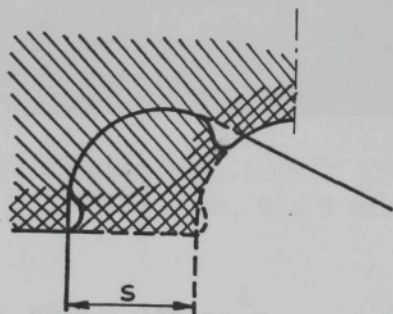
Obr. 26 Koncentrované opotřebení na vedlejším břitu.

Vzorek č. 22, 14220, S20, T = 17,5 min

Zvětšeno: 126 x

Při obrábění materiálu 14220 docházelo u všech druhů VBD k výrazné tvorbě primární rýhy, která je v tomto případě vytvořená makrolomem - obr. 25.

Obrábění materiálu 14220 bylo doprovázeno vytlačením obráběného materiálu ve směru posuvu ve formě nákrůžků, jako důsledek deformace materiálu (kap. 2.1.1). Periodická tvorba a zánik těchto nákrůžků působilo dynamickým účinkem na hlavní hřbet, čímž došlo ke vzniku výrazné primární rýhy. Na vedlejší hřbetu byly zjištěny pravidelné drážky, které jsou vytvořeny koncentrovaným opotřebením, tyto drážky jsou zřetelnější z obr. 26. Mechanismus koncentrovaného opotřebení studovala řada autorů /5, 8, 38/. Na vedlejší břit nástroje vzniká koncentrovaný otěr v místě rozhraní mezi neobrobenou a obrobenou plochou, který se projevuje vytvořením jedné nebo více drážek. Na obr. 27 je schema vzniku koncentrovaného opotřebení.



Obr. 27 Koncentrované opotřebení /8/.

Buda a kol. /5/ vysvětlují vznik těchto žlábků pomocí následujících mechanismů:

- zvýšením tvrdosti materiálu na obrobené ploše v důsledku zpevnění se zvyšuje abrazivní účinek na vedlejší hřbet,
- protrhnutí žlábků na čele směrem k vedlejší řezné hraně,
- vliv mechanismu oxidace,
- zvětšení výšky stop po břitu nástroje v důsledku vytlačování kovu v procesu tvoření třísky.

Smirnov /38/ uvádí, že přes odlišný charakter opotřebení se na vzniku drážek podílejí všechny základní mechanismy opotřebení.

Katastrofální opotřebení jako ztráta funkčních vlastností VBD při obrábění oceli 11600 je vidět na obr. 28.



Obr. 28 Katastrofální opotřebení.

Vzorek č. 43, 11600, S20, T = 5 min

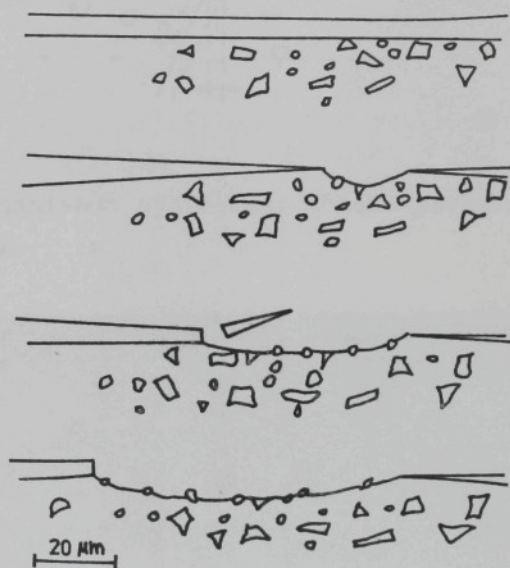
Zvětšeno: 65 x

#### Opotřebení VBD S20 DNMM 150408

Jedním ze současných trendů zvyšování stability řezného procesu v oblasti aplikace řezných nástrojů ze slinutých karbidů, jsou depozice kovových povlaků. Nejrozšířenější jsou povlaky TiN, TiC a  $Al_2O_3$  a jejich kombinace. Vedle nižší intenzity opotřebení než u nepovlakovaných SK se řada autorů shoduje v tom že lepší vlastnosti povlakovaných SK zůstávají zachovány i po porušení povlaku a odkrytí podkladového materiálu, a to jak na hřbetě tak i na čele nástroje. Byli to např. Trent, Chubb, Dearnley, Humár a další. U hřbetu je tato skutečnost vysvětlována tím, že podklad má dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, které zde převládá /11/. Setrvávající zvýšená odolnost čela nástroje proti opotřebení je vysvětlována tím, že částice povlaku jsou přenášeny z neporušených

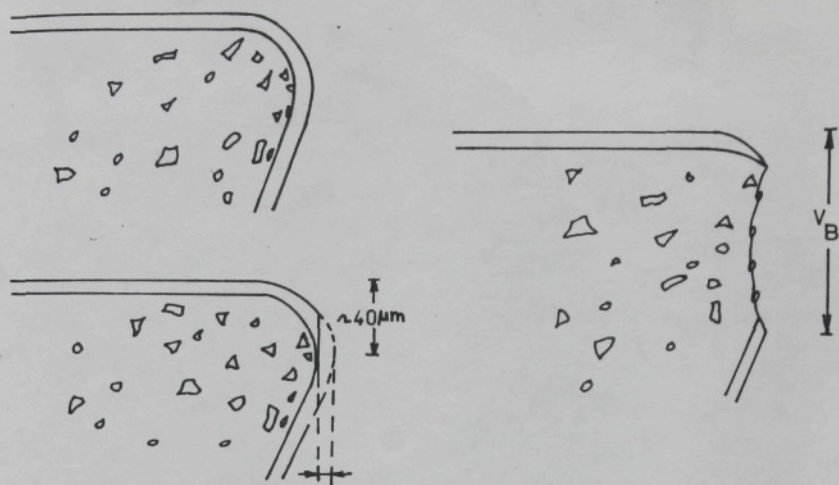
míst do výmolu, kde vytvářejí bariéru, i když je zde původní povlak odstraněn. Mechanismus opotřebení hřbetní a čelní plochy je znázorněn na obr. 29 a 30. Časový průběh opotřebení hřbetu a špičky podle naměřených hodnot VB a VC pro vybrané VBD je uveden v diagramech na obr. 15, 16, 17 a 18. Dále jsou uvedeny fotografie některých opotřebovaných VBD, které charakterizují soubor provedených experimentů.

Na obr. 31 je opotřebovaná břitová destička při obrábění oceli 11373. Na čelní ploše VBD je velmi dobře patrné místo, kde dochází nejdříve k odstranění povlaku účinkem odcházející třísky.

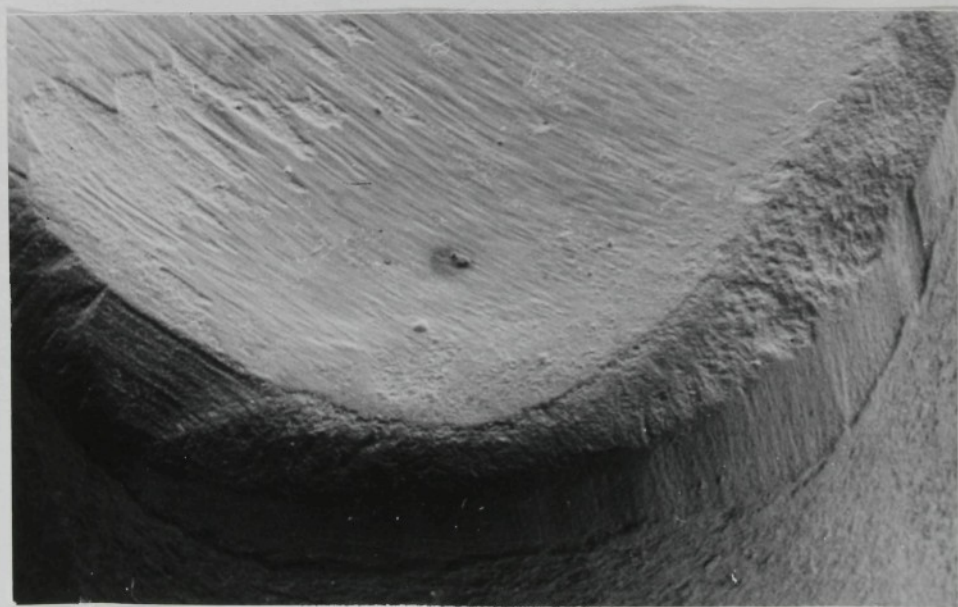


Obr. 29 Mechanismus opotřebení čela povlakovaného nástroje /11/





Obr. 30 Mechanismus opotřebení hřbetu povlakovaného nástroje  
/11/.



Obr. 31 Opotřebení špičky nástroje, počátek odstranění povlaku  
na čele.

Vzorek č. 47, 11373, S20CN, T = 7 min      Zvětšeno: 120 x



Obr. 32 Čelo povlakované VBD.

Vzorek č. 36, 11600, S20CN, T = 12 min

Zvětšeno: 90 x

Na hřbetu i špičce nástroje jsou zřetelné dva stupně opotřebení. Vedle odstranění povlaku je zde i výrazné poškození základového materiálu. Vydrolení základového SK je patrně ovlivněno technologií výroby VBD resp. nekompaktností nástrojového materiálu. Na obr. 32 je vidět opotřebení čela nástroje, které je propojeno rýhou na vedlejší hřbetu. Tento vnější projev opotřebení je výsledkem současného působení třech mechanismů:

- fyzikálním účinkem odcházející třísky na čelo nástroje, vznikem výmolu s největší hloubkou u vedlejšího břitu,
- abrazivním účinkem zpevněné obrobené plochy na povrch vedlejšího hřbetu,
- mechanismem oxidace na vedlejší hřbet.



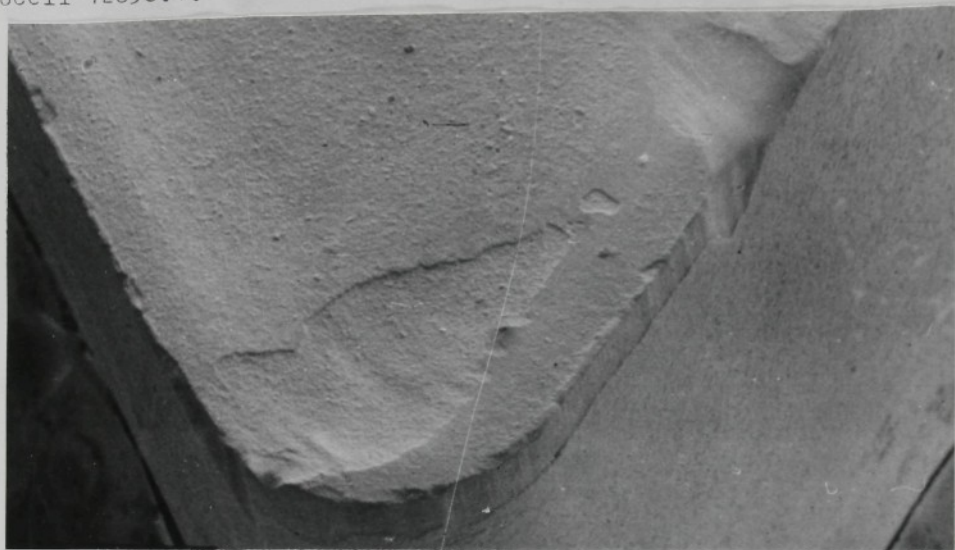
Obr. 33 Čelo povlakované VBD.

Vzorek č. 36, 11600, S20CN, T = 12 min

Zvětšeno: 116 x



Obdobné vnější projevy opotřebení jsou patrné z obrábění oceli 12050.1.



Obr. 34 Čelo povlakované VBD, výrazná primární rýha.

Vzorek č. 36, 12050.1, S20CN, T = 23 min

Zvětšeno: 41 x

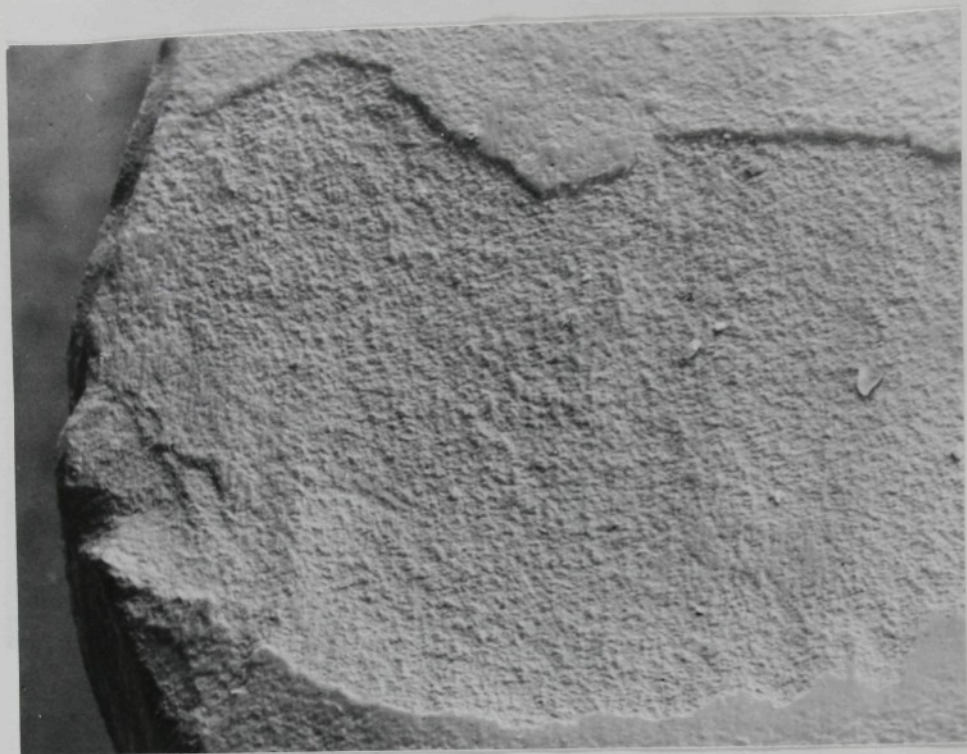


Obr. 35 Čelo povlakované VBD.

Zvětšeno: 108 x

Vzorek č. 9, 12050.1. S20CN, T = 23 min





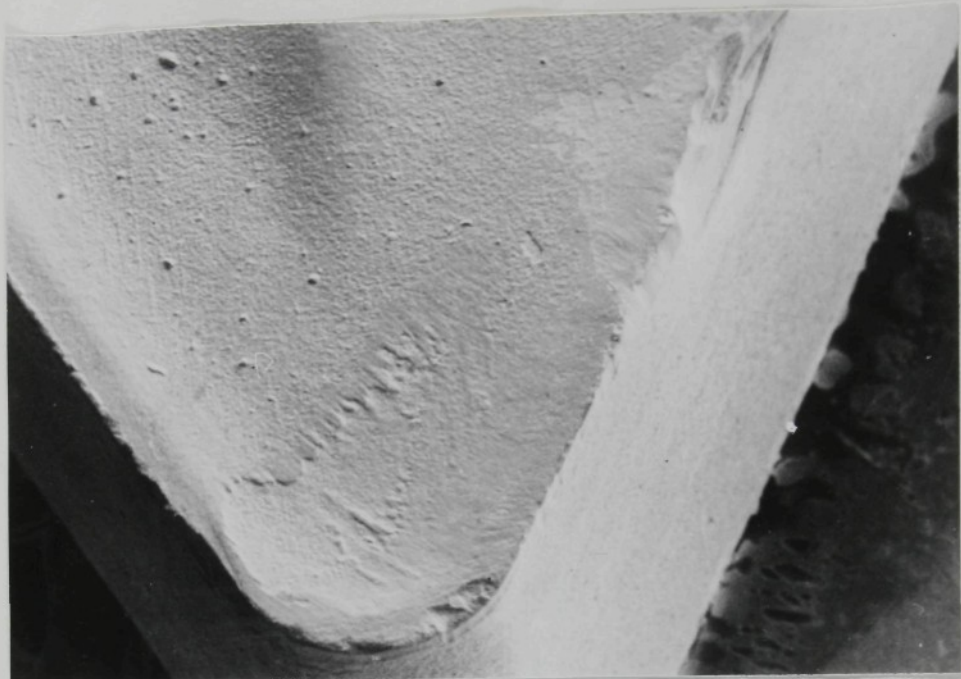
Obr. 36 Čelo, vedlejší břit opotřeбенé povlakované VBD.

Vzorek č. 9, 12050.1, S20CN, T = 23 min

Zvětšeno: 190 x

Při obrábění materiálu 14220 je velmi zřetelná přímá rýha s přilehlou oblastí. Dále je z obr. 37, 38, 39 zřejmé, že mechanismus mikrolomů je velmi intenzivní.

Z obr. 39 je jasně vidět výrazná orientace částice povlaku ve směru odcházející třísky.



Zvětšeno: 36 x

Obr. 37 Celkový pohled opotřebeného břitu.

Vzorek č. 20, 14220, S20CN, T = 28 min



Obr. 38 Čelo a špička opotřeбенé povlakované VBD.

Vzorek č. 20, 14220, S20CN, T = 28 min

Zvětšeno: 93 x



Obr. 39 Čelo a špička opotřeбенé VBD.

Vzorek č. 20, 14220, S20CN, T = 28 min

Zvětšeno: 137 x



Z uvedených experimentálních výsledků vyplývá, že na celkovém opotřebení vybraných druhů VBD ze slinutých karbidů, se podílejí všechny charakteristické projevy opotřebení uváděné pro nástroje ze slinutých karbidů, přičemž podíl jednotlivých parametrů je značně odlišný.

Velikost opotřebení hřbetu bylo závislé na jednotlivých kombinacích nástrojového a obráběného materiálu. Opotřebení čela VBD bylo velmi výrazné u nástrojů bez utvařeče. Tvar žlábků, který je patrný např. z obr. 33, 34, 35, byl u všech VBD obdobný. Největší hloubka žlábků byla zjištěna na vedlejším břitě. Pro všechny druhy zkoušených VBD bylo charakteristické opotřebení účinkem křehkého lomu.

Makrolom byl patrný především v oblasti primární rýhy a to hlavně při obrábění materiálu 14220. Dalším projevem křehkého lomu byl vznik fazetky na břitě nástroje jako důsledek adhezního mechanismu. Mikrolomy výrazně zhoršovaly kvalitu břitů aniž by přesáhly šířku opotřebení hřbetní plochy VB nebo špičky VC (obr. 38, 39).

Opotřebení VBD na vedlejším břitě je na celkovém projevu opotřebení významné. Prolomení této rýhy se žlábkem na čele nástroje výrazně ovlivňuje kvalitu vytvářeného povrchu.

## 5.2 Řezné síly a opotřebení řezného nástroje

V kontextu s metodikou experimentální části KDP jsou v této kapitole uvedeny některé souvislosti a výsledky experimentů mezi opotřebením VBD a řeznými silami při soustružení.

Jednou ze základních úloh automatizace je zvýšení přesnosti, spolehlivosti a stability technologických procesů. Vzájemná souvislost mezi opotřebením VBD a složkami řezných sil je v procesu automatizace obráběcích procesů používána k monitorizaci stavu ŘN prostřednictvím různě konstruovaných dynamometrů nebo piezoelektrických siloměrných prvků.

Problémem při tomto způsobu monitorizace stavu řezných nástrojů je zjišťování mezních hodnot řezných sil ve vztahu k opotřebení, a především ve vztahu k požadované kvalitě povrchu či nevhodných tvarů třísek, které mohou vzniknout následkem opotřebení.

Negativní geometrie čela kopírovacích VBD je odůvodněna přede-

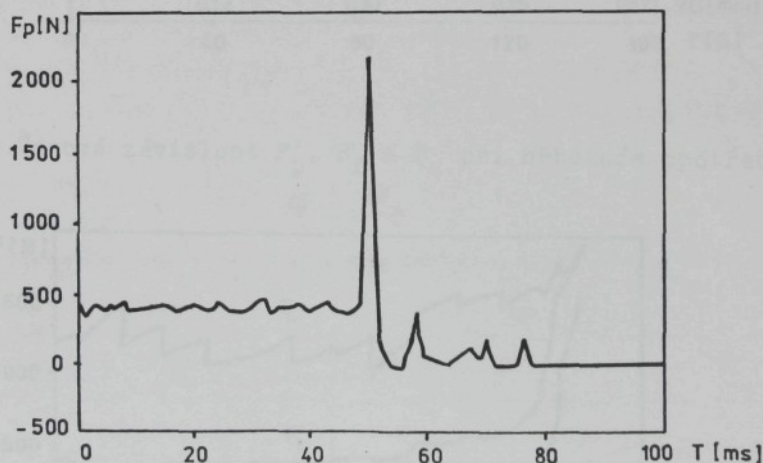
vším proměnnou hloubkou řezu, malým úhlem špičky i vysokými řeznými podmínkami, v kterých kopírovací soustružení probíhá. Tato negativní geometrie způsobuje, že hodnoty posuvové složky jsou v některých případech vyšší než hlavní složky řezné síly.

Z hlediska vnějšího projevu opotřebení břitu VBD zřejmě všechny změny vzniklé opotřebením mají vliv na změnu v řezných silách. Z uvedeného je účelné rozdělit opotřebení VBD do dvou skupin:

1/ náhlé opotřebení

2/ opotřebení postupné.

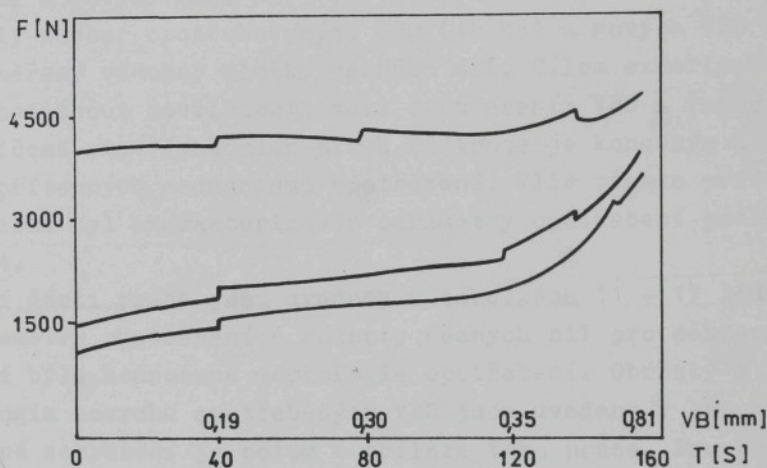
Při náhlém opotřebení, máme na mysli makrolom při kterém dochází k výraznému zvýšení všech složek řezných sil. Tato skutečnost je způsobena tím, že dochází k uváznutí hrotu poškozeného nástroje mezi obrobkem. Po následném uvolnění ( $2 + 3 \text{ ms}$ ) této části VBD, složka  $F_p$  poklesne na nulovou hodnotu vlivem mezery mezi nástrojem a obrobkem, /35/. Uvedený průběh je znázorněn na obr. 40.



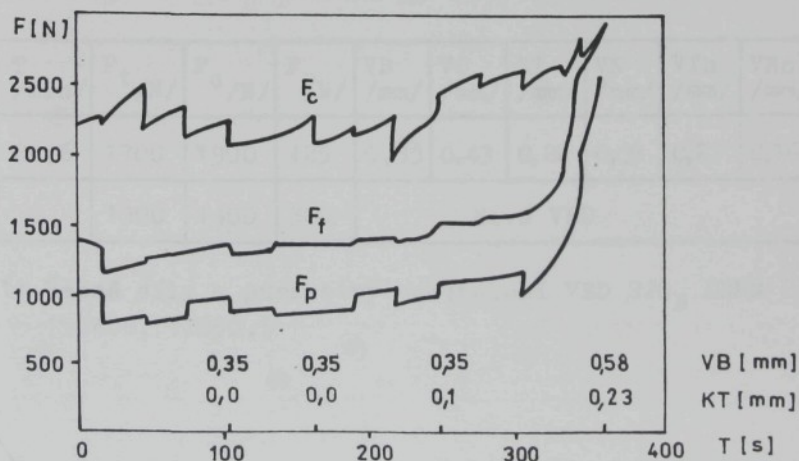
Obr. 40 Časová závislost  $F_p$  při opotřebení křehkým lomem /35/.

V případě postupného opotřebení je situace značně komplikovaná. Při opotřebení hřbetní plochy VBD dochází ke zvyšování složek řezné síly, ale na druhé straně se opotřebením čelní plochy zvětšuje úhel čela což má za následek snižování těchto

složek /34, 35, 39/. Uvedené závislosti jsou znázorněny na obr. 41 a 42. Z obrázků je patrný vliv jednotlivých parametrů opotřebení VBD na všechny složky řezných sil. Řada autorů např. Powell, Tlustý, Uehara a další se shodují v tom, že opotřebení ŘN nejvíce ovlivňuje především řeznou složku posuvovou a přísmuvovou.



Obr. 41 Časová závislost  $F_p$ ,  $F_f$  a  $F_c$  při hřbetním opotřebení/35/



Obr. 42 časová závislost  $F_p$ ,  $F_f$ ,  $F_c$  při opotřebení hřbetuačela /35/



Z obr. 41 je zřejmé, že  $F_f$  a  $F_p$  postupně s opotřebením hřbetu narůstají, zatímco hlavní složka řezné síly  $F_c$  zůstává relativně konstantní. Na obr. 42 je znázorněn i účinek opotřebení výmolem na čele nástroje, což má za následek potlačení růstu posuvové i přísuvové složky řezné síly.

Podle metodiky uvedené v kapitole 4.1 byly v předkládané práci měřeny jednotlivé složky řezných sil při soustružení, opotřebovanými a novými VBD.

Pro celý soubor opotřebovaných VBD (48 ks) a nových VBD (12 ks) byly změřeny všechny složky řezných sil. Cílem experimentů tedy bylo postihnout souvislosti mezi opotřebením VBD a řeznými silami, přičemž stav funkčních ploch nástroje je konečným důsledkem všech přítomných mechanismů opotřebení. Vliv těchto přítomných mechanismů byl charakterizován parametry opotřebení podle obr. 14.

V další části práce jsou uvedeny v tabulkách 11 - 17 jednotlivé parametry opotřebení a hodnoty řezných sil pro některé VBD u nichž byla hodnocena morfologie opotřebení. Obrázky z této morfologie povrchu opotřebovaných VBD jsou uvedeny v kap. 5.1, souhrnné zobrazení je potom v příloze této práce. Pro přehled o naměřených hodnotách řezných sil je v tabulkách 18 - 20 uveden rozsah naměřených hodnot pro všechny kombinace VBD a obráběných materiálů. Parametry opotřebení jednotlivých VBD jsou souhrnně uvedeny v příloze této práce.

| č.v. | T<br>/min/ | $F_t$<br>/N/ | $F_c$<br>/N/ | $F_p$<br>/N/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTn<br>/mm/ |
|------|------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 4    | 24,6       | 1700         | 1900         | 425          | 0,33       | 0,43       | 0,22       | 0,33       | 0,27        | 0,16        | 0,10        |
| 0    | 0          | 1300         | 1400         | 380          | Nová VBD   |            |            |            |             |             |             |

Tab. 11 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20<sub>B</sub> DNMM  
150408, 12050.1



| č.v. | T<br>/min/ | F <sub>f</sub><br>/N/ | F <sub>c</sub><br>/N/ | F <sub>p</sub><br>/N/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTn<br>/mm/ |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 14   | 21         | 1220                  | 1200                  | 3700                  | 0,30       | 0,35       | 0,01       | 0,30       | 0,11        | 0,14        | 0,11        |
| 10   | 0          | 1180                  | 1200                  | 350                   | Nová VBD   |            |            |            |             |             |             |

Tab. 12 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20 DNMM  
150408, 12050.1

| č.v. | T<br>/min/ | F <sub>f</sub><br>/N/ | F <sub>c</sub><br>/N/ | F <sub>p</sub><br>/N/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 48   | 29         | 1200                  | 1200                  | 290                   | 0,13       | 0,23       | 0          | 0,51       | 0,45        | 0,15        | 0,04        |
| 44   | 0          | 1120                  | 1200                  | 300                   | Nová VBD   |            |            |            |             |             |             |

Tab. 13 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20CN DNMM  
150408, 11373

| č.v. | T<br>/min/ | F <sub>f</sub><br>/N/ | F <sub>c</sub><br>/N/ | F <sub>p</sub><br>/N/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 56   | 13         | 1530                  | 1400                  | 350                   | 0,17       | 0,18       | 0,06       | 0,17       | 0,02        | 0,08        | 0,06        |
| 54   | 0          | 1680                  | 2000                  | 230                   | Nová VBD   |            |            |            |             |             |             |

Tab. 14 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20<sub>B</sub> DNMM  
150408, 11373

| č.v. | T<br>/min/ | F <sub>f</sub><br>/N/ | F <sub>c</sub><br>/N/ | F <sub>p</sub><br>/N/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ |
|------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 30   | 9          | 1560                  | 1530                  | 410                   | 0,30       | 0,30       | 0,02       | 0,30       | 0,01        | 0,06        | 0,08        |
| 26   | 0          | 1300                  | 1350                  | 360                   | Nová VBD   |            |            |            |             |             |             |

Tab. 15 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20<sub>B</sub> DNMM 150408,  
14220

| č.v. | T<br>/min/ | $F_f$<br>/N/ | $F_c$<br>/N/ | $F_p$<br>/N/ | VB<br>/mm/               | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTn<br>/mm/ |
|------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 62   | 12         | 2600         | 4600         | 500          | Katastrofální opotřebení |            |            |            |             |             |             |
| 59   | 0          | 1250         | 1570         | 380          | Nová VBD                 |            |            |            |             |             |             |

Tab. 16 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20<sub>B</sub> DNMM 150408,  
11600

| č.v. | T<br>/min/ | $F_f$<br>/N/ | $F_c$<br>/N/ | $F_p$<br>/N/ | VB<br>/mm/               | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | VN<br>/mm/ | VTh<br>/mm/ | VNn<br>/mm/ | VTn<br>/mm/ |
|------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 43   | 5          | 2050         | 1660         | 690          | Katastrofální opotřebení |            |            |            |             |             |             |
| 38   | 0          | 1300         | 1420         | 390          | Nová VBD                 |            |            |            |             |             |             |

Tab. 17 Řezné síly a parametry opotřebení VBD S20 DNMM 150408,  
11600

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| Řezná síla | S20 <sub>B</sub> - 12050.1 |
| $F_c$ /N/  | 1400 - 1900                |
| $F_f$ /N/  | 1300 - 1700                |
| $F_p$ /N/  | 380 - 425                  |

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| Řezná síla | S20 <sub>B</sub> - 14220 |
| $F_c$ /N/  | 1020 - 1530              |
| $F_f$ /N/  | 1300 - 1560              |
| $F_p$ /N/  | 360 - 410                |

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| Řezná síla | S20 <sub>B</sub> - 11600 |
| $F_c$ /N/  | 1570 - 4600              |
| $F_f$ /N/  | 1250 - 2600              |
| $F_p$ /N/  | 380 - 500                |

|            |                          |
|------------|--------------------------|
| Řezná síla | S20 <sub>B</sub> - 11373 |
| $F_c$ /N/  | 230 - 370                |
| $F_f$ /N/  | 1190 - 1680              |
| $F_p$ /N/  | 230 - 370                |

Tab. 18 Rozsah jednotlivých složek řezných sil

|            |               |
|------------|---------------|
| Řezná síla | S20 - 12050.1 |
| $F_c$ /N/  | 1020 - 1390   |
| $F_f$ /N/  | 960 - 1220    |
| $F_p$ /N/  | 340 - 370     |

|            |             |
|------------|-------------|
| Řezná síla | S20 - 14220 |
| $F_c$ /N/  | 1020 - 1520 |
| $F_f$ /N/  | 1300 - 1580 |
| $F_p$ /N/  | 320 - 380   |

|            |             |
|------------|-------------|
| Řezná síla | S20 - 11600 |
| $F_c$ /N/  | 1420 - 1660 |
| $F_f$ /N/  | 1300 - 2050 |
| $F_p$ /N/  | 390 - 690   |

|            |             |
|------------|-------------|
| Řezná síla | S20 - 11373 |
| $F_c$ /N/  | 1300 - 1410 |
| $F_f$ /N/  | 1300 - 1650 |
| $F_p$ /N/  | 230 - 380   |

Tab. 19 Rozsah jednotlivých složek řezných sil

|            |                 |
|------------|-----------------|
| Řezná síla | S20CN - 12050.1 |
| $F_c$ /N/  | 880 - 1480      |
| $F_f$ /N/  | 850 - 1110      |
| $F_p$ /N/  | 320 - 380       |

|            |               |
|------------|---------------|
| Řezná síla | S20CN - 14220 |
| $F_c$ /N/  | 1020 - 1350   |
| $F_f$ /N/  | 1180 - 1330   |
| $F_p$ /N/  | 330 - 500     |

|            |               |
|------------|---------------|
| Řezná síla | S20CN - 11600 |
| $F_c$ /N/  | 1300 - 2000   |
| $F_f$ /N/  | 1180 - 1350   |
| $F_p$ /N/  | 280 - 400     |

|            |               |
|------------|---------------|
| Řezná síla | S20CN - 11373 |
| $F_c$ /N/  | 1150 - 1350   |
| $F_f$ /N/  | 1040 - 1480   |
| $F_p$ /N/  | 290 - 330     |

Tab. 20 Rozsah jednotlivých složek řezných sil



Poznátky z měření lze formulovat následovně:

- Z celkového charakteru naměřených hodnot vyplývá, že posuvové složky řezných sil dosahují relativně vysokých hodnot oproti hodnotám hlavních řezných sil. Tato skutečnost je způsobena negativní geometrií čela nástroje.
- Závislost mezi opotřebením VBD a řeznými silami určují vedle dominantního vnějšího projevu opotřebení, mechanické vlastnosti obráběného materiálu (11373,  $R_m = 382 \text{ MPa}$ ). Při vzniku stužkové třísky (dlouhé) byly naměřeny nižší hodnoty řezných sil (posuvových složek) než při vzniku vlnité šroubovitě třísky.
- Při postupném opotřebení a menších hodnotách opotřebení  $VB \sim 0,2 \text{ mm}$  nebyly zjištěny výraznější změny v nárůstu hodnot řezných sil.
- Výrazné zvýšení řezných sil bylo zjištěno při obrábění VBD (č. vzorku 62), kde  $VB = 0,55 \text{ mm}$  a  $VC = 1,44 \text{ mm}$ , v druhém případě to bylo u VBD kde bylo zjištěno katastrofální opotřebení (vzorek č. 43).
- Vznik mikrolomů v šířce opotřebené hřbetní fazetky VBD byl doprovázen zvýšením především  $F_f$ .
- Při vzniku výraznějšího opotřebení špičky nástroje VC byly naměřeny přírůstky v přísmových složkách řezných sil.

5.3 Vliv opotřebení řezných nástrojů při soustružení na vybrané charakteristiky kvality povrchu.

#### 5.3.1 Mikrogeometrie povrchu

Jednotlivé parametry mikrogeometrie soustružených povrchů novými i opotřebovanými VBD, byly měřeny na zařízení HOMMEL TESTER. Celkem byla změřena mikrogeometrie 60-ti vzorků, 12 vzorků bylo obrobena novými VBD a 48 vzorků s různým opotřebením (podle metodiky měření v kap. 4.1).

U všech vzorků byly zjišťovány následující parametry mikrogeometrie:

$R_T$ ,  $R_{\max}$ ,  $R_{ZD}$ ,  $R_{ZI}$ ,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_{PM}$ ,  $R_q$ ,  $R_{3Z}$ ,  $R_{3ZM}$ ,  $P_t$ ,  $w_t$  a  $N_R$ .  
Dále byla určena nosná část mikropofilu a rozdělení četností prohlubní a vrcholů. Definiční vztahy a znázornění jednotlivých parametrů je uvedeno v tabulkách 2 - 6 na straně 11 - 15.  
Z naměřeného souboru údajů jsou v této práci uvedeny pouze



některé. Ze souboru naměřených hodnot vyplývá, že změna tvaru břitu vlivem opotřebení jednoznačně nezpůsobuje zhoršení mikrogeometrie povrchu. V některých případech vykazovala nová VBD z počátku větší drsnost než břit s určitým opotřebením.

Ke zcela jednoznačnému zhoršení drsnosti povrchu dochází při velkém ev. katastrofálním opotřebení (v.č. 43, 62). Pro základní orientaci a zároveň jako příklad sledované závislosti mezi opotřebením řezného nástroje a mikrogeometrií povrchu, jsou v tabulkách 21 a 22 uvedeny některé parametry mikrogeometrie povrchu a základní charakteristiky opotřebení ŘN. Při zohlednění použití VBD pro polohrubovací operace podélného soustružení lze v této části práce rozdělit naměřené hodnoty do dvou skupin:

-  $R_a < 6,3 \text{ } \mu\text{m}$ , 47 vzorků tj. 78,3 %

-  $R_a > 6,3 \text{ } \mu\text{m}$ , 13 vzorků tj. 21,7 %

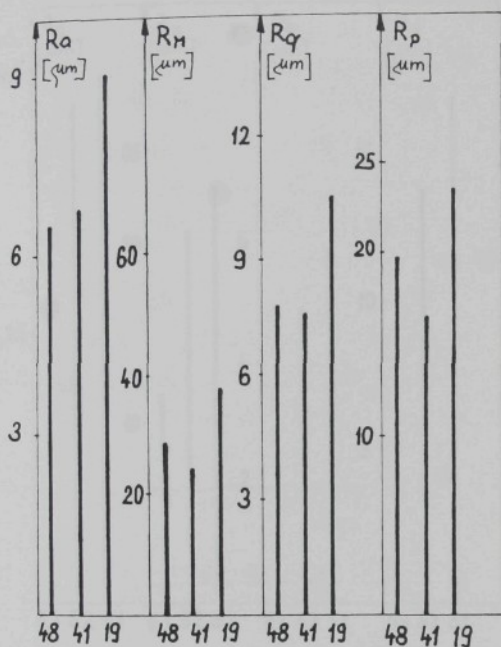
Z uvedených 13-ti vzorků byly dva obrobeny s velkým (resp. katastrofálním) opotřebením, v třech případech bylo zjištěno chvění v interakční zóně N-O a dva vzorky byly obráběny novými VBD. U 6-ti zbývajících vzorků (č.v. 51, 52, 63, 14, 22, 24) bylo potom průměrné opotřebení hřbetu  $\overline{VB} = 0,23 \text{ mm}$  a špičky  $\overline{VC} = 0,41 \text{ mm}$  při průměrné hodnotě  $\overline{Ra} = 8,48 \text{ } \mu\text{m}$ .

