

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2017

JAN ČUPA



**Stanovení optimálních řezných podmínek na základě
vizualizace řezných odporů**
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Doc. Ing. Michal Černý, CSc.

Vypracoval:
Bc. Jan Čupa

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: *Stanovení optimálních řezných podmínek na základě vizualizace řezných odporů* vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Doc. Ing. Michalu Černému, CSc., jehož odborné vedení, vynikající teoretické znalosti i praktické zkušenosti a cenné rady významným dílem přispěly k vypracování mého diplomového projektu. Dále chci poděkovat panu Jiřímu Slavíkovi, Ing. Michalu Šustrovi a Ing. Jakubu Rozlivkovi, kteří se podíleli na uskutečnění experimentálního měření.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na stanovení optimálních řezných podmínek pomocí nedestruktivní metody testování - akustické emise (dále AE). Práce se konkrétně zabývá detekcí opotřebením nástroje při kontinuálním sledování obráběcího procesu metodou AE.

Teoretická část projektu začíná teorií obrábění, po které následují mechanismy opotřebením řezných nástrojů. Další kapitola je kompilací z oblasti měření řezných odporů a momentů. Poslední kapitola v rešeršní části popisuje metodu AE.

Náplní praktické části je popis přípravy a metodiky experimentálního měření, následovaný popisem průběhu měření AE při soustružení ostrým a tupým nástrojem. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky měření a na základě získaných poznatků je navrženo uplatnění pro praxi.

Klíčová slova

soustružení, opotřebením, řezný odpor, akustická emise

ABSTRACT

The thesis named *Determination of optimum cutting conditions based on the visualization of cutting resistances* is focused on the determination of optimum cutting conditions by the method of non-destructive testing - acoustic emission. Thesis specifically deals with the detection of cutting tool wear during continuous observation of machining process.

The theoretical part of thesis starts with the theory of machining and wear mechanisms of cutting tools. Considerable attention has been paid to compilation from cutting force measurement. Final chapter of this part describes method of acoustic emission.

Practical part of the thesis describes preparation and methodics of the experimental measurement. Next there is described measurement process with sharp and worn cutting tool. End of the thesis evaluates measurement results and also suggests practical application of the obtained knowledge.

Keywords

turning, cutting tool wear, cutting resistance, acoustic emission

OBSAH

| | | |
|-------|----------------------------------------------|----|
| 1 | ÚVOD | 8 |
| 2 | CÍL | 9 |
| 3 | TEORIE OBRÁBĚNÍ | 10 |
| 3.1 | Základní pojmy | 10 |
| 3.2 | Kinematika řezného procesu | 11 |
| 3.3 | Kinematika soustružení | 12 |
| 3.4 | Řezné síly a odpory | 13 |
| 3.5 | Geometrie soustružnického nástroje | 14 |
| 3.6 | Nástrojové úhly | 15 |
| 4 | MECHANISMY OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ | 17 |
| 4.1 | Druhy opotřebení | 18 |
| 4.2 | Trvanlivost řezného nástroje (T) | 20 |
| 4.3 | Životnost řezného nástroje (Ž) | 20 |
| 5 | METODY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A MOMENTŮ | 21 |
| 5.1 | Nepřímé měření řezných sil a momentů | 21 |
| 5.2 | Přímé měření řezných sil a momentů | 21 |
| 5.3 | Základní rozdělení dynamometrů | 22 |
| 5.3.1 | Mechanické dynamometry | 23 |
| 5.3.2 | Hydraulické dynamometry | 24 |
| 5.3.3 | Pneumatické dynamometry | 24 |
| 5.3.4 | Elektrické dynamometry | 25 |
| 5.3.5 | Elektrické indukční dynamometry | 25 |
| 5.3.6 | Piezoelektrické dynamometry | 26 |
| 5.3.7 | Tenzometrické odporové dynamometry | 27 |
| 5.4 | Odporové tenzometry | 27 |
| 6 | AKUSTICKÁ EMISE | 28 |
| 6.1 | Typy akustické emise | 29 |
| 6.1.1 | Spojité akustická emise | 29 |
| 6.1.2 | Nespojitá („praskavá“) akustická emise | 30 |
| 6.2 | Parametrický popis signálu AE | 30 |
| 6.3 | Snímače AE | 32 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 6.3.1 | Charakteristické vlastnosti snímačů AE při měření..... | 33 |
| 6.4 | Výhody a nevýhody metody AE..... | 33 |
| 6.4.1 | Výhody metody AE..... | 33 |
| 6.4.2 | Nevýhody metody AE..... | 34 |
| 7 | PŘÍPRAVA MĚŘENÍ..... | 34 |
| 7.1 | Volba materiálu..... | 34 |
| 7.1.1 | Příprava vzorků..... | 34 |
| 7.2 | Volba nástroje a řezných podmínek..... | 36 |
| 7.3 | Snímač AE..... | 37 |
| 7.3.1 | Umístění snímače..... | 37 |
| 7.3.2 | Upevnění snímače AE..... | 38 |
| 7.4 | Návrh postupu měření..... | 38 |
| 7.5 | Konfigurace měřicí aparatury Dakel - XEDO..... | 39 |
| 8 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 40 |
| 8.1 | Strojové vybavení..... | 40 |
| 8.1.1 | Soustruh použitý v experimentu..... | 40 |
| 8.2 | Diagnostický systém Dakel XEDO - Daemon..... | 41 |
| 8.2.1 | Analyzátor akustické emise Dakel - XEDO..... | 42 |
| 8.2.2 | Měřicí kanálová jednotka diagnostického systému AE..... | 43 |
| 8.3 | Průběh experimentálního měření..... | 44 |
| 8.3.1 | Opotřebenění nástroje..... | 45 |
| 8.3.2 | Stav vzorků po ukončení měření..... | 45 |
| 8.3.3 | Výsledky měření..... | 46 |
| 8.3.1 | Diskuse výsledků..... | 59 |
| 9 | ZÁVĚR..... | 60 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 61 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 63 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 64 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 65 |

1 ÚVOD

V oblasti zkoumání řezného procesu je k dispozici mnoho experimentálních metod. Při obrábění dochází v zóně řezání k plastické deformaci, což je složitý proces ovlivněný mnoha faktory. Velmi záleží na chemickém složení obráběného materiálu a jeho mechanických a fyzikálních vlastnostech. Vliv na tyto činitele má způsob výroby (tepelné a mechanické zpracování) a struktura materiálu. Plastické deformace lze při obrábění sledovat dvěma způsoby. A to buď kontinuálně během procesu řezání (přímým pozorováním) nebo po skončení procesu řezání (v tom případě se jedná o studium ukončených změn). Studium průběhu procesu řezání je možné hodnotit, zda jsou řezné podmínky ideální a případně je optimalizovat.

Mezi experimentální metody v oblasti kontinuálního sledování procesu obrábění patří například: rychlostní fotografické snímání probíhajících deformací, měření teploty soustavy stroj – nástroj – obrobek, měření vibrací, měření řezných sil pomocí dynamometrů apod.

V posledních dvou dekádách dochází k rozvoji a rozšiřování nedestruktivního testování metodou akustické emise. Jedná se o velmi perspektivní metodu, která nachází uplatnění v kontinuálním sledování velkého množství různorodých procesů (od testování tlakových nádob, přes sledování plošné koroze až k monitoringu přehradních hrází). Princip měření spočívá v detekci napěťové vlny vznikající události (korozní praskání, trhliny v materiálu apod.) snímačem umístěným na sledovaném objektu.

Metoda akustické emise v posledních letech proniká i do oblasti sledování řezného procesu. Signál akustické emise je pro své charakteristické vlastnosti vhodný k monitoringu stavu obráběcího nástroje a to zejména v oblasti ultrazvuku (protože má široký frekvenční rozsah). Výhodou frekvenčního rozsahu je eliminace rušivých vlivů prostředí a vlastních kmitů stroje, ležících převážně ve slyšitelném pásmu zvukového spektra. Vznik signálu akustické emise je spojen s fyzikální podstatou tvorby třísky, což znamená, že jej lze měřit nepřetržitě během celého obráběcího procesu. [5]

2 CÍL

Cílem teoretické části diplomové práce je vytvořit ucelený soubor nejnovějších poznatků z oblasti teorie obrábění, mechanismů opotřebení řezných nástrojů, měření řezných odporů a akustické emise.

Cílem praktické části projektu je navrhnout metodiku pro detekci napěťových vln akustické emise při kontinuálním sledování řezného procesu soustružení a proveditelnost navrženého postupu následně ověřit experimentálním měřením.

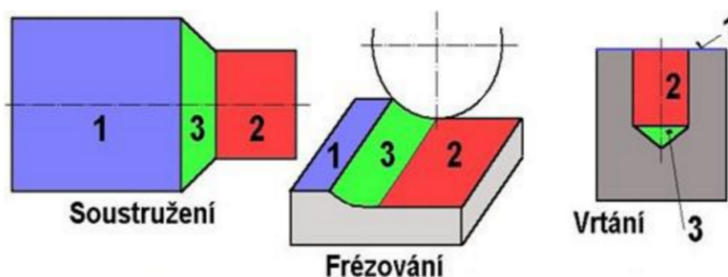
Podstatou měření AE bude zaznamenat napěťové vlny vyvolané řeznými odpory při obrábění dvou druhů vzorků konstrukční oceli naostřeným a opotřebeným nástrojem. A na základě porovnání vizualizací řezných odporů, při obrábění ostrým a tupým nástrojem, určit optimální řezné podmínky a navrhnout využití pro praxi.

3 TEORIE OBRÁBĚNÍ

Obrábění je proces, při kterém dochází k oddělování částic materiálu obrobku břitem nástroje. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako řezání, respektive řezný proces. Dle způsobu oddělování materiálu rozlišujeme řezný proces kontinuální (soustružená, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). [1]

3.1 Základní pojmy

- **Obrobek** – obráběná, nebo již částečně, případně úplně obrobená součást. Je charakterizován obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou. Tyto plochy jsou názorně vyznačeny na Obr. 1.
- **Obráběná plocha** – plocha, která má být obrobena řezáním.
- **Obrobená plocha** – plocha, která je získána jakožto výsledek řezného procesu.
- **Přechodová plocha** – část povrchu obrobku, která je vytvořena působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku.
- **Nástroj** – činitel, který v interakci s obrobkem umožňuje realizovat řezný proces. Z geometrického hlediska je identifikován svými prvky, plochami, ostřími a rozměry ostří.
 - Řezná část – funkční část nástroje, obsahující prvky tvořící třísku. Těmi jsou zejména ostří, čelo a hřbet.
 - Základna – plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje. Slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření.
 - Břit – prvek řezné části nástroje, který je ohraničen čelem a hřbetem nástroje. Může být spojený jak s hlavním, tak i vedlejším ostřím. [1]



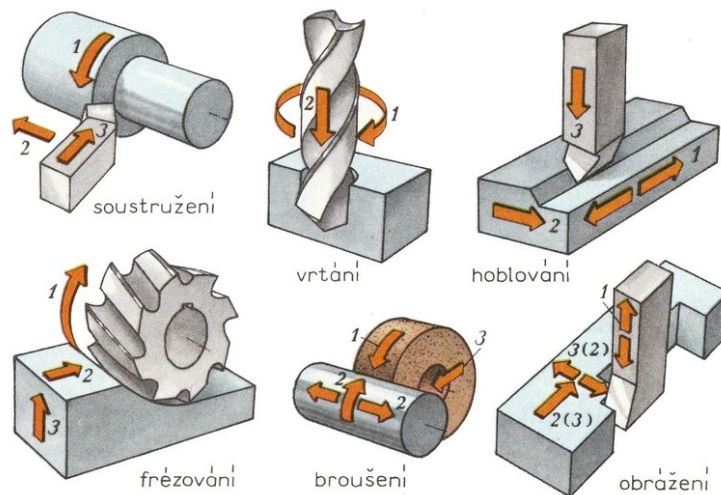
Obr. 1 Základní druhy ploch u vybraných typů obrábění [18]

1 – obráběná plocha, 2 – obrobená plocha, 3 – přechodová plocha

3.2 Kinematika řezného procesu

Kinematika řezného procesu je identifikována relativními pohyby nástroje a obrobku, které se vyjádří vhodnými veličinami:

- **Hlavní pohyb** – je vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem, realizován obráběcím strojem. Při soustružení je to rotační pohyb obrobku, zatímco při vr-tání a frézování je to rotační pohyb nástroje, při hoblování je to pak přímočarý pohyb obrobku
- **Směr hlavního pohybu** – je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.
- **Řezná rychlost v_c** – je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního pohybu.
- **Posuvový pohyb** – je realizovaný obráběcím strojem jako další relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Posuvový pohyb společně s hlavním pohybem umožňuje plynulé nebo přerušované odřezávání třísky z obráběného povrchu. Posuvový pohyb může být postupný nebo plynulý. Při některých obráběcích procesech posuvový pohyb není potřebný (protahování).
- **Směr posuvového pohybu** – je určen směrem okamžitého posuvového pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.
- **Posuvová rychlost v_f** - je určena jako okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku. V případě přerušovaného posuvu není jeho rychlost definována (hoblování, obrážení).
- **Řezný pohyb** – je pohyb vycházející ze současného hlavního a posuvového pohybu.
- **Směr řezného pohybu** – je dán směrem okamžitého řezného pohybu uvažova-ného bodu ostří vzhledem k obrobku.
- **Rychlost řezného pohybu v_e** – je okamžitá rychlost řezného pohybu uvažova-ného bodu ostří vzhledem k obrobku.
- **Úhel posuvového pohybu φ** – vyjádřen jako úhel mezi směry současného po-suvového a hlavního pohybu, který je měřený v pracovní boční rovině P_{fe} . Tento úhel není pro některé obráběcí procesy definovaný (hoblování, protaho-vání).
- **Úhel řezného pohybu η** – je dán úhlem mezi směrem hlavního pohybu a směrem řezného pohybu, měřený v pracovní boční rovině P_{fe} . [1]



Obr. 2 Řezné pohyby u různých typů obráběcích procesů [17]

1 – hlavní pohyb, 2 – vedlejší řezný pohyb (posuv), 3 – přísv

3.3 Kinematika soustružení

Hlavní pohyb (rotační) vykonávaný obrobkem, je definován vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

v_c - řezná rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

D - průměr obrobku (mm)

n - otáčky (min^{-1})

Vedlejší pohyb (přímočarý) vykonávaný soustružnickým nožem, je definován:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad (3.2)$$

v_f – posuvová rychlost ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

f – posuv na otáčku

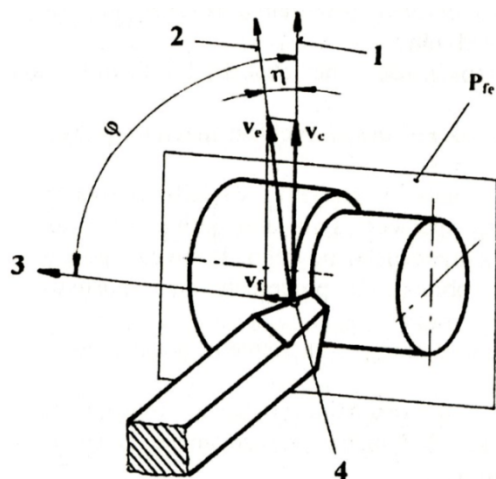
Výsledný efektivní pohyb je vektorovým součtem řezného a posuvového pohybu

$$v_e = v_c + v_f \quad (3.3)$$

resp. ve skalárním tvaru:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (3.4)$$

[2]



Obr. 3 Pohyby nástroje a obrobku při podélném soustružení [1]

1 - směr hlavního pohybu; 2 - směr řezného pohybu; 3 - směr posuvového pohybu; 4 - uvažovaný bod ostří; P_{fc} - pracovní boční rovina; v_c - řezná rychlost; v_f - posuvová rychlost; v_e - výsledná rychlost řezného pohybu; φ - úhel posuvového pohybu; η - úhel řezného pohybu.