Z první skupiny (47 vzorků) bylo vybráno šest VBD (č.v. 19, 41, 48, 33, 34, 36), u kterých bylo naměřeno průměrné opotřebení  $\overline{VB} = 0,27 \text{ mm}$  a  $\overline{VC} = 0,47 \text{ mm}$ , přičemž těmito nástroji byl vytvořen povrch s  $\overline{Ra} = 3,9 \text{ } \mu\text{m}$ . Uvedený příklad, kdy se získávají povrchy s nižší hodnotou  $R_a$  při vyšších kritériích VB a VC a opačně je poukázáno na nedostatečnost hodnocení opotřebení podle stávajících kritérií.

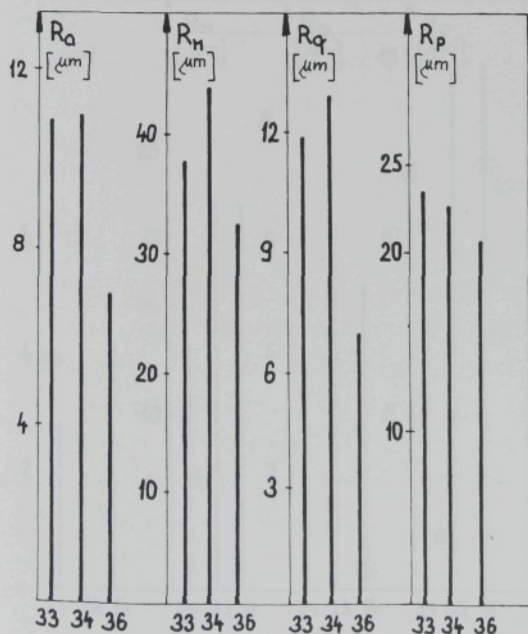
Rozhodující hledisko pro hodnocení řezných nástrojů je schopnost vytvářet povrch v požadované kvalitě. Komplexní charakteristiky mikrogeometrie povrchu, všechny parametry opotřebení VBD včetně morfologie opotřebených VBD jsou souhrnně uvedeny v příloze této práce.

### 5.3.2 Zbytková pnutí

Z metodiky experimentů (kap. 4.1) vyplývá, že zbytková pnutí byla měřena pro všechny kombinace obráběných materiálů a VBD. Zjištěné hodnoty jsou vyneseny do grafů. Celkem bylo získáno šedesát grafických závislostí.

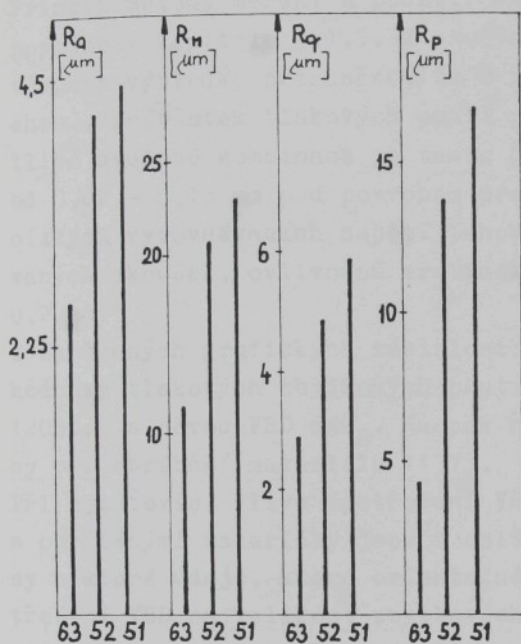


| č.v | VB   | VC   | Obráb. mat. | Nástroj |
|-----|------|------|-------------|---------|
| 48  | 0,13 | 0,23 | 11373       | S20CN   |
| 41  | 0,30 | 0,41 | 11600       | S20     |
| 19  | 0,22 | 0,40 | 11220       | S20CN   |

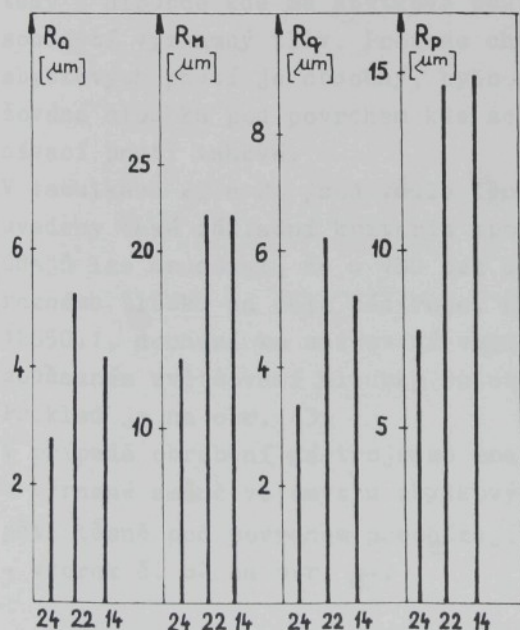


| č.v | VB   | VC   | Obráb. mat. | Nástroj |
|-----|------|------|-------------|---------|
| 33  | 0,20 | 0,47 | 11600       | S20CN   |
| 34  | 0,16 | 0,61 | 11600       | S20CN   |
| 36  | 0,38 | 0,37 | 11600       | S20CN   |

Tab. 21 Vybrané charakteristiky mikrogeometrie povrchu a opotřebení VBD



| č.v | VB   | VC   | Obráb. mat. | Nástroj          |
|-----|------|------|-------------|------------------|
| 63  | 0,23 | 0,55 | 11600       | S20 <sub>B</sub> |
| 52  | 0,27 | 0,72 | 11373       | S20              |
| 51  | 0,29 | 0,41 | 11373       | S20              |



| č.v | VB   | VC   | Obráb. mat. | Nástroj |
|-----|------|------|-------------|---------|
| 24  | 0,24 | 0,47 | 14 220      | S20     |
| 22  | 0,30 | 0,32 | 14 220      | S20     |
| 14  | 0,30 | 0,35 | 14 220      | S20     |

Tab. 22 Vybrané charakteristiky mikrogeometrie povrchu a opotřebení VBD

Princip metody měření a použité experimentální zařízení je popsáno v kapitole 4.1.5. Z naměřených hodnot je pro téměř všechny výsledky příznačné, že s rostoucí hloubkou pod povrchem, přírůstek tlakových pnutí postupně klesá. Pro jednotlivé uvedené kombinace je tento gradient odlišný. V hloubce od 0,02 - 0,13 mm pod povrchem přecházejí tlaková pnutí do nízkých vyrovnávacích napětí tahových. Jak vyplývá z realizovaných zkoušek, ovlivněná vrstva zřejmě nepřesahuje hloubku 0,2 mm.

Z naměřených grafických závislostí je evidentní, že nejvyšší hodnoty tlakových zbytkových pnutí jsou při obrábění materiálu 12050.1 s novou VBD S20<sub>B</sub>. Naopak nejnižší hodnoty byly zjištěny při obrábění materiálu 11373.

Při zjišťování vlivu opotřebení VBD v jednotlivých kombinacích s obráběnými materiály jsou v další části této kapitoly uvedeny některé údaje, které orientačně charakterizují účinek opotřebení VBD na velikost zbytkových pnutí. Pro tuto základní orientaci vlivu opotřebení VBD na průběh zbytkového pnutí, byla uvažována velikost zbytkového pnutí v hloubce 0,005 mm, tedy v hloubce kde má zbytkové pnutí na provozní vlastnosti součástí významný vliv. Protože charakter průběhu i smysl zbytkových pnutí je obdobný, bylo jako druhé kritérium uvažována hloubka pod povrchem kde se mění tlakové pnutí ve vyrovnávací pnutí tahové.

V tabulkách 23 a 24 jsou vedle těchto sledovaných kritérií uvedeny také základní kritéria opotřebení VBD. Z uvedených údajů lze usuzovat, že u VBD bez utvařeče, kdy dochází k výraznému žlábků na čele nástroje, např. při obrábění materiálu 12050.1, dochází ke snižování velikosti zbytkového pnutí při současném zvětšování hloubky nulových zbytkových pnutí.

Příklad je na obr. 43.

V případě obrábění nástrojem se značným opotřebením dochází k výrazné změně ve smyslu zbytkových pnutí, a to tlaková napětí těsně pod povrchem přecházejí v nevýhodná tahová napětí - vzorek č. 62 na obr. 44.



12050.1 - S20<sub>B</sub>

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 0    | -795                    | 0,02                     | 0          | 0          | 0          |
| 1    | -578                    | 0,03                     | 0,15       | 0,22       | 0,01       |
| 2    | -565                    | 0,03                     | 0,21       | 0,25       | 0,08       |
| 3    | -555                    | 0,04                     | 0,25       | 0,30       | 0,12       |
| 4    | -277                    | 0,05                     | 0,33       | 0,43       | 0,22       |

12050.1 - S20

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 10   | -251                    | 0,03                     | 0          | 0          | 0          |
| 11   | -368                    | 0,03                     | 0,14       | 0,28       | 0,01       |
| 12   | -308                    | 0,03                     | 0,23       | 0,23       | 0,02       |
| 13   | -298                    | 0,04                     | 0,25       | 0,33       | 0,01       |
| 14   | -338                    | 0,05                     | 0,30       | 0,35       | 0,01       |

12050.1 - S20CN

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 5    | -286                    | 0,03                     | 0          | 0          | 0          |
| 6    | -456                    | 0,02                     | 0,10       | 0,11       | 0,02       |
| 7    | -392                    | 0,02                     | 0,14       | 0,24       | 0,14       |
| 8    | -209                    | 0,02                     | 0,24       | 0,24       | 0,12       |
| 9    | -126                    | 0,05                     | 0,30       | 0,36       | 0,11       |

14220 - S20<sub>B</sub>

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 26   | -76                     | 0,07                     | 0          | 0          | 0          |
| 27   | -246                    | 0,05                     | 0,11       | 0,16       | 0,02       |
| 28   | -161                    | 0,15                     | 0,19       | 0,22       | 0,02       |
| 29   | -144                    | 0,08                     | 0,12       | 0,13       | 0,02       |
| 30   | -198                    | 0,09                     | 0,30       | 0,30       | 0,02       |

14220 - S20

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 21   | -139                    | 0,05                     | 0          | 0          | 0          |
| 22   | -246                    | 0,03                     | 0,30       | 0,32       | 0          |
| 23   | -145                    | 0,06                     | 0,15       | 0,23       | 0,01       |
| 24   | -102                    | 0,07                     | 0,24       | 0,47       | 0,01       |
| 25   | -70                     | 0,06                     | 0,10       | 0,16       | 0          |

14220 - S20CN

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 16   | -145                    | 0,04                     | 0          | 0          | 0          |
| 17   | -394                    | 0,04                     | 0,14       | 0,14       | 0          |
| 18   | -256                    | 0,06                     | 0,12       | 0,26       | 0,01       |
| 19   | -272                    | 0,05                     | 0,22       | 0,40       | 0          |
| 20   | -272                    | 0,06                     | 0,27       | 0,24       | 0          |

Tab. 23 Velikost zbytkových pnutí v hloubce 0,005 mm pod povr-  
chem, hloubkou nulových pnutí a opotřebením VBD

11600 - S20<sub>B</sub>

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/                  | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|------------|
| 59   | -135                    | 0,04                     | 0                           | 0          | 0          |
| 60   | -220                    | 0,04                     | 0,16                        | 0,38       | 0,05       |
| 61   | -286                    | 0,07                     | 0,45                        | 0,92       | 0,32       |
| 62   | -49                     | 0,13                     | Katastrofální<br>opotřebení |            |            |
| 63   | -192                    | 0,04                     | 0,23                        | 0,55       | 0,21       |

11600 - S20

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/                  | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|------------|
| 38   | -359                    | 0,03                     | 0                           | 0          | 0          |
| 40   | -319                    | 0,05                     | 0,18                        | 0,31       | 0          |
| 41   | -229                    | 0,04                     | 0,30                        | 0,41       | 0,12       |
| 42   | -291                    | 0,05                     | 0,29                        | 0,47       | 0,11       |
| 43   | -231                    | 0,05                     | Katastrofální<br>opotřebení |            |            |

11600 - S20CN

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 31   | -173                    | 0,03                     | 0          | 0          | 0          |
| 33   | -187                    | 0,03                     | 0,20       | 0,47       | 0          |
| 34   | -90                     | 0,07                     | 0,16       | 0,61       | 0          |
| 35   | -278                    | 0,04                     | 0,40       | 0,47       | 0          |
| 36   | -33                     | 0,01                     | 0,38       | 0,37       | 0          |

11373 - S20<sub>B</sub>

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 54   | -41                     | 0,09                     | 0          | 0          | 0          |
| 55   | -22                     | 0,07                     | 0,11       | 0,17       | 0,01       |
| 56   | -131                    | 0,08                     | 0,17       | 0,18       | 0,06       |
| 57   | -84                     | 0,10                     | 0,25       | 0,35       | 0,05       |
| 58   | -36                     | 0,08                     | 0,28       | 0,36       | 0,07       |

11600 - S20

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 49   | -123                    | 0,08                     | 0          | 0          | 0          |
| 50   | -174                    | 0,08                     | 0,12       | 0,24       | 0          |
| 51   | -206                    | 0,08                     | 0,29       | 0,41       | 0,01       |
| 52   | -143                    | 0,08                     | 0,27       | 0,72       | 0,06       |
| 53   | -118                    | 0,09                     | 0,16       | 0,23       | 0,05       |

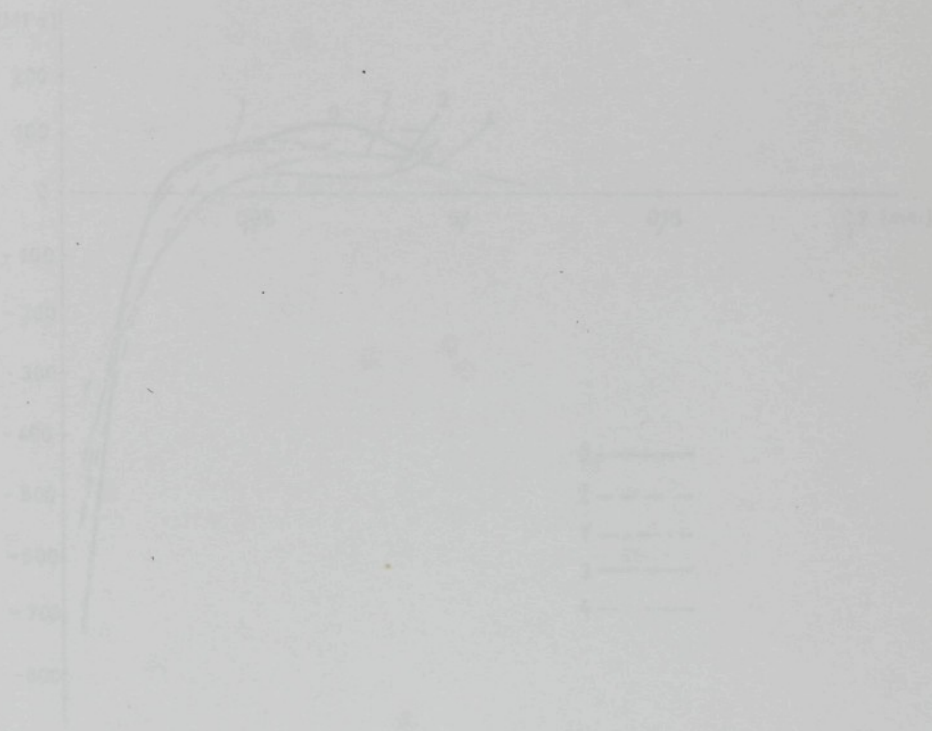
11600 - S20CN

| č.v. | Zbyt.<br>pnutí<br>/MPa/ | Hl.nul.<br>pnutí<br>/mm/ | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ |
|------|-------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| 44   | -43                     | 0,05                     | 0          | 0          | 0          |
| 45   | -114                    | 0,07                     | 0,05       | 0,16       | 0          |
| 46   | -207                    | 0,09                     | 0,14       | 0,30       | 0          |
| 47   | -148                    | 0,09                     | 0,26       | 0,44       | 0          |
| 48   | -79                     | 0,08                     | 0,13       | 0,23       | 0          |

Tab. 24 Velikost zbytkových pnutí v hloubce 0,005 mm pod povr-  
chem, hloubka nulových pnutí a opotřebení VBD

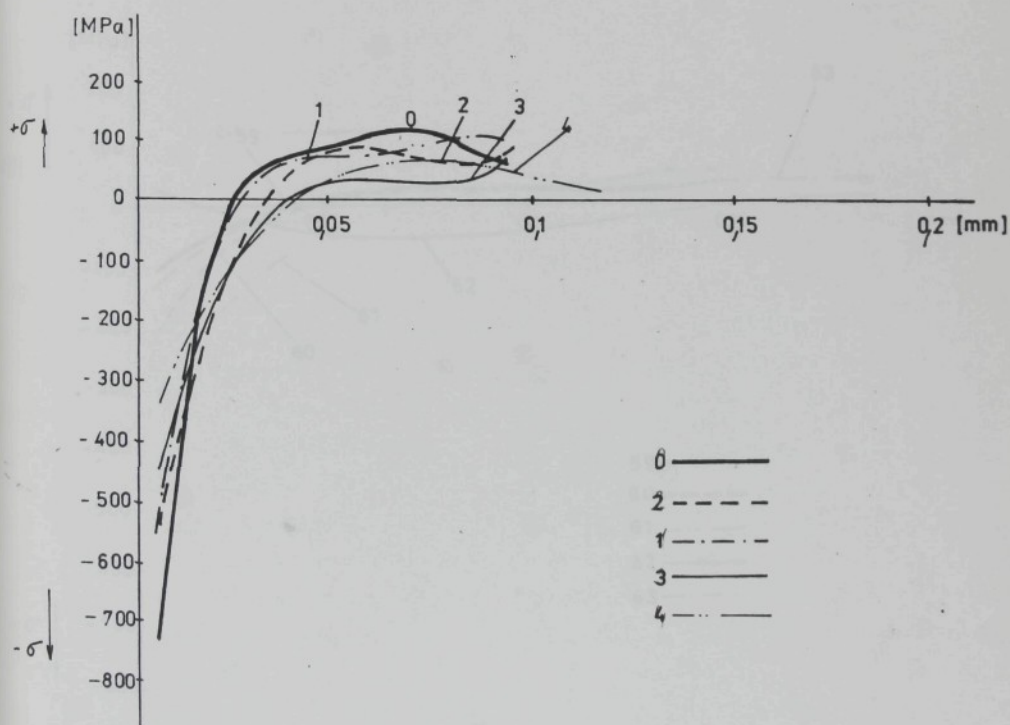
V případě obrábění VBD s utvařečem kde opotřebení hřbetu nástroje převládá, dochází ke zvyšování velikosti tlakových zbytkových pnutí a ke snižování vyrovnávacích napětí tahových. Např. na obr. 45 je obrábění materiálu 12050.1. Úplné parametry opotřebení VBD jsou společně s příslušnými průběhy zbytkových pnutí uvedeny v příloze této práce.

|   |          |      |      |         |
|---|----------|------|------|---------|
| 1 | 0,150,25 | 0,01 | 3,5  | 12050.1 |
| 2 | 0,210,25 | 0,08 | 10,5 | 12050.1 |
| 3 | 0,250,30 | 0,12 | 20   | 12050.1 |
| 4 | 0,330,43 | 0,22 | 40   | 12050.1 |



Obr. 45 Průběhy zbytkových pnutí při obrábění VBD s různými velikostmi opotřebení

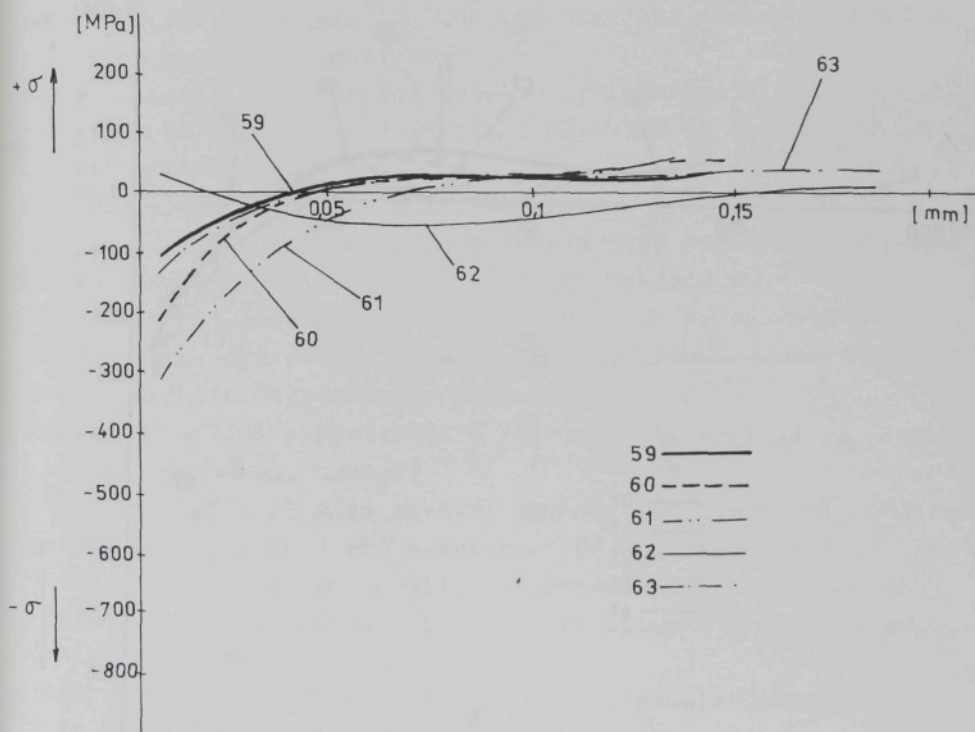
| č.v | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | T<br>/min/ | Nástroj          | Obráběný<br>materiál |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------------|----------------------|
| 0   | 0          | 0          | 0          | 0          | S20 <sub>B</sub> | 12050.1              |
| 1   | 0,15       | 0,22       | 0,01       | 3,5        | S20 <sub>B</sub> | 12050.1              |
| 2   | 0,21       | 0,25       | 0,08       | 10         | S20 <sub>B</sub> | 12050.1              |
| 3   | 0,25       | 0,30       | 0,12       | 20         | S20 <sub>B</sub> | 12050.1              |
| 4   | 0,33       | 0,43       | 0,22       | 24,6       | S20 <sub>B</sub> | 12050.1              |



Obr. 43 Průběh zbytkového pnutí při obrábění VBD s různou velikostí opotřebení

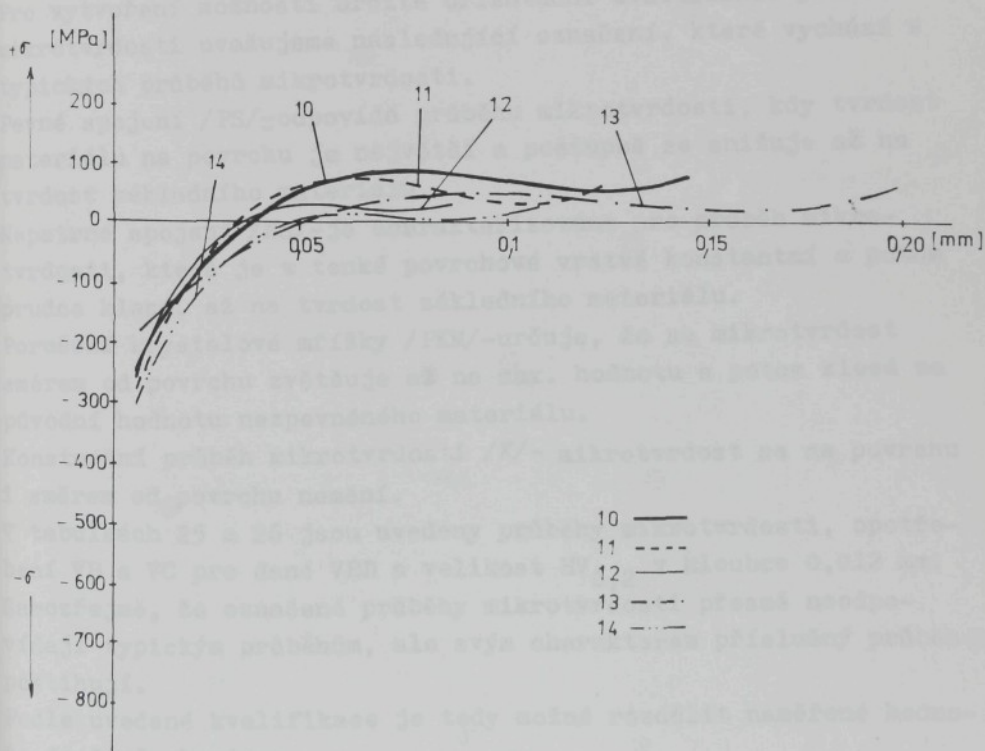


| č.v | VB<br>/mm/                  | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | T<br>/min/ | Nástroj          | Obráběný<br>materiál |
|-----|-----------------------------|------------|------------|------------|------------------|----------------------|
| 59  | 0                           | 0          | 0          | 0          | S20 <sub>B</sub> | 11600                |
| 60  | 0,16                        | 0,38       | 0,05       | 3,5        | S20 <sub>B</sub> | 11600                |
| 61  | 0,45                        | 0,92       | 0,32       | 8,5        | S20 <sub>B</sub> | 11600                |
| 62  | Katastrofální<br>opotřebení |            |            | 12         | S20 <sub>B</sub> | 11600                |
| 63  | 0,23                        | 0,55       | 0,21       | 5          | S20 <sub>B</sub> | 11600                |



Obr. 44 Průběh zbytkového pnutí při obrábění VBD  
s různou velikostí opotřebení

| Š.v | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ | KT<br>/mm/ | T<br>min/ | Nástroj | Obráběný<br>materiál |
|-----|------------|------------|------------|-----------|---------|----------------------|
| 10  | 0          | 0          | 0          | 0         | S20     | 12050.1              |
| 11  | 0,14       | 0,28       | 0,01       | 4         | S20     | 12050.1              |
| 12  | 0,23       | 0,23       | 0,02       | 7         | S20     | 12050.1              |
| 13  | 0,25       | 0,33       | 0,01       | 9,6       | S20     | 12050.1              |
| 14  | 0,30       | 0,35       | 0,01       | 21        | S20     | 12050.1              |



Obr. 45 Průběh zbytkového pnutí při obrábění VBD s různou velikostí opotřebení

### 5.3.3 Mikrotvrдость

Mikrotvrдость soustruženého povrchu byla změřena u všech šedesáti vzorků dle metodiky uvedené v kapitole 4.1.

Pro zvýšení hodnověrnosti naměřených hodnot byla mikrotvrдость na plochách vytvořených šikmými řezy měřena dvakrát.

Průměrné hodnoty jsou pak vyneseny v grafických závislostech v příloze této práce.

Výsledky experimentálních měření ukázaly, že mikrotvrдость ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Dále bylo z měření zjištěno, že velikost mikrotvrđosti ovlivňuje i tvar třísek. Při vzniku stužkové třísky byla naměřena menší mikrotvrđost než při vzniku třísek elementních.

Pro vytvoření možnosti určité orientační kvalifikace průběhu mikrotvrđosti uvažujeme následující označení, které vychází z typických průběhů mikrotvrđosti.

Pevné spojení /PS/-odpovídá průběhu mikrotvrđosti, kdy tvrdost materiálu na povrchu je největší a postupně se snižuje až na tvrdost základního materiálu.

Nepatrné spojení /NS/-je charakterizováno pro průběh mikrotvrđosti, která je v tenké povrchové vrstvě konstantní a potom prudce klesá, až na tvrdost základního materiálu.

Porušení krystalové mřížky /PKM/-určuje, že se mikrotvrđost směrem od povrchu zvětšuje až na max. hodnotu a potom klesá na původní hodnotu nezpevněného materiálu.

Konstantní průběh mikrotvrđosti /K/- mikrotvrđost se na povrchu i směrem od povrchu nemění.

V tabulkách 25 a 26 jsou uvedeny průběhy mikrotvrđosti, opotřebení VB a VC pro dané VBD a velikost  $HV_{0,2}$  v hloubce 0,012 mm. Samozřejmě, že označené průběhy mikrotvrđosti přesně neodpovídají typickým průběhům, ale svým charakterem příslušný průběh postihují.

Podle uvedené kvalifikace je tedy možné rozdělit naměřené hodnoty do čtyř skupin:

1. skupina 30 vzorků - průběh PS
2. skupina 16 vzorků - průběh K
3. skupina 5 vzorků - průběh NS

#### 4. skupina 9 vzorků - průběh PKM

V první skupině 30-ti vzorků bylo 9 vzorků obrobena novými VBD. Zbývajících 21 vzorků bylo obrobena nástroji s následujícími parametry opotřebení  $\overline{VB} = 0,20$  mm a  $\overline{VC} = 0,34$  mm.

V druhé skupině byly 3 vzorky obrobena novými VBD. Ostatních 13 vzorků bylo soustruženo nástroji s  $\overline{VB} = 0,13$  mm a  $\overline{VC} = 0,21$  mm.

V třetí skupině bylo 5 vzorků obrobena nástroji s  $\overline{VB} = 0,34$  mm a  $\overline{VC} = 0,54$  mm.

Ve čtvrté skupině byl vzorek č. 43 obroben VBD s katastrofálním opotřebením, zbývajících 8 vzorků bylo obrobena nástroji s  $\overline{VB} = 0,30$  mm a  $\overline{VC} = 0,42$  mm.

| č. vz. | typ | průměr | $\overline{VB}$<br>/mm/ | $\overline{VC}$<br>/mm/ |
|--------|-----|--------|-------------------------|-------------------------|
| 1      | PKM | 261    | 0                       | 0                       |
| 2      | PKM | 262    | 0,10                    | 0,31                    |
| 3      | PKM | 263    | 0,14                    | 0,34                    |
| 4      | PKM | 223    | 0,22                    | 0,21                    |
| 5      | PKM | 263    | 0,30                    | 0,36                    |

| č. vz. | typ | průměr | $\overline{VB}$<br>/mm/ | $\overline{VC}$<br>/mm/ |
|--------|-----|--------|-------------------------|-------------------------|
| 6      | PKM | 339    | 0,16                    | 0,22                    |
| 7      | PKM | 302    | 0,43                    | 0,30                    |
| 8      | PKM | 300    | 0,55                    | 0,31                    |
| 9      | PKM | 344    | 0,43                    | 0,36                    |

| č. vz. | typ | průměr | $\overline{VB}$<br>/mm/  | $\overline{VC}$<br>/mm/ |
|--------|-----|--------|--------------------------|-------------------------|
| 10     | PKM | 277    | 0,17                     | 0,31                    |
| 11     | PKM | 302    | 0,18                     | 0,31                    |
| 12     | PKM | 324    | 0,30                     | 0,41                    |
| 13     | PKM | 311    | 0,29                     | 0,47                    |
| 14     | PKM | 285    | katastrof.<br>opotrebení |                         |

| č. vz. | typ | průměr | $\overline{VB}$<br>/mm/ | $\overline{VC}$<br>/mm/ |
|--------|-----|--------|-------------------------|-------------------------|
| 15     | PKM | 266    | 0                       | 0                       |
| 16     | PKM | 303    | 0,20                    | 0,42                    |
| 17     | PKM | 330    | 0,16                    | 0,31                    |
| 18     | PKM | 303    | 0,40                    | 0,47                    |
| 19     | PKM | 334    | 0,38                    | 0,37                    |

Tab. 2: Typy průběhu mikrotvrdosti, opotřebení VBD a -valí-  
krot  $\sigma_{0,2}$  v závislosti na průměru



12 050.1 - S20 B

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/ | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|---------|---------|
| 0   | K           | 269               | 0       | 0       |
| 1   | PS          | 334               | 0,15    | 0,22    |
| 2   | PKM         | 274               | 0,21    | 0,25    |
| 3   | PS          | 252               | 0,25    | 0,30    |
| 4   | PKM         | 263               | 0,33    | 0,43    |

12 050.1 - S20

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/ | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|---------|---------|
| 10  | PS          | 404               | 0       | 0       |
| 11  | K           | 282               | 0,14    | 0,28    |
| 12  | PS          | 304               | 0,23    | 0,23    |
| 13  | PKM         | 273               | 0,25    | 0,33    |
| 14  | PS          | 307               | 0,30    | 0,35    |

12 050.1 - S20 C

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/ | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|---------|---------|
| 5   | PS          | 281               | 0       | 0       |
| 6   | PS          | 352               | 0,10    | 0,11    |
| 7   | K           | 269               | 0,14    | 0,24    |
| 8   | PKM         | 223               | 0,22    | 0,24    |
| 9   | NS          | 263               | 0,30    | 0,36    |

11 600 - S20 B

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/ | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|---------|---------|
| 59  | PS          | 316               | 0       | 0       |
| 60  | PS          | 359               | 0,16    | 0,38    |
| 61  | PKM         | 302               | 0,45    | 0,92    |
| 62  | NS          | 380               | 0,55    | 1,44    |
| 63  | PS          | 324               | 0,23    | 0,55    |

11 600 - S20

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/               | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|-----------------------|---------|
| 38  | PS          | 277               | 0                     | 0       |
| 40  | PS          | 302               | 0,18                  | 0,31    |
| 41  | PS          | 322               | 0,30                  | 0,41    |
| 42  | PS          | 311               | 0,29                  | 0,47    |
| 43  | PKM         | 285               | katastrof. opotřebení |         |

11 600 - S10 CN

| č.v | Typ průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB /mm/ | VC /mm/ |
|-----|-------------|-------------------|---------|---------|
| 31  | PS          | 268               | 0       | 0       |
| 33  | PS          | 305               | 0,20    | 0,47    |
| 34  | PS          | 330               | 0,16    | 0,61    |
| 35  | PS          | 305               | 0,40    | 0,47    |
| 36  | PKM         | 271               | 0,38    | 0,37    |

Tab. 25

Typy průběhu mikrotvrdosti, opotřebení VBD a velikost HV<sub>0,2</sub> v hloubce 0,012 mm

11 373 - S20 B

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 54   | PS             | 221               | 0          | 0          |
| 55   | K              | 227               | 0,11       | 0,17       |
| 56   | K              | 218               | 0,17       | 0,18       |
| 57   | K              | 230               | 0,25       | 0,35       |
| 58   | K              | 207               | 0,28       | 0,35       |

11 373 - S20

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 49   | K              | 193               | 0          | 0          |
| 50   | PS             | 223               | 0,12       | 0,24       |
| 51   | NS             | 263               | 0,29       | 0,41       |
| 52   | PS             | 256               | 0,27       | 0,72       |
| 53   | PS             | 239               | 0,16       | 0,23       |

11 373 - S20 CN

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 44   | PS             | 250               | 0          | 0          |
| 45   | K              | 204               | 0,05       | 0,16       |
| 46   | K              | 209               | 0,14       | 0,30       |
| 47   | K              | 220               | 0,26       | 0,44       |
| 48   | K              | 228               | 0,13       | 0,23       |

14 220 - S20 B

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 26   | K              | 229               | 0          | 0          |
| 27   | K              | 206               | 0,11       | 0,16       |
| 28   | K              | 233               | 0,19       | 0,22       |
| 29   | PS             | 278               | 0,12       | 0,13       |
| 30   | NS             | 263               | 0,30       | 0,30       |

14 220 - S20

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 21   | PS             | 311               | 0          | 0          |
| 22   | PKM            | 211               | 0,30       | 0,32       |
| 23   | PS             | 329               | 0,15       | 0,23       |
| 24   | PKM            | 259               | 0,24       | 0,47       |
| 25   | K              | 257               | 0,10       | 0,16       |

14 220 - S20 CN

| č.v. | Typ<br>průběhu | HV <sub>0,2</sub> | VB<br>/mm/ | VC<br>/mm/ |
|------|----------------|-------------------|------------|------------|
| 16   | PS             | 303               | 0          | 0          |
| 17   | PS             | 276               | 0,14       | 0,14       |
| 18   | PS             | 266               | 0,12       | 0,26       |
| 19   | PS             | 270               | 0,22       | 0,40       |
| 20   | NS             | 355               | 0,27       | 0,24       |

Tab. 26

Typy průběhu mikrotvrdosti, opotřebení VBD a velikost HV<sub>0,2</sub> v hloubce 0,012 mm

#### 5.3.4 Hodnocení měření

Tato kapitola je zaměřena na komplexnější zhodnocení problematiky vlivu opotřebení VBD na jednotlivé charakteristiky kvality soustruženého povrchu.

Následující rozbor je založen na výsledcích měření opotřebení VBD, které je obsahem kapitoly 5.1.

Pro přehlednost a úplnost zhodnocení vlivu opotřebení VBD na kvalitu povrchu jsou postupně analyzovány jednotlivé kombinace VBD a obráběných materiálů.