3.4 Řezné síly a odpory

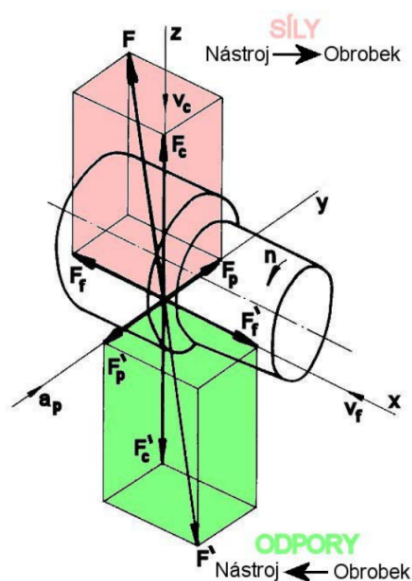
a) Celková řezná síla – při soustružení (Obr. 4) se vypočte podle vztahu:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \text{ (N)} \quad (3.5)$$

F_c – řezná síla (N)

F_p – pasivní síla (N)

F_f – posuvová síla (N). [20]



Obr. 4 Řezné síly a odpory při soustružení [20]

b) Měrný řezný odpor

Měrná síla potřebná k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. Měrný řezný odpor k_c je vyjádřen řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu. Je tedy definován jako poměr řezné síly a plochy jmenovitého průřezu třísky. Z toho důvodu je jednotkou MPa (označení měrný řezný odpor a měrná řezná síla koreluje s principem akce a reakce). Definice měrné řezné síly v základním tvaru odpovídá rovnici (4.2): [2]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ (MPa)} \quad (3.6)$$

F_c – řezná síla (N)

A_D – jmenovitý průřez třísky (mm^2)

Na velikost řezného odporu mají vliv:

- Fyzikální vlastnosti materiálu obrobku (především tvrdost nebo pevnost)
- Velikost průřezu třísky – především tloušťka třísky
- Geometrie nástroje, případně další deformační podmínky
- Řezné prostředí, apod. [2]

3.5 Geometrie soustružnického nástroje

Soustružnické nože jsou geometrická tělesa, která jsou složená nebo celistvá.

Nejvýznamnějšími částmi řezného nástroje jsou:

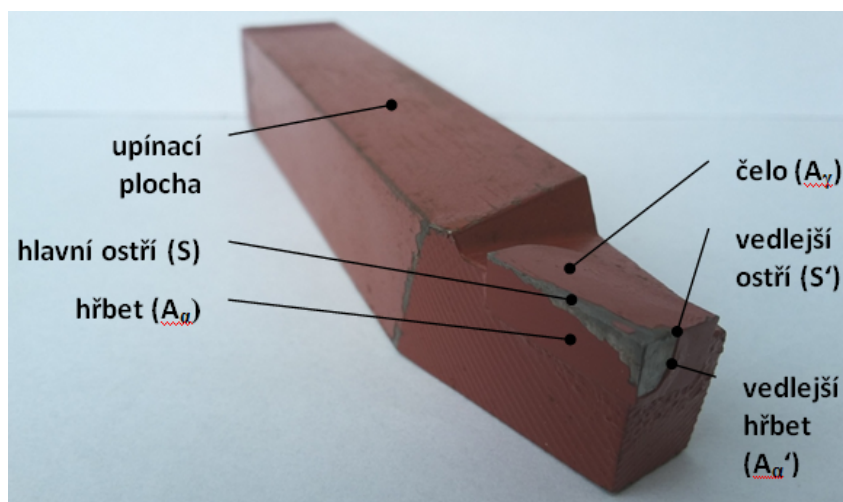
- Část upínací (stopka, držák).
- Část řezná (ta může být celistvá, dělená nebo výměnná). [1]

Část řezná sestává z prvků, které je možné vidět na Obr. 5, kde je popsán soustružnický nůž s letovaným řezným plátkem slinutého karbidu (dále SK):

- **Čelo A_γ** – plocha, případně souhrn ploch, po nichž odchází tříška. Pokud čelo tvoří několik protínajících se ploch, určí se označení tak, že k indexu se připojí pořadové číslo, začínající od ostří (např. $A_{\gamma 1}$, $A_{\gamma 2}$).
- **Utvařec třísky** – část čelní plochy, která je určena na lámání nebo svinování třísky. Je realizována vhodným tvarováním čela, nebo přiloženým utvařecem.
- **Hřbet (A_α , A_α')** – plocha, případně souhrn ploch, jež při procesu řezání směřují k ploše obrobku. Jestliže hřbet tvoří několik protínajících se ploch, určuje se

označení tak, že k indexu se připisuje pořadové číslo, ve směru od ostří. Hlavní hřbet A_α směřuje k přechodové ploše.

- **Ostří** – prvek řezné části nástroje, kterým je realizován vlastní proces řezání
- **Hlavní ostří (S)** – část ostří, začínající v bodě, kde nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r je roven nule. Hlavní ostří slouží k vytvoření přechodové plochy na obrobku. Má-li nástroj ostrou špičku, hlavní ostří začíná na této špičce.
- **Vedlejší ostří S'** - část ostří, kde nástrojový úhel nastavení ostří κ_r je rovný nule, ale ve směru od hlavního ostří. Úkolem vedlejšího ostří je provést dokončovací práci na obrobené ploše. Nezúčastňuje se při vytváření přechodové plochy. Některé nástroje (např. upichovací nože) mohou mít několik vedlejších ostří. [1]



Obr. 5 Popis soustružnického nože, foto: autor

3.6 Nástrojové úhly

Základními nástrojovými úhly (Obr. 6) jsou v případě soustružnického nože:

Úhel hřbetu (α), úhel břitu (β), úhel čela (γ), úhel řezu (δ).

Vliv nástrojových úhlů na řezný proces je následující:

a) **Úhel hřbetu (α)** – konstrukčně se navrhuje v rozmezí $+8^\circ$ až $+12^\circ$.

Jeho hodnota se projevuje na:

- tření nástroje o obrobek
- poměrech velikostí složek sil řezání
- vzniku tepla, zejména třením
- tuhosti břitu
- trvanlivosti nástroje

b) Úhel břitu (β) – navrhován v rozmezí od $+40^\circ$ do $+100^\circ$

Hodnota úhlu břitu má vliv na:

- pevnost břitu
- velikost řezného odporu
- odvod tepla z místa obrábění do tělesa nože

c) Úhel čela (γ) – Je běžně volen od -8° do $+8^\circ$.

Jeho hodnota má vliv na:

- tvorbu třísek
- poměry velikosti složek síly řezání
- opotřebení řezného nástroje
- drsnost obrobené plochy

S úhlem hřbetu působí tento úhel i na tuhost a pevnost břitu nástroje. Čím je větší, tím snadněji břit vniká do materiálu a tím menší je řezný odpor. Potom však dochází k zeslabování břitu a ten je tím citlivější na vylomení. Při velkém úhlu čela dochází ke zhoršování kvality obrobené plochy (drsnost povrchu), protože břit materiál „vytrhává“.

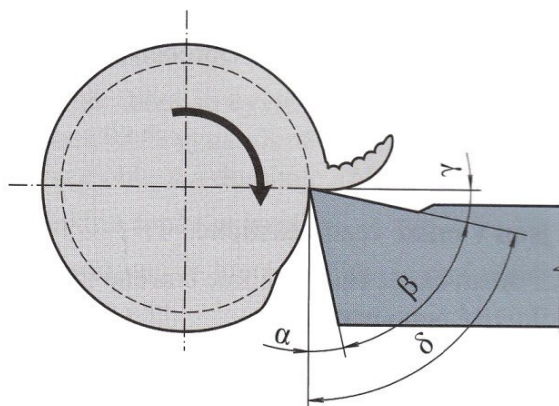
U materiálů s malou pevností v ohybu (slinuté karbidy, keramické materiály) se používají záporné úhly čela. [11]

d) Úhel řezu (δ) – Je doplňkovým úhlem k úhlu čela do 90° .

Mezi úhly určenými v nástrojové rovině měření platí:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (3.7)$$

$$\gamma + \delta = 90^\circ \quad (3.8)$$



Obr. 6 Základní nástrojové úhly soustružnického nože [11]

4 MECHANISMY OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Opotřebení je běžným důsledkem funkce strojních součástí, u nichž dochází ke vzájemnému silovému kontaktu a relativnímu pohybu. V případě obrábění dochází vlivem řezného procesu k relativnímu pohybu soustavy nástroj - obrobek a nástroj - tříška, i ke kontaktu nástroje s obrobkem (na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje) a odcházející třískou (na čele nástroje), což musí nutně vést k opotřebení nástroje.

Podmínky práce řezného nástroje se zásadně liší od podmínek práce běžných strojních součástí, což je velmi dobře zřejmé z Tab. 1. [2]

Tab. 1 Komparace velikosti zatížení běžných součástí a řezných nástrojů [2]

| Pracovní podmínky | Strojní součásti | Břit nástroje |
|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Tlakové kontaktní zatížení [MPa] | 10^2 | $10^3 - 10^4$ |
| Teplota na funkčním povrchu [°C] | 60 - 100 | 300 - 1200 |
| Teplotní gradient na čele nástroje [°C.mm ⁻¹] | - | 10^4 |
| Rychlost ohřevu na čele nástroje [°C.s ⁻¹] | - | $10^6 - 10^9$ |
| Deformační rychlosti [s ⁻¹] | - | $10^3 - 10^6$ |
| Doba kontaktu mezi nástrojem a třískou [s] | - | 10^{-3} |
| Otěr na dráze $10^3 - 10^4$ [mm.m ⁻¹] | $10^{-3} - 10^{-4}$ | $10^{-2} - 10^{-1}$ |

Proces opotřebení je složitým dějem, závislým na mnoha faktorech – na fyzikálních i mechanických vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu (zejména druhu polotovaru), druhu obráběcí operace a řezu (plynulý nebo přerušovaný), geometrii nástroje, řezných podmínkách, atd. [2]

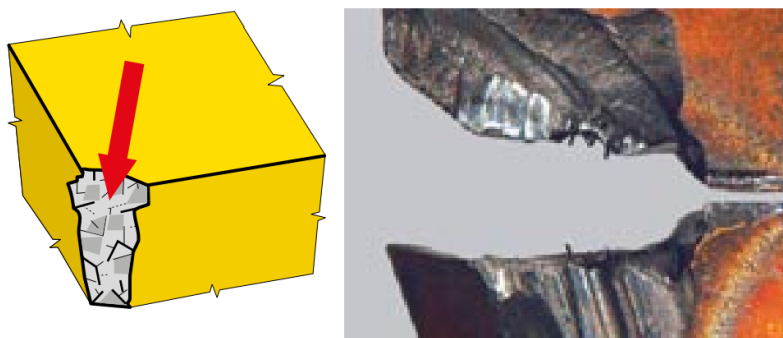
Základní kategorie mechanismů opotřebení bříty jsou vyjmenovány v Tab. 2.

Tab. 2 Kategorie mechanismů opotřebení bříty [2]

| Fyzikálně - Mechanické | Chemické |
|----------------------------------------|------------------------------|
| Křehký lom | Difúzní otěr |
| Plastická deformace | Tvorba chemických sloučenin |
| Abrazivní otěr | Interkrystalické zeslabování |
| Adhezní otěr | Termo-elektrické opotřebení |
| Teplotní trhliny | Kombinace mechanismů |
| Delaminace vrstev | |
| Kmity soustavy „Stroj-Nástroj-Obrobek“ | |
| Únava materiálu | |
| Kombinace mechanismů | |

4.1 Druhy opotřebení

- a) **Křehký lom** – příčiny destrukce břitu, resp. špičky nástroje mohou být různé a jsou závislé jak na materiálu nástroje, tak i na materiálu obrobku, stavu a zejména tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek.



Obr. 7 Křehký lom břitu nástroje [19]

Tomuto poškození lze předejít např. použitím houževnatějšího typu slinutého karbidu, zvolením méně intenzivních řezných podmínek (snížení posuvu i hloubky záběru), použitím nástroje s větším úhlem špičky atd. [19]

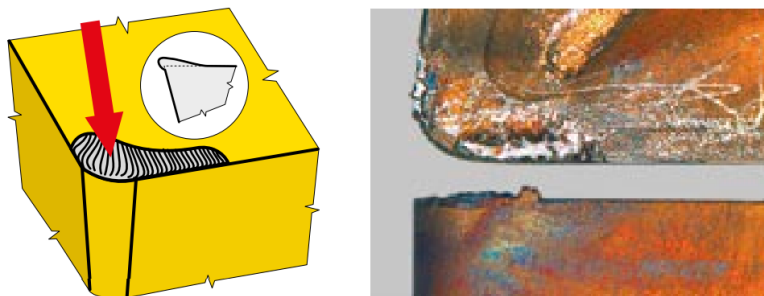
- b) **Abrazivní otěr** – jedná se o brusné opotřebení. Vlivem mikročástic materiálu obrobku, které jsou tvrdší než materiál břitu nástroje, dochází k abrazi (mechanickému vymílání) hřbetních a čelních ploch.