Analýza je dále doplněna o další poznatky z výzkumu morfologie obrobených povrchů, mikrostruktury i poznatky z vlastního procesu řezání.

Přehled jednotlivých měření je v příloze této práce.

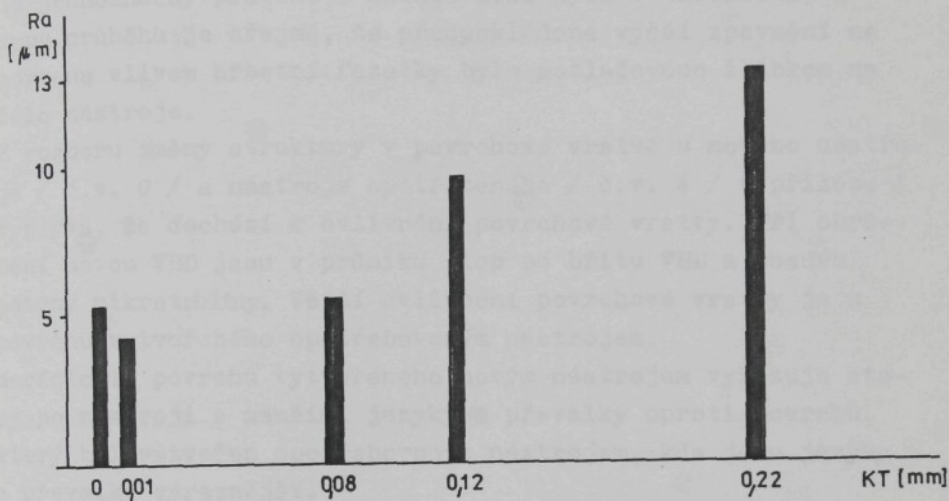
1. Obráběný materiál: 12 050.1

Řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče

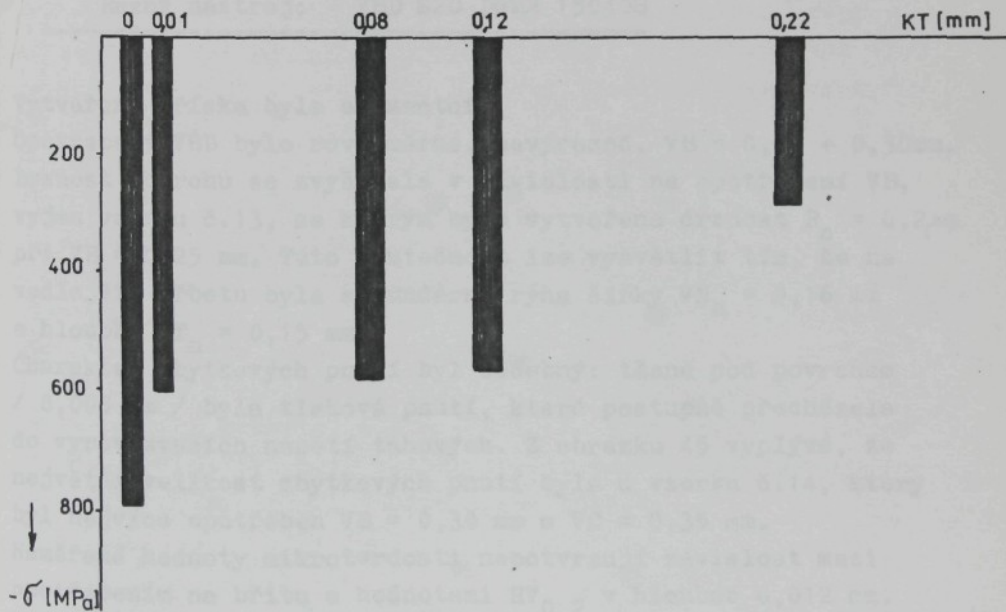
---

- Proces řezání byl charakterizován výraznou změnou tvarů třísek. Při obrábění novou VBD byla vzniklá tříska stužková a při postupném vzniku žlábků na čele VBD se měnila v třísku elementní.
  - Z hlediska opotřebení byl zjištěn jako rozhodující parametr hloubka žlábků na čele. Proto je dále uveden právě tento parametr opotřebení v souvislosti s jednotlivými charakteristikami kvality povrchu.
  - Na obrázku 46 je diagram drsnosti  $R_a$  a velikost opotřebení KT
  - Zbytková pnutí tlaková s rostoucí velikostí parametru opotřebení KT se zmenšovala.
- Na obrázku 47 je diagram  $\zeta$  - KT / v hloubce 0,005 mm pod povrchem/.





Obr. 46 Drsnost povrchu  $R_a$  a opotřebení KT



Obr. 47 Velikost zbytkových pnutí  $\sigma$  a opotřebení KT



- Velikost mikrotvrdosti  $HV_{0,2}$  v hloubce 0,012 mm nevykazovala jednoznačný průběh. Z hodnot uvedených v tabulce 25 i typu průběhu je zřejmé, že předpokládané vyšší zpevnění na povrchu vlivem hřbetní fazetky bylo potlačováno žlábkem na čele nástroje.
- Z rozboru změny struktury v povrchové vrstvě u nového nástroje / č.v. 0 / a nástroje opotřebeného / č.v. 4 / v příloze 1 vyplývá, že dochází k ovlivnění povrchové vrstvy. Při obrábění novou VBD jsou v průniku stop po břitě VBD a posuvu patrný mikrotrhlíny. Větší ovlivnění povrchové vrstvy je u povrchu vytvořeného opotřebovaným nástrojem.
- Morfologie povrchu vytvořeného novým nástrojem vykazuje stopy po nástroji s menšími jazyky a převalky oproti povrchu, který byl vytvořen opotřebovaným nástrojem, kde jsou jazyky a převalky výraznější.

2. Obráběný materiál: 12 050.1

Řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408

---

- Vytvářená tříska byla elementní.
- Opotřebení VBD bylo rovnoměrné, nevýrazné,  $VB = 0,14 \div 0,30 \text{ mm}$ .
- Drsnost povrchu se zvyšovala v závislosti na opotřebení VB, vyjma vzorku č.13, se kterým byla vytvořena drsnost  $R_a = 6,2 \mu\text{m}$  při  $VB = 0,25 \text{ mm}$ . Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že na vedlejších hřbetu byla sekundární rýha šířky  $VN_R = 0,16 \text{ mm}$  a hloubky  $VT_R = 0,15 \text{ mm}$ .
- Charakter zbytkových pnutí byl obdobný: těsně pod povrchem / 0,005 mm / byla tlaková pnutí, která postupně přecházela do vyrovnávacích napětí tahových. Z obrázku 45 vyplývá, že největší velikost zbytkových pnutí byla u vzorku č.14, který byl nejvíce opotřeben  $VB = 0,30 \text{ mm}$  a  $VC = 0,35 \text{ mm}$ .
- Naměřené hodnoty mikrotvrdosti nepotvrzují závislost mezi opotřebením na břitě a hodnotami  $HV_{0,2}$  v hloubce 0,012 mm. Nejméně vhodný průběh byl u vzorku č. 13.

- Analýza mikrostruktury povrchů č.v.10 a č.v.14, který byl soustružen opotřebovaným nástrojem  $VB = 0,30$  a  $VC = 0,35$ , ukazuje výrazný rozdíl v profilech po břitě nástroje  $R_{a,10} = 2,0 \mu m$ ,  $R_{a,14} = 4,2 \mu m$ . Deformace povrchové vrstvy nebyla zpozorována.
- Morfologie porovnávaných povrchů ukazuje, že v obou případech se jedná o jemné poruchy. V případě vzorku č. 14 jsou zjištěny tyto poruchy výraznější.

3. Obráběný materiál: 12 050.1

Řezný nástroj: VBD S20 CN DNMM 150408

---

- Vytvářená tříska byla elementní, řezný proces plynulý.
- Drsnost povrchu se pohybovala mezi  $R_a = 2,0 + 15,0 \mu m$ . Při dosažení  $R_a = 15 \mu m$  u vzorku č. 9 bylo zpozorováno chvění v interakční zóně N - O.
- Průběh zbytkových pnutí je příznivý, tlakové pnutí bezprostředně pod povrchem  $/0,005 \text{ mm}/$  přechází do nevýrazných vyrovnávacích napětí tahových. Nejmenší gradient tlakových i tahových napětí je u vzorku č. 9,  $VB = 0,30 \text{ mm}$ ,  $KT = 0,11 \text{ mm}$ .
- Průběh mikrotvrdosti je rozdílný. Nepříznivý průběh je u vzorku č. 8, kde  $VB = 0,22 \text{ mm}$  a  $KT = 0,12 \text{ mm}$  a u vzorku č. 9, kde  $VB = 0,30 \text{ mm}$  a  $KT = 0,11 \text{ mm}$ .
- Z mikrostruktury povrchu jsou patrné výrazné změny mezi opotřebovaným nástrojem č.v.9 a novým nástrojem č. 5. Deformace povrchové vrstvy nebyla zpozorována.
- Z morfologie obou povrchů vyplývá, že u vzorku č. 5 se jedná pouze o jemné poruchy, ale u vzorku č. 9 se jedná o poruchy hrubé. Jazyky, přealky a mikrotřísky charakterizují současně s výraznými stopami vzniku tento povrch.

4. Obráběný materiál: 14 220

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408 bez utvařeče

---

- Vytvářená tříška byla převážně plynulá, proces řezání byl nespojitý, doprovázen vznikem nákrůžku na obrobku. Střídavý vznik a zánik nákrůžků je důsledkem boční plastické deformace. Tento nepravidelný vznik a zánik nákrůžků nepravidelně přerušoval třísku, která byla stužková nebo vinutá a vedle toho měl uvedený mechanismus výrazný vliv na tvorbu primární rýhy - např. obr. 25.
- Drsnost povrchu:  $R_a = 2,4 \div 6,1 \mu\text{m}$ .
- Průběhy zbytkových pnutí vykazují velmi malé hodnoty. V hloubce 0,005 mm pod povrchem jsou zbytková pnutí tlaková, která s velmi nízkým gradientem přecházejí v nepatrná vyrovňovací napětí tahová. Vysvětlení těchto malých zbytkových pnutí patrně souvisí s mechanismem boční plastické deformace. / kapitola 2.1.1/.
- Toto tvrzení je zdůrazněno i velmi malým zpevněním. Rozsah mikrotvrdosti je  $206 \div 278 \text{ HV}_{0,2}$ .
- Deformační změny v povrchové vrstvě nejsou patrné, pouze je zřetelný rozdíl ve stopách po břitě nástroje. Opotřebovaná VBD /v.č. 30/ vytváří povrch s výraznější konturou včetně vrcholů /  $R_a = 2,4 \mu\text{m}$  / oproti nové VBD /č.v. 26/, kde stopy po břitě jsou nevýrazné. /  $R_a = 4,15 \mu\text{m}$  /
- Z hodnocení morfologie jsou zřejmé pouze jemné poruchy, stopy po nástroji ve tvaru rýh ve směru nástroje a mikrotřísky.

5. Obráběný materiál: 14 220

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408

---

- Vytvářená tříška byla stužková s výskytem třísky vinuté, dlouhé  $50 \div 100 \text{ mm}$ . Vlastní proces řezání byl nespojitý, doprovázený vznikem nákrůžků jako důsledek mechanismu boční plastické deformace.



- Drsnost povrchu:  $R_a = 2,05 \pm 5,3 \mu\text{m}$ , max.  $R_a = 5,3 \mu\text{m}$  vzorku č.22 byla vytvořena VBD s  $VB = 0,30 \text{ mm}$ ,  $WV_n = 0,06 \text{ mm}$  a  $VT_n = 0,12 \text{ mm}$ .
- Průběh zbytkových pnutí má stejný charakter, tzn. v hloubce  $0,005 \text{ mm}$  jsou napětí tlaková, která s malým gradientem přecházejí do nepatrných napětí tahových. Výrazně největší hodnota byla naměřena u vzorku obrobeného VBD s maximálním opotřebením /v.č.22/;  $\sigma_{22} = -246 \text{ MPa}$ ,  $VB = 0,30 \text{ mm}$ ,  $VT_n = 0,12 \text{ mm}$ .
- Průběh mikrotvrdosti byl nejméně příznivý právě u v.č. 22.
- Makrostrukturní změny u v.č. 21 a 22 nevykazují deformaci povrchové struktury. Je patrná výrazná asymetrie stop na břitu nástroje /v.č.22/. Tato asymetrie může být způsobena drážkou na hlavním hřbetu, která byla u v.č. 22 výrazná.
- Morfologie povrchu u v.č. 21 vykazuje pouze jemné poruchy -  
- stopy po nástroji. V.č. 22 vykazuje výrazné stopy po nástroji a mikrotřísky.

6. Obráběný materiál: 14 220

Řezný nástroj: VBD S20 CN DNNM 150408

---

- Řezný proces i vytvářená tříska byly obdobné jako při obrábění s nepovlakovanou VBD.
- Drsnost povrchu  $R_a = 3,9 \pm 8,7 \mu\text{m}$ . Větší drsnost obrobené plochy je způsobena mikrolomy v hlavním hřbetu a výraznější primární rýhou. Největší drsnost  $R_a = 8,7 \mu\text{m}$  byla zjištěna u vzorku č.19, kde  $VB = 0,22 \text{ mm}$ ,  $VC = 0,40 \text{ mm}$ ,  $VN = 0,67 \text{ mm}$ .
- Průběh zbytkových pnutí má v hloubce  $0,005 \text{ mm}$  tlakové hodnoty, které postupně přecházejí do tahových vyrovnávacích napětí. Gradient tlakových pnutí je vyšší než u nepovlakovaného nástroje.
- Z průběhů mikrotvrdosti je nepříznivý průběh u v.č. 20;  $VB = 0,27 \text{ mm}$ ,  $VC = 0,24 \text{ mm}$  a  $VN = 0,85 \text{ mm}$ .
- Mikrostrukturní deformační změny jsou patrné u v. č. 16 /nová VBD/. Změny v konturách na břitu nástroje nejsou patrné.



- Morfologie povrchu v.č. 16 vykazuje výraznější stopy po nástroji. Vzorek č. 20 vykazuje výraznější mikrotřísky.

7. Obráběný materiál: 11 600

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408 bez utvařeče

---

- Stuzková tříska se po vytvoření žlábků měnila na třísku elementní.
- Drsnost povrchu při zvýšeném opotřebení výrazně vzrostla.  
 $R_a = 2,6 + 14,0 \mu\text{m}$ . Při katastrofálním opotřebení VBD byla  
 $R_a = 14,0 \mu\text{m}$ .
- Při opotřebení docházelo k výraznému zvýšení gradientu tlakových napětí. Při nadměrných opotřebeních /v.č. 62/ je evidentní, že bezprostředně na povrchu dochází k tahovým napětím, která přecházejí do tlakových napětí a posléze opět do vyrovnávacích napětí tahových. Tento průběh je velmi nepříznivý.
- Průběh mikrotvrdosti vykazuje vyšší hodnoty zpevnění povrchu, nejméně příznivý je průběh u v.č. 62.
- Z analýzy mikrostruktury v.č. 59 a 62 vyplývá výrazná změna ve tvaru drážek po břitě nástroje. Výrazná asymetrie u v.č. 62 je způsobena velkým opotřebením. Změny deformací povrchové vrstvy jsou důsledkem změny v tvaru břitu a sil, které tyto změny vyvolaly;  $F_f = 2\,600\text{ N}$ ,  $F_c = 4\,600\text{ N}$ .
- Z morfologie povrchů v.č. 59 vyplývá, že se jedná o jemné poruchy. U v.č. 62 jsou velmi výrazné drážky po nástroji, které zároveň označují svoji hloubku /  $R_a = 14,0 \mu\text{m}$  /.

8. Obráběný materiál: 11 600

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408

---

- Řezný proces je charakterizován rychlou degradací funkčních vlastností břitu. Zpočátku se tvořila tříska vinutá v délce  $50 \pm 100\text{ mm}$  a průměru  $18 \pm 20\text{ mm}$ . Po jedné minutě obrábění

- dochází ke vzniku třísky elementní.
- Naměřená drsnost:  $R_a = 3,45 \pm 13,3 \mu\text{m}$ . Největší byla u nástroje s katastrofálním opotřebením č.v. 43.
  - Průběhy tlakových pnutí vykazují vyšší hodnoty gradientu u nové VBD než u opotřebené. Tuto skutečnost lze vysvětlit zřejmě vyšší hodnotou KT, která gradient tlakového pnutí snižuje.
  - Průběh mikrotvrdosti byl nejméně příhodný u v.č. 43.
  - Z rozboru mikrostruktury jsou evidentní změny mezi v.č. 38 a v.č. 43 / opotřebený katastrofálně/. V případě v.č. 38 jsou stopy na břit VBD velmi nevýrazné, v případě v.č. 43 jsou naopak velmi výrazné s mikrotrhlinami.
  - Z morfologie obou vzorků vyplývá, že u v.č. 38 se jedná pouze o jemné poruchy / mikrotrhlinky, stopy po VBD /. V případě v.č.43 se jedná o značně hrubé rýhy po nástroji s velmi drsným povrchem.

9. Obráběný materiál: 11 600

Řezný nástroj: VBD S20 CN DNNM 150408

---

- Řezný proces byl stabilní, charakteristické bylo podstatné zvýšení řezivosti VBD. Tvorba mikrolomů na hřbetě nástroje je nevýrazná, vzniklé třísky jsou obloukovité nebo elementní.
- Drsnost povrchů je vyšší oproti drsnosti vytvořené VBD S20-. Důvodem je výrazná rýha na vedlejších hřbetě, která drsnost ovlivňuje. / obr. 32 a 33 /
- Průběh zbytkového pnutí má u třech vzorků charakteristický průběh, tzn. tlakové pnutí pod povrchem přechází v pnutí tahové. U vzorků č. 34 a 36 je průběh nepříhodný, tzn., že na povrchu dochází k tahovým pnutím, která přecházejí do tlakových pnutí a následně do tahových pnutí. U vzorku č.36 dochází k velkým gradientům napětí pod povrchem.
- Průběh mikrotvrdosti byl nevhodný u v.č.36.
- Z analýzy mikrostruktury jsou patrné změny v kontuře drážky

po břitu nástroje. Vzorek č. 36 vytvořený opotřebovanou VBD /  $VB = 0,38 \text{ mm}$ ,  $VN = 0,40 \text{ mm}$  / vykazuje ve tvaru drážky určitou asymetrii, která patrně vznikla primární drážkou na hlavním hřbetu nástroje. Změny deformované povrchové vrstvy nejsou patrné.

- Morfologie povrchu v.č. 31 vykazuje stopy po jazycích a převalcích. Vzorek č. 36 pak vykazuje výrazné rýhy po nástroji a velké množství mikrotřísek.

10. Obráběný materiál: 11 373

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408 bez utvařeče

-----

- Řezný proces byl nespojitý, stužková tříska se postupně se vznikem žlábků na čele nástroje měnila na třísku vinutou v délce 100 mm. S postupným zvětšováním docházelo ke vzniku elementní třísky za současného zmenšování nákrůžků vlivem plastické deformace.
- ~~Drsnost~~  $R_a = 2,35 \div 5,1 \mu\text{m}$ .
- Zbytková pnutí vykazovala velmi ploché charakteristiky. Gradient tlakových napětí v závislosti na hloubce je nepatrný. V hloubce 0,005 mm je rozsah zbytkových pnutí  $- 22 \div - 131 \text{ MPa}$ .
- Průběhy mikrotvrdosti jsou téměř konstantní.
- Z analýzy mikrostruktury v.č. 54 a 56 je patrná změna v kontuře na břitu nástroje nového /č.v. 54/ a opotřebovaného /v.č. 56/. Deformace povrchové vrstvy je minimální.
- Z morfologie povrchu č.v. 54 vykazuje velmi jemné poruchy. Vzorek č. 56 vykazuje výrazné stopy po nástroji s velkým množstvím mikrotřísek.



11. Obráběný materiál: 11 373

Řezný nástroj: VBD S20 DNNM 150408

---

- Řezný proces plynulý, elementní tříška, malé opotřebení VBD.
- Dosažená drsnost  $R_a = 3,5 \div 5,5 \mu\text{m}$ .
- Zbytková pnutí vykazují velmi ploché charakteristiky.
- Zpevnění je výraznější u v.č. 52  $VB = 0,27 \text{ mm}$ ,  $VC = 0,72 \text{ mm}$ ,  $VN = 1,52 \text{ mm}$ .
- Z analýzy mikrostruktury jsou výraznější tvary u v.č. 52 než u v.č. 49, který byl obroben novým nástrojem. Nejsou patrné deformace povrchových vrstev. Ale ze vzhledu naleptané plochy / intenzivnější vliv leptadla na vrstvu bezprostředně pod povrchem / lze usuzovat, že povrchová vrstva má oproti základnímu materiálu jiné vlastnosti.
- Z morfologie povrchu v. č. 49 jsou patrné velmi jemné stopy po nástroji, v.č. 52 vykazuje výraznější rýhy po břitě a mikrotřísky.

12. Obráběný materiál: 11 373

Řezný nástroj: VBD S20 CN DNNM 150408

---

- Řezný proces plynulý, elementní tříška, malé opotřebení VBD.
- Dosažená drsnost  $R_a = 2,25 \div 6,5 \mu\text{m}$ . Nejhorší drsnost vytvořena VBD, kde  $VB = 0,13 \text{ mm}$ , ale  $VN = 0,51 \text{ mm}$ ,  $VT_n = 0,04 \text{ mm}$  a  $VN_n = 0,15 \text{ mm}$ . Tato skutečnost potvrzuje význam sekundární rýhy na mikrogeometrii povrchu, ale také nutnost kvalitativního hodnocení řezných nástrojů.
- Průběhy zbytkových pnutí mají nevýrazný plochý charakter s přechodem tlakového pnutí v tahové.
- Největší zpevnění je u v.č. 47 /  $VB = 0,26 \text{ mm}$ ,  $VC = 0,44 \text{ mm/}$ .
- Mikrostruktura v.č.44 vykazuje mírnou deformaci povrchové vrstvy, která je u v.č. 48 výraznější.
- Z morfologie hodnocených povrchů je zřetelné, že u v.č. 44 jsou patrné mírné stopy po břitě, pak u v.č. 48 jsou tyto rýhy výrazné se stopami mikrotřísek.



#### 5.4 Návrh matematického modelu predikce zbytkových pnutí

V automatizovaných technologických procesech je monitorizace stavu řezného nástroje nezbytnou podmínkou pro zajištění bezobslužného provozu.

Jedním z principů, kterých se využívá k monitorizaci stavu řezného nástroje, je změna řezných sil na základě změn řezného nástroje vlivem opotřebení; prostřednictvím různě konstruovaných dynamometrů nebo piezoelektrických siloměrných prvků. Problematika určování mezních hodnot řezných sil je zpravidla řešena pouze velikostí opotřebení řezného nástroje. Opotřebení řezného nástroje ale způsobuje vedle změn v řezných silách také změny v jednotlivých charakteristikách kvality povrchu.

Ze současných tendencí vlastního procesu automatizovaného obrábění, který je především charakterizován vysokými řeznými podmínkami a snahou o obrobení součásti při jednom upnutí na čisto, a dále stupněm rozvoje poznatků o integritě povrchů, pak vyplývá skutečnost, že při určování mezních velikostí řezných sil, musí být rozhodujícím kritériem právě kvalita vytvářené plochy. Zbytková pnutí jsou nejpoužívanějším kritériem zahrnujícím většinu mechanicko-fyzikálních i strukturních změn v povrchové vrstvě obrobené plochy, které zůstávají v materiálu i když příčiny, které je vyvolaly už nepůsobí. Velikost, smysl, gradient a hloubka pod povrchem, kam zasahují zbytková pnutí, celkem spolehlivě kvalifikují vhodnost způsobu a podmínek výroby zkoumaného povrchu obrobku.

Náročnost experimentálního výzkumu zbytkových pnutí si vynucuje použití dalších metod, které mohou predikovat smysl a velikost zbytkových pnutí.

Jednou z těchto metod je matematické modelování.

Cílem tedy je navrhnout a ověřit m a t e m a t i c k ý m o d e l, který by predikoval velikost a smysl zbytkových pnutí na základě měření jiných veličin, doprovázejících proces řezání.

Vlastní návrh matematického modelu vychází z experimentálního programu této práce. V dílčích experimentálních měřeních byly

postupně sledovány veličiny:

R - mikrogeometrie obrobeného povrchu

F - řezné síly

P - zbytková pnutí

Tuto trojici budeme chápat jako náhodný trojrozměrný vektor s normálním / trojrozměrným / rozdělením. Rozdělení tohoto vektoru je dále specifikováno třemi faktory:

- druh VBD
- druh obráběného materiálu
- opotřebení VBD

V dalším textu zvolíme pro jednoduchost zápisu označení veličin:

$$Y^{1/} = P$$

$$Y^{2/} = F$$

$$Y^{3/} = R$$

$$\vec{Y} = \begin{bmatrix} Y^{1/} \\ Y^{2/} \\ Y^{3/} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dále jsou uvažovány 3 druhy VBD  $N_1, N_2, N_3$  / tři úrovně (3)

faktoru 1 / a 4 druhy obráběného materiálu  $O_1, O_2, O_3, O_4$  / čtyři úrovně faktoru 2 /. (4)

Faktor 3 / opotřebení VBD / probíhá spojitě v jistém rozmezí. / označení OP / -

Jak již bylo uvedeno, předpokládáme, že veličina  $Y^{m/}$  má rozdělení  $N(\mu^{m/}, \sigma^{2m/})$  /  $m = 1, 2, 3$  /

O střední hodnotě  $\mu^{m/}$  předpokládáme, že je ovlivněna faktory v aditivním smyslu, konkrétně

$$\mu^{m/} = D^{m/} + O_1^{m/} + N_j^{m/} + P_{1j}^{m/} + \mathcal{E}^{m/} \quad / \text{OP} = \overline{OP} / \quad (5)$$

V modelu střední hodnoty /5/ je:

- $D^{m/}$  ... konstanta pro m-tou složku
- $O_1^{m/}$  ... efekt i-tého obráběného materiálu pro m-tou složku

- $N_j^{/m/}$  ... efekt j-té VBD pro m-tou složku  
 $P_{ij}^{/m/}$  ... interakční člen i-tého materiálu a j-té VBD pro m-tou složku  
 $OP$  ... hodnota naměřeného opotřebení  
 $\overline{OP}$  ... hodnota středního opotřebení  
 $\mathcal{X}^{/m/}$  ... regresní koeficient  
 $\mathcal{X}^{/m/} \cdot / OP - \overline{OP} /$  ... efekt faktoru opotřebení

V daném modelu není uvažována interakce opotřebení s ostatními faktory eventuálně interakční člen všech tří faktorů. Poměrně malý počet pozorování neumožňuje vytvoření spolehlivých odhadů těchto členů.

Můžeme tedy napsat

$$Y^{/m/} = \mu^{/m/} + \varepsilon^{/m/}, \text{ kde} \quad (6)$$

$\varepsilon^{/m/}$  je náhodná veličina s rozdělením  $N / 0, \sigma^{2/m/} /$ , které / jak předpokládáme / je společné pro všechny kombinace faktorů i, j, OP.

Celkově tedy můžeme napsat

$$\vec{Y} / i, j, OP / = \vec{\mu} / i, j, OP / + \vec{\varepsilon} \quad (7)$$

kde

$$\vec{\mu} / i, j, OP / = \begin{bmatrix} \mu^{/1/} / i, j, OP / \\ \mu^{/2/} / i, j, OP / \\ \mu^{/3/} / i, j, OP / \end{bmatrix}, \quad \vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon^{/1/} / \\ \varepsilon^{/2/} / \\ \varepsilon^{/3/} / \end{bmatrix} \quad (8)$$



Uvedením argumentů  $i, j$ , OP zdůrazňujeme závislost na faktorech.

Vektor  $\vec{\varepsilon}$  má podle předpokladu normální trojrozměrné rozdělení  $N(0, S_{\varepsilon})$ , kde  $S_{\varepsilon}$  je kovarianční matice vektoru  $\vec{\varepsilon}$ , tj.

$$S_{\varepsilon} = E \vec{\varepsilon} \cdot \vec{\varepsilon}^T \quad (9)$$

Prvek  $s_{ij}$  matice  $S_{\varepsilon}$  je

$$s_{ij} = E \varepsilon^{(i)} \cdot \varepsilon^{(j)} \quad , \text{ kde} \quad (10)$$

$E$  je symbol střední hodnoty.

Hlavním cílem daných úvah je dále stanovení odhadu zbytkových pnutí, známe-li úroveň jednotkových faktorů, tj.  $i, j$ , OP a jsou-li na daném obrobku naměřeny řezná síla a mikrogeometrie.

Za daných předpokladů lze stanovit více než pouze bodový odhad hodnoty zbytkových pnutí, a to konkrétně rozdělení pravděpodobnosti zbytkových pnutí při podmínce daných faktorů a naměřených hodnot řezné síly a mikrogeometrie povrchu.

Z teorie mnohorozměrného normálního rozdělení / např. /37// plyne, že střední hodnota tohoto rozdělení, které je opět normální, je

$$\omega^{(i,j,OP)} = -\frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial \varepsilon^{(j)}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon^{(i)}} \ln L \quad (11)$$

a rozptyl je

$$\frac{1}{S^{11}} \quad , \text{ kde}$$



$$\varepsilon^{/2/} = \varepsilon^{2/1,j,OP/} = \left| \begin{array}{c} Y^{/2/} - \omega^{/2/} / \\ i, j, OP \end{array} \right| \quad (12)$$

$$\varepsilon^{/3/} = \left| \begin{array}{c} Y^{/3/} - \omega^{/3/} / \\ i, j, OP \end{array} \right|$$

a dále / rozdělíme matici  $S_{\varepsilon}^{-1}$  na bloky /

$$S_{\varepsilon}^{-1} = \begin{array}{|c|c|} \hline s^{11} & / \overrightarrow{s}^{12,T} \\ \hline \overrightarrow{s}^{12} & S_i^{22} \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \quad (13)$$

$Y^{/2/}, Y^{/3/}$  jsou naměřené realizace při daných hodnotách faktorů.

Odhady efektů a konstant se provedou následujícím způsobem. /26/

Je dán soubor naměřených hodnot

$$Y_{ijk}^{/m/} \quad \begin{array}{ll} m = 1, 2, 3 & \\ i = 1, \dots, 4 & NI = 4 \\ j = 1, 2, 3 & NJ = 3 \\ k = 1, 2, \dots, 5 & NK = 5 \end{array} \quad (14)$$

$$N = NI \cdot NJ \cdot NK$$

$m$  ... značí měřenou veličinu

$i, j$  ... úrovně faktorů - obráběný materiál, VBD

$k$  ... pořadové číslo pozorování v dané skupině

Faktor opotřebení je přiřazen nahodile.

Potom / stříška značí odhad / :

$$\hat{D}^{/m/} = \frac{1}{N} \sum Y_{ijk}^{/m/}$$

$$\hat{O}_i^{/m/} = \frac{1}{NJ \cdot NK} \sum_{jk} Y_{ijk}^{/m/} - \hat{D}^{/m/}$$

$$\hat{N}_j^{/m/} = \frac{1}{NJ \cdot NK} \sum_{ik} Y_{ijk}^{/m/} - \hat{D}^{/m/}$$

$$\hat{P}_{ij}^{/m/} = \frac{1}{NK} \sum_k Y_{ijk}^{/m/} - \hat{O}_i^{/m/} - \hat{N}_j^{/m/} - \hat{D}^{/m/}$$

Odhad  $\hat{\mathcal{R}}^{/m/}$

$$y_{ijk}^{/m/} = Y_{ijk}^{/m/} - \hat{D}^{/m/} - \hat{O}_i^{/m/} - \hat{N}_j^{/m/} - \hat{P}_{ij}^{/m/}$$

$$x_{ijk} = OP_{ijk} - \overline{OP}, \quad \overline{OP} = \frac{1}{N} \sum_{ijk} OP_{ijk}$$

$$\hat{\mathcal{R}}^{/m/} = \frac{\sum_{ijk} x_{ijk} \cdot y_{ijk}}{\sum_{ijk} x_{ijk}^2}$$

Podle /5/ dostaneme  $\hat{\mathcal{R}}^{/m/}$  dosazením střížkových hodnot.

Dále:

$$\varepsilon_{ijk}^{/m/} = y_{ijk}^{/m/} - \hat{\omega}^{/m/}_{/1,j,OP/}$$

$$\hat{s}_{\varepsilon} = /s p r / = -\frac{1}{N} \sum_{ijk} \varepsilon_{ijk}^{/p/} \cdot \varepsilon_{ijk}^{/r/}$$

Použitím střížkových hodnot potom získáme při naměřených hodnotách  $y^{/2/}$ ,  $y^{/3/}$  a daných faktorech  $i, j, OP$  podmíněné rozdělení pro  $y^{/1/}$  tj. zbytková pnutí podle /10, 11, 12/.

#### 5.4.1 Ověření navrženého matematického modelu

Podle navrženého matematického modelu byl proveden výpočet zbytkových pnutí pro experimentálně zjištěný soubor údajů, který byl určen při naplňování cílů této práce.

Výpočty byly provedeny pomocí mikropočítače PMD - 85 na Katedře obrábění a montáže.

Naměřené charakteristiky mikrogeometrie povrchu byly pro výpočet uvažovány v aditivním smyslu, tedy

$$R = R_T + R_M + R_{ZD} + R_{ZI} + R_A + R_P + R_{PM} + R_Q + R_{3Z} + R_{3ZM} + P_T + W_T \quad / \mu m / \quad (15)$$

Řezné síly byly vyjádřeny ve tvaru

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_p + \vec{F}_f \quad / N / \quad (16)$$

Jak již bylo uvedeno, konečným důsledkem komplexního působení všech přítomných mechanismů opotřebení je stav funkčních ploch nástroje. Proto tedy bylo celkové opotřebení rovněž uvažováno v aditivním smyslu

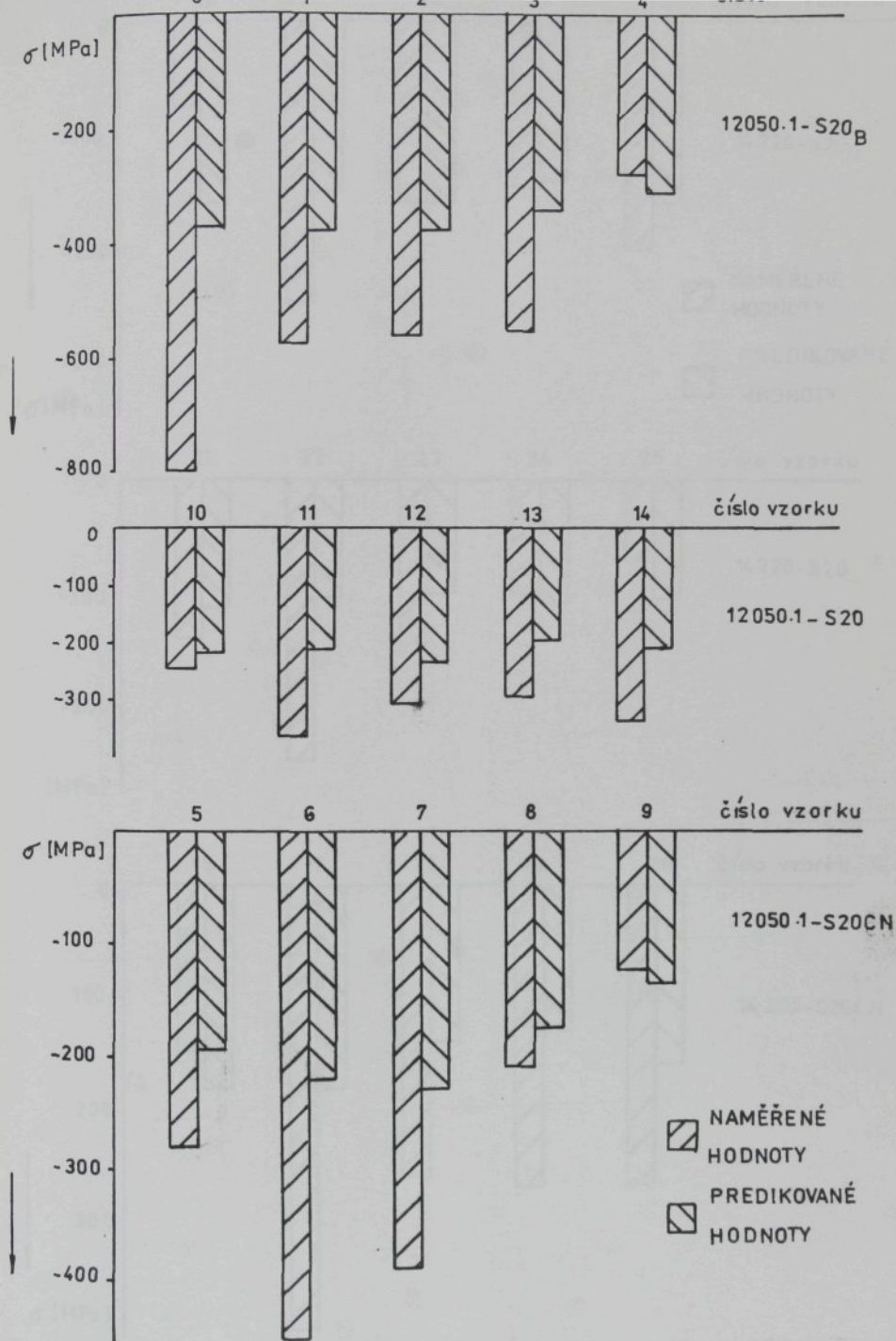
$$OP = VB + VC + KT + VN + VN_h + VTh + VTn \quad /mm/ \quad (17)$$

Zbytková pnutí byla porovnávána v hloubce 0,005 mm pod obroběným povrchem.