Obr. 8 Opotřebení hřbetu způsobené abrazivním otěrem [19]

Dochází-li k opotřebení nástroje otěrem, způsobem zobrazeným na Obr. 8, doporučuje se zvolit řezný materiál odolnější na otěr, zvýšit posuv (je-li nižší než $0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$), snížit řeznou rychlost a zajistit chlazení nebo zvýšit intenzitu chlazení. [19]

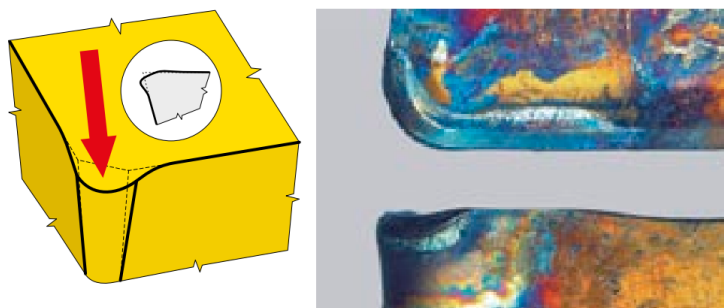
- c) **Adhezní otěr (tvorba nárůstku)** – způsobený adhezí (přilnavostí). Ve styku čela nástroje a vnější plochy vznikají mikrosváry (nárůstky), které jsou však další třískou rozrušovány. Při odtrhávání nárůstků může dojít ke křehkému porušení břitu nástroje. To má za následek snížení jakosti obráběného povrchu. [19]



Obr. 9 Nalepování obráběného materiálu na břit nástroje [19]

Dochází-li k tvorbě nárůstků a nalepování obráběného materiálu na břit nástroje (Obr. 9), může to být způsobeno malou řeznou rychlostí, nevhodným chlazením nebo nevhodným povlakem nástroje, případně málo pozitivní geometrií nástroje. [19]

- d) **Difúzní otěr** – vlivem difúze dochází k prolínání krystalografických mřížek, vzniká defektní vrstva o tloušťce až 20 μm s horšími mechanickými vlastnostmi. Defektní vrstva je pak náchylnější k abrazivnímu opotřebení. [9]
- e) **Porušení křehkými lomy** – vzniká, dojde-li k překročení zatížení břitu vlivem velkého nebo proměnlivého průřezu třísky, přerušovaného řezu, tepelných rázů nebo přítomností nekovových vměstků. [2]
- f) **Porušení plastickou deformací** – vzniká, obrábíme-li vyšší řeznou rychlostí materiál s nízkou tepelnou vodivostí. Pak dochází k přesunu plasticky deformovaných vrstev ve směru třísky. [9]



Obr. 10 Plastická deformace špičky nástroje [19]

V případě, že dochází k plastické deformaci špičky, jak je zobrazeno na Obr. 10, může být řešením snížení řezné rychlosti a posuvu.

Shrneme-li uvedené příčiny opotřebení řezných břitů nástroje, můžeme konstatovat, že otupení břítu je ovlivňováno:

- Vlastnostmi materiálu obrobku a činné části nástroje
- Z řezných podmínek nejvíce řeznou rychlostí, v podstatně menší míře velikostí posuvu a tloušťkou odřezávané vrstvy
- Z řezných úhlů úhlem řezu δ
- Řezným prostředím (jeho působením na velikost součinitele tření a teploty). [9]

4.2 Trvanlivost řezného nástroje (T)

Trvanlivost nástroje je možné definovat jako součet všech čistých časů řezání, od začátku obrábění až po opotřebení nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu a to po celou dobu trvanlivosti nástroje). Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebení nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), ale také vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí). [2]

4.3 Životnost řezného nástroje (Ž)

Životnost nástroje je definována jako součet všech trvanlivostí nástroje nebo také jako celková doba funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do jeho úplného vyřazení (tj. do stavu, kdy je celá funkční část nástroje odbroušena, nebo v případě vyměnitelných břitových destiček byly použity všechny břity). Dle tohoto hlediska je možné životnost n -krát přeastřené nástroje vyjádřit vztahem:

$$\check{Z} = 1 + \sum_1^n T_i \quad (4.1)$$

V případě vyměnitelných břitových destiček lze životnost vyjádřit vztahem:

$$\check{Z} = p \cdot \sum_1^n T_i \quad (4.2)$$

n – počet využitelných břitů na jedné straně destičky,

p – vyjadřuje, zda je destička jednostranná ($p=1$) nebo oboustranná ($p=2$). [2]

5 METODY MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A MOMENTŮ

V oblasti měření sil a momentů řezného procesu existují dva způsoby měření:

- Nepřímé měření sil a momentů,
- Přímé měření sil a momentů. [3]

5.1 Nepřímé měření řezných sil a momentů

Metody nepřímého měření vycházejí zejména z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Ze vztahu pro užitečný výkon při obrábění

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (W) \quad (5.1)$$

$P_{už}$ – užitečný výkon (W),

F_c – tangenciální (řezná) složka síly řezání (N),

v_c – řezná složka rychlosti obrábění ($m \cdot s^{-1}$).

vyplývá, že nepřímým měřením je možné z výkonu elektromotoru stanovit pouze tangenciální složku síly řezání. Tuto složku lze také určit nepřímým měřením z točivého momentu. [5]

5.2 Přímé měření řezných sil a momentů

Metoda přímého měření řezných sil a momentů je založena na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během procesu obrábění, k čemuž se využívá dynamometrů. Dynamometr musí jako měřicí přístroj zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Dále musí mít schopnost měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností a musí zaručit stálost naměřených hodnot s časem včetně její reprodukovatelnosti. [5]

Základní požadavky kladené na dynamometry:

- **Tuhost dynamometrů** - je dána velikostí zatěžující síly F , která způsobí deformaci. Velikost deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu – čidla, na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na použité měřicí metodě. Dostatečná tuhost dynamometru je při dynamickém měření zásadní.
- **Citlivost dynamometrů** - souvisí s citlivostí použité měřicí metody i s tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Dynamometr musí mít takovou citli-

vost, aby nejmenší odečítaná jednotka při dodržení dostatečné přesnosti odečítání odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny.

- **Stálost údajů dynamometrů** - je závislá na tuhosti, citlivosti a přesnosti od stanovení nulové polohy až po zachycení údajů o sledované veličině, a to po celou dobu měření.
- **Reprodukovatelnost údajů dynamometrů** - úzce souvisí s výše uvedenými charakteristikami.
- **Setrvačnost dynamometrů** - závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Zejména při dynamických měřeních, kdy je nutné sledovat jak skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené síly řezání, tak i její časový průběh, by měla být setrvačnost pokud možno co nejmenší.
- **Konstrukce dynamometrů** - musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly. [5]

Měřicí aparatura, používaná k měření složek řezné síly, je zpravidla složena ze tří částí:

- a) Pružný člen** - přebírá vnější zatížení a překonává jisté změny (deformace, změna polohy apod.).
- b) Snímač** - mění mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí aparatury.
- c) Přijímač** - zesiluje a zpracovává signál snímače, případně zapisuje velikost zatížení. [5]

5.3 Základní rozdělení dynamometrů

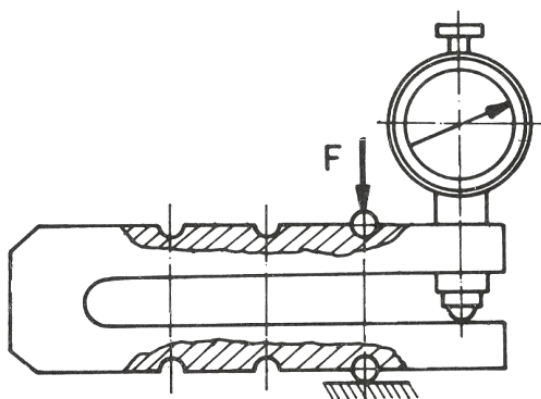
Dynamometry lze rozdělit podle následujících hledisek:

- a) Podle počtu měřených složek síly řezání** - dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření točivých (krouticích) momentů.
- b) Podle aplikované měřicí metody** - respektive dle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační. Podle tohoto hlediska lze dynamometry dělit na mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu), optické a podobně.
- c) Podle metody obrábění** - rozlišujeme dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení atd., případně dynamometry univerzální. [5]

5.3.1 Mechanické dynamometry

Mechanické dynamometry se zpravidla používají pro cejchování jiných druhů dynamometrů, a to z toho důvodu, že u nich lze většinou vyloučit nežádoucí rušivé vlivy a jsou dále charakteristické naprosto lineárním vztahem mezi sledovanou silou a vlastními naměřenými údaji.

Působení síly se u mechanických dynamometrů přenáší přímo nebo znásobeně mechanickým převodem na měřicí prvek, kterým je například číselníkový úchylkoměr. O velikosti síly se usuzuje z deformace silových pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, případně podle hloubky vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. [3]



Obr. 11 Mechanický dynamometr třmenový [3]

Hlavním představitelem této skupiny dynamometrů jsou dynamometry třmenové (Obr. 11), určené pro zatížení až do 10 000 N. Dalším typem jsou dynamometry kruhové nebo také prstencové (Obr. 12) pro ještě vyšší zatížení. [5]



Obr. 12 Mechanický dynamometr prstencový [22]

Výhodami mechanických dynamometrů jsou jednoduchost, spolehlivost, stálost údajů a stálá přesnost v rozmezí 0,5 – 2 %.

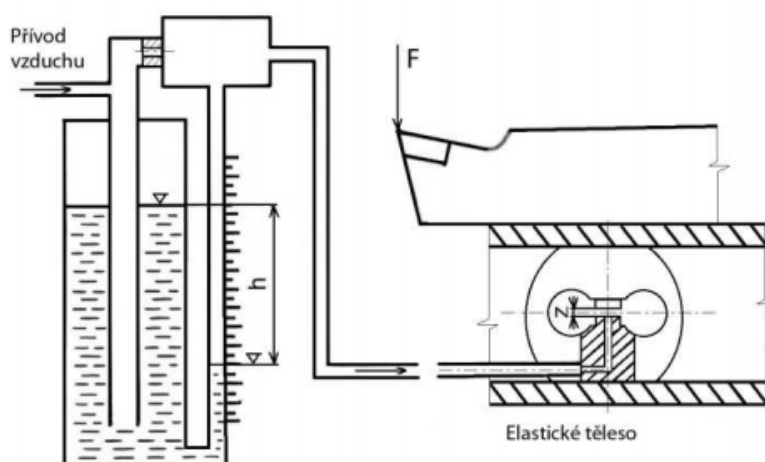
Nevýhodami mechanických dynamometrů jsou závislost jejich údajů na teplotě, obtížná změna rozsahu měření, nutnost vymezovat vůle v mechanismech, únava materiálu a velká setrvačnost systémů, která nedovoluje jejich použití pro dynamická měření. [5]

5.3.2 Hydraulické dynamometry

Podstatou je přenos účinku měření síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Změna tlaku je potom snímána pomocí manometru, nebo jiného přístroje. Výhodou hydraulických dynamometrů je jednoduchá konstrukce a možnost snadného měření více složek současně. Nevýhodami jsou pak nízká citlivost, požadavky na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. Z těchto důvodů je nelze použít pro dynamická měření. V současnosti se používají spíše výjimečně. [5]

5.3.3 Pneumatické dynamometry

Základem pneumatických dynamometrů (Obr. 13) je snímač deformace pneumatickým systémem klapka – tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Principiálně jsou založeny na měření změny tlaku nebo průtoku v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost v porovnání s elektrickými způsoby a relativně nízké náklady na pořízení a provoz. [5]



Obr. 13 Pneumatický dynamometr [24]

5.3.4 Elektrické dynamometry

Tyto dynamometry patří pro své vlastnosti mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější v technické praxi.

Základními přednostmi elektrických dynamometrů jsou:

- snadný dálkový přenos signálu s řadou možných úprav
- možnost snímání signálu rotujících a pohybujících se součástí
- využití miniaturních měřicích elementů
- možnost vhodné registrace zachycených signálů různých průběhů a frekvencí
- snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu. [5]

Podle způsobu mechanicko-elektrické transformace rozlišujeme dva základní systémy elektrických dynamometrů:

- **Systémy parametrické** – založené na změně jednoho z parametrů elektrického obvodu – indukčnosti (L), kapacity (C) a odporu (R)
- **Systémy generátorové** – založené na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementů. Podstatou může být mimo jiné i piezoelektrický jev. [5]

5.3.5 Elektrické indukční dynamometry

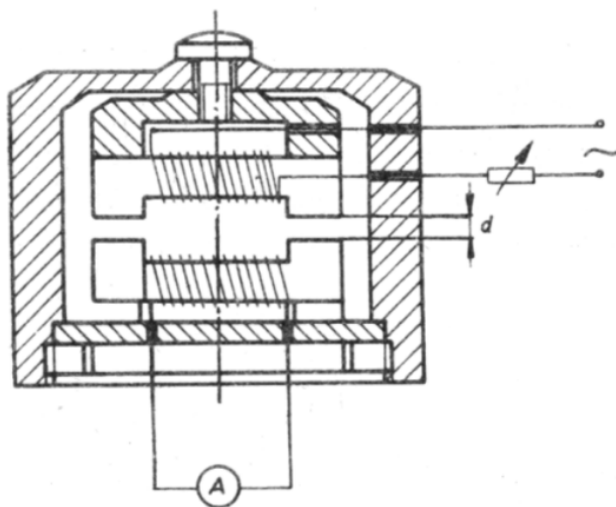
Princip indukčních dynamometrů je založen na změně indukčnosti snímače, ke které dochází vlivem působení měřené síly. Probíhající mechanicko-elektrická transformace se dá vyjádřit např. blokovým schématem.

Pro indukční dynamometry se využívá následujících snímačů:

- **Snímače s malou vzduchovou mezerou** (tedy snímače s uzavřeným magnetickým obvodem)
- **Snímače s otevřeným magnetickým obvodem**
- **Snímače se stálým magnetickým obvodem.** [5]

V elektrických indukčních dynamometrech (Obr. 14) se používají převážně snímače pracující s malou vzduchovou mezerou. Působením zátěžové síly se mění šířka vzduchové mezery. Tím se mění impedance magnetického obvodu a v důsledku toho i indukčnosti cívky. Změna indukčního odporu vyvolá změnu impedance cívky. Odpor magnetického obvodu indukčního snímače je složen z odporu feromagnetické části

a z odporu vzduchové mezery. Funkční závislost impedance na délce vzduchové mezery $Z = f(a)$ má hyperbolický průběh. [5]



Obr. 14 Indukční snímač sil [3]

5.3.6 Piezoelektrické dynamometry

Pro snímání využívají deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Jedním z nejpoužívanějších piezoelektrických materiálů je křemen. Dalšími používanými materiály jsou na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobně. Základem piezoelektrického snímače je měřicí destička vhodně vyříznutá z příslušného krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém. [5]

Obr. 15 zobrazuje piezoelektrický dynamometr, který se používá pro měření řezných sil při soustružení.



Obr. 15 Piezoelektrický dynamometr Kistler 9265B [23]

5.3.7 Tenzometrické odporové dynamometry

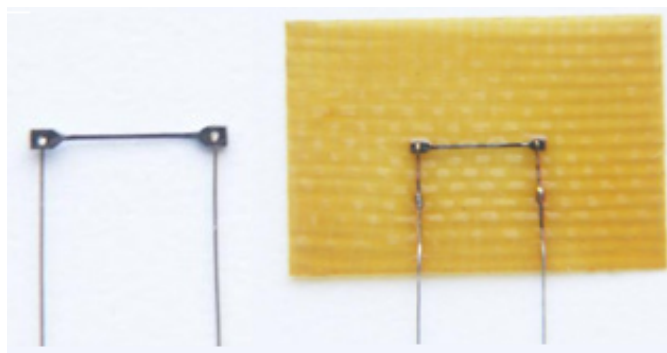
Měření velikosti deformace je založeno na změně odporu snímačů. Používaným snímačem je v tomto případě odporový tenzometr, který je popsán v následující kapitole 5.4.

5.4 Odporové tenzometry

Tenzometrický rezistor (tenzometr) je odporový senzor, u něhož je změna odporu způsobená deformací vodiče nebo polovodiče. Odporový tenzometr je deformován spolu s deformačním elementem, neboť je s ním pevně spojen. Změna odporu vodiče je přímo úměrná deformaci, která vzniká na deformačním elementu v důsledku působení síly řezání (obrábění) nebo točivého (krouticího) momentu. Při deformaci vodiče dochází ke změně délky a průřezu vodiče, taktéž dochází ke změně měrného odporu materiálu vodiče. [12, 25]

Tenzometry lze rozdělit podle typu materiálu na:

- **kovové tenzometry**
 - drátkové (lepené, s volnou mřížkou)
 - fóliové
 - vrstvé
- **polovodičové tenzometry.** [21]



Obr. 16 Polovodičový tenzometr bez podložky a s podložkou [12]

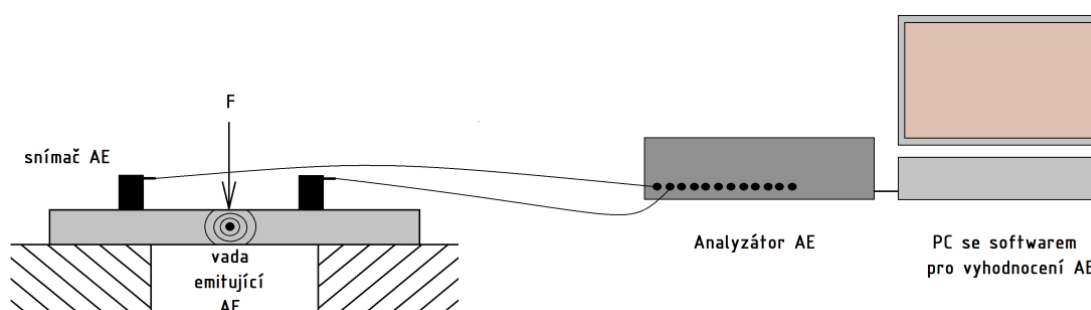
Tenzometrický rezistor se obvykle skládá z vlastního snímače a podložky (Obr. 16), která zajišťuje přenos deformace z povrchu měřeného objektu na vlastní snímač. Podložka současně tvoří elektrickou izolaci. Na povrch měřeného objektu se podložka lepí speciálními lepidly (epoxidové pryskyřice, celuloid, atd.). [21]

6 AKUSTICKÁ EMISE

Názvosloví dle EN 13390 popisuje akustickou emisi (dále AE) jako elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa (např. klepnutí).

Metodou AE nazýváme metodu detekce akustické emise, následné elektronické zpracování detekovaného signálu AE a konečně též vyhodnocení parametrů detekovaného signálu AE.

První systematické práce v této oblasti jsou datovány do padesátých let 20. století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera. Přibližně od šedesátých let 20. století se pak tato metoda začíná aplikovat v praxi pro monitorování a detekci celé řady dalších procesů, jež iniciují vznik AE šířící se tělesem. V dnešní době se při využití metody AE nejedná pouze o detekci AE vyvolané plastickou deformací kovů, ale též o monitorování a identifikaci celé řady jiných procesů, jako porušování materiálů konstrukcí, netěsností a úniků médií pod tlakem, tření, obrábění, sváření, výrobních a technologických procesů. [4]



Obr. 17 Schéma měření akustické emise, zdroj: autor

Na Obr. 17 je zobrazeno schéma měření akustické emise. K testovanému objektu, který je zde zatěžován silou F , jsou připojeny dva snímače akustické emise. Působením síly F na testovaný objekt dochází ke vzniku vady. Vyvolaná událost emituje signál AE. Napěťová vlna se šíří materiálem ke snímači, který ji detekuje a převede na elektrický signál. Ten míří do analyzátoru a zde je převeden do datové struktury. Dále pokračuje do PC, kde je vyhodnocován speciálním softwarem. Software následně vykreslí zaznamenaná data do diagramů. Diagramy je pak nutné vyhodnotit zkušenými odborníky v oboru AE.

Rozdělení fází procesu metody AE:

- a) Událost zdroje AE, zdroj AE, mechanismus zdroje AE
- b) Šíření napěťových vln – akustické emise od zdroje k místu detekce snímačem AE
- c) Detekce napěťových vln snímačem AE na povrchu tělesa – tzn. transformace AE na povrchu tělesa v místě snímače na elektrický signál AE
- d) Analogové zpracování a vedení elektrického signálu AE na vstup vyhodnocení signálu
- e) Vyhodnocení výsledného elektrického signálu AE měřícím systémem AE. [4]

Pojmy v oblasti akustické emise:

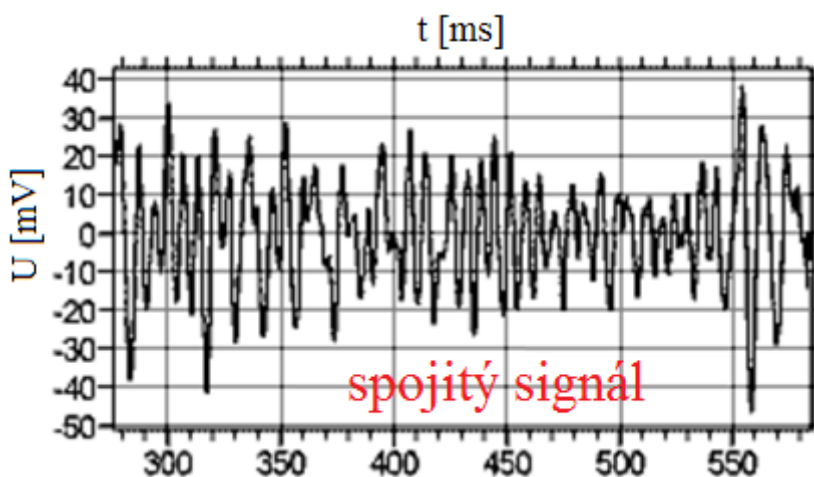
- **Událost AE** – je fyzikální jev, který způsobuje vznik akustické emise, tímto jevem může být např. posun dislokace, dynamický vznik mikrotrhliny, klepnutí částice, apod. Událostí AE nazýváme též skupinu zkompletovaných hitů, u nichž předpokládáme, že mají společný původ v jedné a téže fyzikální události AE. [4]
- **Zdroj AE** – je fyzikální původ jedné či více událostí AE. Fyzikální proces, který generuje akustickou emisi, např. plastická deformace doprovázená poskoky dislokací = událostmi emitujícími AE. Podobně se jedná o proces rozvoje porušení materiálu doprovázený iniciací mikrotrhlin či mikroposkoky čela trhliny. Dalším příkladem zdroje AE je únik média pod tlakem, kdy AE generuje turbulence, tlakové fluktuace média ve štěrbině emitující akustický šum (sykot). V případě, kdy je zdrojem AE eroze, jsou událostmi AE poklepy částic popadající na povrch např. v ohybu potrubí. Zdrojem může být i tření povrchů atd. [4]

6.1 Typy akustické emise

6.1.1 Spojitá akustická emise

Již zmíněný pojem „událost AE“ představuje jednotlivý fyzikální dynamický ráz, který iniciuje AE. Detekcí rázové vlny jedné události AE vzniká v detekovaném signálu jeden izolovaný „hit elektrického signálu AE“. V případě, kdy působí mnoho událostí AE současně a akustické vlny jednotlivých událostí se časově překrývají, sčítají a superpo-

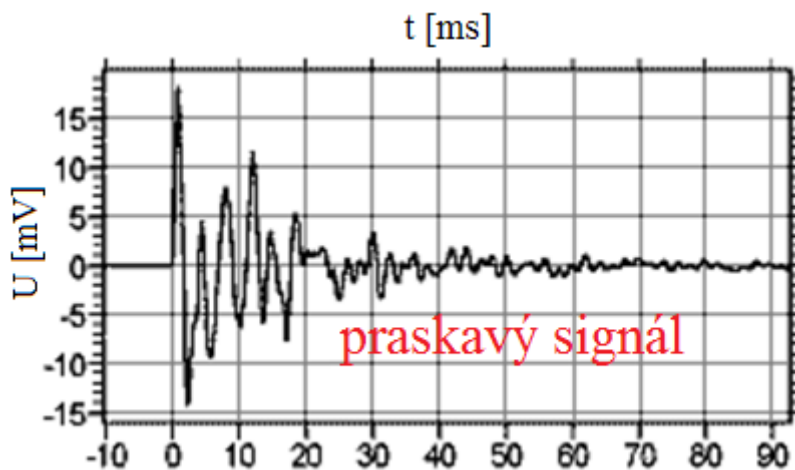
nují, vzniká tak akustický šum – spojitá AE. Spojitý signál (Obr. 18) je charakteristický tím, že po delší dobu neklesá pod práh. Typickým příkladem zdroje spojitého signálu jsou např. úniky média pod tlakem, pohyb dislokací při plastické deformaci apod. [4]



Obr. 18 Charakter spojitého signálu AE [13], překlad: autor

6.1.2 Nespojité („praskavá“) akustická emise

O nespojité AE hovoříme v případě, kdy jednotlivé hity událostí AE jsou časově izolovány a vytváří tak nespojitý signál, který má charakter praskání (Obr. 19).

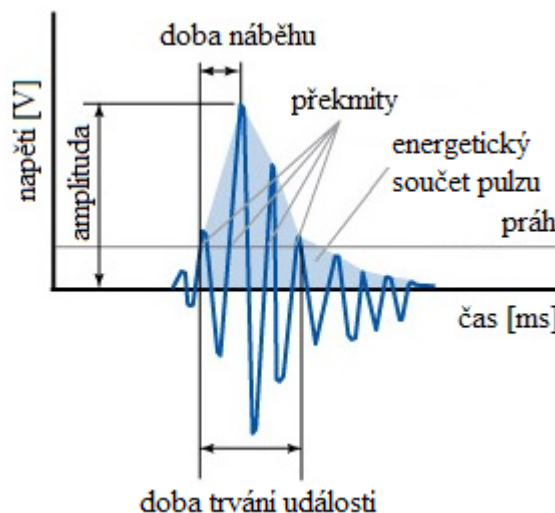


Obr. 19 Charakter nespojitého (praskavého) signálu AE [13], překlad: autor

6.2 Parametrický popis signálu AE

Výjimečně je při měření AE detekováno pouze pár prasknutí. Měřicí systém detekuje stovky až tisíce prasknutí, která musí být dále statisticky zpracována. Zpracování samotných tvarů zvukových vln je obtížné, avšak některé vlastnosti vln mohou být

vyjádřeny relativně jednoduše. Je třeba určit klíčové parametry každého prasknutí záznamného ve formě zvukové vlny, aby jej bylo možné dále identifikovat a zpracovávat. Nejčastěji používané parametry signálu jsou vyznačeny na Obr. 20 a dále podrobněji popsány. [15]



Obr. 20 Parametry signálu AE [14], překlad: autor

Nejčastěji používanými parametry signálu jsou:

- **Příchozí čas** – absolutní čas prvního přechodu prahu intenzity.
- **Amplituda** – nejvyšší hodnota napětí v měřeném průběhu, uváděna v decibelech. Je to velmi důležitý parametr, neboť určuje detekovatelnost signálu. Je-li amplituda pod nastavenou mez, tak nedojde k záznamu události.
- **Doba náběhu pulzu** – časový interval mezi prvním přechodem prahu intenzity a dosažením maximální amplitudy pulzu.
- **Doba trvání pulzu (události)** – doba mezi prvním a posledním přechodem nastaveného prahu intenzity.
- **Počet přechodů prahu** – počet překmitů, změn polarit pulzu.
- **energetický součet pulzu (tzv. marse)** – integrál čtverce amplitudy přes dobu trvání pulzu.
- **Střední kvadratická úroveň napětí signálu** – nebo také okamžitá energie signálu = RMS (z anglického „root mean square“). [15]