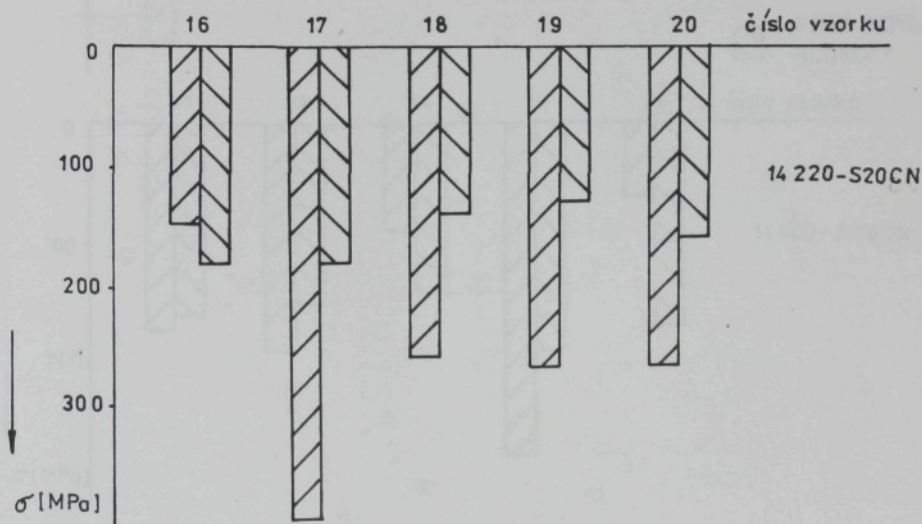
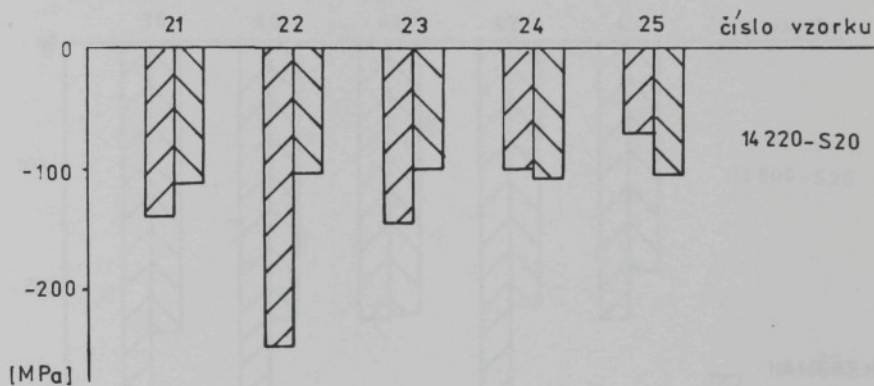
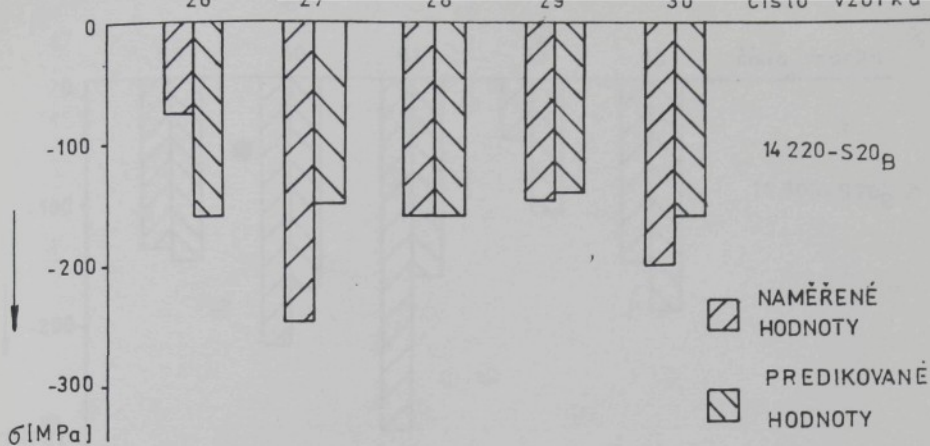
Predikované a naměřené hodnoty jsou uvedeny v diagramech na obrázcích 48, 49, 50, 51.

V diagramech je predikované zbytkové pnutí uváděno jako střední hodnota rozptyl  $\frac{1}{s} = \pm 125 \text{ MPa}$  pro všechny predikované hodnoty.

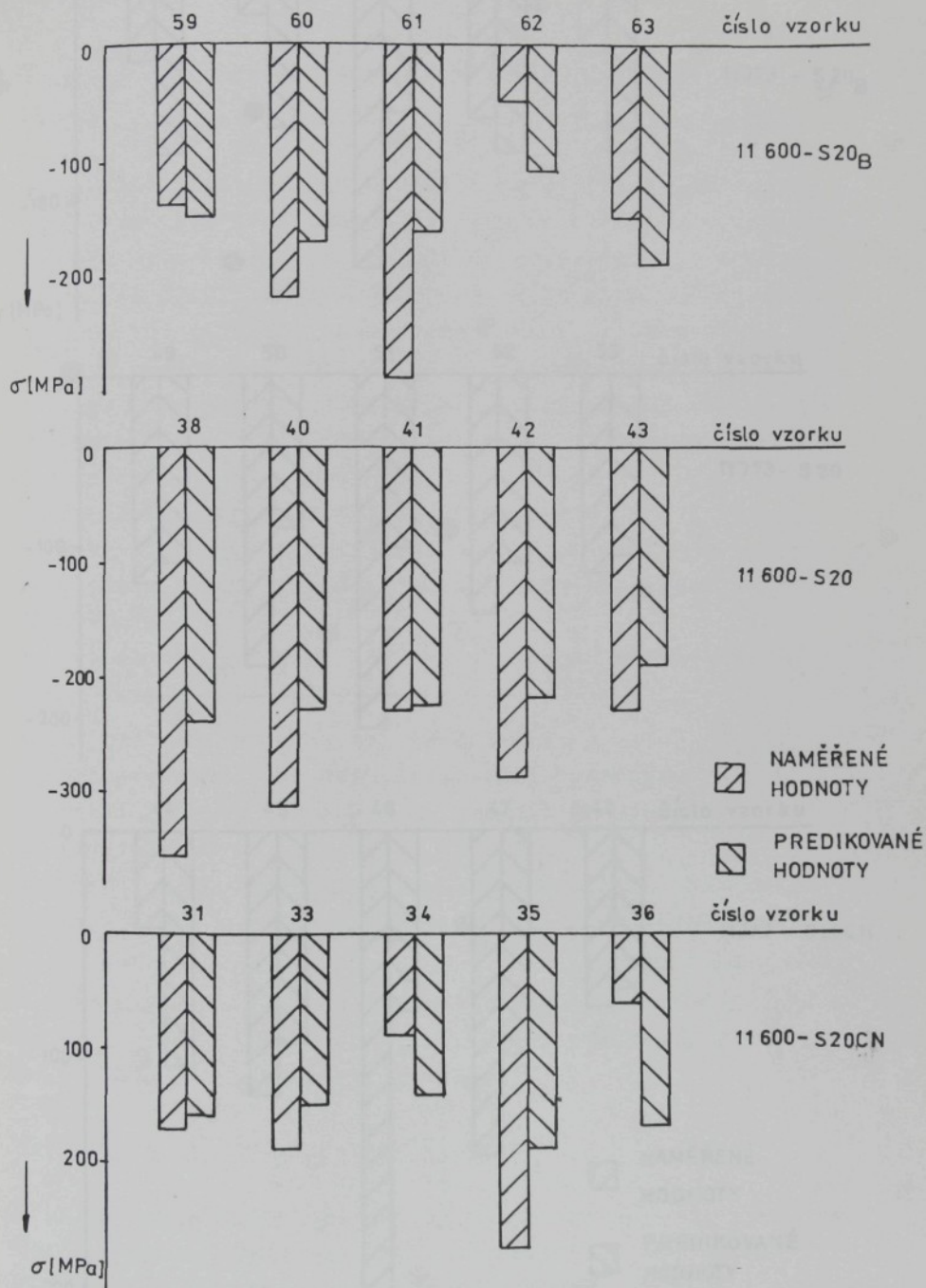




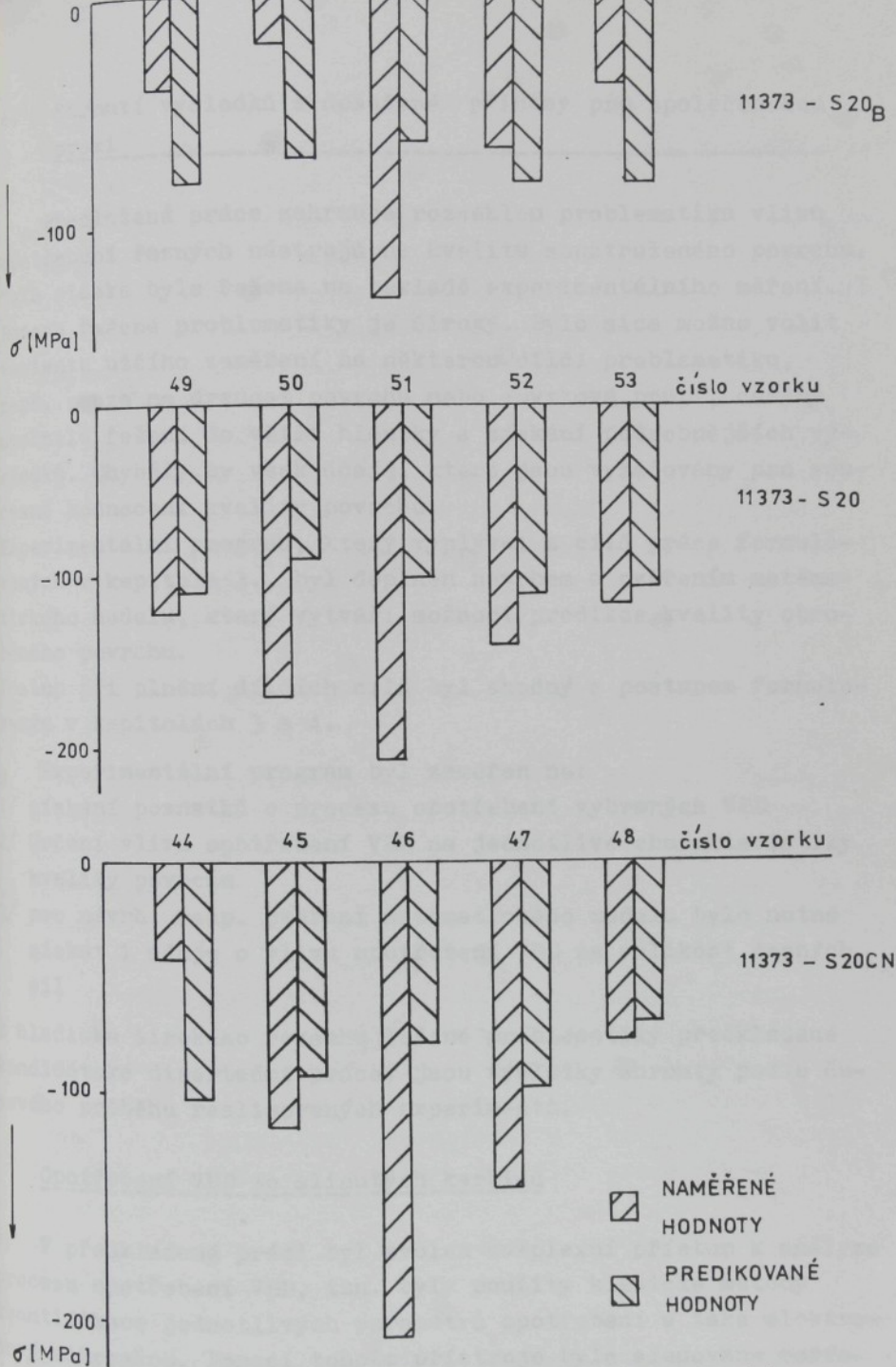
Obr. 48 Naměřené a predikované hodnoty zbytkových pnutí v hloubce 0,005 mm



Obr. 49 Naměřené a predikované hodnoty zbytkových  
pnutí v hloubce 0,005 mm



Obr. 50 Naměřené a predikované hodnoty zbytkových pnutí v hloubce 0,005 mm



Obr. 51 Naměřené a predikované hodnoty zbytkových pnutí v hloubce 0,005 mm



## 6. Shrnutí výsledků a dosažené přínosy pro společenskou praxi

Předložená práce zahrnuje rozsáhlou problematiku vlivu opotřebení řezných nástrojů na kvalitu soustruženého povrchu. Tato otázka byla řešena na základě experimentálního měření. Rozsah řešené problematiky je široký. Bylo sice možno volit variantu užšího zaměření na některou dílčí problematiku, např. pouze na drsnost povrchu nebo zbytková pnutí, což by umožnilo řešení do větší hloubky a získání podrobnějších výsledků. Chyběly by však údaje, které jsou vyžadovány pro současné hodnocení kvality povrchů.

Experimentální program, který vyplýval z cílů práce formulovaných v kapitole 3., byl doplněn návrhem a ověřením matematického modelu, který vytváří možnost predikce kvality obroběného povrchu.

Postup při plnění dílčích cílů byl shodný s postupem formulovaným v kapitolách 3 a 4.

Experimentální program byl zaměřen na:

- 1/ získání poznatků o procesu opotřebení vybraných VBD
- 2/ Určení vlivu opotřebení VBD na jednotlivé charakteristiky kvality povrchu
- 3/ pro návrh, resp. ověření matematického modelu bylo nutné získat i údaje o vlivu opotřebení VBD na velikost řezných sil

Z hlediska širokého rozsahu řešené problematiky předkládané kandidátské disertační práce, jsou výsledky shrnuty podle časového průběhu realizovaných experimentů.

### Opotřebení VBD ze slinutých karbidů

V předkládané práci byl zvolen komplexní přístup k analýze procesu opotřebení VBD, tzn. byly použity klasické metody kvantifikace jednotlivých parametrů opotřebení a také elektronový mikroskop. Pomocí tohoto přístroje byla sledována morfologie vybraných ploch nástroje, která rozlišuje charakteris-

tické znaky jednotlivých mechanismů opotřebení.

Výsledky kandidátské disertační práce lze formulovat následovně:

- Velký rozptyl opotřebení VBD je způsoben technologickou kvalitou při jejich výrobě. Konkrétně vznikají nedolísované oblasti a drobná vydrolení řezných hran. Tato skutečnost výrazně podporuje mechanismus opotřebení křehkým lomem.
- Předlísovaný utvařec na předmětných VBD S20 / S20CN/ DNMM 150408 se ukázal jako nevhodný při obrábění oceli 14 220.
- Povlakované VBD S20CN s povlakem TiC vykazují celkově lepší odolnost proti opotřebení než VBD S20; limitující technologickou veličinou jsou nedolísované oblasti řezných hran.
- Jednostranně používané VBD po opotřebení je možné využít pro další obrábění např. litin. Tento praktický návrh zohledňuje nedostatek slinutých karbidů.

Z hlediska výzkumu vnějších projevů opotřebení VBD lze za významné poznatky považovat:

- 1/ Opotřebení na vedlejších hřbetě ve tvaru drážek. Pomocí elektronového mikroskopu byla existence tohoto projevu opotřebení prokázána.
- 2/ Tvar žlábků i místo největší hloubky na čele nástroje je u předmětných VBD odlišné oproti běžně uváděným případům.
- 3/ Pomocí elektronové mikroskopie byl objasněn mechanismus odstraňování povlaku na čele nástroje, rovněž bylo zjištěno místo, kde k odstraňování povlaku dochází nejdříve.
- 4/ Opotřebení povlakovaných VBD na hřbetní ploše probíhá ve dvou pásmech. V prvním, širším pásmu, dochází k odstranění povlaku, v druhém pásmu pak dochází k vydrolování základního slinutého karbidu, což je s největší pravděpodobností způsobeno nekompaktností základního materiálu.
- 5/ Byl dokázán výrazný podíl na celkovém opotřebení VBD mechanismem křehkého lomu.

Provedené experimenty potvrdily nutnost komplexního sledování procesu opotřebení VBD při konkrétních zkouškách řezání,

protože celková odolnost proti opotřebení není specifickou vlastností nástrojového materiálu ani jiného parametru.

Shrnuté výsledky experimentálních měření určují, že je nezbytné:

- 1/ hodnotit projev opotřebení podle všech měnících se parametrů opotřebení
- 2/ hodnotit proces opotřebení řezných nástrojů kvalitativně, což je jediné možné měřítko stavu břitu řezného nástroje

### Opotřebení VBD a řezné síly

K poznatkům vzájemných souvislostí lze uvést:

1. Negativní geometrie předmětných VBD způsobuje, že hodnota  $F_f$  je relativně vysoká.
2. Při postupném opotřebení a menších hodnotách  $VB \sim 0,2$  nebyly zjištěny výraznější změny v řezných silách.
3. Nadměrným opotřebením /katastrofálním/ VBD dochází ke zvýšení řezných sil až o 100% u posuvové složky a o 200% u hlavní složky.
4. Opotřebení hřbetu  $VB$  a špičky  $VC$  VBD způsobuje zvýšení všech složek řezných sil. Vznik žlábků na čele nástroje naopak tento růst potlačuje.
5. Pro zjišťování souvislostí mezi opotřebením VBD a řeznými silami je nutné uvažovat opotřebení jako důsledek všech přítomných mechanismů. Vliv těchto mechanismů je charakterizován parametry opotřebení podle obrázku 14.
6. Vznik výrazného opotřebení špičky VBD byl doprovázen nárůstem přísluvové složky řezné síly.
7. Opotřebení mikrolomy nebo makrolomy /primární rýha/ zvýšilo především posuvové složky řezné síly.



## Opotřebení VBD a mikrogeometrie povrchu

Z hlediska hodnocení uvedeného rozboru pomocí topografie lze závěry formulovat takto:

1. V některých případech vykazovala nová VBD z počátku větší drsnost než VBD s určitým opotřebením.
2. Opotřebení VBD do  $VB \leq 0,2$  mm nemá vliv na drsnost povrchu.
3. Opotřebení VBD  $VB = 0,2 + 0,3$  mm jednoznačně nezpůsobuje zhoršení drsnosti povrchu.
4. Ke zcela jednoznačnému zhoršení drsnosti povrchu dochází při nadměrném opotřebení.
5. Pro zjišťování souvislostí mezi opotřebením VBD a drsností povrchu je vedle vybraných charakteristik mikrogeometrie povrchu nutné uvažovat opotřebení VBD jako konečný důsledek všech přítomných mechanismů. Vliv těchto mechanismů je charakterizován parametry opotřebení podle obrázku 14.

Z analýzy mikrostruktury obecně vyplývá:

- dochází ke změnám v profilu obrobku po břítu nástroje a posuvu mezi novým a opotřebeným nástrojem
- rovněž dochází u výrazně opotřebených nástrojů k deformaci povrchové vrstvy

Morfologie povrchu zcela jasně ukazuje na rozdíly mezi povrchem vytvořeným novým nástrojem a otupeným.

V případech nových VBD jsou patrné pouze jemné poruchy a to, stopy po nástroji a mikrotřísky.

V případech povrchů, které byly vytvořeny nástroji s různou velikostí opotřebení, pak z morfologie povrchu jsou patrné výrazné rýhy po břítu nástroje, převalky a jazyky včetně částic nalepeného materiálu.

## Opotřebení VBD a zbytková pnutí

Z provedených měření /60 průběhů zbytkových pnutí/ lze usuzovat, že při obrábění VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče, kdy dochází k výraznému žlábků na čele nástroje např. při obrábění



materiálu 12 050.1, dochází ke snižování velikosti zbytkového pnutí při současném zvětšování hloubky nulových zbytkových pnutí. Příklad je na obrázku 43.

Výrazné opotřebení např. vzorku č. 62, dochází ke změně průběhu i smyslu zbytkových pnutí. Příklad je uveden na obrázku 44. V případě obrábění VBD S20 DNNM 150408, kde převládá opotřebení VB a VC, dochází ke zvyšování velikosti tlakových zbytkových pnutí a ke snižování vyrovnávacích napětí tahových. Příklad těchto průběhů je na obrázku 45.

### Opotřebení VBD a mikrotvrdost

Z provedených průběhů a velikostí opotřebení podle parametrů VB a VC lze provést následující shrnutí:

1. Skupina - pevné spojení povrchové vrstvy se základním materiálem /21 vzorků/  
Opotřebení VBD :  $\overline{VB} = 0,20 \text{ mm}$  ,  $\overline{VC} = 0,34 \text{ mm}$
2. Skupina - konstantní průběh /13 vzorků/  
Opotřebení VBD :  $\overline{VB} = 0,13 \text{ mm}$  ,  $\overline{VC} = 0,21 \text{ mm}$
3. Skupina - nepatrné spojení /5 vzorků/ povrchové vrstvy se základním materiálem  
Opotřebení VBD :  $\overline{VB} = 0,34 \text{ mm}$  ,  $\overline{VC} = 0,54 \text{ mm}$
4. Skupina - porušení krystalové mřížky /8 vzorků/  
Opotřebení VBD :  $\overline{VB} = 0,30 \text{ mm}$  ,  $\overline{VC} = 0,42 \text{ mm}$

Dosažené přínosy předkládané práce lze shrnout do několika oblastí:

- Literární část práce postihuje současné přístupy k mechanismům vzniku nového povrchu, s přihlédnutím na vznik nového povrchu s negativním úhlem čela. Shrnuje poznatky o jednotlivých charakteristikách kvality obrobených povrchů.
- Je navržena metodika experimentálního výzkumu, která posti-

- huje jednotlivé cíle programu měření.
- Poznatky získané o procesech opotřebení pomocí elektronového mikroskopu i klasických metod určitě přispějí k objasnění mechanismů opotřebení. Budou podnětným poznatkem při vývoji SK ve VÚPM v Šumperku.
  - Výzkum jednotlivých charakteristik kvality povrchů s ohledem na opotřebení VBD je experimentálně ověřován pomocí řady experimentálních zařízení. Jsou zjištěny určité závislosti, které charakterizují interakce mezi opotřebovanými VBD a obráběnými materiály.
  - Pro praxi může mít velký význam navržený matematický model, který vychází ze základních veličin, charakterizujících proces řezání, umožňuje predikci jedné z nejvýznamnějších charakteristik kvality povrchů - zbytková pnutí.

Sledování vlivu opotřebení řezných nástrojů na kvalitu obrobek povrchů by bylo zřejmější pro obráběné materiály s výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi.

Obráběné materiály nebyly vybrány samoučelně, ale jedná se o běžně používané materiály v automobilovém průmyslu.

## 7. Závěr

Na základě dosažených výsledků práce je možné konstatovat, že cíle práce formulované v kapitole 3 byly splněny. Předkládaná práce tvoří určitý úsek do kompilace údajů o integritě povrchu, které v budoucnosti musí vytvořit integrální část technologické databanky.

Nakonec považují za svou povinnost poděkovat především svému školiteli Doc. Ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. za trpělivé vedení během externí a později interní aspirantury, i za cenné připomínky k vlastní práci.

Dále bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Jaroslavu Staňkovi, CSc. za jeho pomoc při práci na elektronovém mikroskopu na fakultě textilní.

Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Kracíkovi, CSc. za pomoc a konzultace při tvorbě matematického modelu.

Dále děkuji pracovníkům Katedry obrábění a montáže; Ing. Ivanu Mašínovi za pomoc při vlastních experimentech, Haně Vyvlečkové a Zdeně Heligarové pak za pečlivé nakreslení obrázků a grafů.

Liberec, duben 1989

Ing. Milan Vytlačil



## Seznam použité literatury

- / 1/ ABEEBE, M.T.: Theoretical analysis of the basic mechanics of orthogonal metal cutting and abrazeive processes. /A Doctor's Dissertation/. Manhattan 1984. Kansas State University.
- / 2/ BAILEY, J. a kol.: Surface integrity in Machining AISI 4340 steel. Journal of Engineering for Industry, august 1976.
- / 3/ BÁTORA, B.: Požiadavky na kontrolu akosti obrábaných povrchov. In: Meranie a meracia technika v strojárstve. DTČSVTS Žilina 1987.
- / 4/ BEKÉS, J. - ANDONOV, J.: Analýza a syntéza strojárských objektov a procesov. Bratislava, ALFA 1986.
- / 5/ BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: Teória obrábania. Bratislava, ALFA 1983.
- / 6/ BUMBÁLEK, B.: Integrita povrchu a její význam pro hodnocení exploatačních vlastností funkčních ploch součástí. In: Obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov. DTČSVTS Bratislava 1985.
- / 7/ BUMBÁLEK, B. a kol.: Charakteristiky mikrogeometrie povrchu a jejich hodnocení kvantitativní metodou na základě statistické analýzy. /Výzkumná zpráva/. Brno, VÚ 070 1983
- / 8/ ČOP, V.: Štúdia priebehu zmien rozmeru a tvaru hrotu nástroja pri obrábaní ložiskových krúžkov. /Kandidátská disertace/. Košice 1969. VŠT.
- / 9/ ČSN 014450. Drsnost povrchu. Pojmy a definice. 1980.
- /10/ ČSN 014451. Drsnost povrchu. Základní charakteristiky a číselné hodnoty. 1981.
- /11/ DEARNLEY, P.A. - TRENT, E.M.: Wear mechanismus of coated carbide tools. Metals Technology, vol.9, 1982.



- /12/ DUNAY, G.: Problémy monitorizace stavu technologického procesu. In: Rozvoj automatizácie strojárskej výroby. Košice 1985.
- /13/ FIELD, M. - KAHLES, J.: Review of Surface Integrity of Machined Components. Annals of the CIRP Vol. 20, 1971.
- /14/ Měření drsnosti povrchů podle DIN-ISO pro HOMMEL - TES-TER. Firemní materiál.
- /15/ HOUDEK, J.: Drsnost obrobeneho povrchu jako kritérium opotrebení břitu ze slinutých karbidů. In: Nástroje. DTČSVTS Bratislava 1986.
- /16/ HOUDEK, J.: Opotřebení břitu výkonných slinutých karbidů s povlaky a bez wolframových SK a problematika technologických zkoušek řezivosti. Strojírenství č.6/7, 1984.
- /17/ HRUBÝ, J.: Deformace a zpevnění obráběných povrchů. In: Konferencia technológov obrábania. DTČSVTS Bratislava 1986.
- /18/ HUMÁR, A.: Proces opotrebování slinutých karbidů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů. /Kandidátská disertace/. Brno 1982. VAAZ.
- /19/ HUMÁR, A. - BUMBÁLEK, B.: Vzájemná souvislost řezné síly a opotrebení nástroje. Strojírenství č. 6/7, 1984.
- /20/ CHUBB, J.P. a kol.: Comparison of wear behaviour of single- and multilayer coated carbide cutting tools. Metals Technology, July 1980.
- /21/ JAKOBSON, M.O.: Šerochovatost, naklep i ostatočnyje naprjaženija pri mehaničeskoj obrabotke. Moskva, Mašgiz 1956.
- /22/ KADERÁBEK, J.: Matematika III. Skripta VŠST Liberec 1979.
- /23/ KAFKA, J.: Ověření vlivu některých technologických procesů na kvalitu povrchové vrstvy u slitin titanu. /Kandidátská disertace/. Praha 1988. ČVUT.

- /24/ MORI, M. a kol.: Variation of machined surface roughness with progressing of tool wear. Bulletin Japan Society of Pree. Engg. Vol. 19/3, 1985.
- /25/ LESKOVAR, P. - PEKLENIK, J.: Influences Affecting Surface Integrity in the Cutting Process. Annals of the CIRP Vol. 31, 1982.
- /26/ LIKEŠ, J.: Navrhování průmyslových experimentů. Praha SNTL 1968.
- /27/ LOLADZE, T.N.: Pročnost i iznosostojkost režuščego instrumenta. Moskva 1982.
- /28/ NECKÁŘ, F.: Vliv technologie výroby na kvalitu povrchové vrstvy a funkční vlastnosti části strojů. In: Intenzifikacia a optimalizacia procesu rezania. DTČSVTS Žilina 1982.
- /29/ NECKÁŘ, F.: Vliv řezného procesu na integritu povrchu. In: Obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov. DTČSVTS Bratislava 1985.
- /30/ ONDRA, J.: Optimalizace řezných podmínek na NC soustruzích s ohledem na obrobiteľnosť speciálních materiálů zbrojní výroby. /Kandidátská disertace/. Brno 1986 VAAZ.
- /31/ OŠTÁDAL, B.: Tvorba mikrogeometrie povrchu v procese obrábění. In: Obrábanie ťažkoobrobiteľných materiálov. DTČSVTS Bratislava 1985.
- /32/ PERCY, J.H. - UEDA, K.: The Concepts of Fracture Mechanics Applied to Metal Cutting. International Conference on Manufacturing Engineering, Melbourne 1980.
- /33/ PLUHAŘ, J. - KORITTA, J.: Strojírenské materiály. 2.vydání Praha, SNTL/ALFA 1977.
- /34/ POVIC, A.: Trošenje okretnih reznih pločica od tvrdog metala pri tovaranju. Strojarstvo 27, 1985.
- /35/ POWELL, J.W. a kol.: Cutting Tool Sensors. The Carbide and Tool Journal. May - June 1985.

- /36/ PŘIKRYL, Z. - MUSÍLKOVÁ, R.: Teorie obrábění. 2.vydání  
Praha SNTL/ALFA 1975.
- /37/ RAO, S.R.: Linějnýje statističeskije metody. Moskva 1968.
- /38/ SMIRNOV, R.J.: Koncentrirovannyj iznos rezcov i evo vli-  
janije na šerochovatosť obrabotannoj naverchnosti. Vestnik  
mašinostrojenija no 8, 1983.
- /39/ TLUSTÝ, J. - ANDREWS, G.C.: A critical review of sensors  
for unmanned machining. Annals of the CIRP vol. 32/2, 1983.
- /40/ TLUSTÝ, J. - MASOOD, Z.: Chipping and Breakage of Carbide  
Tools. Journal of Engineering for industry. Vol. 100, 1978.
- /41/ TRENT, E.M.: Rezanije metallov. Moskva 1980.
- /42/ UEHARA, K. a kol.: Automatic tool wear monitoring in NC  
turning. Annals of the CIRP Vol. 32/2, 1983.
- /43/ VASILKO, K.: Prognóza rozvoja obrábania v podmínkach auto-  
matizace. In: Konferencia technologov obrábania. DTČSVTS  
Bratislava 1987.
- /44/ VASILKO, K. a kol.: Prognóza zlepšovania obrábatelnosti  
kovových materiálov. /Správa o riešení kontrolovateľnej  
etapy E 04 hlavnej úlohy ŠPZV č.III-1-5/. Žilina 1988.
- /45/ VASILKO, K. a kol.: Štúdium napätostných a deformačných  
stavov vo vzťahu k obrábatelnosti ocelí. /Výzkumná zprá-  
va/. Žilina 1983. VŠDS.
- /46/ VLACH, B.: Teoretické základy jemného obrábění a kon-  
strukce a konstrukce experimentálního zařízení. /Doktor-  
ská disertace/. Praha 1989. ČVUT.
- /47/ VYTLAČIL, M.: Příspěvek k analýze opotřebení řezných ná-  
strojů. /Písemná část ke kandidátské odborné zkoušce/.  
Liberec 1986, VŠST.
- /48/ VYTLAČIL, M.: Příspěvek ke studiu vlivu opotřebení řez-  
ných nástrojů na kvalitu soustružených povrchů. /Výzkum-  
ná zpráva/. Liberec 1989, VŠST.



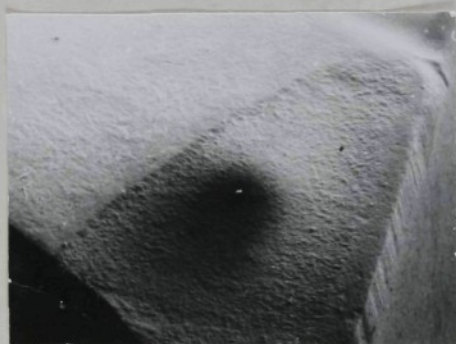
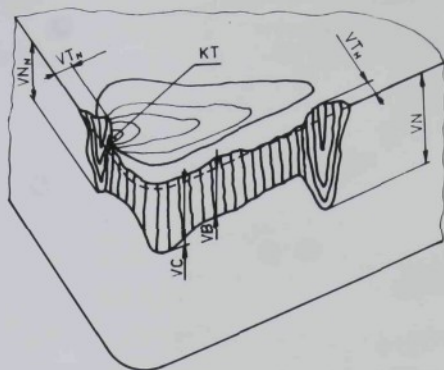
- /49/ VYTLAČIL, M. a kol.: Výzkum řezivosti břitových destiček z PMRO. /Výzkumná zpráva/. Liberec 1988, VŠST.
- /50/ VYTLAČIL, M. - MAŠÍN, I.: Výzkum opotřebení břitových destiček ze slinutých karbidů. /Výzkumná zpráva/. Liberec 1989, VŠST.
- /51/ VYTLAČIL, M. - MAŠÍN, I.: Spolehlivost řezných nástrojů ve výrobních systémech. In: Projektování výrobních procesů. ČSVTS Jiskra Tábor 1989.
- /52/ VYTLAČIL, M. - BURIAN, J.: Monitorizace v ATP. In: Projektování výrobních procesů. ČSVTS Jiskra Tábor 1989.
- /53/ VYTLAČIL, M. - BURIAN, J.: Monitorizační subsystémy v podmínkách ATP. In: Sborník prací Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, Liberec, VŠST 1987.
- /54/ VYTLAČIL, M. - BURIAN, J.: Vzájemná souvislost řezné síly a opotřebení řezného nástroje při monitorizaci v ATP. / 7.Vědecké symposium VŠST Liberec - TU Dresden /. Liberec 1989.
- /55/ VYTLAČIL, M. - MAŠÍN, I.: Trvanlivost řezných nástrojů v podmínkách ATP. Strojírenská výroba, 1989 / v tisku/.
- /56/ VYTLAČIL, M. - MAŠÍN, I.: K pravděpodobnostnímu hodnocení trvanlivosti řezných nástrojů. In: Sborník prací Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, Liberec, VŠST 1987.
- /57/ VYTLAČIL, M. - MAŠÍN, I.: Řezné vlastnosti PM rychlořezných ocelí. In: Sborník prací Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, Liberec, VŠST 1989.