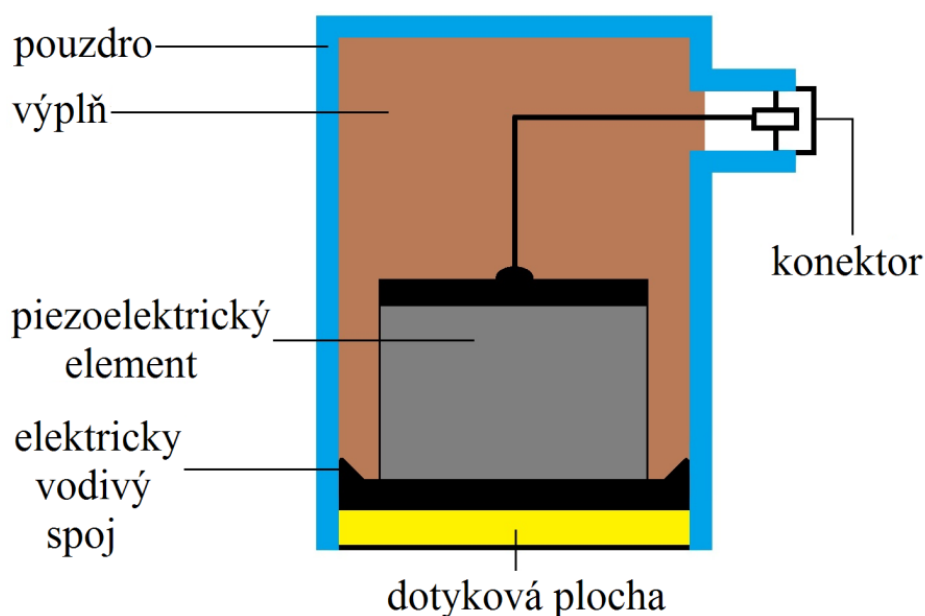
6.3 Snímače AE

Při měření AE se jako převodníky akustických vln na elektrický signál používají piezoelektrické senzory (Obr. 21). Tyto senzory se v praxi ukázaly jako nejvhodnější pro tento druh měření. Jejich konstrukce je robustní a jsou citlivější než jiné typy snímačů jako např. kapacitní, elektrodynamické nebo optické. [15]

Součástí sensorů často bývá předzesilovač signálu. Pro účely přichycení k povrchu testovaného tělesa bývají vybaveny magnetem nebo je uchycení na testovaný materiál řešeno jiným způsobem, např. speciálními lepidly. Zajištění kvalitního uchycení senzoru je klíčovým aspektem ovlivňujícím výslednou kvalitu snímaného signálu. Spoj by proto měl zajišťovat dobrý akustický kontakt mezi senzorem a povrchem testovaného objektu. Volba spojovacího materiálu závisí na konkrétním měření a je nutné volit jej tak, aby například nezpůsobil korozi a aby byl vhodný pro dané teploty použití. [15]

Následkem špatné volby lepidla by pak při zatuhnutí mohlo být jeho křehnutí a produkce nežádoucího praskotu. Z toho důvodu se senzor navíc přitiskuje k povrchu například s pomocí gumové pásky.

Pro zajištění maximální přesnosti výsledků měření je třeba, aby vrstva naneseného lepidla byla co nejtenčí. Po připojení senzoru k povrchu testovaného objektu se pak provádí test funkčnosti spoje. [15]



Obr. 21 Řez snímačem AE, zdroj: autor

6.3.1 Charakteristické vlastnosti snímačů AE při měření

Při měření AE obvykle využíváme více snímačů rozmístěných na měřeném tělese. Stejná událost je pak detekována jako „hit“ signálu ve více snímačích sítě. Každý snímač přitom „slyší“ původní událost AE jinak, v závislosti na tom kde je umístěn (zde má vliv rozdílné šíření vln tělesem od zdroje k místu detekce). [4]

Faktory ovlivňující měření snímačů jsou:

- **Útlum** – rozptyl energie a útlum vlny má za následek to, že bližší snímače detekují intenzivnější signál AE téhož zdroje, než snímače vzdálenější.
- **Disperze** – vzdálenější snímače také často detekují „časově/frekvenčně rozmazanější zvuk“ s potlačením vyšších frekvencí oproti snímačům bližším, které původně ostrý puls detekují jako ostrý („nerozmazaný“).
- **Časové zpoždění** - Vzdálenější snímače detekují signál AE se zpožděním oproti snímačům bližším.
- **Vyhodnocení rozdílů** – Díky vyhodnocení rozdílů detekovaného signálu stejného původu v různých místech sítě AE máme k dispozici informace o zdroji AE, o místu původu zdroje a o charakteru šíření AE v tělese.
- **Kompletace hitů AE** – přiřazení hitů detekovaných v různých měřicích místech sítě do skupin, posloupností hitů detekovaných v různých měřicích kanálech, u nichž předpokládáme společný původ v jedné a téže fyzikální události AE. Kompletace hitů do události AE umožňuje mimo jiné např. Δt lokalizaci zdroje AE. [4]

6.4 Výhody a nevýhody metody AE

6.4.1 Výhody metody AE

Akustická emise monitoruje skutečnou aktivitu a tím reálnou závažnost defektu v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, při skutečně působící úrovni a orientaci napětí, teplotních napětích, při reálném stavu materiálu a jeho komplexních podmínkách rozvoje porušení. Kontinuální monitorování objektu tak znamená úsporu času oproti jiným metodám s postupným testováním. [4]

Nespornou výhodou je, že se jedná pasivní o metodu nedestruktivního testování, čili měření neovlivňuje měřený objekt.

Mezi výhody také patří možnost detekovat zdroje AE na rovných nebo válcových kovových površích ve vzdálenosti až několika metrů. To umožňuje testovat v oblastech, kde to není jinými metodami možné, například kvůli nepřístupnosti nebo nemožnosti uchycení senzorů. [15]

6.4.2 Nevýhody metody AE

Nevýhodou metody je, že neznáme přesnou příčinu vzniku akustické vlny, neboť uvolněná energie je ovlivňována řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny (funkce šíření vlny) daná strukturou a homogenitou materiálu.

Nevýhodou je také, že v některých případech je energie mnohých akustických pulsů příliš malá a ty tak zanikají v šumovém pozadí detektoru.

Řada procesů – zdrojů AE je nevratných, pokud tedy nedetekujeme aktivitu v okamžiku rozvoje procesu, zkoušku nelze opakovat. [15]

Další nevýhodou je, že zaznamenané napěťové pulzy nemusí být tvořeny pouze poruchami, které hledáme, ale také zesíleními šumu pozadí. Proto je důležité správně nastavit úroveň detekčních prahů a eliminovat tak zkreslení signálu. [15]

7 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Předtím než lze přistoupit k samotnému měření, je třeba provést přípravné úkony, které zajistí zdárný průběh měření. Přípravný proces byl rozdělen do těchto částí:

- Volba materiálu
- Výběr nástroje
- Volba řezných podmínek
- Návrh postupu měření
- Konfigurace měřící aparatury AE

7.1 Volba materiálu

Pro měření byly zvoleny dva různé vzorky. Tyto konkrétní vzorky byly zvoleny zejména proto, aby při měření byla patrná diference materiálů a bylo tak možné sledovat reakci nástroje na materiály s nižší a vyšší pevností.

7.1.1 Příprava vzorků

Zkušebními vzorky jsou kruhové tyče (válcované za tepla) o průměru $D = 50$ mm a délce $l = 0,5$ m. Rozměry vzorků byly zvoleny z praktických důvodů, s ohledem

na parametry sklíčidla soustruhu, a to tak, aby bylo zajištěno dokonalé upnutí. Vzorčky byly dodány velkoobchodním prodejcem Feron a.s.



Obr. 22 Vzorčky kruhových tyčí pro měření AE, zdroj: autor

Materiály vzorků:

1. **S235JR dle EN** – alternativa k oceli 11 375 dle ČSN. Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel s minimální mezí kluzu $R_{eH} = 215$ MPa a pevností v tahu $R_m = 360$ až 510 MPa. Tato ocel se vyznačuje zejména velmi dobrou svařitelností, a to všemi obvykle používanými způsoby svařování. Ocel je proto vhodná pro svařované konstrukce se statickým i dynamickým namáháním, pro součásti energetických zařízení a tlakových nádob. Vzhledem k dobré tvárnosti za tepla i za studena, se používá i na výrobu ohýbaných profilů a trubek a pro různé drobné tvářené součásti. [7]
2. **E335 dle EN** – alternativa k oceli 11 600 dle ČSN. Jedná se o nelegovanou konstrukční jakostní ocel s vyšším obsahem uhlíku. Minimální mez kluzu je $R_{eH} = 320$ MPa, pevnost v tahu $R_m = 590$ až 710 MPa. Používá se pro součásti, které jsou namáhané jak staticky, tak i dynamicky a nevyžadují svařitelnost. Součásti vystavené velkému měrnému tlaku, např. hřídele, osy, ozubená a řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry, objímky, šrouby a matice, klíny, pera, kladky, spojky, ozubené hřebeny, tělesa fréz apod. [8]

Vybrané vzorky byly na míru nařezány pásovou pilou přímo od dodavatele. Vzhledem k dobře dimenzované délce stačí vzorek upnout pouze do sklíčidla. Sklíčidlo zajistí dostatečně pevné sevření materiálu a už není třeba vzorek opírat o otočný hrot soustruhu.



Obr. 23 Vzorek připravený k měření, zdroj: autor

Jelikož se jedná o válcované polotovary, je nezbytné před měřením jednou třískou srovnat povrch (Obr. 23) a odstranit horní vrstvu oxidů železa vzniklou při tváření. Tento krok přispěje ke zvýšení objektivit měření a redukcí nežádoucích rušivých signálů.

7.2 Volba nástroje a řezných podmínek

Podmínky, které byly určeny pro experimentální měření, jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Řezné podmínky a typ nástroje, zdroj: autor

| | |
|------------------------------------|----------------------------------------------|
| Otáčky vřetene soustruhu (n): | 500 min ⁻¹ |
| Posuv na otáčku (f): | 0,12 mm na otáčku |
| Nástroj (soustružnický nůž): | Stranový pravý s letovaným řezným plátkem SK |
| Tloušťka třísky (a _p): | 0,5 mm |

Pro měření byl k dispozici i soustružnický držák se sadou výměnných břitových destiček, jeho použití v experimentu však bylo zavrhnuto z důvodu horšího přenosu signálu oproti noži s letovaným plátkem SK. Nůž s letovaným řezným plátkem zajišťuje dokonalejší materiálový styk. Díky tomu nedochází k tak velkému útlumu signálu na trase od zdroje události AE ke snímači jako v případě použití držáku s výměnnými břitovými destičkami.

7.3 Snímač AE

Tab. 4 uvádí parametry snímače IDK - 09, který byl při měření AE použit.

Tab. 4 Technické parametry použitého snímače IDK – 09. [26]

| | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rozměry: | ø 9 mm, výška 9 mm |
| Materiál pouzdra: | nerezová ocel |
| Dotyková plocha: | korund, ø 6mm |
| Provedení vývodu: | radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1.7 mm s BNC konektorem |
| Materiál piezoelementu: | PZT třída 200 |
| Provozní teplota: | -20 °C až +95 °C |
| Určení snímačů: | pro laboratorní i průmyslová měření akustické emise |
| Předzesilovač: | snímač vyžaduje externí koaxiálový impedanční převodník s předzesilovačem, pokud by koaxiálová trasa byla delší než cca 2 m |
| Přípevnění snímače: | lepením nebo magnetickým držákem |

7.3.1 Umístění snímače

Při návrhu metodiky bylo diskutováno i použití dvou snímačů akustické emise, přičemž druhý snímač by byl umístěn na nožové hlavě soustruhu. Po zvážení výhod a nevýhod však bylo od tohoto řešení upuštěno, jelikož by tím došlo ke zvýšení náročnosti vyhodnocování, což by pravděpodobně nebylo vyváжено prokazatelnějšími výsledky.



Obr. 24 Umístění snímače akustické emise na noži, zdroj: autor

7.3.2 Upevnění snímače AE

Snímač akustické emise (Obr. 25) byl pomocí vysokopevnostního lepidla Loctite Super attack universal (Obr. 26) připevněn k zadní straně soustružnického nože (Obr. 24), který se tak stal vlnovodem pro detekci AE.



Obr. 25 Snímač akustické emise IDK - 09, zdroj: autor



Obr. 26 Vysokopevnostní lepidlo Loctite Super attack universal, zdroj: autor

7.4 Návrh postupu měření

1. **Ostrý nástroj a měkký materiál (ocel S235JR)** – do sklíčidla bude upnut měkký materiál, jenž bude obráběn novým naostřeným nástrojem. Řezný nástroj bude v záběru 10 sekund, během kterých bude aparatura AE zaznamenávat napěťové signály.
2. **Ostrý nástroj a tvrdý materiál (ocel E335)** – do sklíčidla bude upnut tvrdý materiál. Obrábění a záznam napěťových pulzů proběhne podle stejného schématu jako v bodě 1.
3. **Tupý nástroj a tvrdý materiál (ocel E335)** – bude obráběn tvrdý materiál, ale s otupeným nožem. Opotřebovaný nástroj bude v záběru opět 10 sekund a po tuto dobu bude aparatura AE zaznamenávat napěťové vlny.

4. **Tupý nástroj a měkký materiál (ocel S235JR)** – vzorek z tvrdé oceli bude nahrazen vzorkem z měkké oceli. Měkký materiál bude obráběn opotřebovaným nástrojem podle postupu uvedeného v bodě 3.