## P Ř Í L O H A

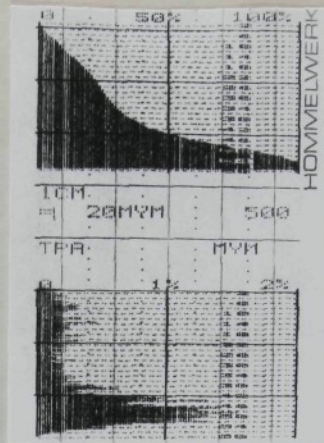
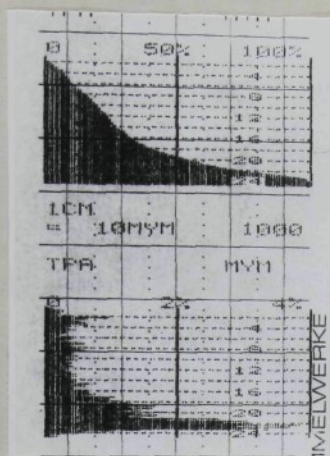
### OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ A CHARAKTERISTIKY KVALITY POVRCHU

1. obráběný materiál: 12050.1  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče
2. obráběný materiál: 12050.1  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408
3. obráběný materiál: 12050.1  
řezný nástroj: VBD S20CN DNMM 150408
4. obráběný materiál: 14220  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče
5. obráběný materiál: 14220  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408
6. obráběný materiál: 14220  
řezný nástroj: VBD S20CN DNMM 150408
7. obráběný materiál: 11600  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče
8. obráběný materiál: 11600  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408
9. obráběný materiál: 11600  
řezný nástroj: VBD S20CN DNMM 150408
10. obráběný materiál: 11373  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408 bez utvařeče
11. obráběný materiál: 11373  
řezný nástroj: VBD S20 DNMM 150408
12. obráběný materiál: 11373  
řezný nástroj: VBD S20CN DNMM 150408



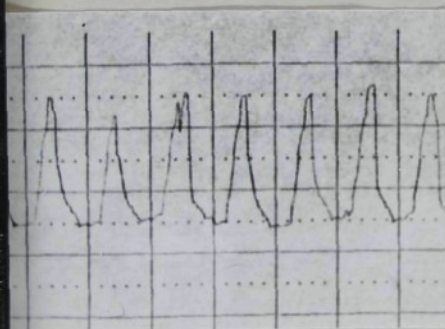
vz. č. 4

| č.v. | T [min] | VB [mm] | VC [mm] | KT [mm] | VN [mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0                    | 0                    | 0                    |
| 1    | 3,5     | 0,15    | 0,22    | 0,01    | 0,15    | 0,01                 | 0,01                 | 0,08                 |
| 2    | 10      | 0,21    | 0,25    | 0,08    | 0,21    | 0,02                 | 0,01                 | 0,10                 |
| 3    | 20      | 0,25    | 0,30    | 0,12    | 0,25    | 0,12                 | 0,04                 | 0,12                 |
| 4    | 24,6    | 0,33    | 0,43    | 0,22    | 0,33    | 0,27                 | 0,10                 | 0,16                 |

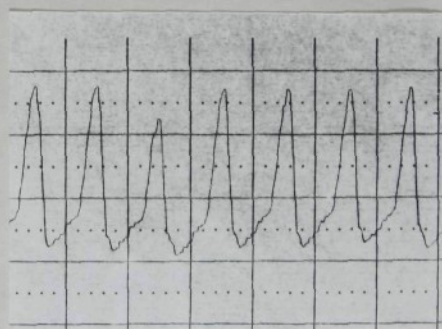


|      |     |          |
|------|-----|----------|
| UT   | ::= | 0.50NM/S |
| LT   | ::= | 4.8 NM   |
| RT   | ::= | 23.20NM  |
| RH   | ::= | 23.20NM  |
| RZ-D | ::= | 21.90NM  |
| RZ-I | ::= | 22.40NM  |
| RH   | ::= | 15.40NM  |
| RP   | ::= | 15.90NM  |
| RPM  | ::= | 15.10NM  |
| RQ   | ::= | 6.50NM   |
| RZM  | ::= | 19.70NM  |
| RZM  | ::= | 21.10NM  |
| PT   | ::= | 24.70NM  |
| WT   | ::= | 1.80NM   |
| NP   | ::= | 40       |

|      |    |           |
|------|----|-----------|
| UT   | == | 0,50MVMS  |
| LT   | == | 4,8 MM    |
| RT   | == | 50,00MVMS |
| RM   | == | 55,40MVMS |
| RE-D | == | 52,40MVMS |
| RE-I | == | 53,70MVMS |
| RA   | == | 12,50MVMS |
| RP   | == | 39,10MVMS |
| RPM  | == | 36,10MVMS |
| RO   | == | 15,30MVMS |
| RGE  | == | 44,50MVMS |
| RGNM | == | 50,20MVMS |
| PT   | == | 57,10MVMS |
| BT   | == | 0,50MVMS  |
| NR   | == | 40        |

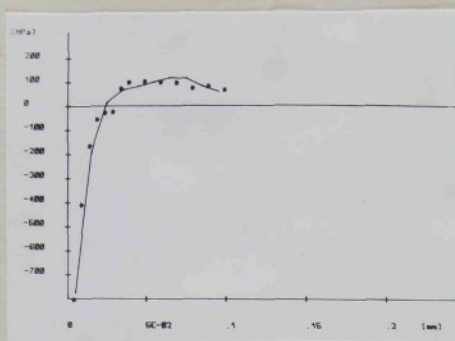


VZ. č. 0

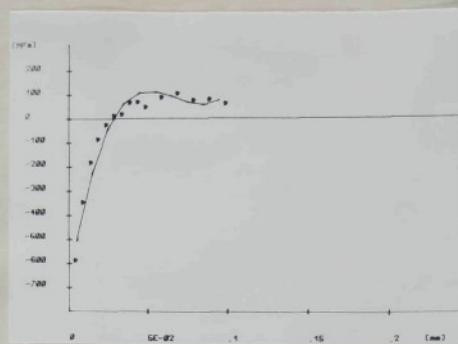


VZ. č. 4

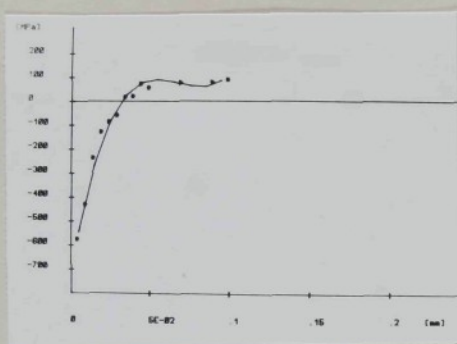




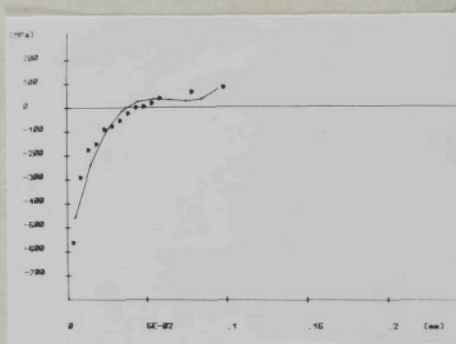
VZ. č.0



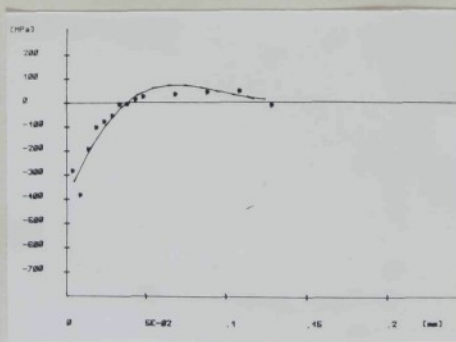
VZ. č.1



VZ. č.2

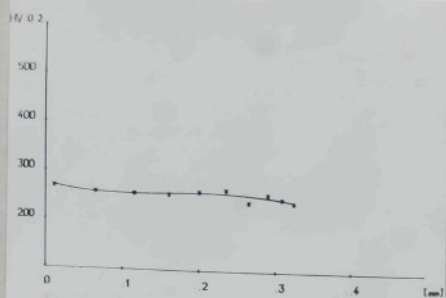


VZ. č.3

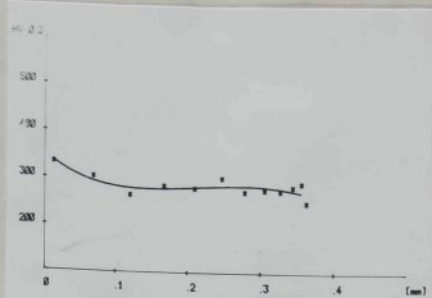


VZ. č.4

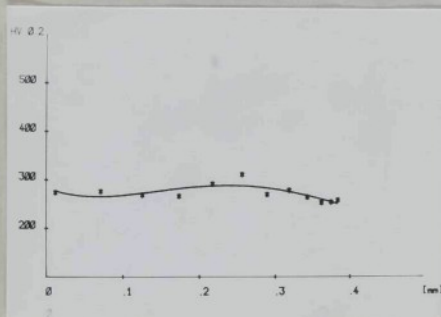




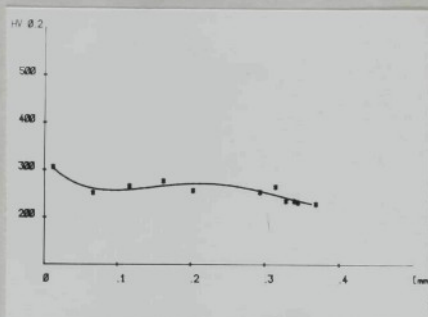
VZ. č.0



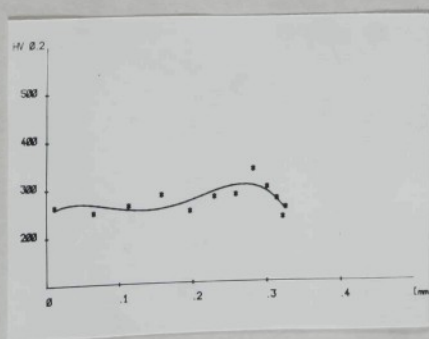
VZ. č.1



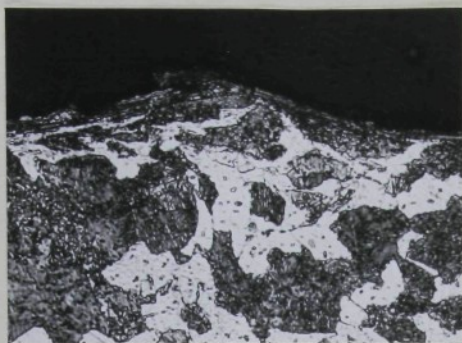
VZ. č.2



VZ. č.3

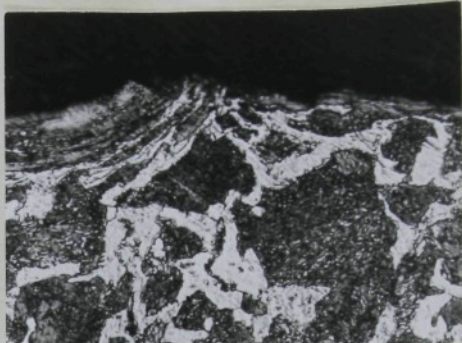


VZ. č.4



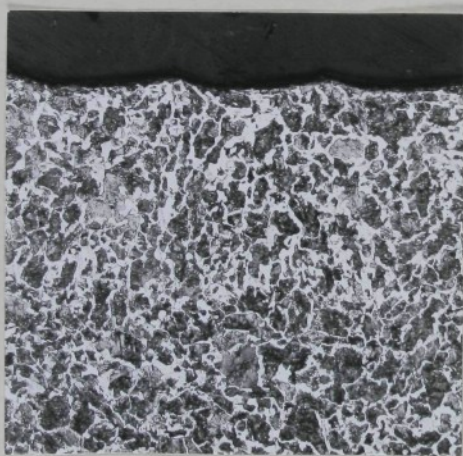
VZ. č. 0

500x



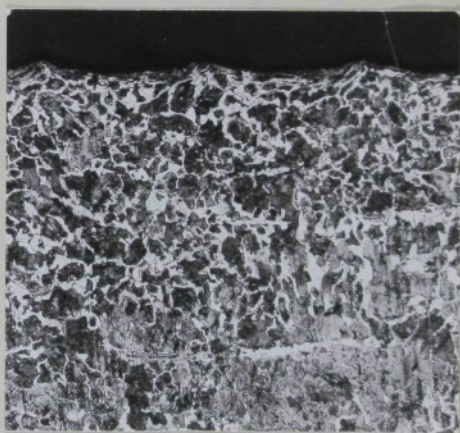
VZ. č. 4

500x



VZ. č. 0

100x



VZ. č. 4

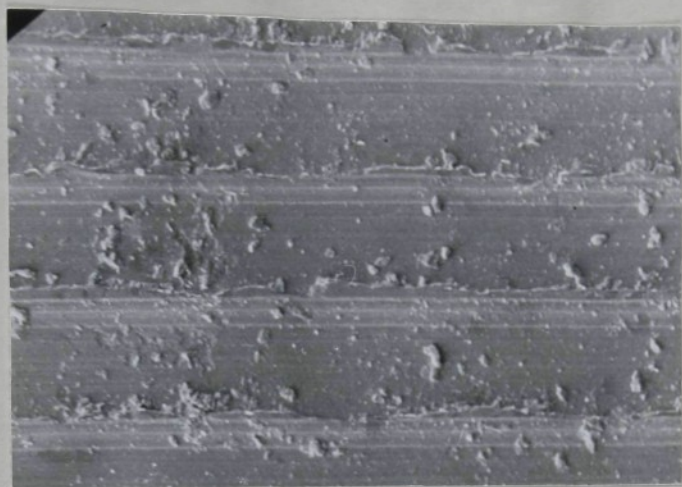
100x

# V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 12050 1

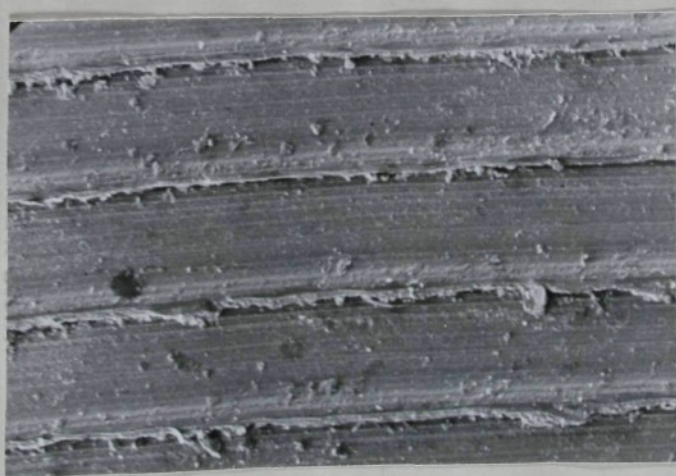
ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBDS 20<sub>B</sub> DNMM 150408

REZ. UTVAŘEČ



VZ.č 0

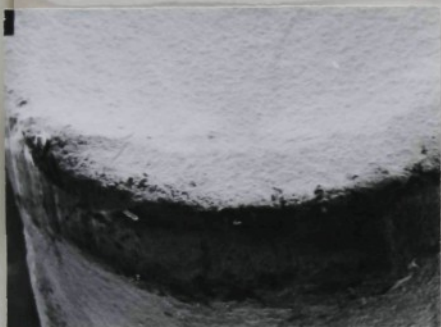
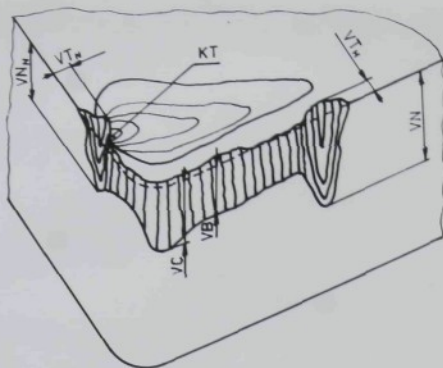
100 x



VZ č.4

100 x



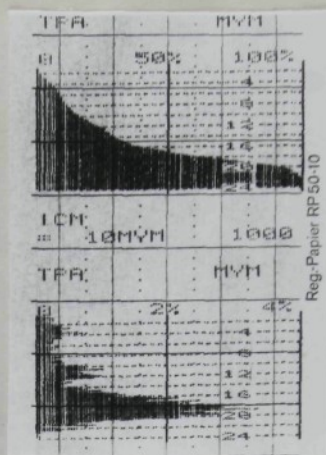
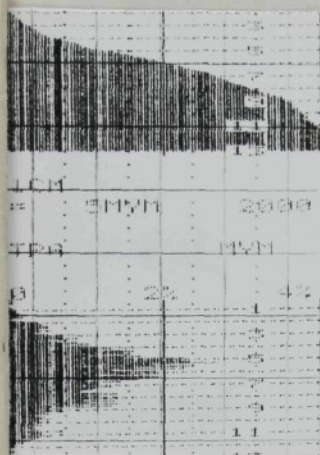


VZ. č. 14

| $T[\text{min}]$ | $VB[\text{mm}]$ | $VC[\text{mm}]$ | $KT[\text{mm}]$ | $VN[\text{mm}]$ | $VT_H[\text{mm}]$ | $VT_N[\text{mm}]$ | $VN_N[\text{mm}]$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | 0                 |
| 4               | 0,14            | 0,28            | 0,008           | 0,14            | 0,15              | 0,06              | 0,14              |
| 7               | 0,23            | 0,23            | 0,02            | 0,23            | 0,15              | 0,12              | 0,20              |
| 96              | 0,25            | 0,33            | 0,01            | 0,25            | 0,10              | 0,15              | 0,16              |
| 21              | 0,30            | 0,35            | 0,01            | 0,30            | 0,11              | 0,11              | 0,14              |

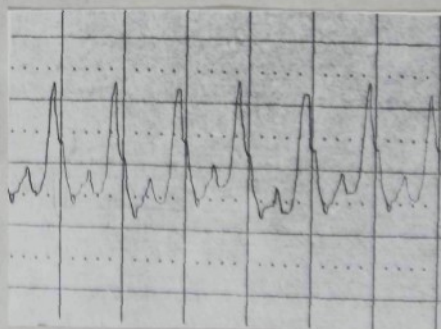
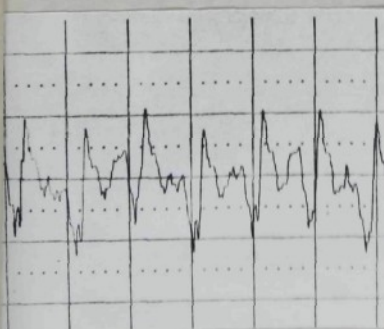
I OPOTŘEBENÍ VBD





|    |   |          |
|----|---|----------|
| UT | = | 0.50MM/5 |
| LT | = | 4.8 MM   |
| RT | = | 12.05MM  |
| RM | = | 12.05MM  |
| RE | = | 11.70MM  |
| RZ | = | 11.50MM  |
| RA | = | 1.75MM   |
| RI | = | 0.70MM   |
| RP | = | 0.20MM   |
| RQ | = | 0.20MM   |
| RS | = | 0.05MM   |
| RZ | = | 0.70MM   |
| PT | = | 10.75MM  |
| UT | = | 0.05MM   |
| NR | = | 120      |
| NI | = |          |
| NI | = |          |

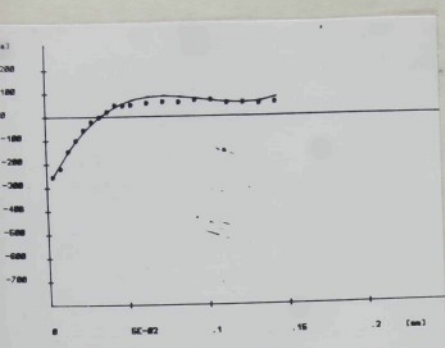
|    |   |          |
|----|---|----------|
| UT | = | 0.50MM/5 |
| LT | = | 4.8 MM   |
| RT | = | 24.00MM  |
| RM | = | 21.00MM  |
| RE | = | 21.40MM  |
| RZ | = | 21.50MM  |
| RA | = | 4.20MM   |
| RI | = | 14.70MM  |
| RP | = | 14.70MM  |
| RQ | = | 0.20MM   |
| RS | = | 10.00MM  |
| RZ | = | 10.00MM  |
| PT | = | 23.60MM  |
| UT | = | 1.00MM   |
| NR | = | 62       |
| NI | = |          |
| NI | = |          |



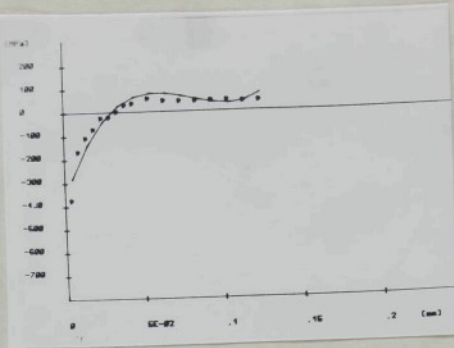
Z. č. 10

VZ. č. 14

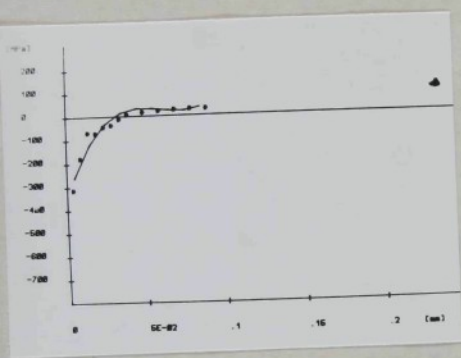
II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



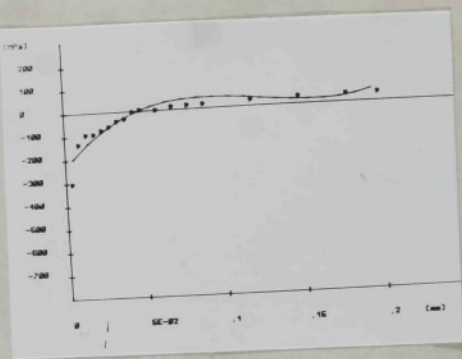
VZ. č.10



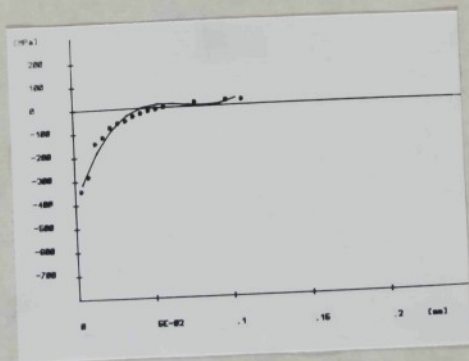
VZ. č.11



VZ. č.12

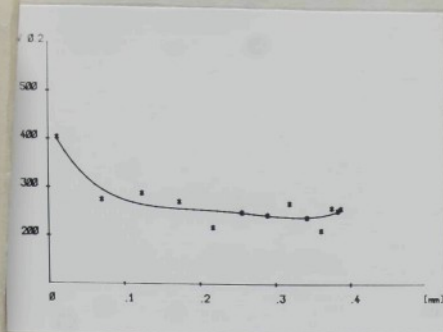


VZ. č.13

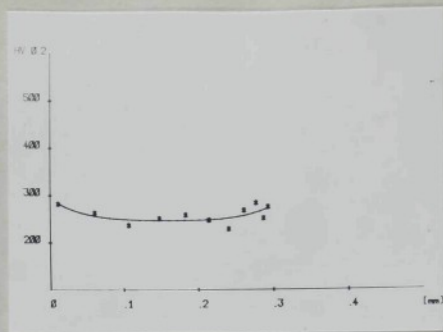


VZ. č.14

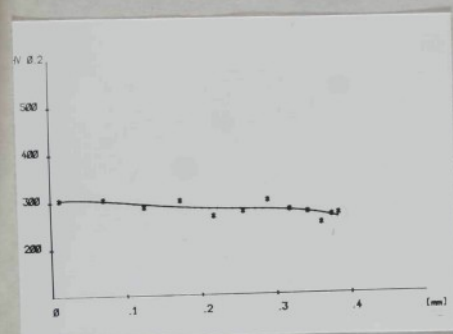
# III PRŮBĚHY ZBYTKOVÉHO PNUTÍ



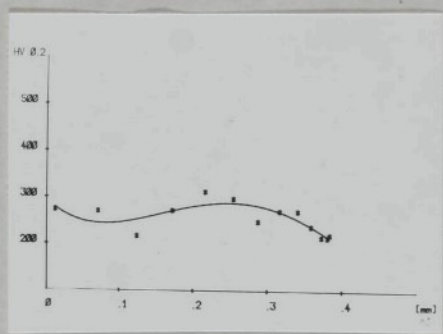
VZ.č.10



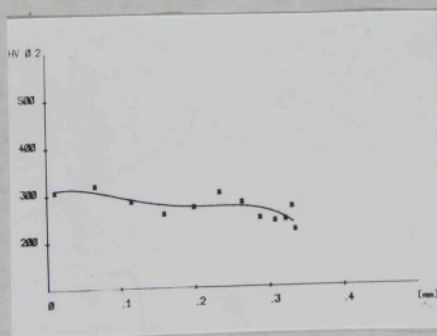
VZ.č.11



VZ.č.12



VZ.č.13



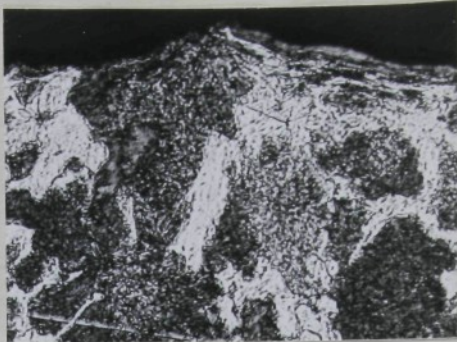
VZ.č.14





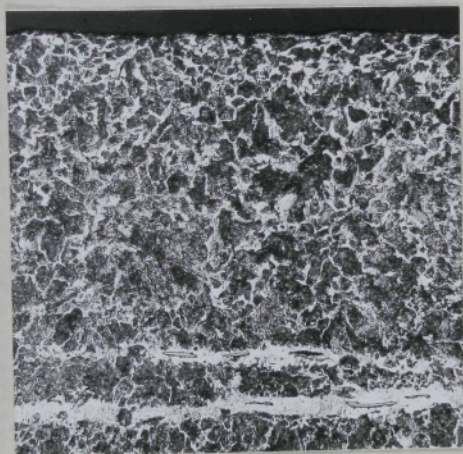
VZ.č.10

500x



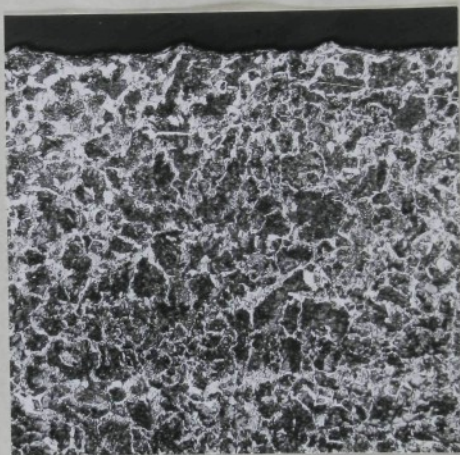
VZ.č.14

500x



VZ.č.10

100x



VZ.č.14

100x

## V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 2 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 12 050.1

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBD S20 DNMM 15 0408





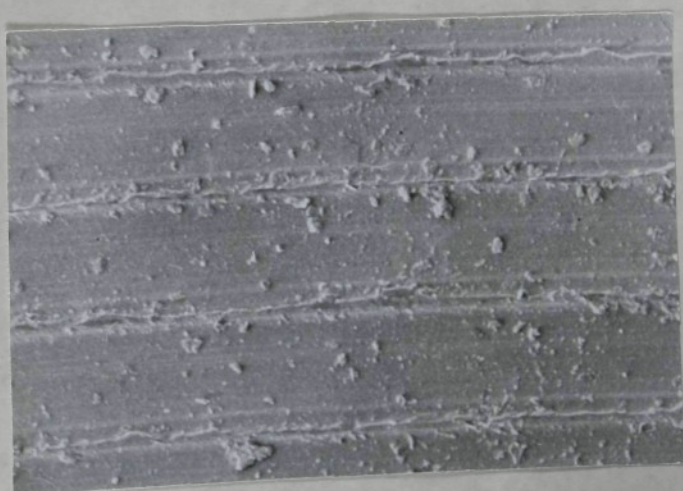
0 x

408



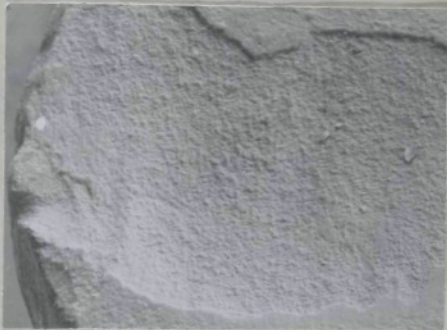
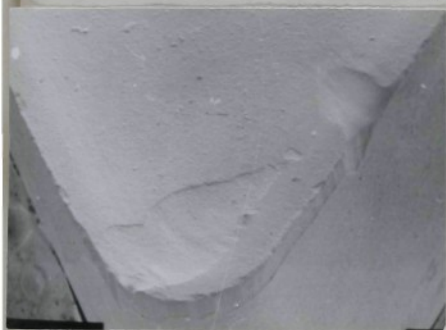
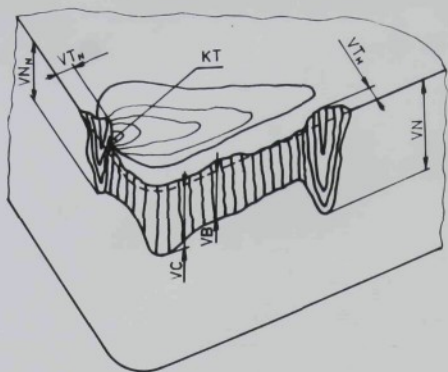
VZ.č.10

100 x



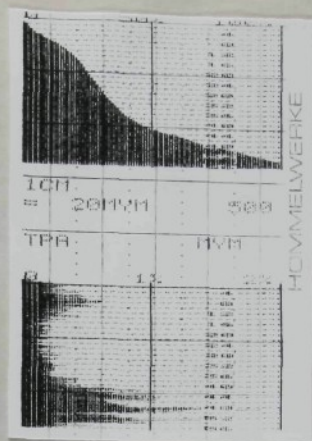
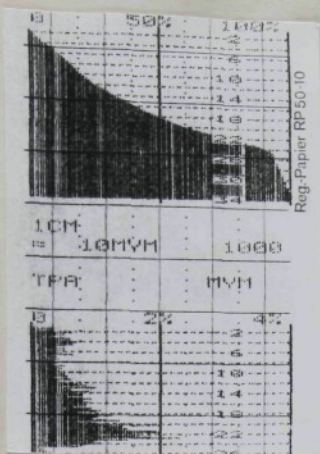
VZ.č.14

100 x



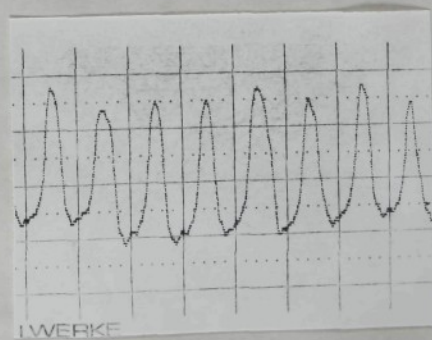
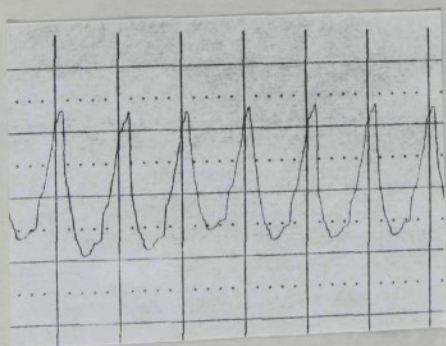
VZ. č. 9

| V. | T [min] | VB [mm] | VC [mm] | KT [mm] | VN [mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 5  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0                    | 0                    | 0                    |
| 6  | 5       | 0,10    | 0,11    | 0,02    | 0,10    | 0,04                 | 0,01                 | 0,08                 |
| 7  | 16      | 0,14    | 0,24    | 0,14    | 0,14    | 0,10                 | 0,03                 | 0,14                 |
| 8  | 17      | 0,22    | 0,24    | 0,12    | 0,22    | 0,05                 | 0,04                 | 0,12                 |
| 9  | 23      | 0,30    | 0,36    | 0,11    | 0,43    | 0,08                 | 0,09                 | 0,13                 |



|      |          |
|------|----------|
| UT   | 0.50mm/s |
| LT   | 4.8mm    |
| RT   | 27.50μm  |
| RH   | 25.70μm  |
| RZ-D | 22.40μm  |
| RZ-I | 23.70μm  |
| RA   | 5.70μm   |
| RP   | 12.40μm  |
| RM   | 13.50μm  |
| RQ   | 16.70μm  |
| RIZ  | 19.10μm  |
| RIZI | 19.40μm  |
| PT   | 33.80μm  |
| WT   | 16.50μm  |
| NR   | 40       |

|      |          |
|------|----------|
| UT   | 0.50mm/s |
| LT   | 4.8mm    |
| RT   | 59.60μm  |
| RH   | 57.90μm  |
| RZ-D | 54.20μm  |
| RZ-I | 55.30μm  |
| RA   | 15.00μm  |
| RP   | 35.30μm  |
| RM   | 33.00μm  |
| RQ   | 16.90μm  |
| RIZ  | 45.10μm  |
| RIZI | 49.40μm  |
| PT   | 56.00μm  |
| WT   | 16.00μm  |
| NR   | 40       |

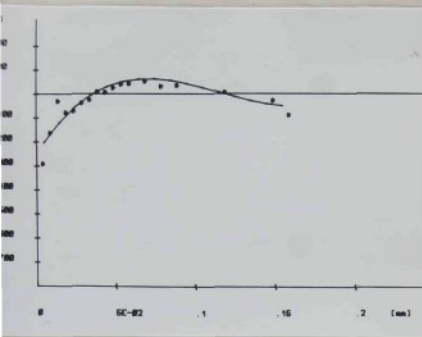


VZ. č. 5

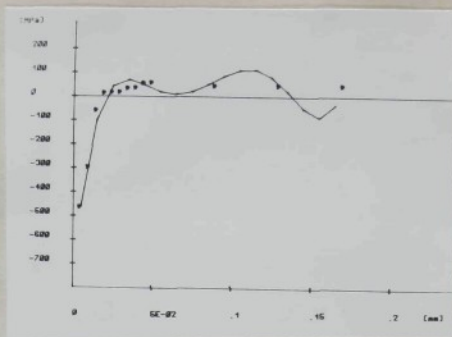
VZ. č. 9

II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU

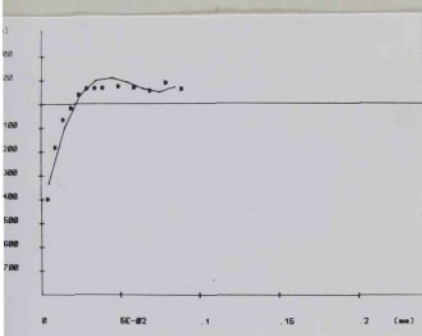




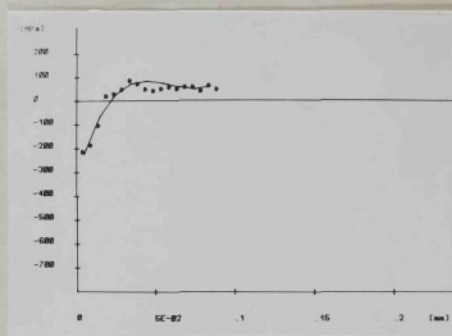
VZ. č. 5



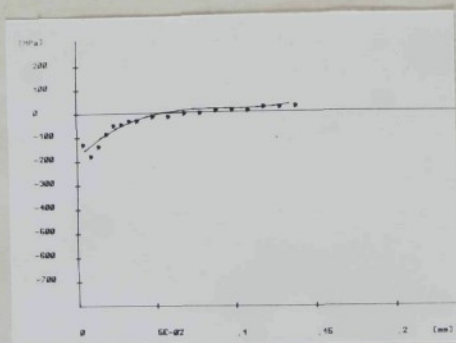
VZ. č. 6



VZ. č. 7

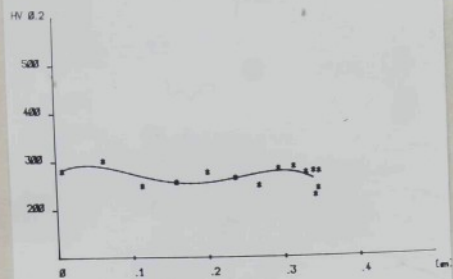


VZ. č. 8

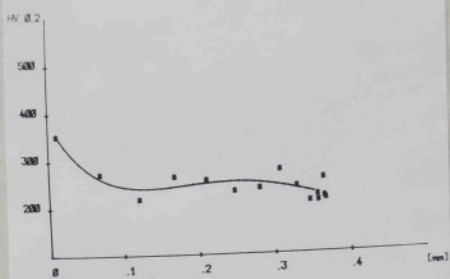


VZ. č. 9

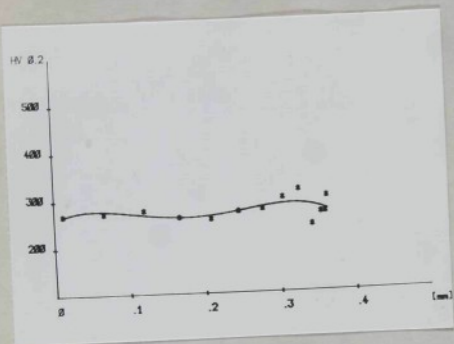




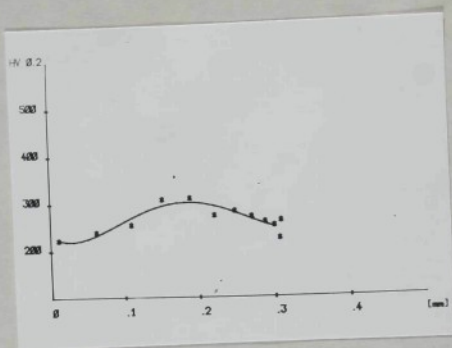
VZ. č.5



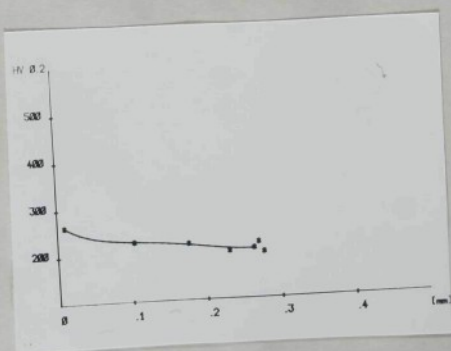
VZ. č.6



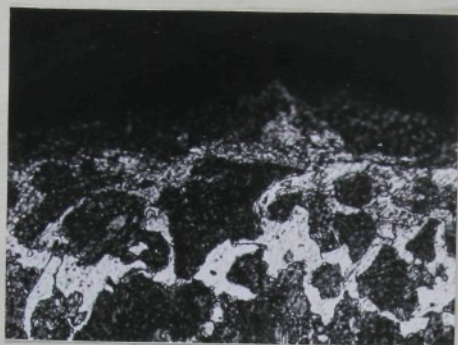
VZ. č.7



VZ. č.8

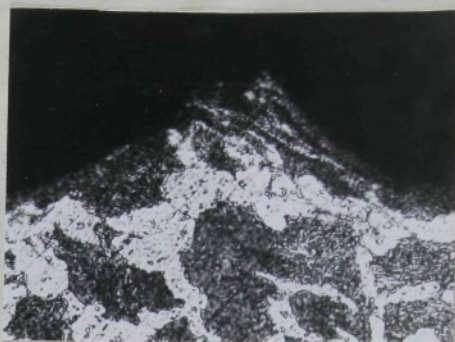


VZ. č.9



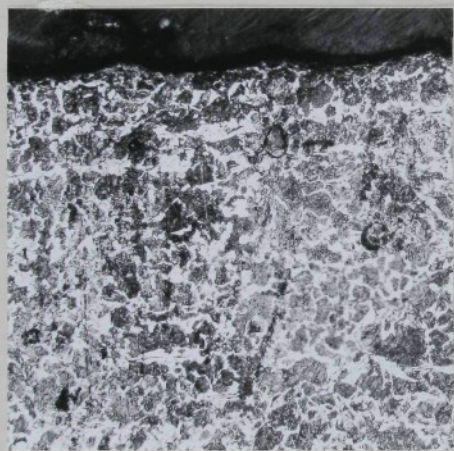
VZ. č. 5

500x



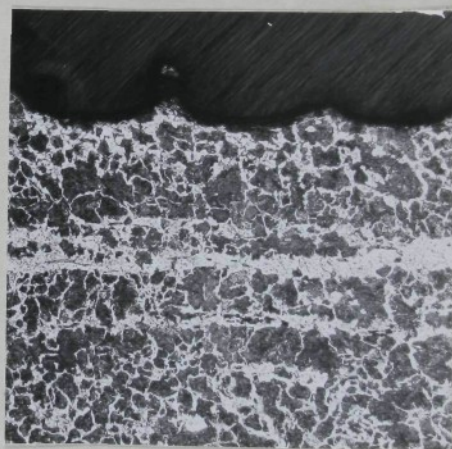
VZ. č. 9

500x



VZ. č. 5

100x



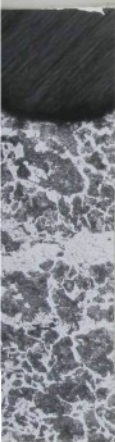
VZ. č. 9

100x

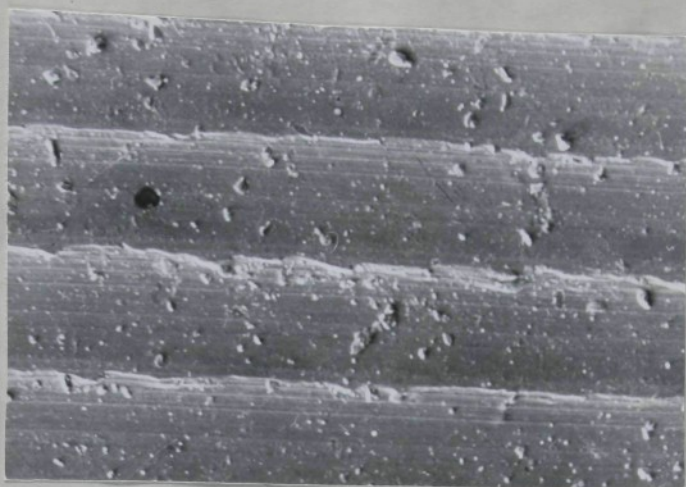
V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 3 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 12050.1