7.5 Konfigurace měřící aparatury Dakel - XEDO

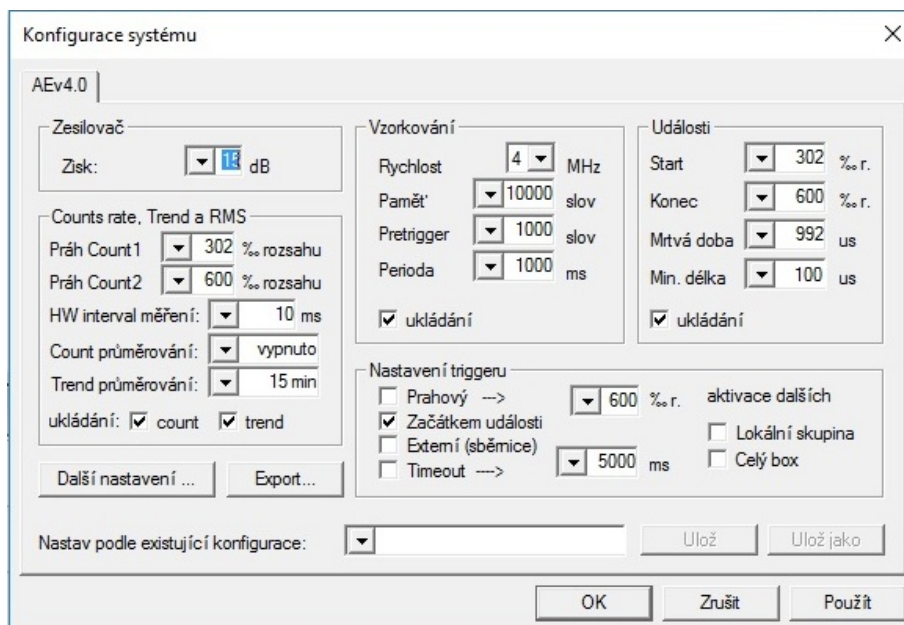
Nastavení systému je klíčovým faktorem ovlivňujícím zaznamenávání napěťových pulzů. Aby bylo možné pomocí aparatury AE detekovat požadované napěťové vlny a odrušit nežádoucí šum, je třeba optimálně nastavit všechny parametry. Těmi jsou např. úroveň detekčních prahů, zisk zesilovače, rychlost vzorkování atd.

Pro stanovení ideálního nastavení parametrů je třeba provést zkušební měření a na základě jeho výsledků optimálně nastavit měřící aparaturu.

Pro všechna měření byly zvoleny hodnoty:

- zisk zesilovače 15 dB
- vzorkovací frekvence signálu 4 MHz
- délka záznamu signálu 10 000 slov

Zvolenou konfiguraci lze vidět na Obr. 27.



Obr. 27 Konfigurace měřícího kanálu v SW Daemon, zdroj: autor

Použitá konfigurace měřícího kanálu byla po několika zkušebních záznamech vyhodnocena jako ideální pro dané experimentální měření.

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Měření proběhlo v laboratoři Ústavu techniky a automobilové dopravy (dále ÚTAD), který je jedním z odborných pracovišť Agronomické fakulty Mendelovy univerzity. Laboratoř ÚTAD disponuje potřebným strojovým a přístrojovým vybavením. Pro potřeby experimentu byl využit soustruh a moderní diagnostický systém DAKEL – XEDO (uspořádání zachyceno na Obr. 28).



Obr. 28 Uspořádání soustruhu a měřicí soupravy při měření, zdroj: autor

Podstatou experimentu je zaznamenat signály AE vyvolané soustružením měkké a tvrdší oceli při použití nového ostrého nástroje a nástroje otupeného. Druhým krokem je získané záznamy uvést do vhodné grafické podoby, aby bylo možné je objektivně hodnotit. Následně je třeba získané výstupy porovnat a na základě vyvozených závěrů navrhnout využití pro praxi.

8.1 Strojové vybavení

8.1.1 Soustruh použitý v experimentu

Měření proběhlo na univerzálním hrotovém soustruhu TOS SN 50B. Tento třískový obráběcí stroj je vhodný na egalizační, závitové, zapichovací, vrtací a kopírovací práce. Během provozu se osvědčil v kusové i sériové výrobě a také jako jednoúčelový stroj. Soustruh je zachycen na Obr. 28 a jeho vybrané technické parametry lze vyčíst z Tab. 5.

Tab. 5 Vybrané technické parametry stroje TOS SN 50B [16]

| | |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Celková délka: | 3075 mm |
| Celková šířka: | 1100 mm |
| Celková výška: | 1460 mm |
| Max. hmotnost obrobku při otáčkách 45 min ⁻¹ : | 300 kg |
| Celkový příkon bez zvláštního příslušenství: | 6,6 kW při 50 Hz |
| Povolený kroutící moment: | 1200 Nm |
| Počet normálních převodových stupňů vřetene: | 12 v rozsahu otáček 45-2000 min ⁻¹ |
| Počet snížených převodových stupňů vřetene: | 12 v rozsahu otáček 22-1000 min ⁻¹ |
| Počet stupňů posuvů podélných: | 38 |
| Počet stupňů posuvů příčných: | 38 |
| Rozsah podélných posuvů (pohon od vřetene): | 0,05 – 0,8 mm na otáčku |
| Rozsah podélných posuvů (pohon od předlohy): | 0,64 – 6,4 mm na otáčku |
| Rozsah příčných posuvů (pohon od vřetene): | 0,025 – 0,4 mm na otáčku |
| Rozsah příčných posuvů (pohon od předlohy): | 0,32 – 3,2 mm na otáčku |

8.2 Diagnostický systém Dakel XEDO - Daemon

Systém Daemon (HW část „XEDO“ + SW část „Daemon“) je moderní a výkonné zařízení pro měření a vyhodnocení parametrů akustické emise, umožňující taktéž měření jiných fyzikálních veličin. [6]

Na Obr. 29 je vidět diagnostický systém tvořený měřicí kanálovou jednotkou (umístěnou v XEDO Boxu – 13) a softwarem Daemon instalovaným v notebooku Dell.



Obr. 29 Měřicí souprava AE, zdroj: autor

8.2.1 Analyzátor akustické emise Dakel - XEDO

Vhodnou kombinací měřících kanálových jednotek AE a jednotek pro měření napětí je možné sestavit konfigurace vyhovující požadavkům celé řady aplikací. Takto nachází zařízení Daemon uplatnění jako monitorovací systém AE a jeho externích parametrů (tlak, teplota, apod.) a rovněž jako měřící systém napěťových veličin.

Měřící jednotky systému jsou řazeny do měřících rámců – boxů (Obr. 30), kde jsou spolu s komunikačními jednotkami připojeny na společnou sběrnici [6]

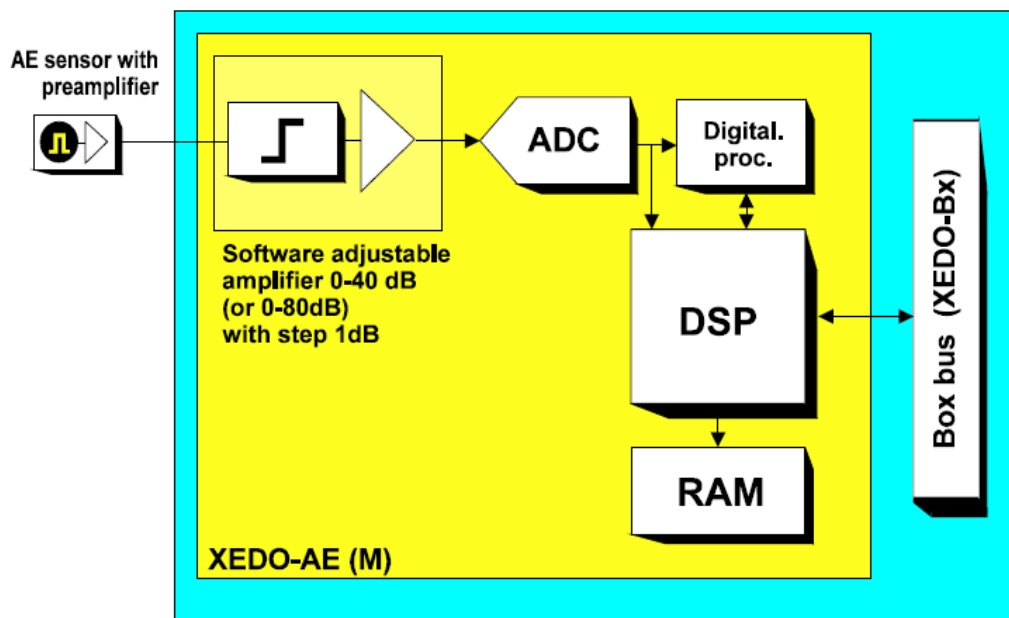


Obr. 30 Analyzátor AE Xedo - box, zdroj: autor

Standardní komunikační rozhraní ethernet 10Base2 umožňuje propojení libovolného počtu boxů s libovolným počtem počítačů. Z komponentů zařízení tak lze podle aktuálních požadavků sestavit jak malé laboratorní přístroje, tak rozsáhlé průmyslové diagnostické systémy. Snímače jsou schopny plnit i funkci vysílačů/budičů a systém Daemon může být vybaven i elektronickým generátorem vhodných pulsů pro simulaci emisních událostí. Toto řešení umožňuje jednoduchou kontrolu funkce snímačů a autokalibraci zařízení. Největší předností systému Daemon je to, že kromě hodnocení klasických parametrů AE umožňuje rovněž vzorkování signálů na každém kanálu. [6]

8.2.2 Měřicí kanálová jednotka diagnostického systému AE

Měřicí kanálová jednotka XEDO – Aev34 je zkonstruována pro měření parametrů AE a je přizpůsobena pro připojení pasivních piezokeramických senzorů bez předzesilovače nebo aktivních senzorů s integrovaným předzesilovačem napájeným napětím 12 V. [6]



Obr. 31 Blokové schéma zapojení měřícího systému [6]

Na Obr. 31 je vyobrazeno blokové schéma zapojení měřící aparatury, které lze popsat následujícím způsobem: analogový signál detekovaný snímačem je po filtraci zesílen zesilovačem s nastavitelným ziskem a přiveden na vstup 10 – bitového A/D převodníku, jehož vstupní rozsah je $\pm 2,4$ V. Následné zpracování signálu probíhá už plně digitálně v programovatelném hradlovém poli, kde se testují překročení prahových hodnot, detekují emisní události apod. Výstup A/D převodníku je současně přiveden na DMA vstup signálového procesoru, kde dochází ke vzorkování signálu frekvencí 2, 4 nebo 8 MHz. Měření parametrů AE není na vzorkování nijak závislé, pokud tedy dojde k zastavení vzorkování a přenosu navzorkovaného signálu do PC, neovlivní to ostatní měření. [6]

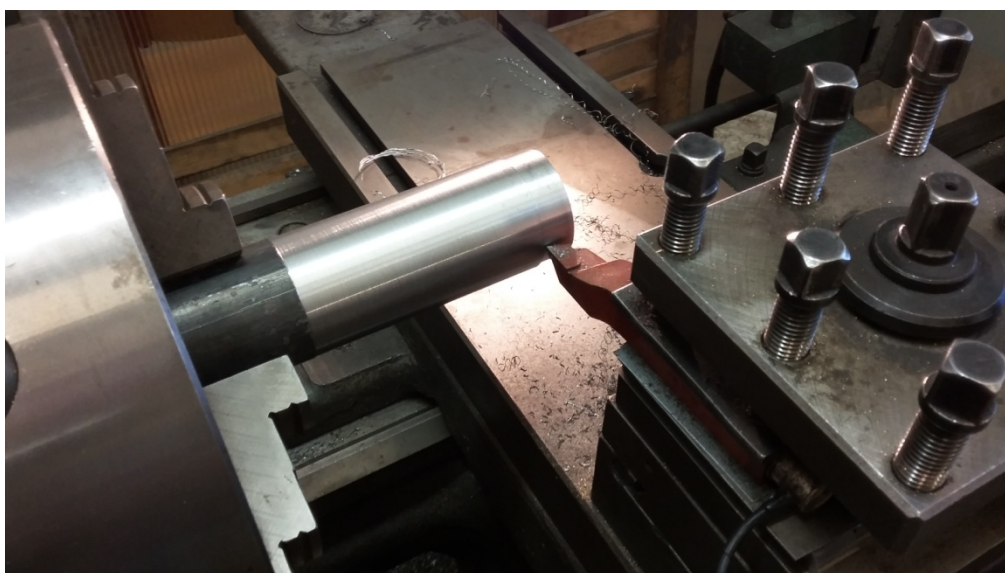
Software Daemon rozpozná měřicí kanálovou jednotku jako XEDO – Aev3x a konfiguruje ji v samostatné záložce konfigurační nabídky zvlášť. V případě rozšíření funkcí podle požadavků zákazníka může být jednotka rozpoznána odlišně od standardní verze a taktéž budou změněny konfigurační nabídky. [6]

Tab. 6 Technické parametry měřicí kanálové jednotky [6]

| | |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Rozměry: | 100 x 220 x 23 mm |
| Hmotnost: | 200 g |
| Napájení: | +5 V DC / 200 mA; +12 V DC / 100 mA |
| Frekvenční rozsah: | 100 - 800 kHz |
| Vzorkovací frekvence: | 2, 4, 8 MHz |
| Rozlišení A/D převodníku: | 10 bitů |
| Vstupní rozsah po zesílení: | ±2400 mV |
| Rozsah zesílení: | 0 - 40 dB, nebo 0 - 80 dB s krokem 1 dB |
| Rozsah pracovních teplot: | +5 až +40 °C |
| Vstupy a výstupy: | konektor BNC pro snímač, digitální konektor XEDO-BUS [®] |

8.3 Průběh experimentálního měření

Měření proběhlo s řeznými podmínkami uvedenými v Tab. 3, dle postupu popsaného v kapitole 7.4 a s konfigurací měřicího kanálu uvedenou na Obr. 27. Průběh měření je zachycen na Obr. 32, kde lze vidět řezný nástroj ubírající třísku z testovaného vzorku materiálu.



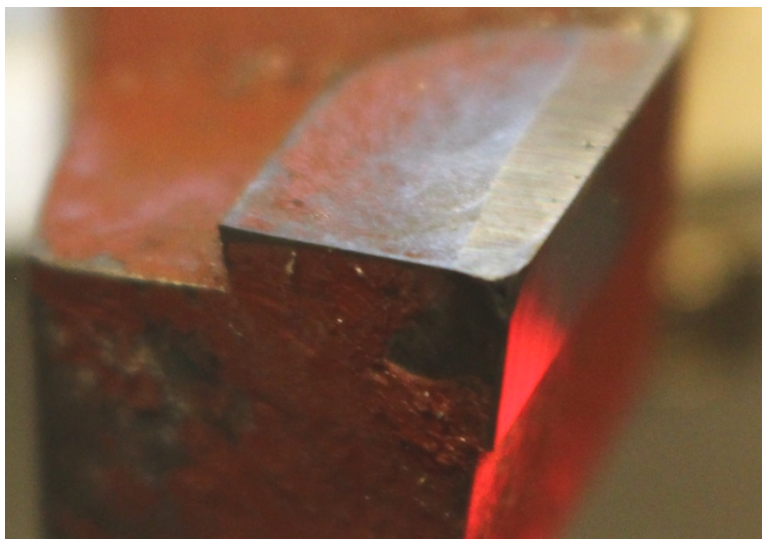
Obr. 32 Řezný nástroj obrábějící tvrdý materiál, zdroj: autor

8.3.1 Opotřebení nástroje

Soustružnický nůž byl před třetí fází procesu měření, popsaného v kapitole 7.4, uměle otupen, aby bylo možné srovnávat napěťovou odezvu při obrábění ostrým a tupým nástrojem. Opotřebení nástroje lze dobře vidět na Obr. 34, kde je zobrazen detail řezné destičky ze slinutých karbidů.



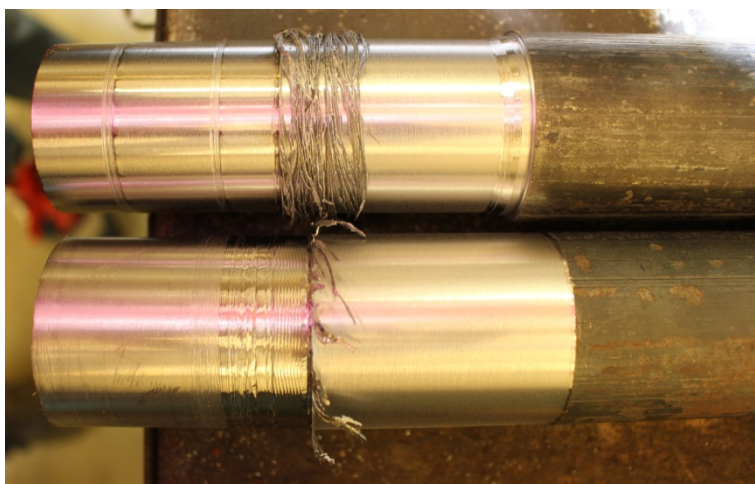
Obr. 33 Ostří nástroje po dosažení hranice trvanlivosti, zdroj: autor



Obr. 34 Detail uměle otupeného ostří řezného nástroje, zdroj: autor

8.3.2 Stav vzorků po ukončení měření

Obr. 35 zachycuje stav povrchu zkušebních vzorků po skončení měření. Z fotografie je patrné, že řezné podmínky nebyly v žádném případě ideální. Špatná kvalita povrchu vzorků a otřepy jsou způsobeny otupěným řezným nástrojem.



Obr. 35 Povrch vzorků po experimentu (shora – měkký, tvrdý), zdroj: autor

8.3.3 Výsledky měření

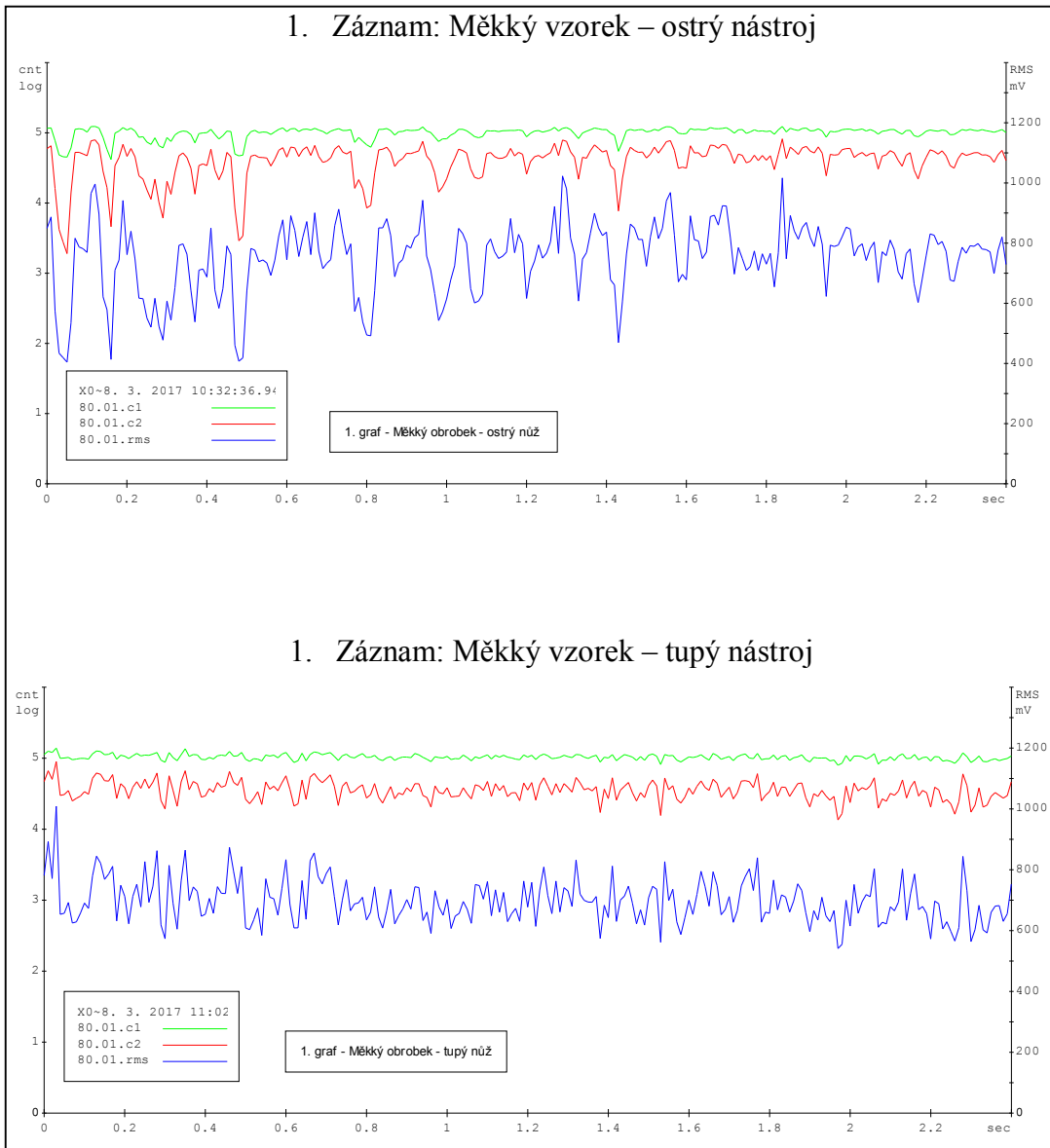
Na obrázcích Obr. 36 až Obr. 41 jsou uvedeny záznamy z měření akustické emise u měkkého (ČSN 11 375 - S235JR dle EN) a tvrdého materiálu (ČSN 11 600 - E335 dle EN) při obrábění ostrým a tupým nástrojem.

Získané záznamy jsou rozděleny do dvou skupin:

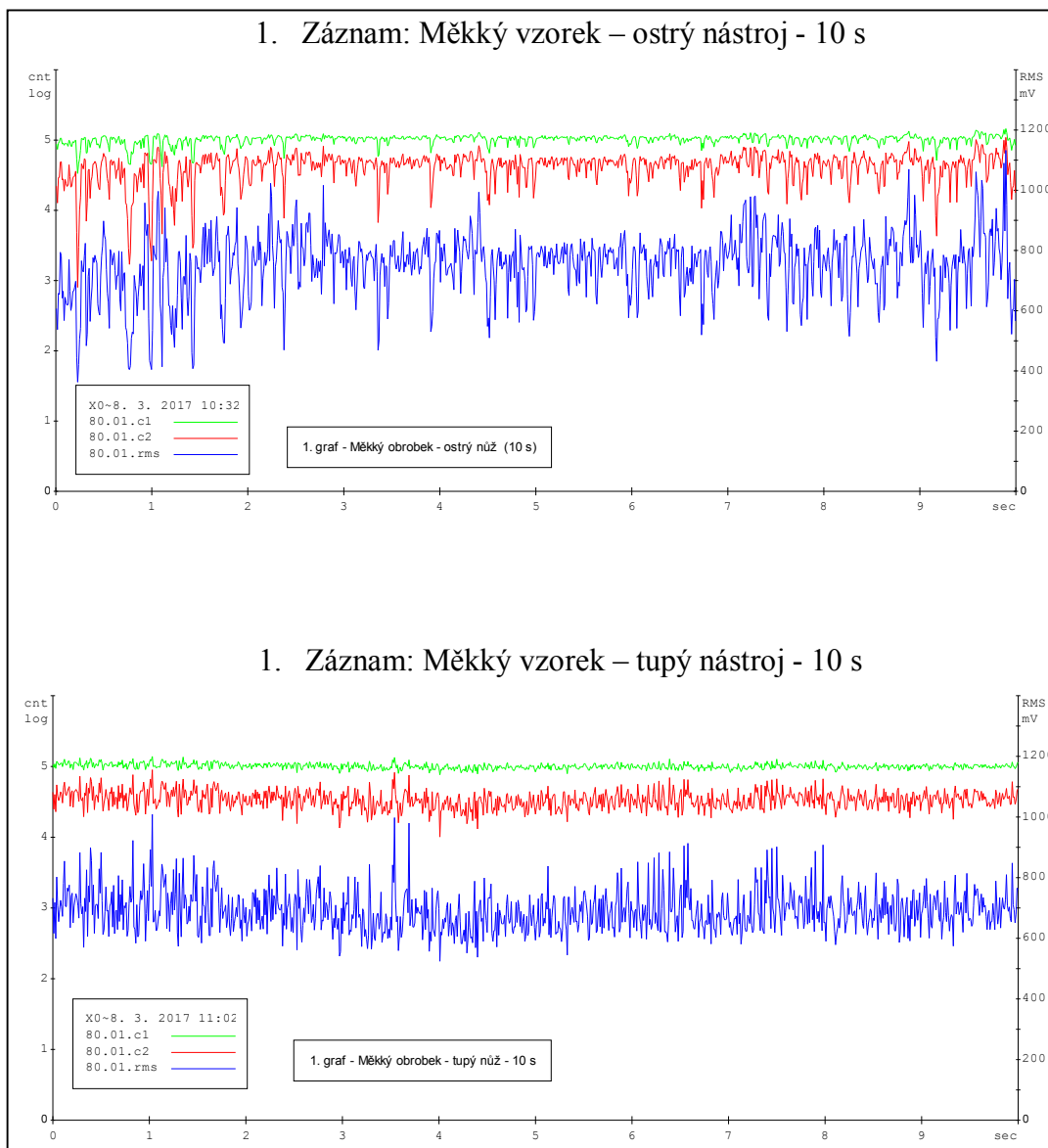
- **1. Skupina** - měkký materiál (Obr. 36 až Obr. 38)
- **2. Skupina** - tvrdý materiál (Obr. 39 až Obr. 41)

Skupiny výsledků jsou dále rozděleny na záznamy v trvání 2,3 sekund pro získání krátkého typického záznamu pro danou skupinu (obrázky s označením „a“) a interval do 10 sekund pro verifikaci frekvence, resp. četnosti výkmitu RMS u jednotlivých skupin (obrázky s označením „b“). Záznamy jsou řazeny nejen podle materiálu, ale i dle použití ostrého a tupého nástroje. Toto řazení dává jednoznačný pohled na vliv otupenosti nástroje při obrábění jednotlivých typů materiálu (houževnatý, tvrdý).