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBD S20CN DNMM 150408

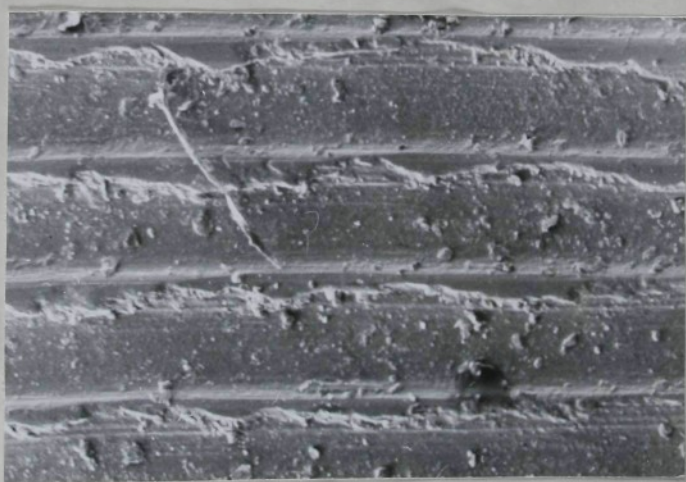


x



VZ. č.5

100 x



VZ. č.9

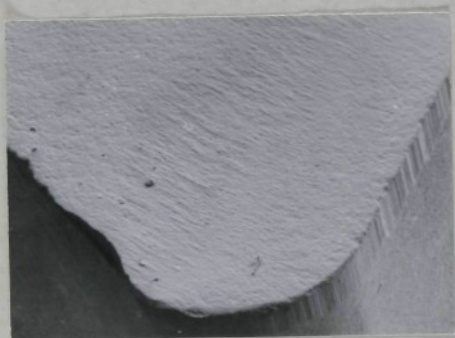
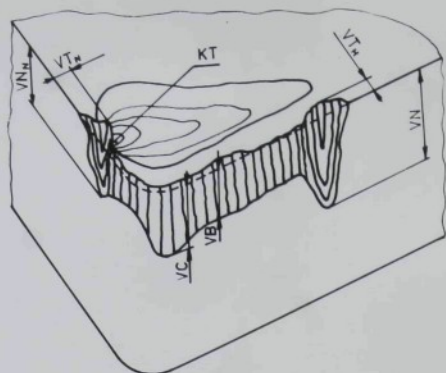
100 x

50408

VI

MORFOLOGIE POVRCHU

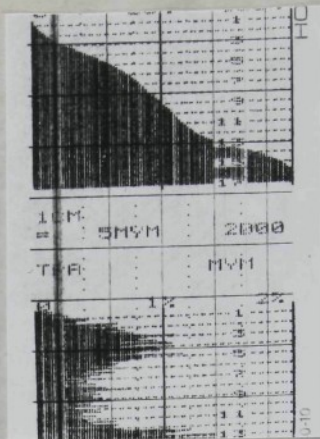




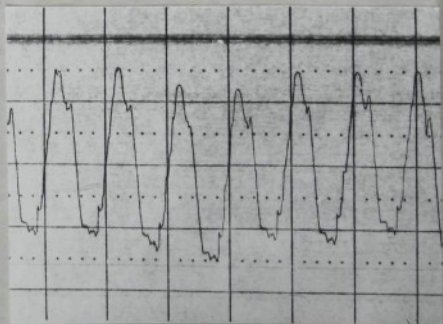
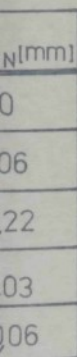
VZ. č. 30

| č.v. | $T[\text{min}]$ | $VB[\text{mm}]$ | $VC[\text{mm}]$ | $KT[\text{mm}]$ | $VN[\text{mm}]$ | $VT_H[\text{mm}]$ | $VT_N[\text{mm}]$ | $VN_N[\text{mm}]$ |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 26   | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | 0                 |
| 27   | 35              | 0,11            | 0,16            | 0,02            | 0,41            | 0,23              | 0,01              | 0,06              |
| 28   | 6,5             | 0,19            | 0,22            | 0,02            | 0,19            | 0,04              | 0,02              | 0,22              |
| 29   | 2               | 0,12            | 0,13            | 0,02            | 0,12            | 0,01              | 0,01              | 0,03              |
| 30   | 9               | 0,30            | 0,30            | 0,02            | 0,30            | 0,01              | 0,08              | 0,06              |

I OPOTŘEBENÍ VBD

[illegible]

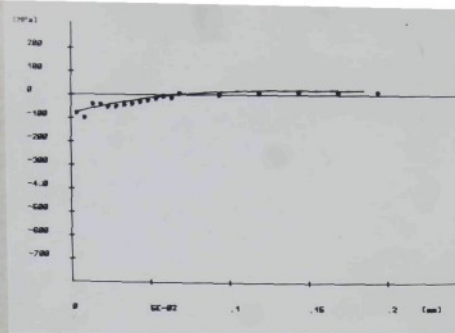
|   |  |  |  |          |
|---|--|--|--|----------|
| C |  |  |  | 0.50mm/s |
| F |  |  |  | 4.8 mm   |
| T |  |  |  | 16.00mV  |
| R |  |  |  | 16.00mV  |
| E |  |  |  | 16.00mV  |
| P |  |  |  | 16.00mV  |
| A |  |  |  | 0.4.10mV |
| S |  |  |  | 0.4.10mV |
| I |  |  |  | N.05mV   |
| R |  |  |  | 4.00mV   |
| G |  |  |  | 16.00mV  |
| M |  |  |  | 16.00mV  |
| V |  |  |  | 16.00mV  |
| E |  |  |  | N.05mV   |
| L |  |  |  | 4.8      |



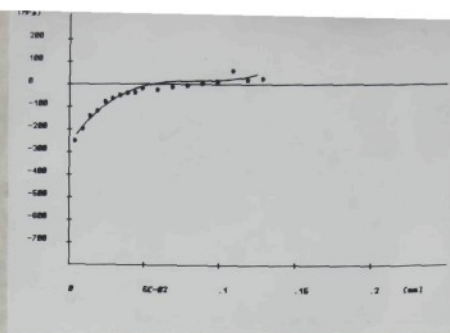
VZ.č.26

VZ. č. 30

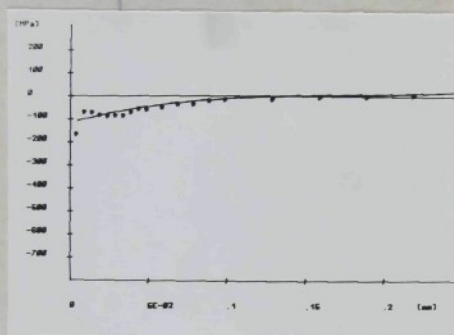
## II. PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



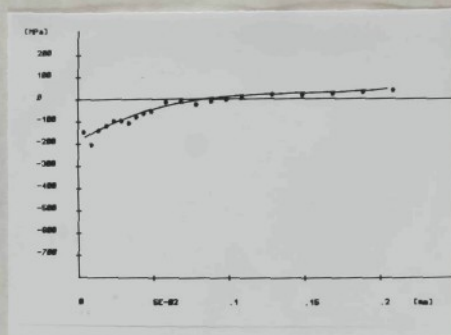
VZ.č.26



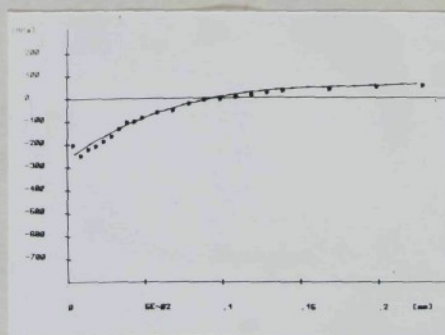
VZ.č.27



VZ.č.28

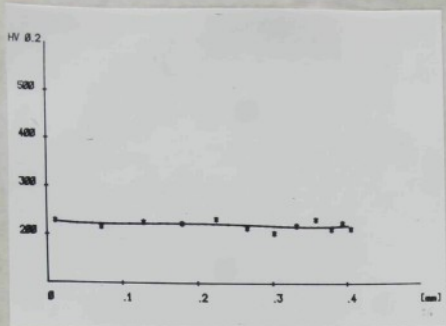


VZ.č.29

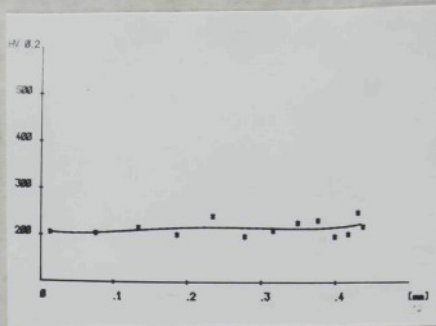


VZ.č.30

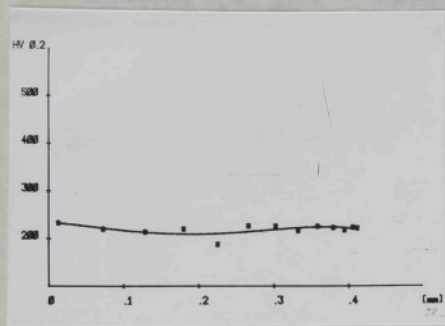




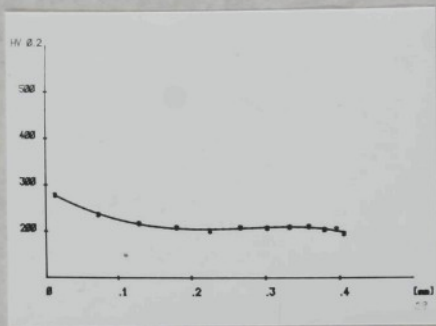
VZ. č.26



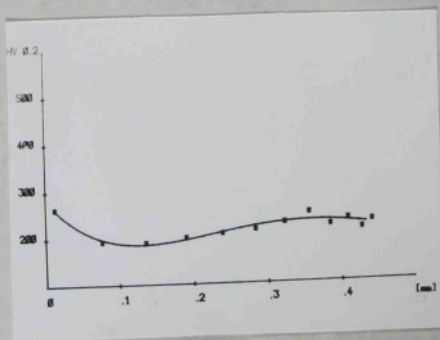
VZ. č.27



VZ. č.28



VZ. č.29

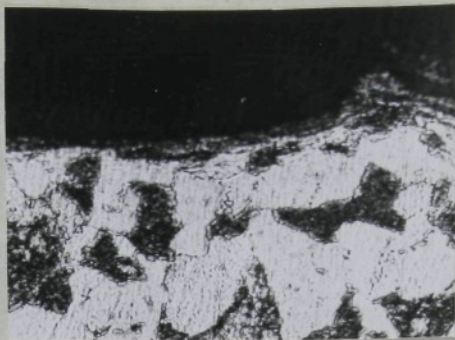


VZ. č.30



VZ.č.26

500 ×



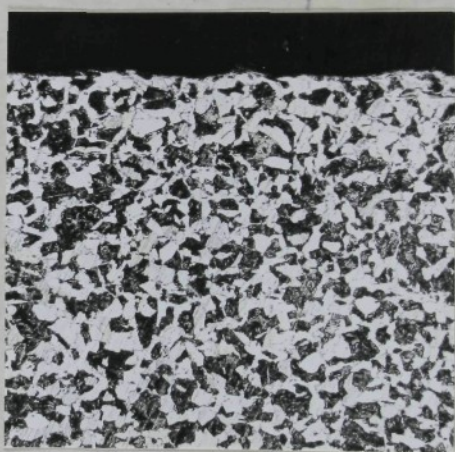
VZ.č.30

500 ×



VZ.č.26

100 ×



VZ.č.30

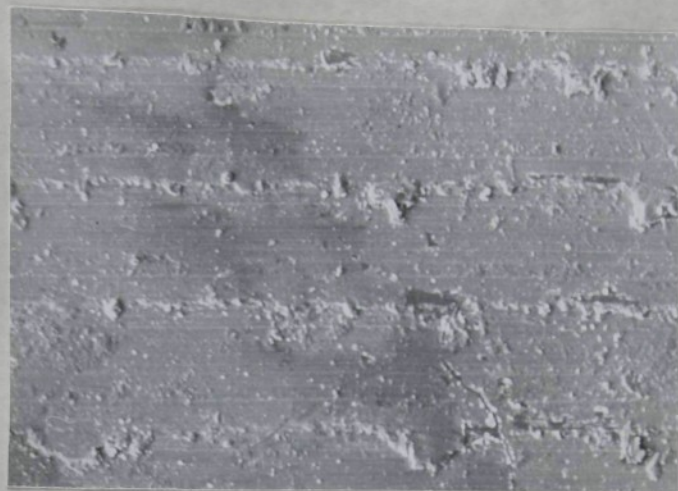
100 ×

# V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 4 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 14 220.1

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBD S20<sub>B</sub> DNMM 150408

BEZ UTVAŘEČE



VZ.č.26

100×

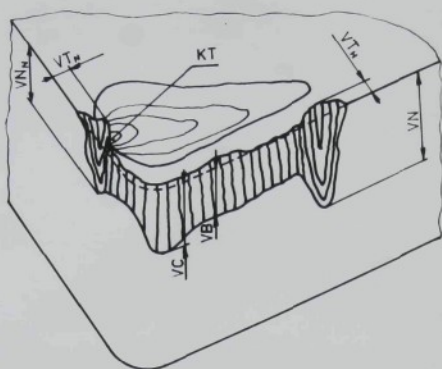


VZ.č.30

100×

0408





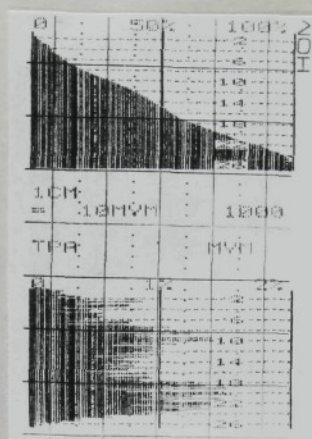
Z. č. 22

| min I | VB[mm] | VC[mm] | KT[mm] | VN[mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|-------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0                    | 0                    | 0                    |
| 17,5  | 0,30   | 0,32   | 0      | 0,65   | 0,42                 | 0,12                 | 0,06                 |
| 3,5   | 0,15   | 0,23   | 0,01   | 0,15   | 0,04                 | 0,01                 | 0,02                 |
| 3,5   | 0,24   | 0,47   | 0,012  | 0,24   | 0,05                 | 0,02                 | 0,08                 |
| 2     | 0,10   | 0,16   | 0      | 0,10   | 0,05                 | 0,03                 | 0,07                 |

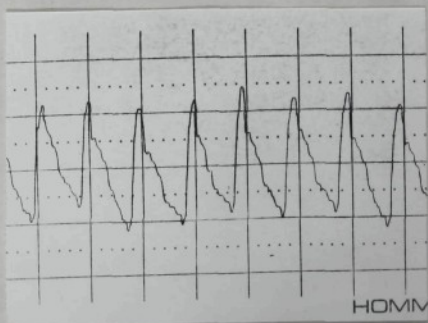
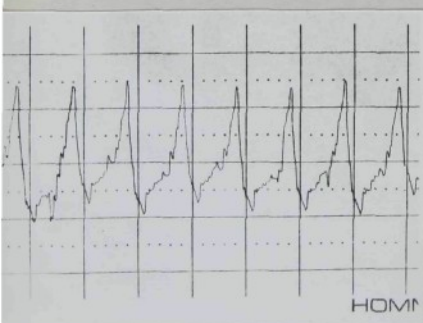
OPOTŘEBENÍ VBD

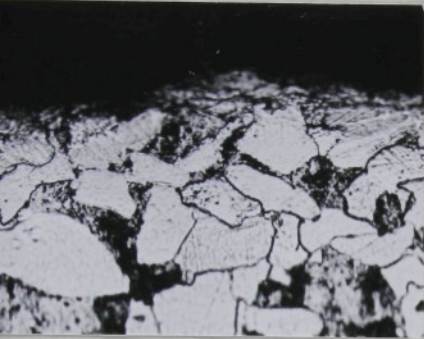
VZ. č. 21

II PA

[illegible]

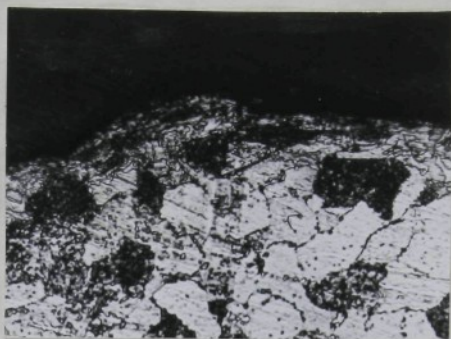
|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | == | 0.5001V  |
| LT   | == | 4.8001V  |
| RT   | == | 26.6001V |
| RP   | == | 26.6001V |
| RE-D | == | 26.6001V |
| RE-I | == | 26.6001V |
| RA   | == | 5.7001V  |
| RP   | == | 15.4001V |
| RPT  | == | 14.2001V |
| RO   | == | 6.6001V  |
| RIZ  | == | 26.7001V |
| REZ1 | == | 21.5001V |
| PT   | == | 26.7001V |
| UT   | == | 3.9001V  |
| UR   | == | 40       |
| FILE |    |          |





VZ.č. 21

500x



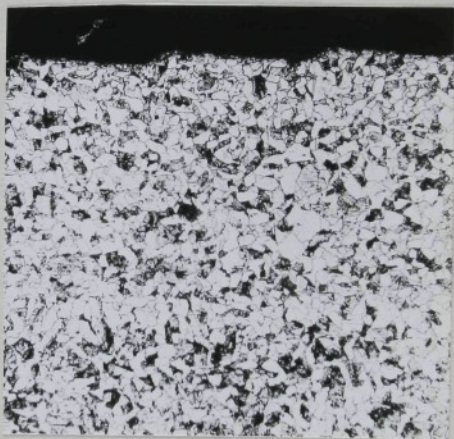
VZ.č. 22

500 x



VZ.č. 21

100 x



VZ.č. 22

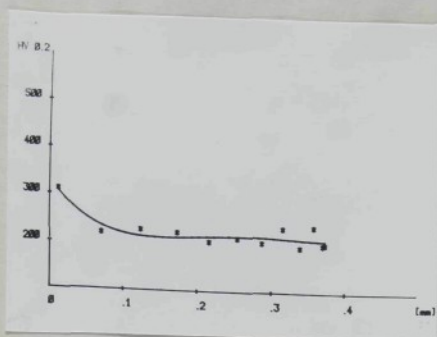
100 x

VI MIKROSTRUKTURA POVRCHU

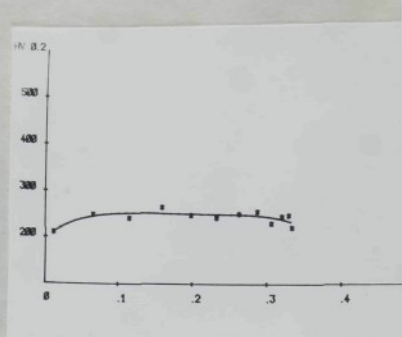
PŘÍLOHA 5 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL: 14 220

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBD S20 DNMM 150408

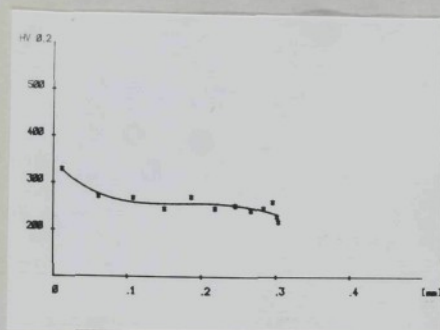




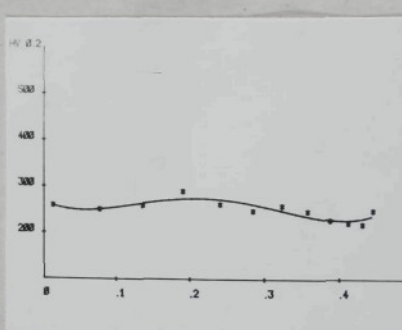
VZ. č. 21



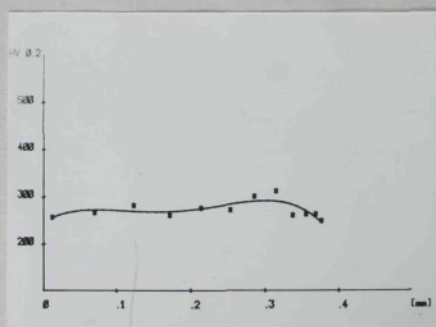
VZ. č. 22



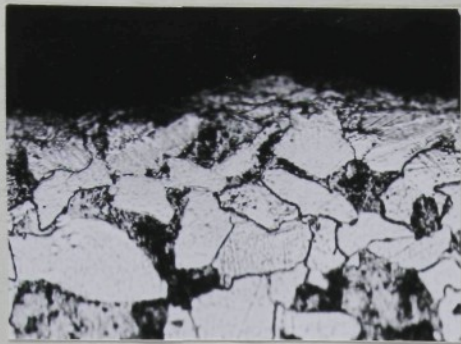
VZ. č. 23



VZ. č. 24



VZ. č. 25



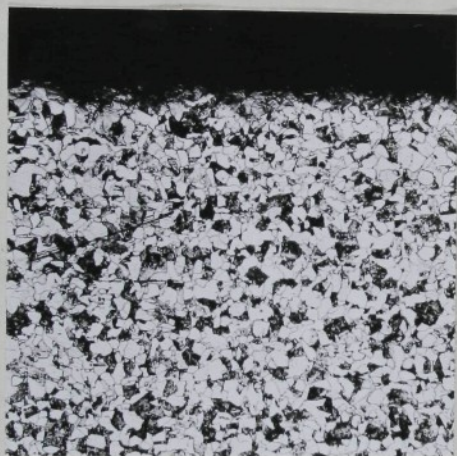
VZ.č. 21

500x



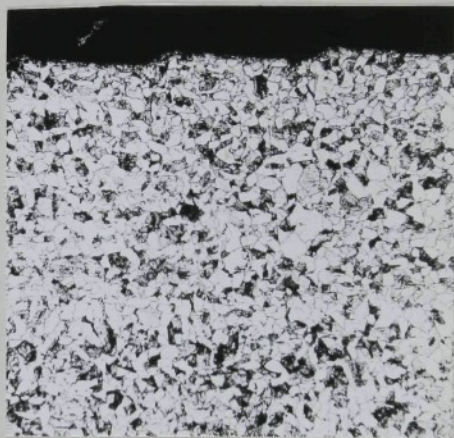
VZ.č. 22

500x



VZ.č. 21

100x



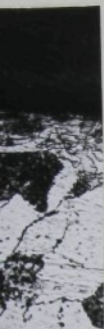
VZ.č. 22

100x

V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

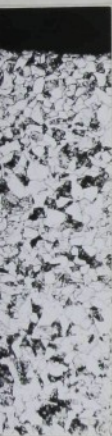
PŘÍLOHA 5 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL: 14 220

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBD S20 DNMM 150408



VZ. č. 21

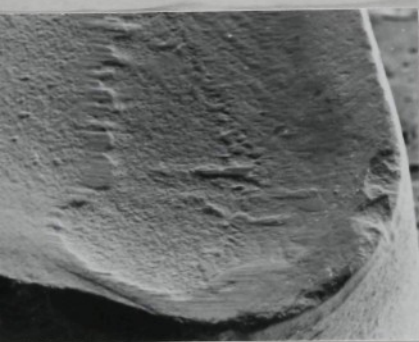
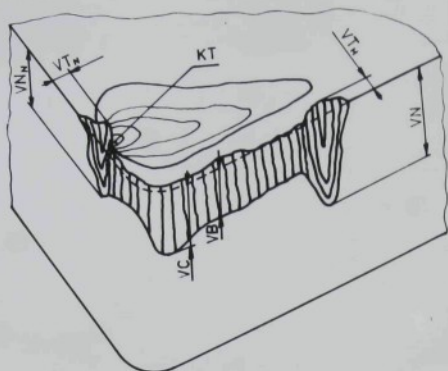
100 ×



VZ. č. 22

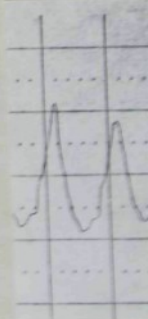
100 ×





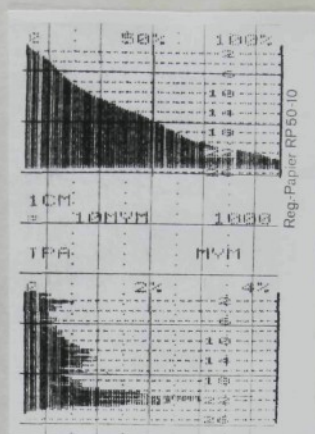
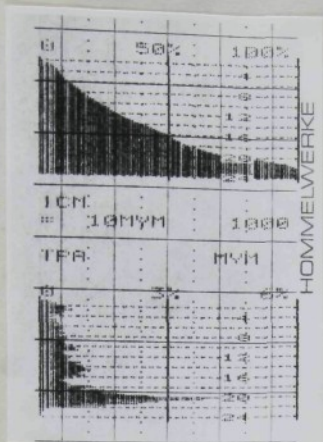
Z č. 20

| [min] | VB[mm] | VC[mm] | KT[mm] | VN[mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|-------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0                    | 0                    | 0                    |
| 12    | 0,14   | 0,14   | 0,003  | 0,58   | 0,62                 | 0,01                 | 0,14                 |
| 17,5  | 0,12   | 0,26   | 0,01   | 0,87   | 0,38                 | 0,11                 | 0,18                 |
| 22    | 0,22   | 0,40   | 0      | 0,67   | 0,34                 | 0                    | 0,09                 |
| 28    | 0,27   | 0,24   | 0      | 0,85   | 0,19                 | 0                    | 0,15                 |



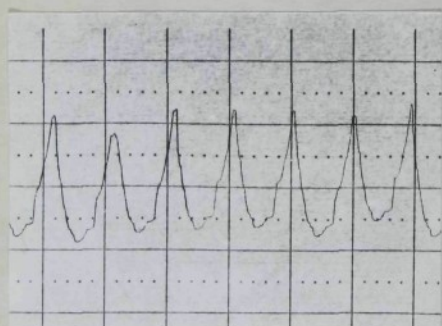
VZ. č. 1

II PA

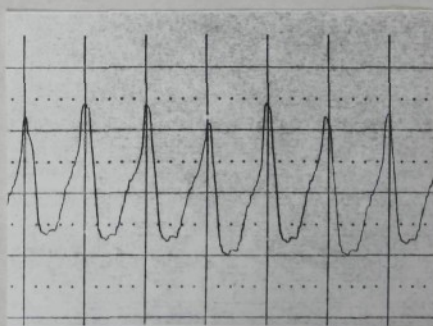


|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | .. | 0,50mm/s |
| LT   | .. | 4,8 mm   |
| RT   | .. | 22,20μm  |
| RM   | .. | 21,30μm  |
| RN-D | .. | 20,90μm  |
| RZ-1 | .. | 21,10μm  |
| RA   | .. | 19,80μm  |
| RF   | .. | 19,20μm  |
| RFM  | .. | 19,60μm  |
| RO   | .. | 19,80μm  |
| RZN  | .. | 19,50μm  |
| RZM  | .. | 19,50μm  |
| PT   | .. | 22,70μm  |
| PT   | .. | 22,40μm  |
| TP   | .. | 2        |

|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | .. | 0,50mm/s |
| LT   | .. | 4,8 mm   |
| RT   | .. | 22,10μm  |
| RM   | .. | 24,50μm  |
| RN-D | .. | 23,10μm  |
| RZ-1 | .. | 23,50μm  |
| RA   | .. | 19,60μm  |
| RF   | .. | 14,90μm  |
| RFM  | .. | 14,90μm  |
| RO   | .. | 19,50μm  |
| RZN  | .. | 20,40μm  |
| RZM  | .. | 20,90μm  |
| PT   | .. | 24,90μm  |
| PT   | .. | 2,50μm   |
| TP   | .. | 42       |

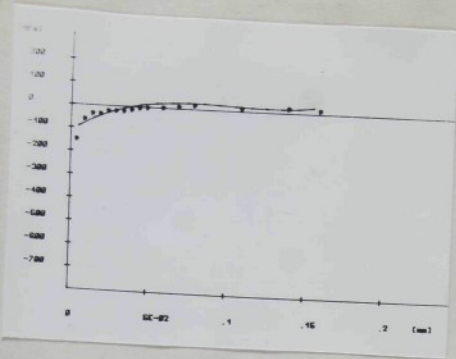


VZ. č.16

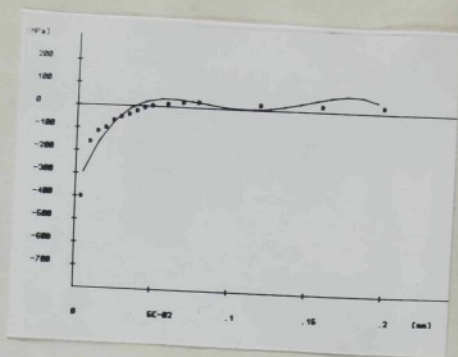


VZ. č.20

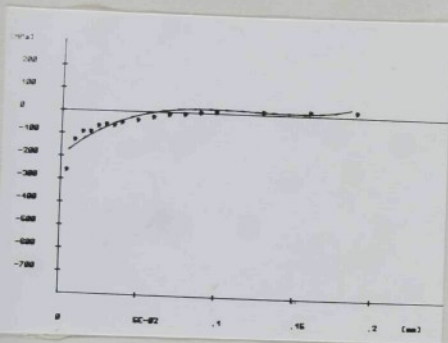
## II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



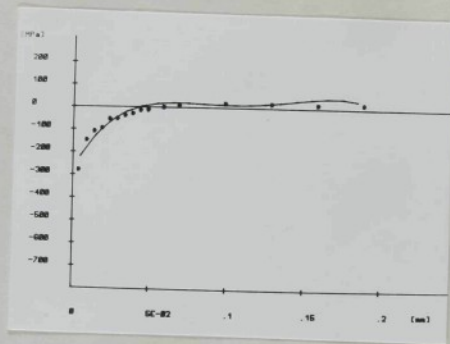
VZ. č.16



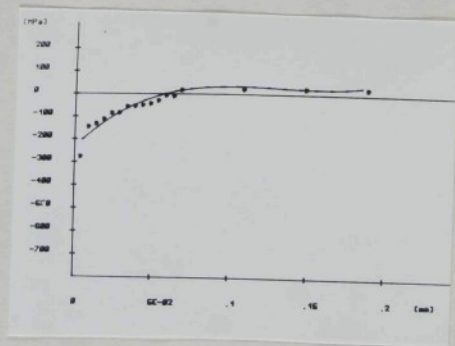
VZ. č.17



VZ. č.18

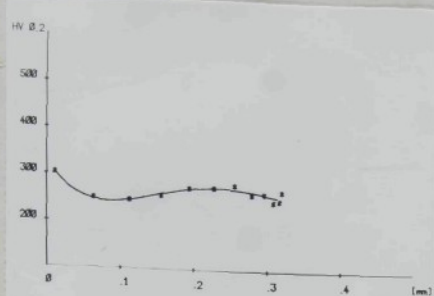


VZ. č.19

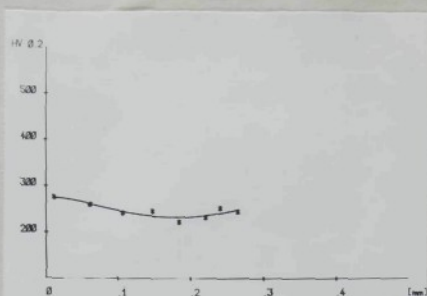


VZ. č.20

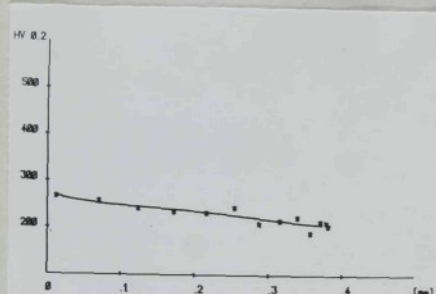




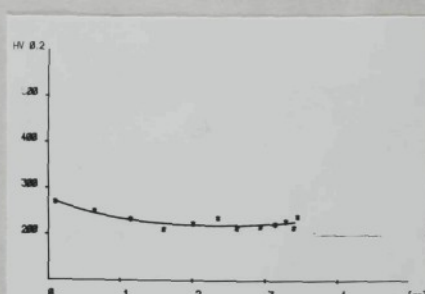
VZ.č.16



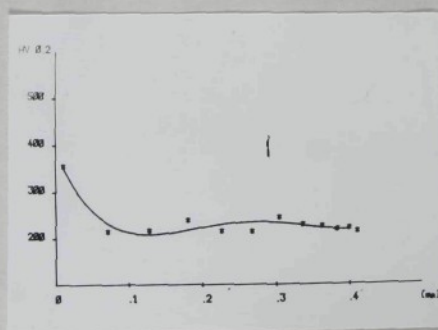
VZ.č.17



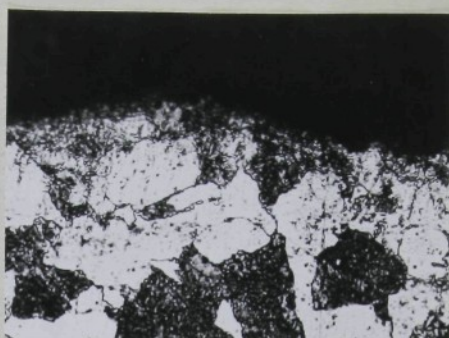
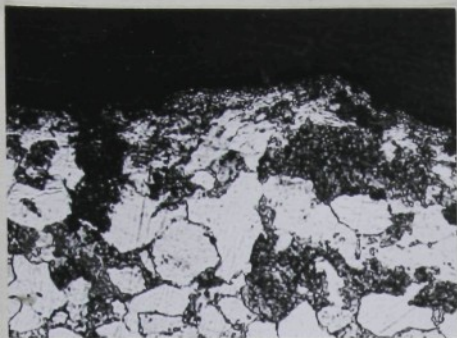
VZ.č.18



VZ.č.19



VZ.č.20

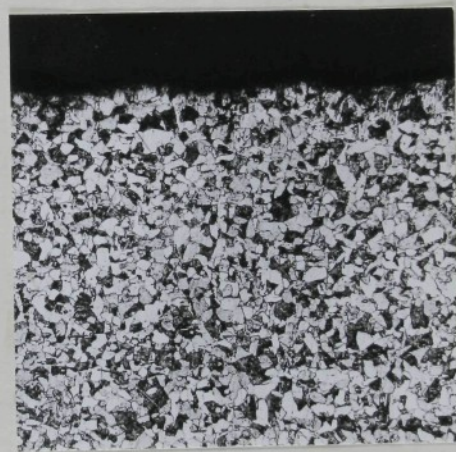
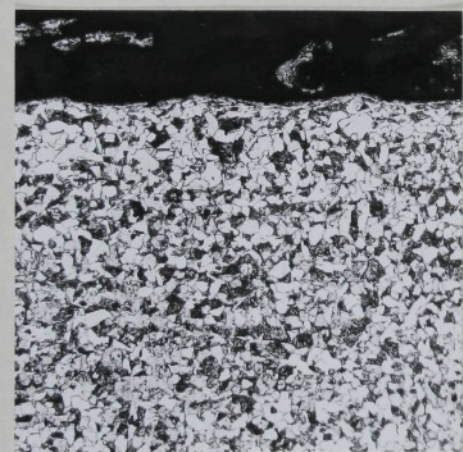


VZ.č.16

500 $\times$

VZ.č.20

500 $\times$



VZ.č.16

100 $\times$

VZ.č.20

100 $\times$

## V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

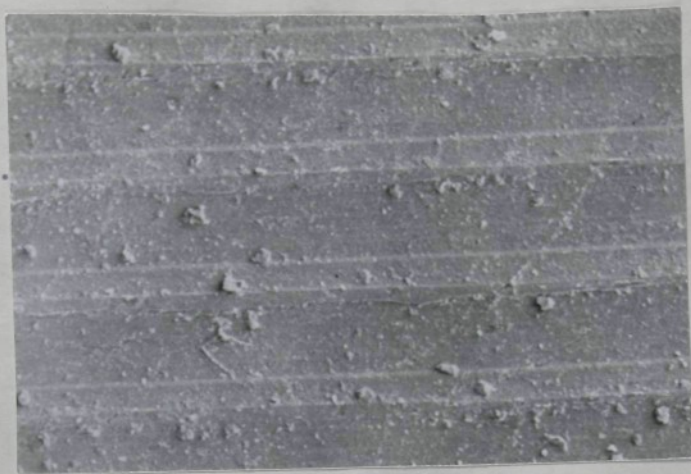
PŘÍLOHA 6 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 14 220

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBD S20CN DNMM 150408



0 x

0408



VZ.č.16

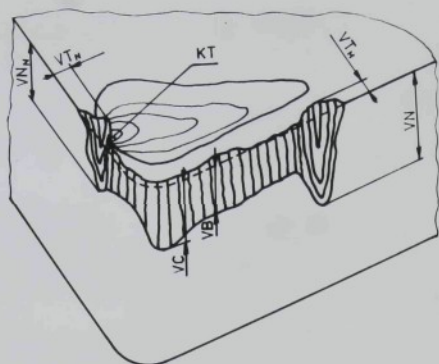
100 x



VZ.č.20

100 x

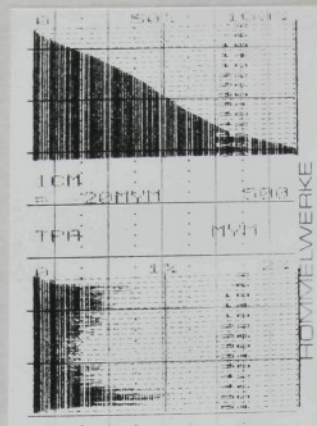
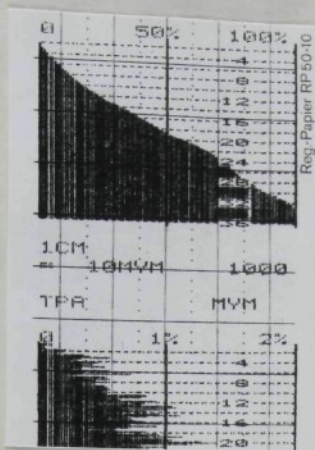




VZ. č.62

| č.v. | T[min] | VB[mm] | VC[mm]                   | KT[mm] | VN[mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 59   | 0      | 0      | 0                        | 0      | 0      | 0                    | 0                    | 0                    |
| 60   | 3,5    | 0,16   | 0,38                     | 0,05   | 0,16   | 0,06                 | 0,08                 | 0,20                 |
| 61   | 8,5    | 0,45   | 0,92                     | 0,32   | 0,45   | 0,14                 | 0,05                 | 0,30                 |
| 62   | 12     | 0,55   | katastrofální opotřebení |        |        |                      |                      |                      |
| 63   | 5      | 0,23   | 0,55                     | 0,21   | 0,23   | 0,03                 | 0,10                 | 0,22                 |

OPOTŘEBENÍ VBD



|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | == | 0,50MM/s |
| LT   | == | 4,8 MM   |
| ET   | == | 33,00mV  |
| RM   | == | 32,00mV  |
| RZ-D | == | 30,70mV  |
| RZ-T | == | 31,30mV  |
| RA   | == | 16,80mV  |
| RP   | == | 18,50mV  |
| RPM  | == | 16,70mV  |
| RO   | == | 8,20mV   |
| RZ2  | == | 20,80mV  |
| RZ2H | == | 20,60mV  |
| PT   | == | 35,50mV  |
| WT   | == | 4,40mV   |
| NR   | == | 45       |
| KIR  | == |          |

|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | == | 0,50MM/s |
| LT   | == | 4,8 MM   |
| ET   | == | 33,00mV  |
| RM   | == | 32,00mV  |
| RZ-D | == | 30,70mV  |
| RZ-T | == | 31,30mV  |
| RA   | == | 14,00mV  |
| RP   | == | 16,60mV  |
| RPM  | == | 16,00mV  |
| RO   | == | 15,70mV  |
| RZ2  | == | 46,00mV  |
| RZ2H | == | 46,70mV  |
| PT   | == | 39,90mV  |
| WT   | == | 5,10mV   |
| NR   | == | 40       |
| KIR  | == |          |

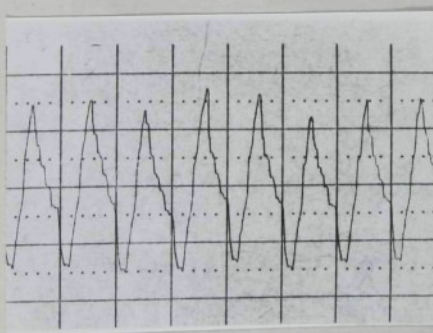
(mm)

0

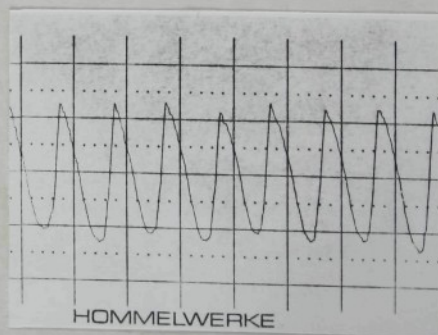
20

30

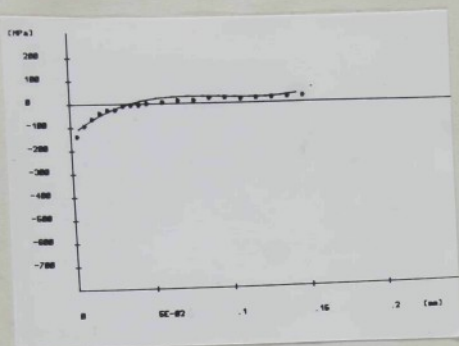
22



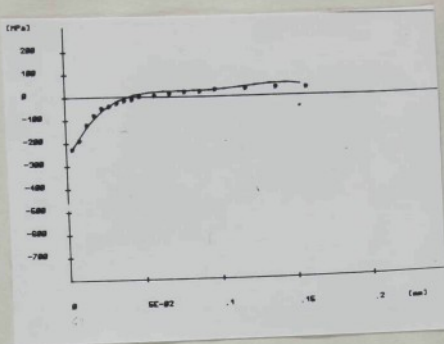
VZ.č.59



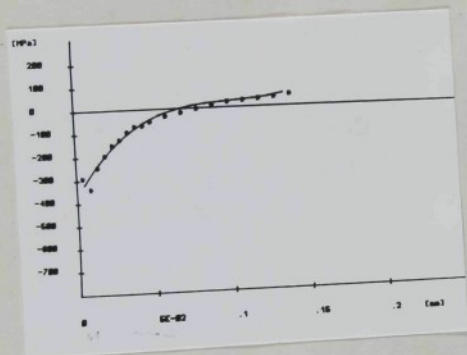
VZ.č.62



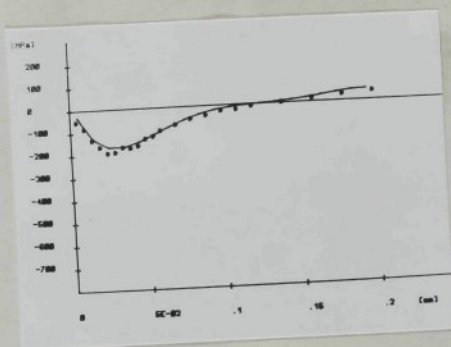
VZ. č.59



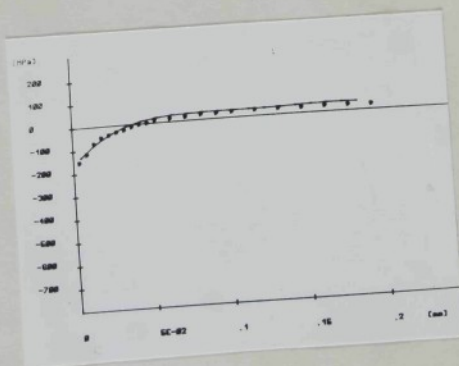
VZ. č.60



VZ. č. 61

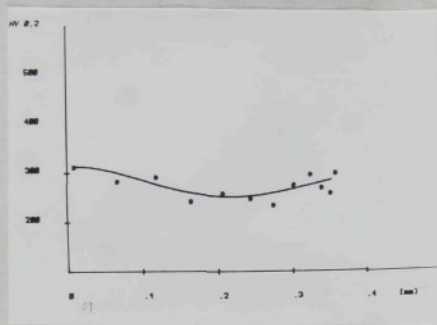


VZ. č.62

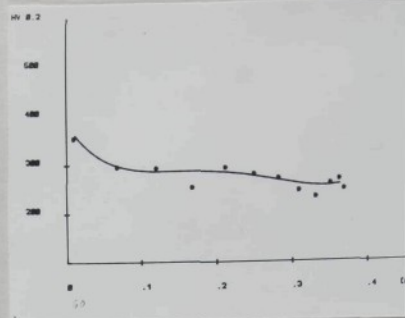


VZ. č.63

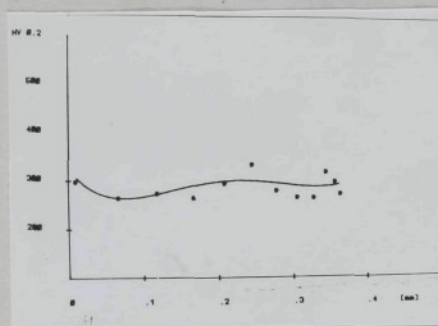




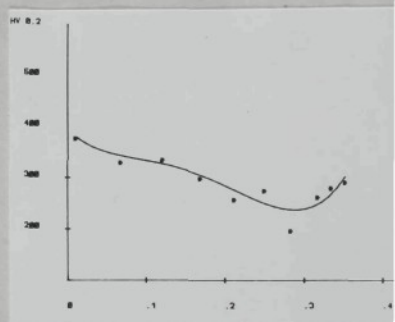
VZ.č.59



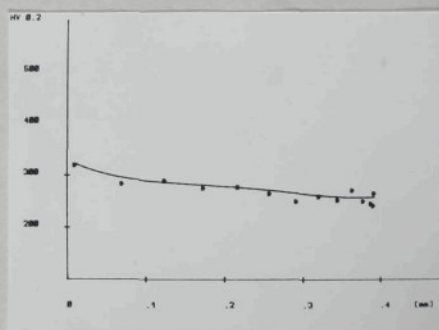
VZ.č.60



VZ.č.61



VZ.č.62

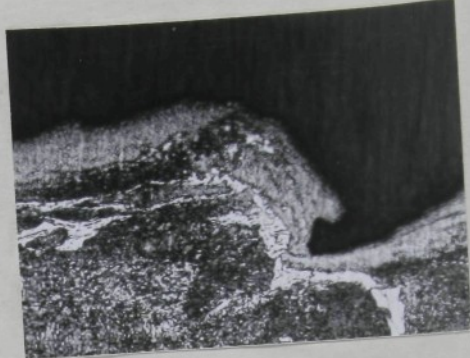


VZ.č.63



VZ.č.59

500x



VZ.č.62

500x



VZ.č.62

100x



VZ.č.62

100x

V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

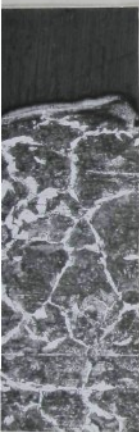
PŘÍLOHA 7 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 11 600

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBDS20<sub>B</sub> DNMM 150408

BEZ UTVAŘEČE



x



00x

1 150408

ČE



VZ.č.59

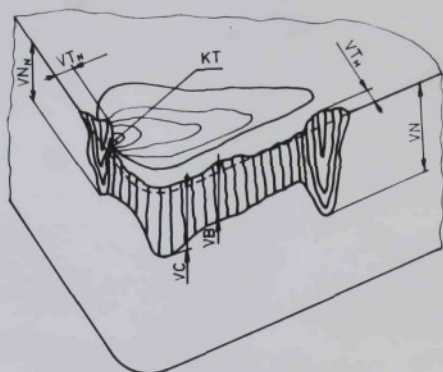
100x



VZ.č.62

100x



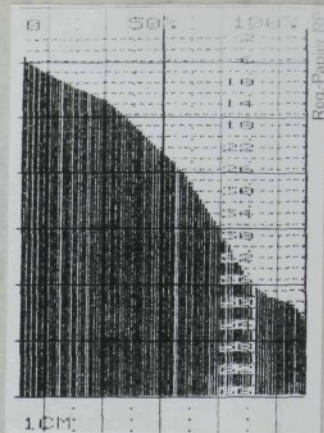
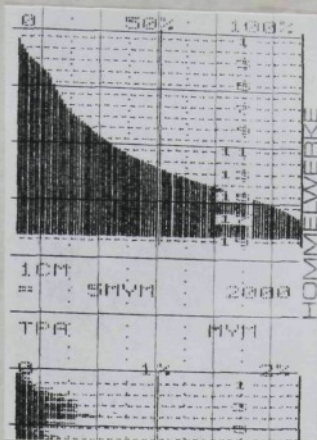


VZ. č. 43

| $t, [min]$ | $VB [mm]$                | $VC [mm]$ | $KT [mm]$ | $VN [mm]$ | $VT_H [mm]$ | $VT_N [mm]$ | $VN_N [mm]$ |
|------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 0          | 0                        | 0         | 0         | 0         | 0           | 0           | 0           |
| 2          | 0,18                     | 0,31      | 0         | 0,18      | 0,05        | 0,14        | 0,20        |
| 5          | 0,30                     | 0,41      | 0,12      | 0,30      | 0,07        | 0,05        | 0,03        |
| 5          | 0,29                     | 0,47      | 0,11      | 0,29      | 0,05        | 0,14        | 0,18        |
| 5          | katastrofální opotřebení |           |           |           |             |             |             |

VZ

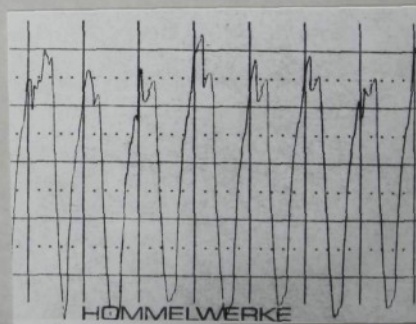
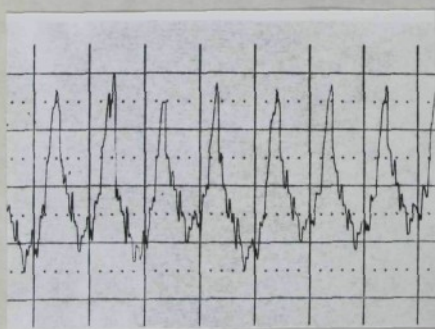
OPOTŘEBENÍ VBD



|    |    |          |
|----|----|----------|
| UT | .. | 0,50MM/S |
| LT | .. | 4,8 MM   |
| RT | .. | 17,65MM  |
| RM | .. | 17,15MM  |
| RN | .. | 16,05MM  |
| RI | .. | 16,60MM  |
| RJ | .. | 14,45MM  |
| RK | .. | 10,45MM  |
| RL | .. | 9,55MM   |
| RM | .. | 4,15MM   |
| RN | .. | 14,05MM  |
| RI | .. | 14,00MM  |
| RJ | .. | 10,45MM  |
| RT | .. | 0,10MM   |
| NR | .. | 60       |

|    |    |          |
|----|----|----------|
| UT | .. | 0,50MM/S |
| LT | .. | 4,8 MM   |
| RT | .. | 54,30MM  |
| RM | .. | 53,40MM  |
| RN | .. | 48,70MM  |
| RI | .. | 50,10MM  |
| RJ | .. | 14,30MM  |
| RK | .. | 24,70MM  |
| RL | .. | 19,00MM  |
| RM | .. | 19,40MM  |
| RN | .. | 44,30MM  |
| RI | .. | 45,60MM  |
| RT | .. | 0,40MM   |
| LT | .. | 0,40MM   |
| NR | .. | 40       |

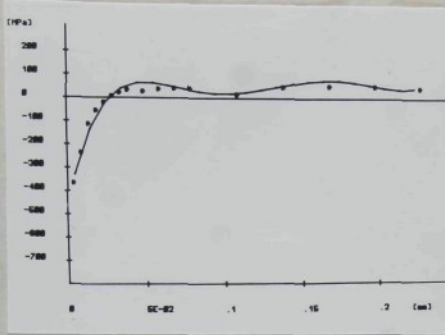
|                     |
|---------------------|
| V <sub>N</sub> (mm) |
| 0                   |
| 0,20                |
| 0,03                |
| 0,18                |



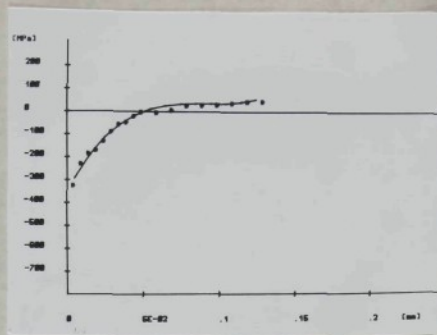
VZ č 38

VZ č 43

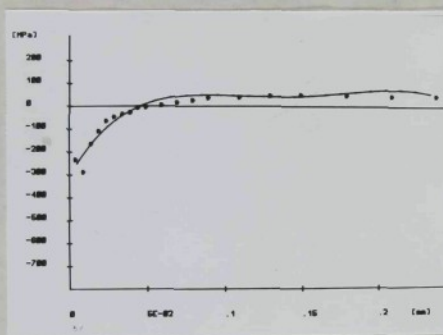
II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



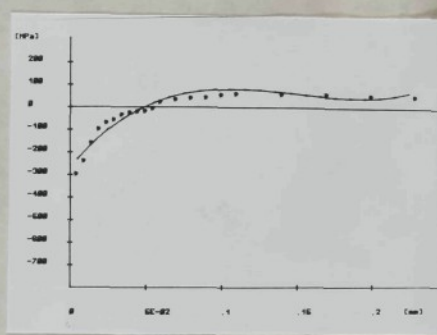
VZ.č.38



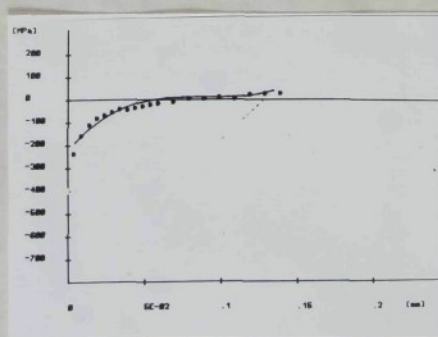
VZ.č.40



VZ.č.41

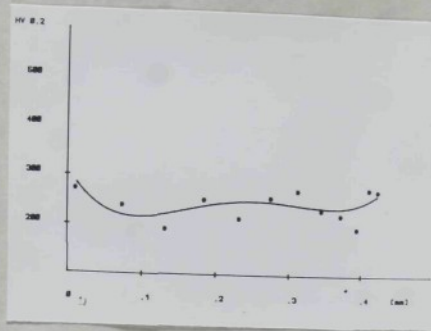


VZ.č.42

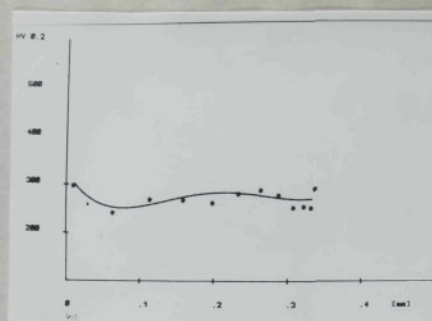


VZ.č.43

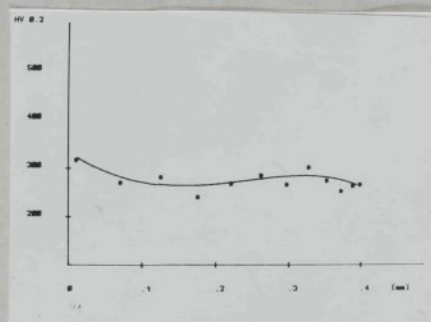




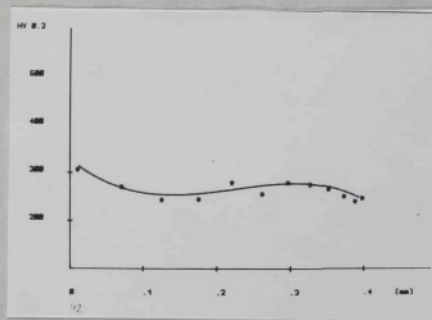
VZ.č.38



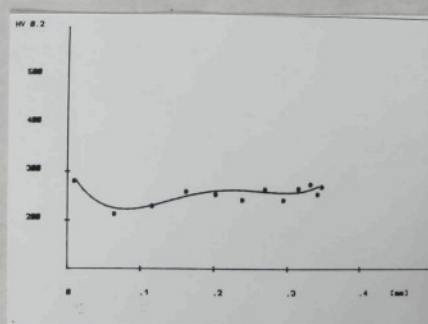
VZ.č.40



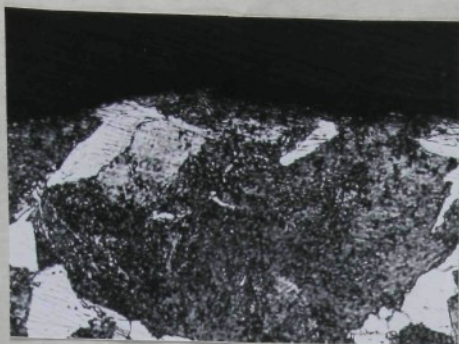
VZ.č.41



VZ.č.42



VZ.č.43



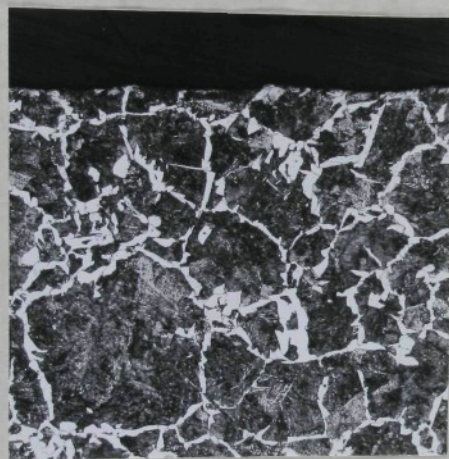
VZ. č.38

500 x



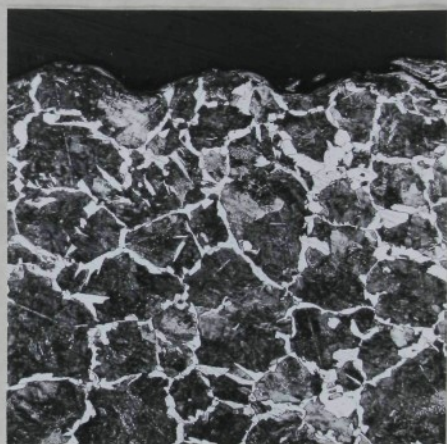
VZ. č.43

500 x



VZ. č.38

100 x



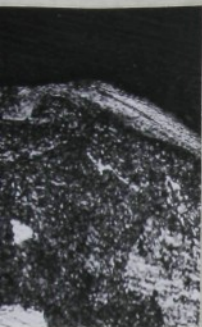
VZ. č.43

100 x

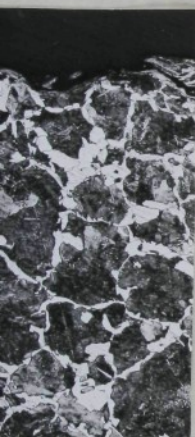
## V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 8 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL: 11600

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBD S20 DNMM 150408



500 x

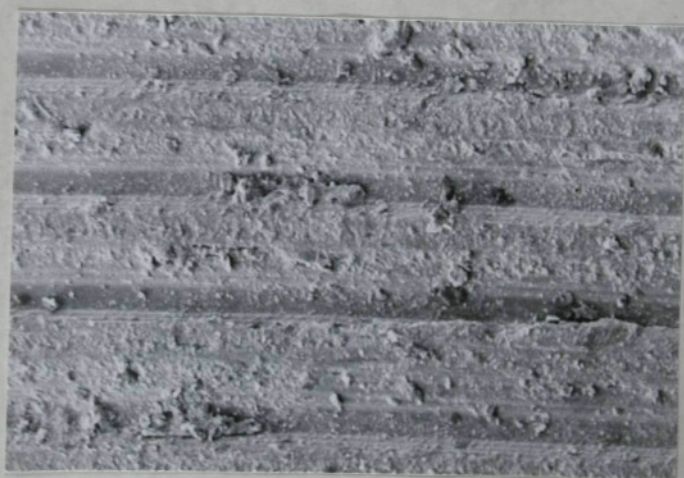


100 x



VZ.č.38

100 x

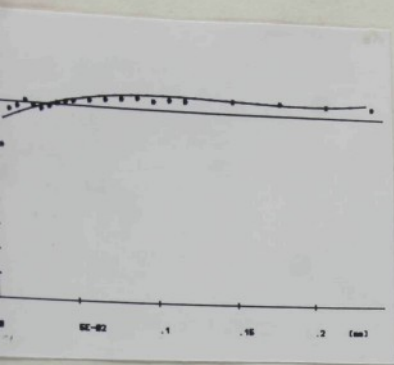


VZ.č.43

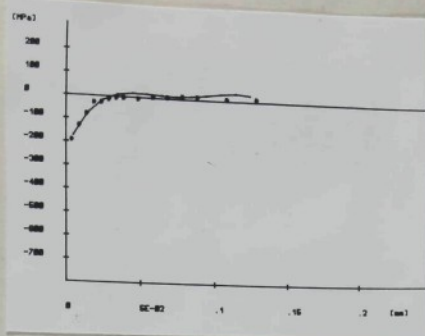
100 x

50408

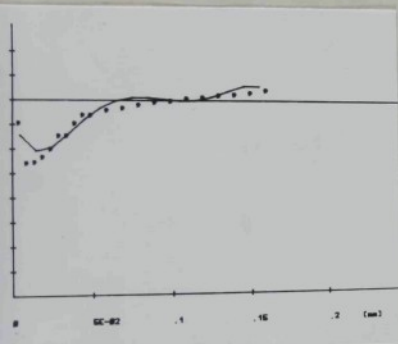




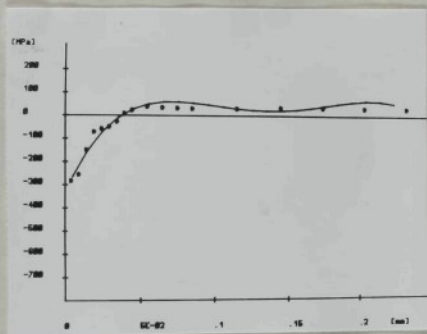
VZ.č.31



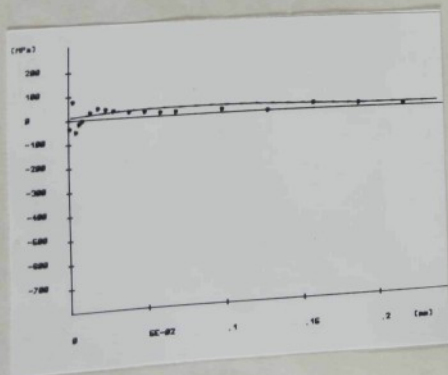
VZ.č.33



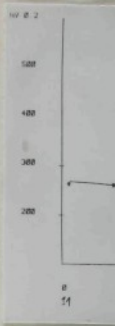
VZ.č.34



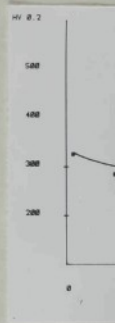
VZ.č.35



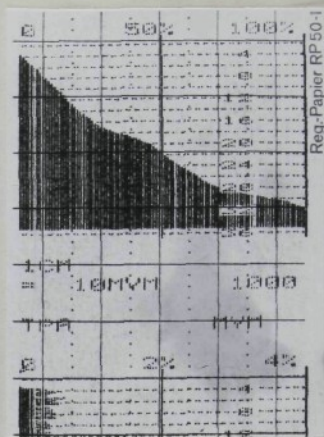
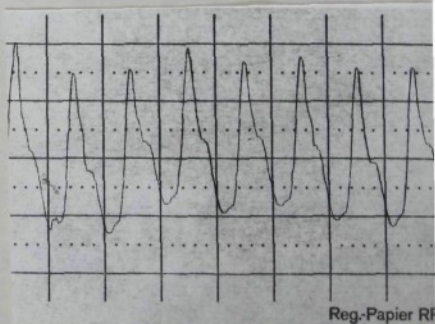
VZ.č.36



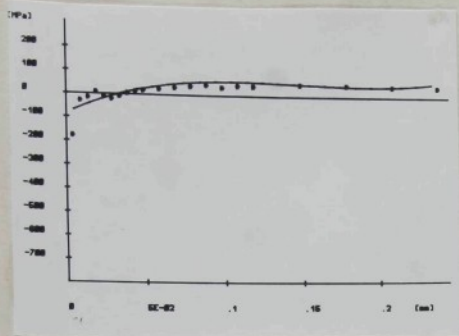
VZ.č.32



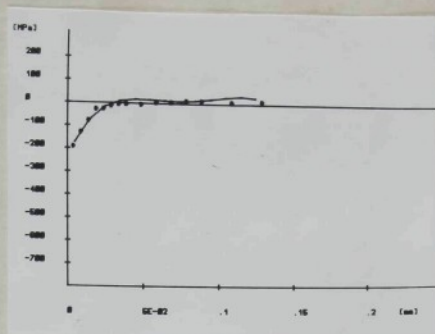
VZ.č.37

[illegible]

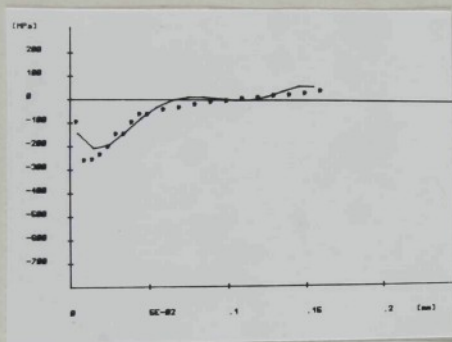
VZ. č. 36



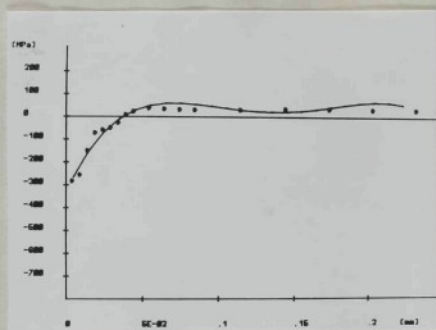
VZ.č.31



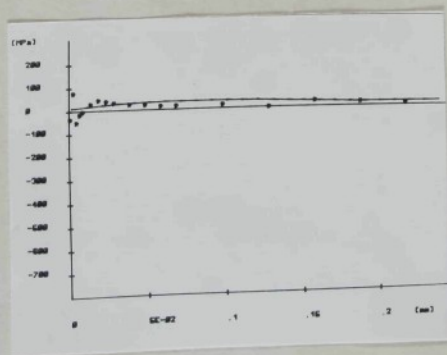
VZ.č.33



VZ.č.34

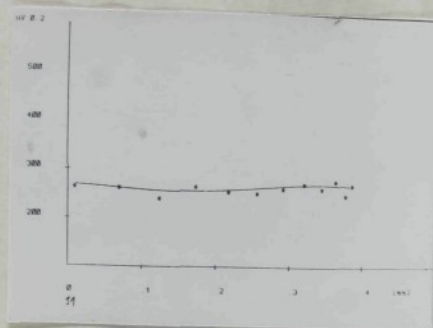


VZ.č.35

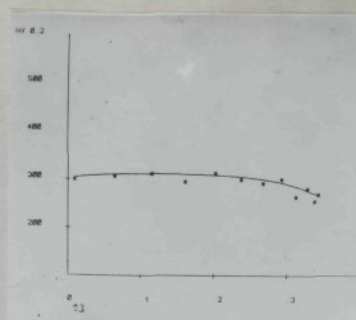


VZ.č.36

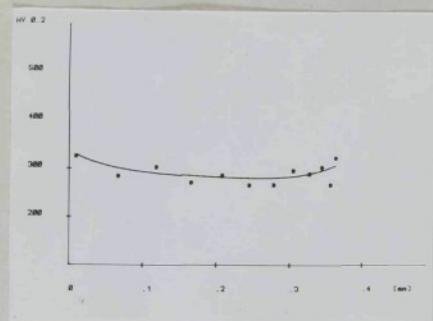
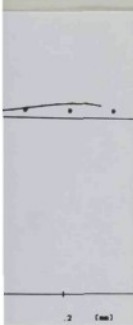




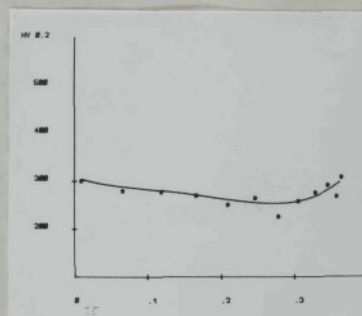
VZ.č.31



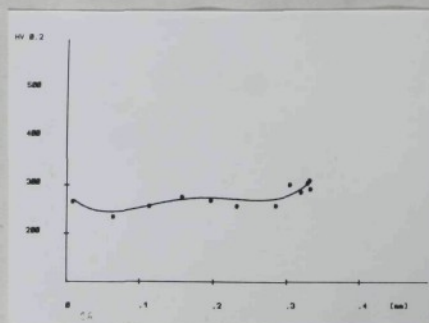
VZ.č.33



VZ.č.34



VZ.č.35

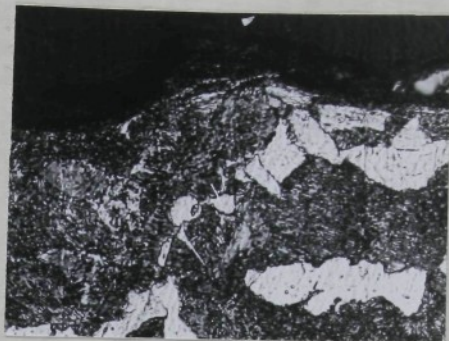


VZ.č.36



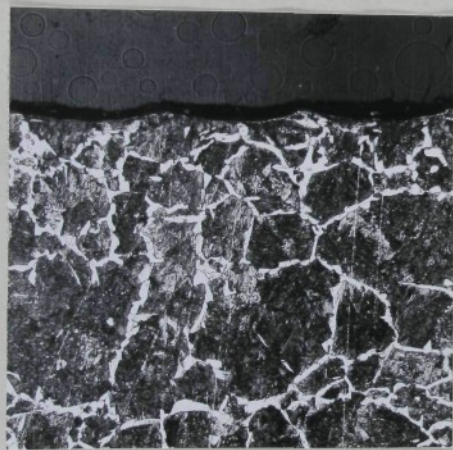
VZ.č. 31.

500x



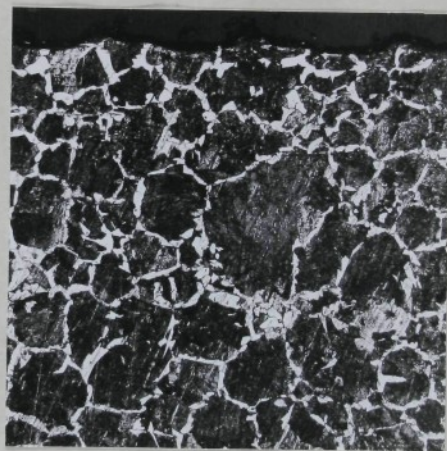
VZ.č.36

500x



VZ.č.31

100x



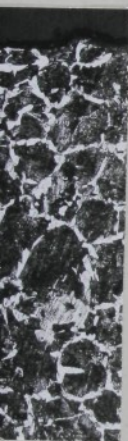
VZ.č.36

100x

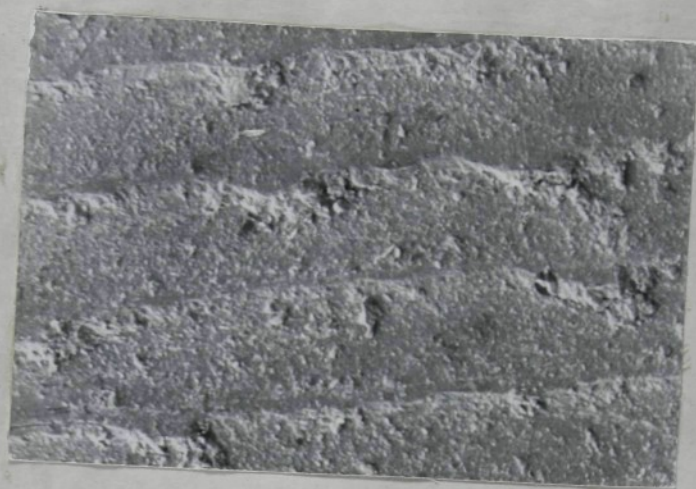
# V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 9 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL: 11600

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBD S20CNDNMM 150408



x



VZ. č.31

100 x



VZ. č.36

100 x

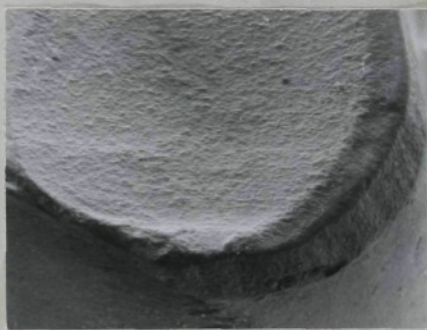
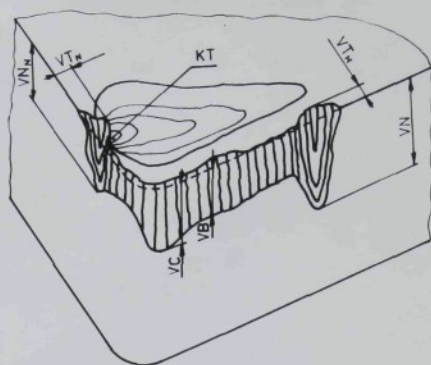
50408

VI

MORFOLOGIE

POVRCHU

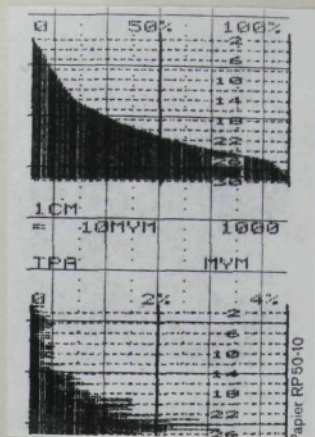
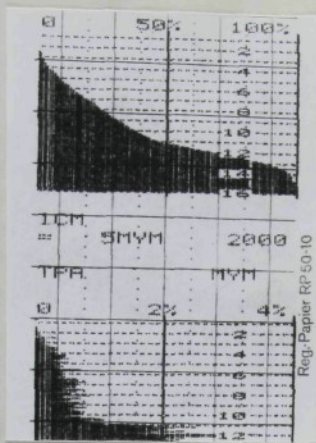




VZ. č. 56

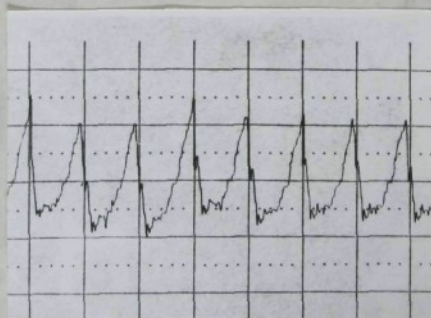
| č. v. | T [min] | VB [mm] | VC [mm] | KT [mm] | VN [mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 54    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0                    | 0                    | 0                    |
| 55    | 3,5     | 0,11    | 0,17    | 0,01    | 0,11    | 0,07                 | 0                    | 0                    |
| 56    | 13      | 0,17    | 0,18    | 0,06    | 0,17    | 0,02                 | 0,06                 | 0,08                 |
| 57    | 10      | 0,25    | 0,35    | 0,05    | 0,25    | 0,07                 | 0,02                 | 0,18                 |
| 58    | 23      | 0,28    | 0,36    | 0,07    | 0,28    | 0,03                 | 0,01                 | 0,14                 |

I OPOTŘEBENÍ VBD

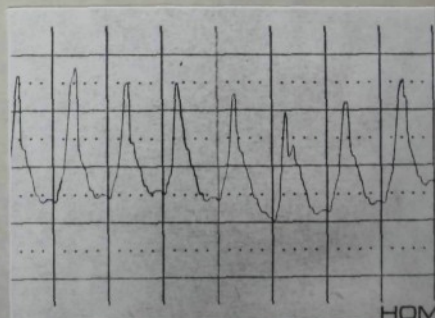


|      |   |          |
|------|---|----------|
| UT   | = | 0.50MM/S |
| LT   | = | 4.0 MM   |
| RT   | = | 13.10MYM |
| RM   | = | 12.80MYM |
| RZ-D | = | 11.60MYM |
| RZ-I | = | 11.90MYM |
| RA   | = | 2.55MYM  |
| RP   | = | 3.45MYM  |
| RPM  | = | 7.20MYM  |
| RQ   | = | 2.80MYM  |
| RZN  | = | 9.70MYM  |
| RZM  | = | 10.20MYM |
| PT   | = | 15.80MYM |
| WT   | = | 5.20MYM  |
| NR   | = | 90       |

|      |   |          |
|------|---|----------|
| UT   | = | 0.50MM/S |
| LT   | = | 4.0 MM   |
| RT   | = | 28.80MYM |
| RM   | = | 25.80MYM |
| RZ-D | = | 23.80MYM |
| RZ-I | = | 25.50MYM |
| RA   | = | 5.00MYM  |
| RP   | = | 19.50MYM |
| RPM  | = | 16.40MYM |
| RQ   | = | 6.50MYM  |
| RZN  | = | 17.10MYM |
| RZM  | = | 20.60MYM |
| PT   | = | 29.50MYM |
| WT   | = | 4.70MYM  |
| NR   | = | 42       |
| NUL  | = |          |
| CODE | = | 0.5      |

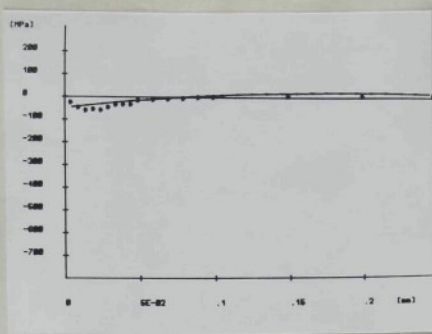
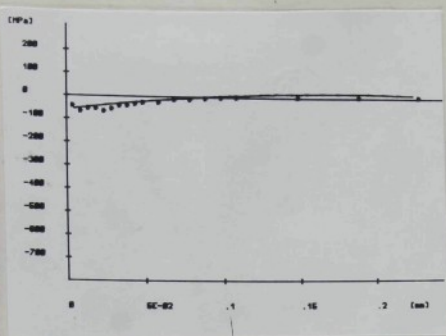


VZ.č.54



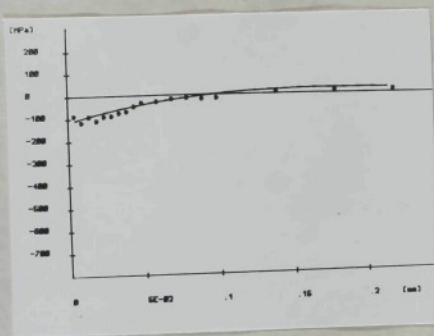
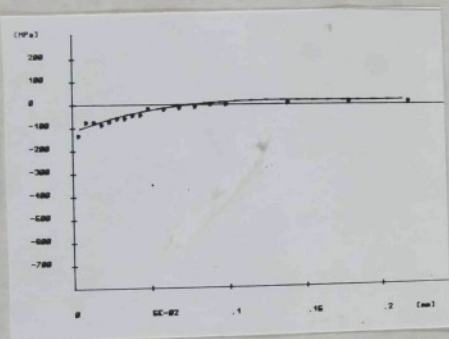
VZ.č.56

## II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



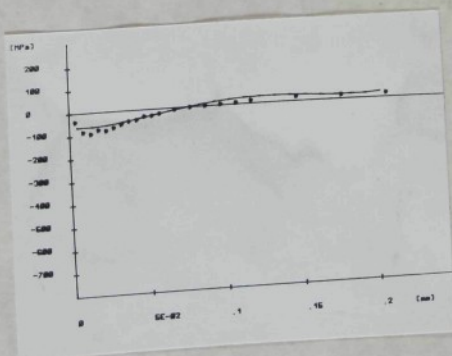
VZ.č.54

VZ.č.55



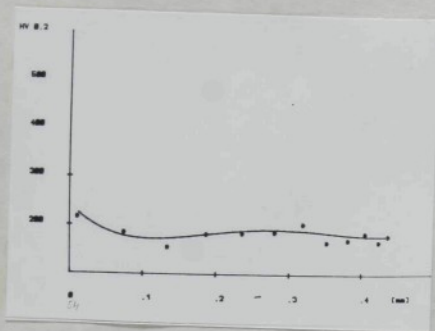
VZ.č.56

VZ.č.57

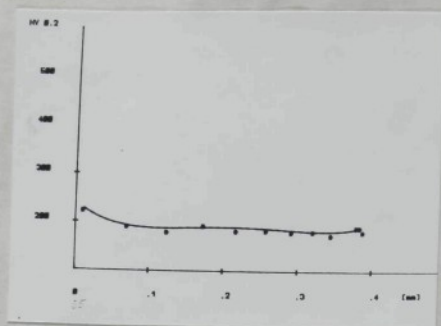


VZ.č.58

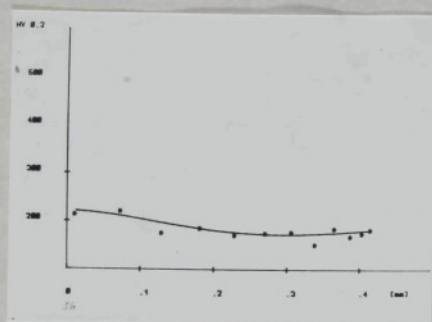




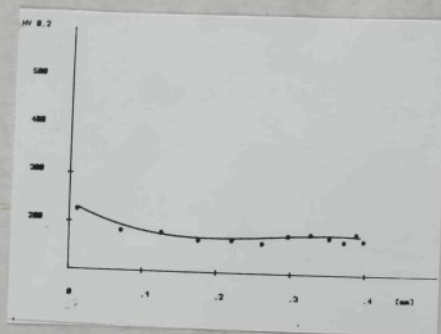
VZ. č. 54



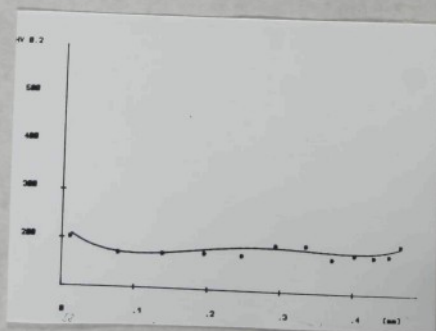
VZ. č. 55



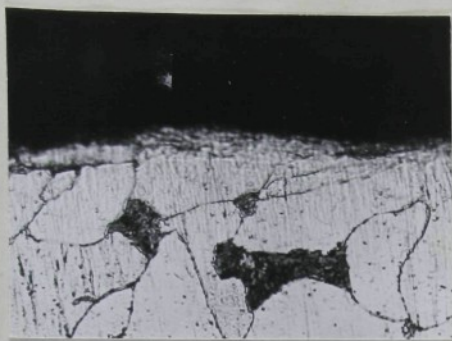
VZ. č. 56



VZ. č. 57

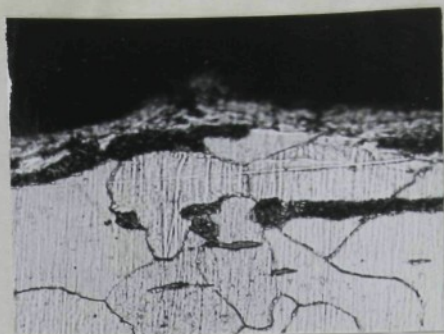


VZ. č. 58



VZ.č.54

500x



VZ.č.56

500x



VZ.č.54

100x



VZ.č.56

100x

# V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 10

OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 11 373

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBDS20<sub>B</sub> DNMM 150408

BEZ UTVAŘEČE \*



VZ. č. 54

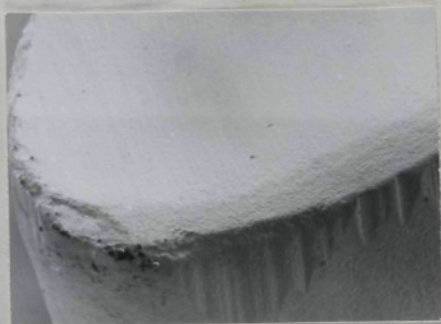
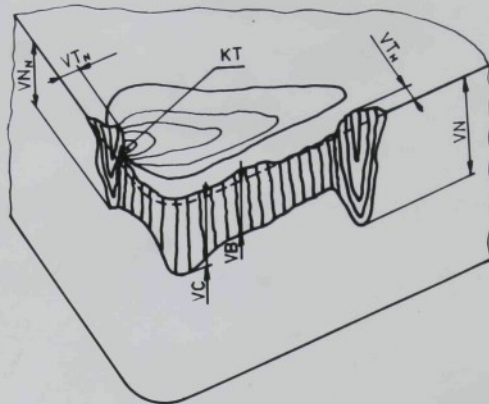
100x



VZ č. 56

100x

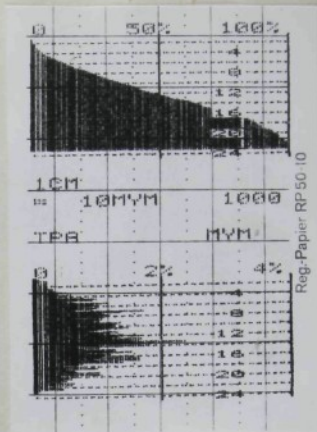
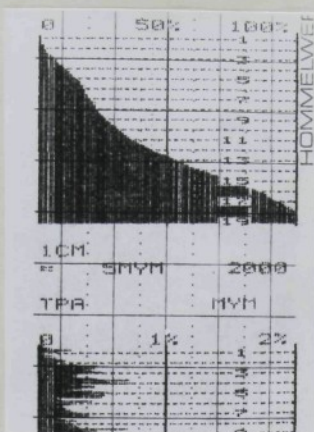




VZ. č. 52

| č.v. | T[min] | VB[mm] | VC[mm] | KT[mm] | VN[mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>N</sub> [mm] |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 49   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0                    | 0                    | 0                    |
| 50   | 3,5    | 0,12   | 0,24   | 0      | 0,19   | 0,25                 | 0,11                 | 0,13                 |
| 51   | 10     | 0,29   | 0,41   | 0,01   | 0,29   | 0,13                 | 0,05                 | 0,10                 |
| 52   | 20     | 0,27   | 0,72   | 0,06   | 1,25   | 0,30                 | 0,09                 | 0,07                 |
| 53   | 13     | 0,16   | 0,23   | 0,05   | 0,51   | 0,18                 | 0,04                 | 0,03                 |

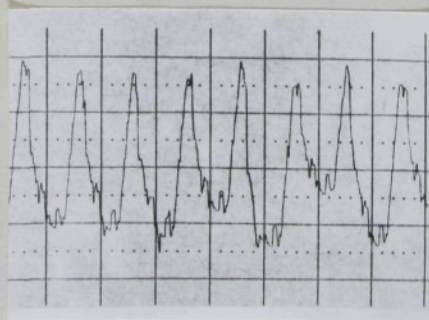
I OPOTŘEBENÍ VBD



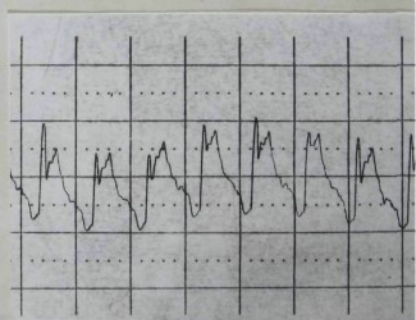
|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | == | 0.50MM/S |
| LT   | == | 4.8 MM   |
| RT   | == | 17.65MYM |
| RM   | == | 17.65MYM |
| RZ-D | == | 16.50MYM |
| RZ-I | == | 16.70MYM |
| RA   | == | 3.85MYM  |
| RP   | == | 10.15MYM |
| RPM  | == | 9.50MYM  |
| RQ   | == | 4.55MYM  |
| RZN  | == | 14.55MYM |
| RZN1 | == | 15.15MYM |
| PT   | == | 19.05MYM |
| WT   | == | 1.50MYM  |
| NR   | == | 50       |
| K111 |    |          |

|      |    |          |
|------|----|----------|
| UT   | == | 0.50MM/S |
| LT   | == | 4.8 MM   |
| RT   | == | 23.40MYM |
| RM   | == | 21.00MYM |
| RZ-D | == | 19.70MYM |
| RZ-I | == | 20.60MYM |
| RA   | == | 4.20MYM  |
| RP   | == | 14.00MYM |
| RPM  | == | 10.90MYM |
| RQ   | == | 4.90MYM  |
| RZN  | == | 15.80MYM |
| RZN1 | == | 16.20MYM |
| PT   | == | 22.80MYM |
| WT   | == | 4.40MYM  |
| NR   | == | 57       |
| K111 |    |          |

|                      |
|----------------------|
| VN <sub>N</sub> (mm) |
| 0                    |
| 0,13                 |
| 0,10                 |
| 007                  |
| 003                  |

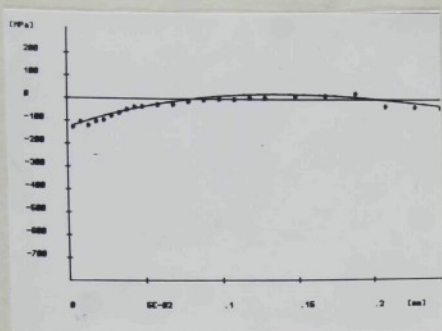


VZ.č49

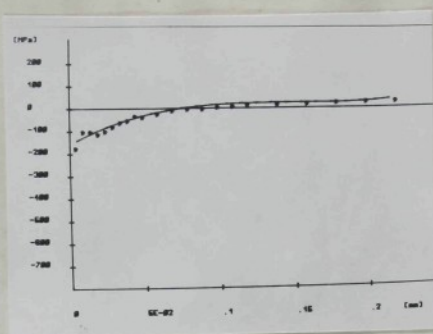


VZ.č52

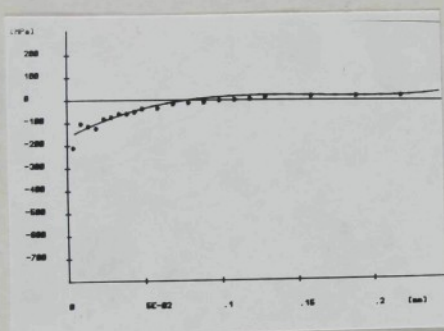
## II PARAMETRY MIKROGEOMETRIE POVRCHU



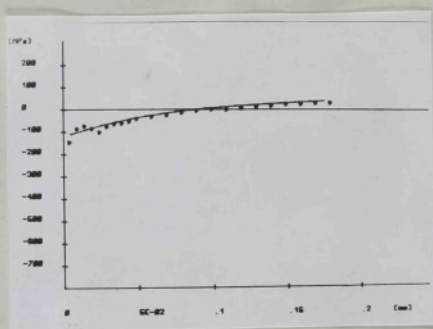
VZ.č. 49



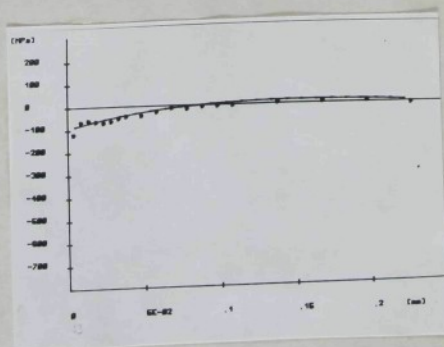
VZ.č. 50



VZ.č. 51

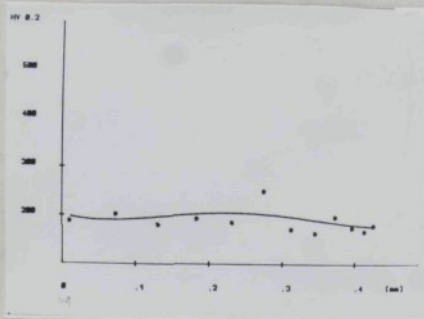


VZ.č. 52

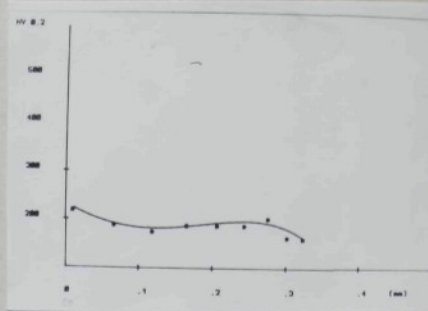


VZ.č. 53

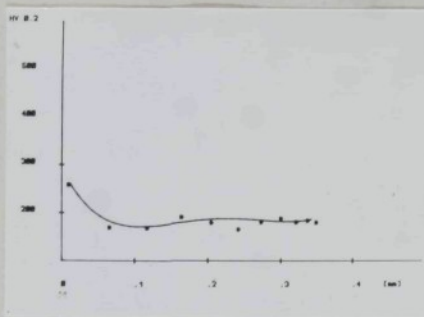




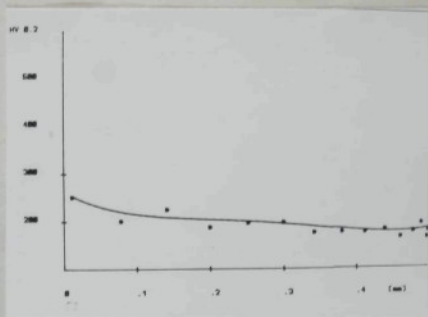
VZ č.49



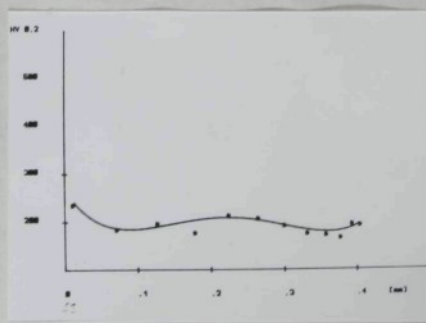
VZ č.50



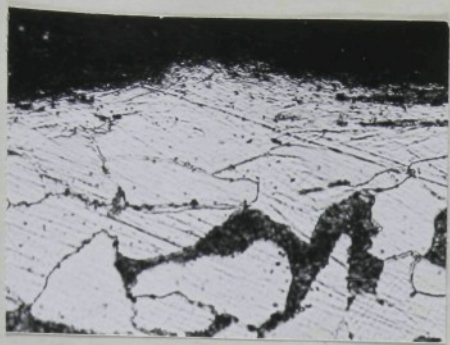
VZ č.51



VZ č.52

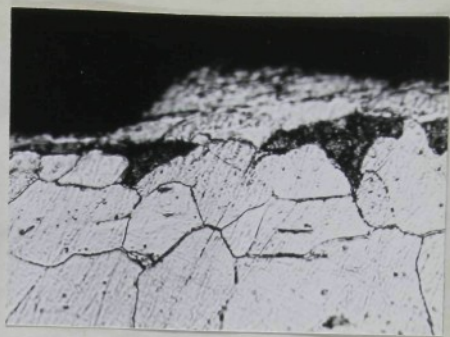


VZ č.53



VZ.č.49

500x



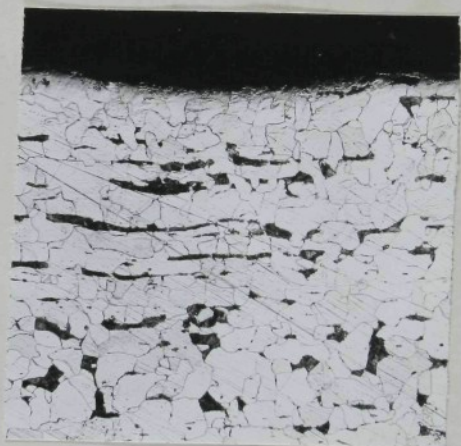
VZ.č.52

500x



VZ.č.49

100x



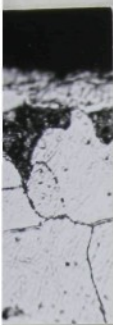
VZ.č.52

100x

V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 11 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 11373

ŘEZNÝ NÁSTROJ: VBD S20 DNMM 150408



00 x



VZ.č.49

100 x

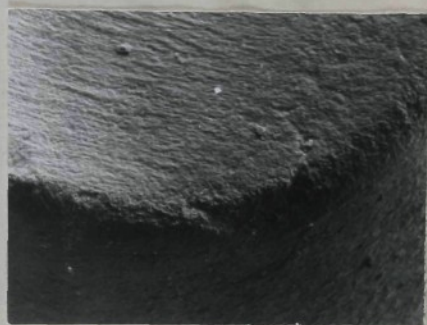
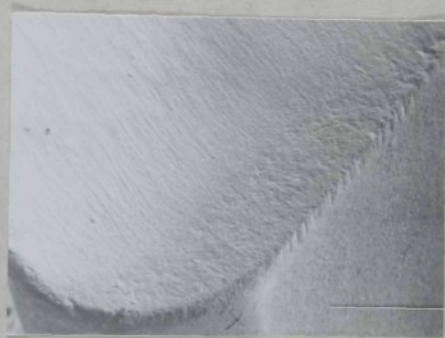
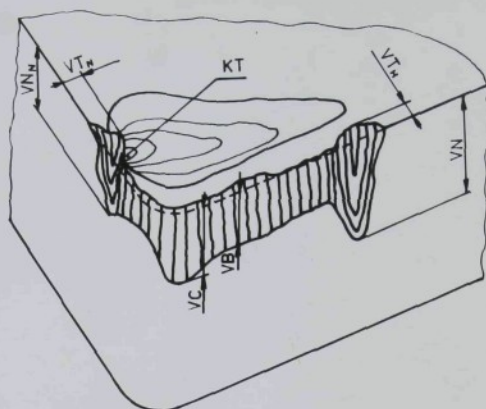


VZ.č.49

100 x

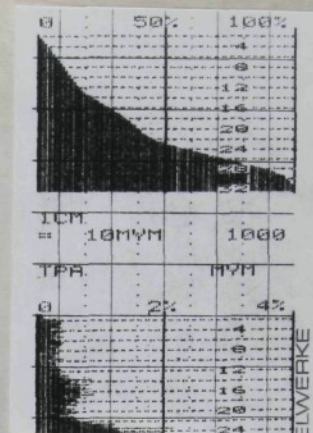
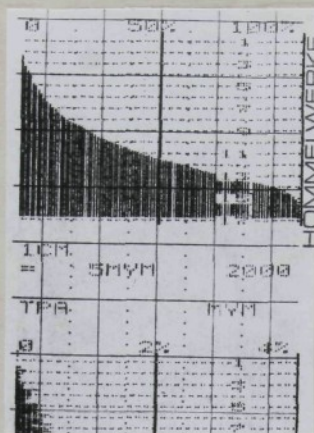
150408





VZ.č.48

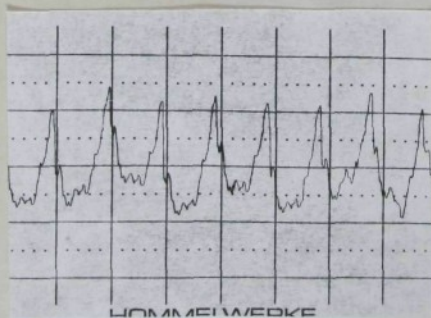
| č.v. | T[min] | VB[mm] | VC[mm] | KT[mm] | VN[mm] | VT <sub>H</sub> [mm] | VT <sub>N</sub> [mm] | VN <sub>1</sub> [mm] |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 44   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0                    | 0                    | 0                    |
| 45   | 3,5    | 0,05   | 0,16   | 0      | 0,05   | 0,03                 | 0,02                 | 0,03                 |
| 46   | 16,5   | 0,14   | 0,30   | 0      | 0,14   | 0,07                 | 0,01                 | 0,07                 |
| 47   | 7      | 0,26   | 0,44   | 0      | 0,26   | 0,02                 | 0,02                 | 0,05                 |
| 48   | 29     | 0,13   | 0,23   | 0      | 0,51   | 0,45                 | 0,04                 | 0,15                 |



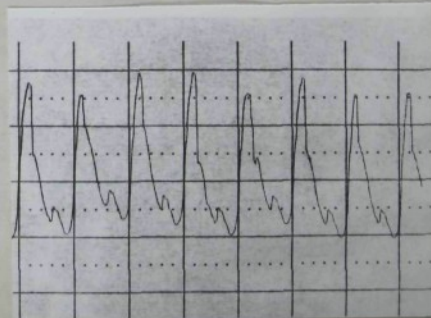
|      |   |          |
|------|---|----------|
| UT   | = | 0.50MM/S |
| LT   | = | 4.8 MM   |
| RT   | = | 12.85MYM |
| RM   | = | 12.40MYM |
| RZ-D | = | 11.80MYM |
| RZ-I | = | 11.85MYM |
| RA   | = | 2.35MYM  |
| RP   | = | 8.25MYM  |
| RPM  | = | 7.25MYM  |
| RQ   | = | 3.75MYM  |
| RZ2  | = | 9.15MYM  |
| RZ2M | = | 10.80MYM |
| PT   | = | 16.80MYM |
| UT   | = | 4.80MYM  |
| NR   | = | 67       |
|      |   |          |
|      |   |          |
|      |   |          |
|      |   |          |
| NUL  |   |          |

|      |   |          |
|------|---|----------|
| UT   | = | 0.50MM/S |
| LT   | = | 4.8 MM   |
| RT   | = | 29.90MYM |
| RM   | = | 29.80MYM |
| RZ-D | = | 28.30MYM |
| RZ-I | = | 29.10MYM |
| RA   | = | 6.80MYM  |
| RP   | = | 19.70MYM |
| RPM  | = | 18.70MYM |
| RQ   | = | 7.70MYM  |
| RZ2  | = | 23.20MYM |
| RZ2M | = | 25.10MYM |
| PT   | = | 32.30MYM |
| UT   | = | 3.50MYM  |
| NR   | = | 40       |
|      |   |          |
|      |   |          |
|      |   |          |
|      |   |          |
| NUL  |   |          |

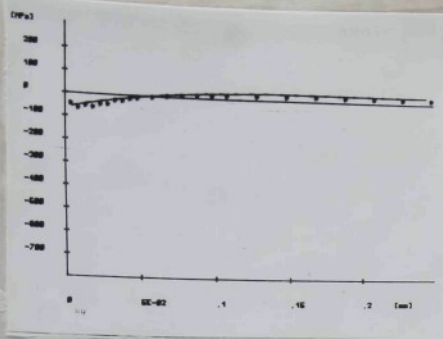
|       |
|-------|
| N(mm) |
| 0     |
| 0.03  |
| 0.07  |
| 0.05  |
| 0.15  |



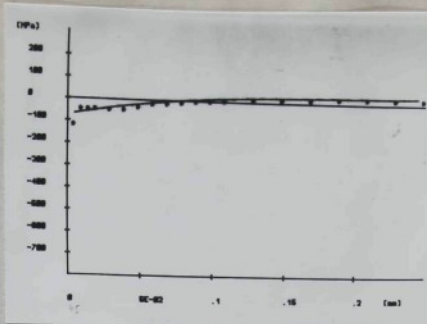
VZ.č.44



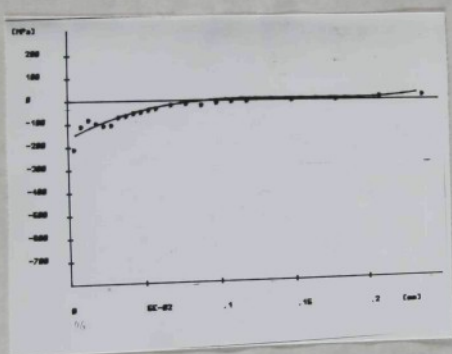
VZ.č.48



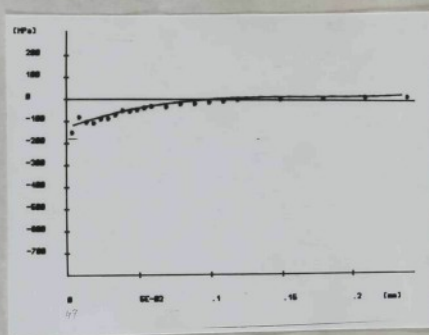
VZ.č.44



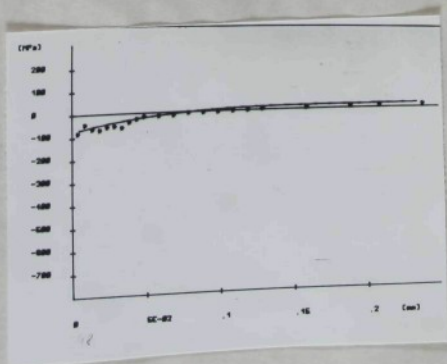
VZ.č.45



VZ.č.46

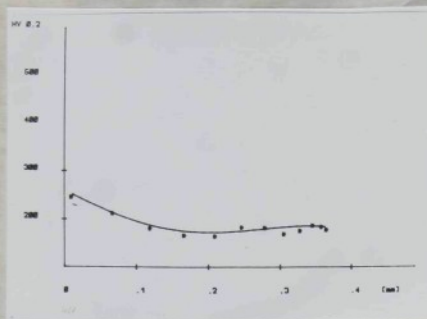


VZ.č.47

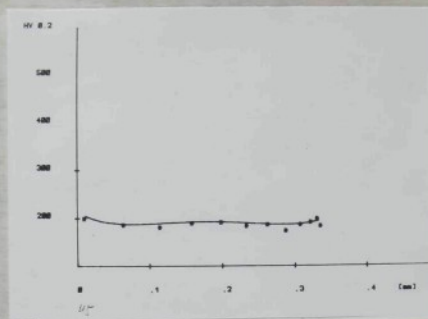


VZ.č.48

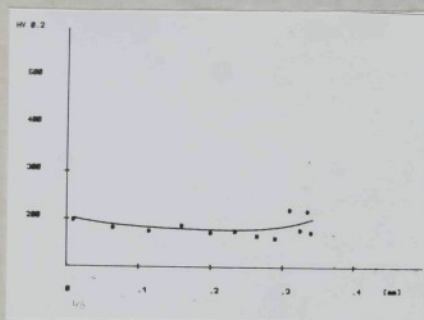




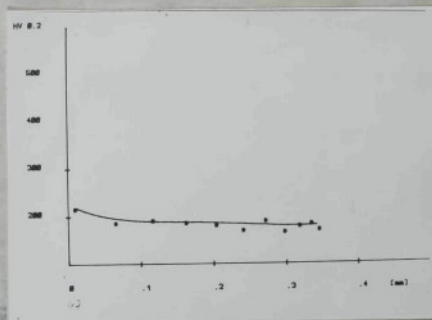
VZ.č.44



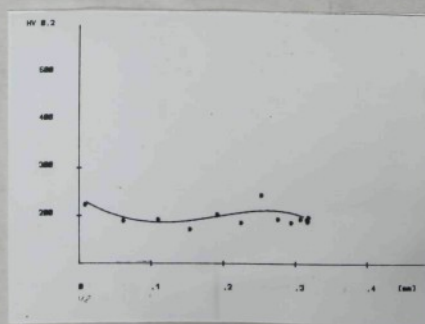
VZ.č.45



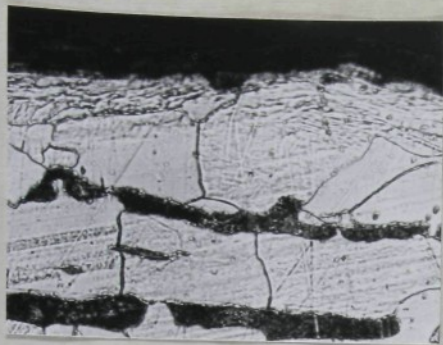
VZ.č.46



VZ.č.47

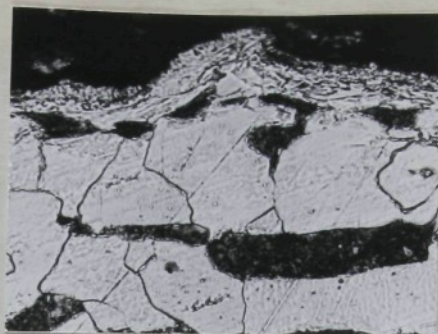


VZ.č.48



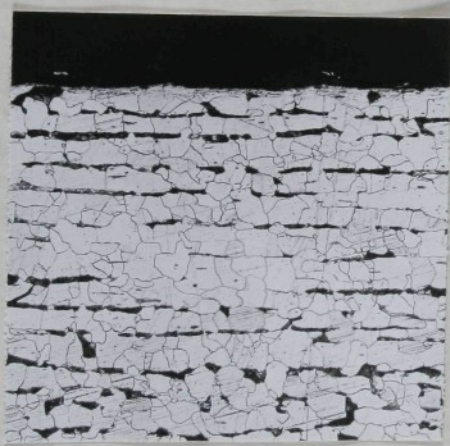
VZ.č.44

500 x



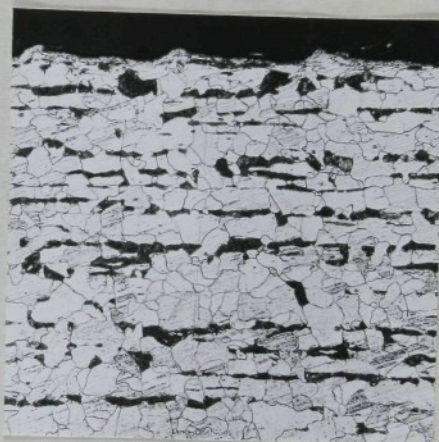
VZ.č.48

500 x



VZ.č.44

100 x



VZ.č.48

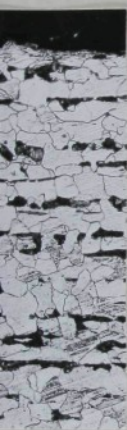
100 x

# V MIKROSTRUKTURA POVRCHU

PŘÍLOHA 12

OBRÁBĚNÝ MATERIÁL : 11 373

ŘEZNÝ NÁSTROJ : VBD S20CN DNMM 150408



0 x

M 150408



VZ. č.44

100 x



VZ.č.48

100 x