1. Skupina záznamů:

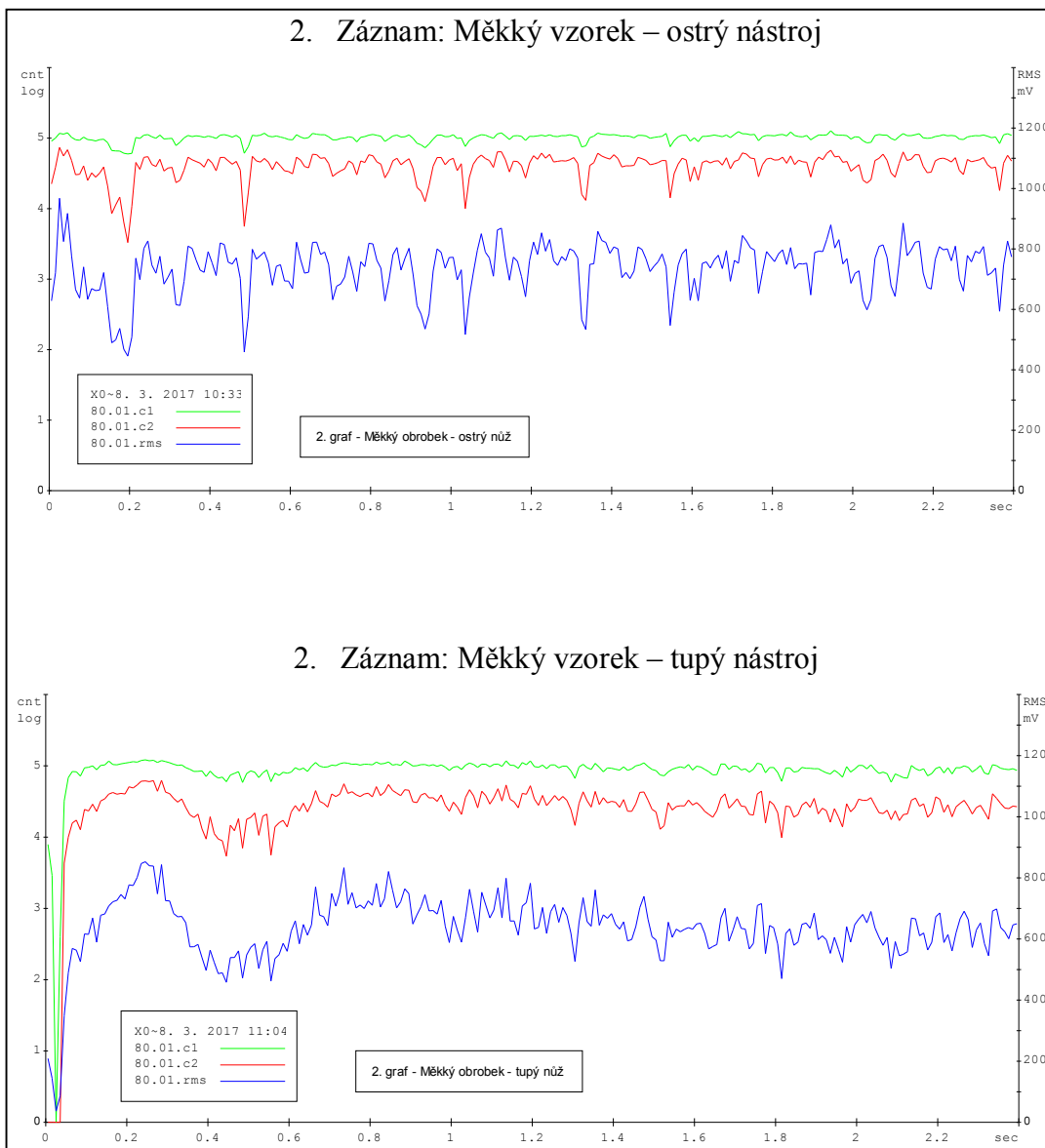


Obr. 36a

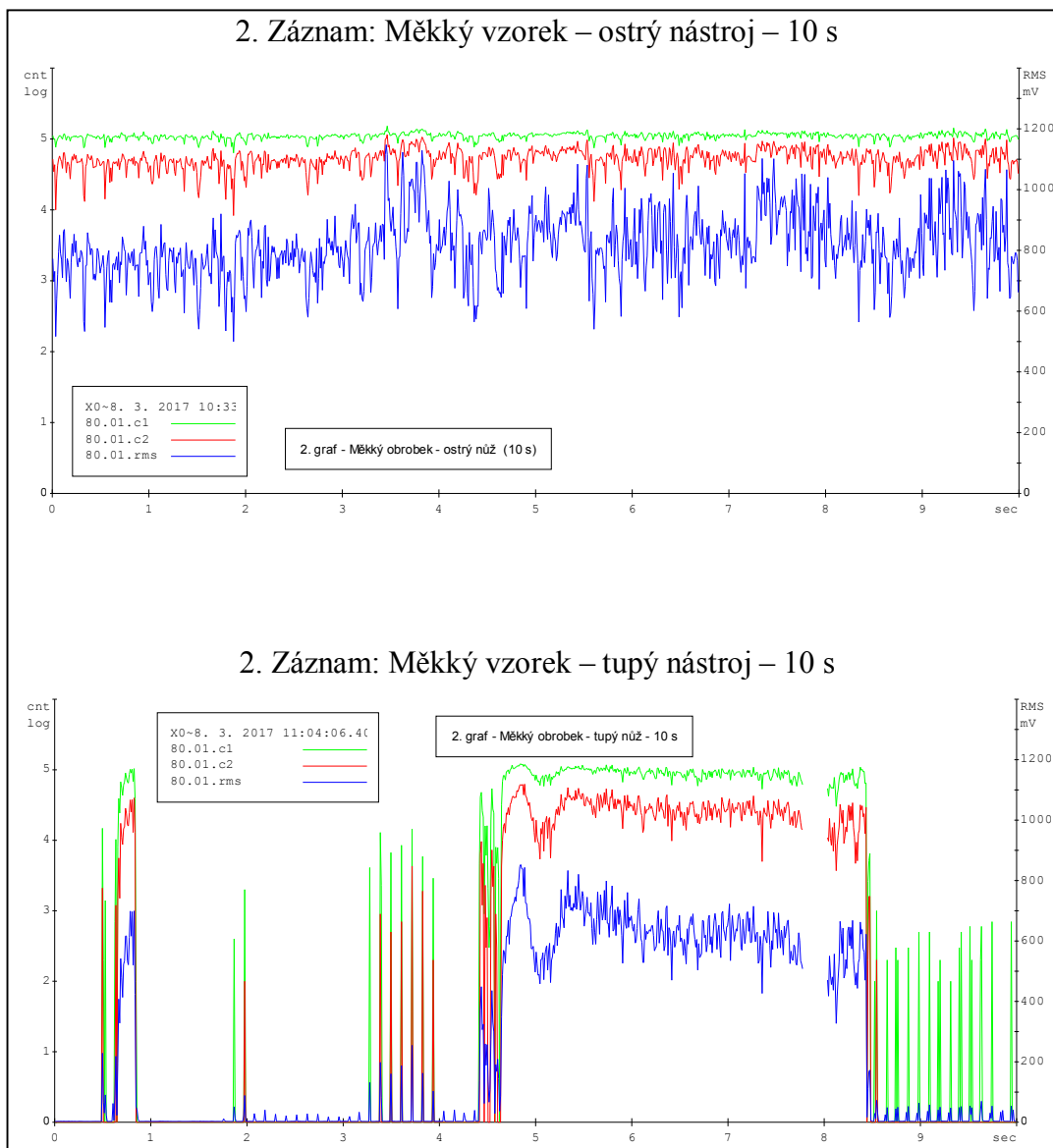


Obr. 36b

Obr. 36 Komparace vizualizací: 1. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor



Obr. 37a



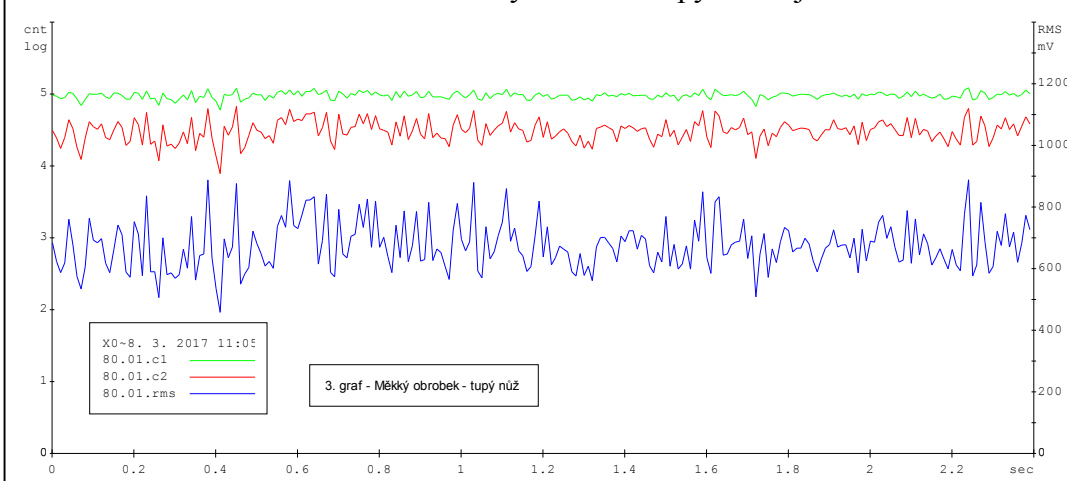
Obr. 37b

Obr. 37 Komparace vizualizací: 2. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor

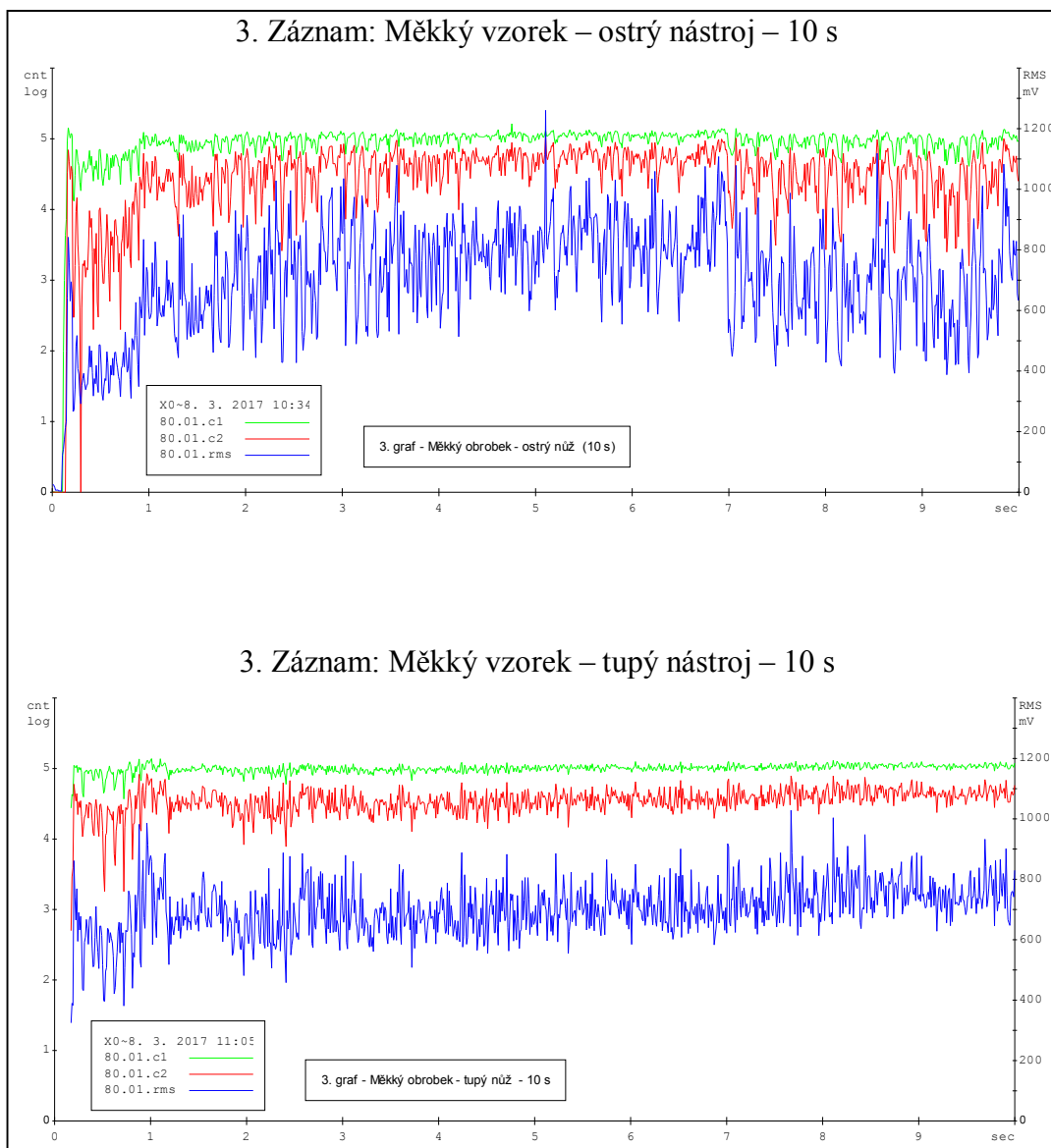
3. Záznam: Měkký vzorek – ostrý nástroj



3. Záznam: Měkký vzorek – tupý nástroj



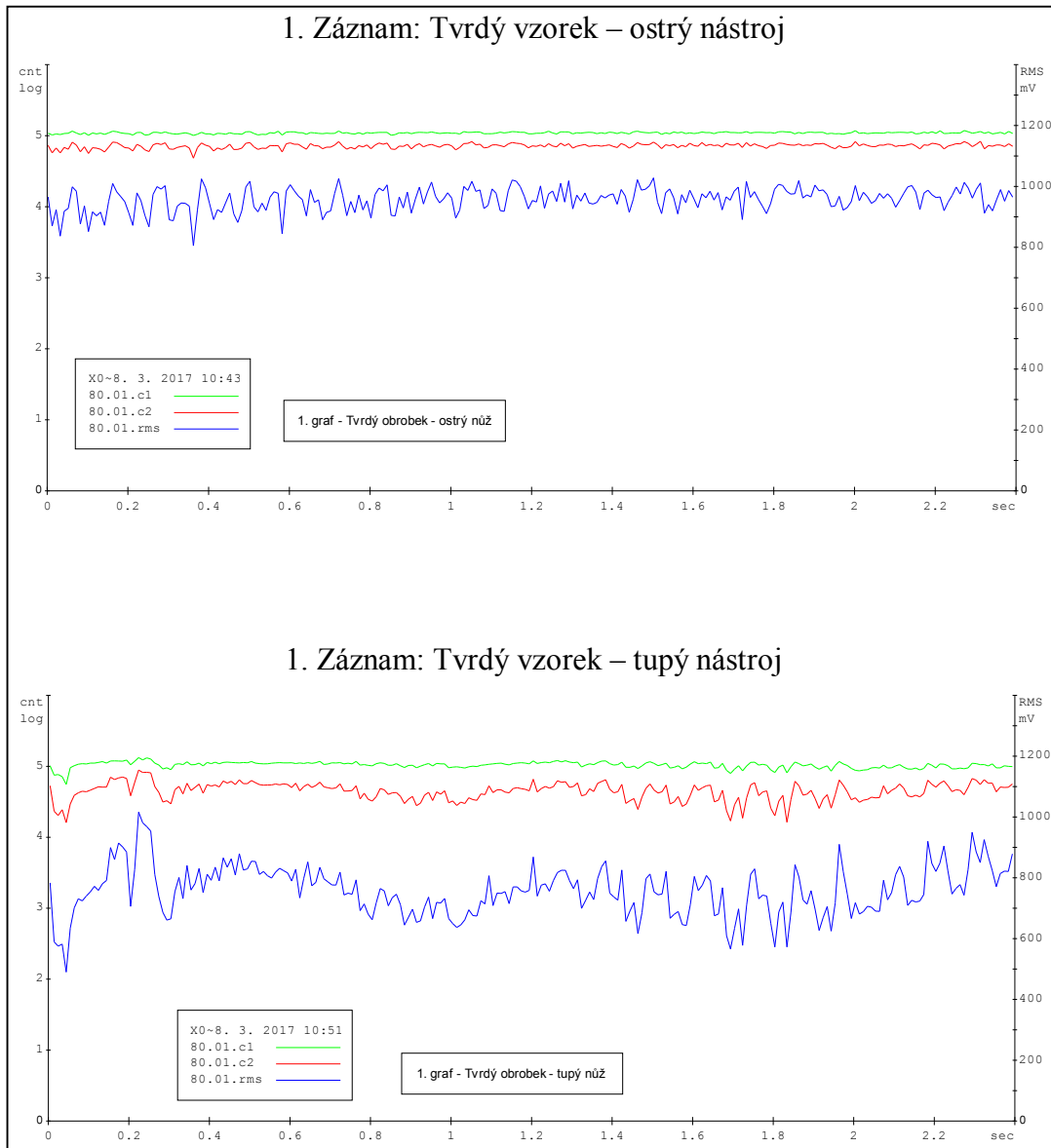
Obr. 38a



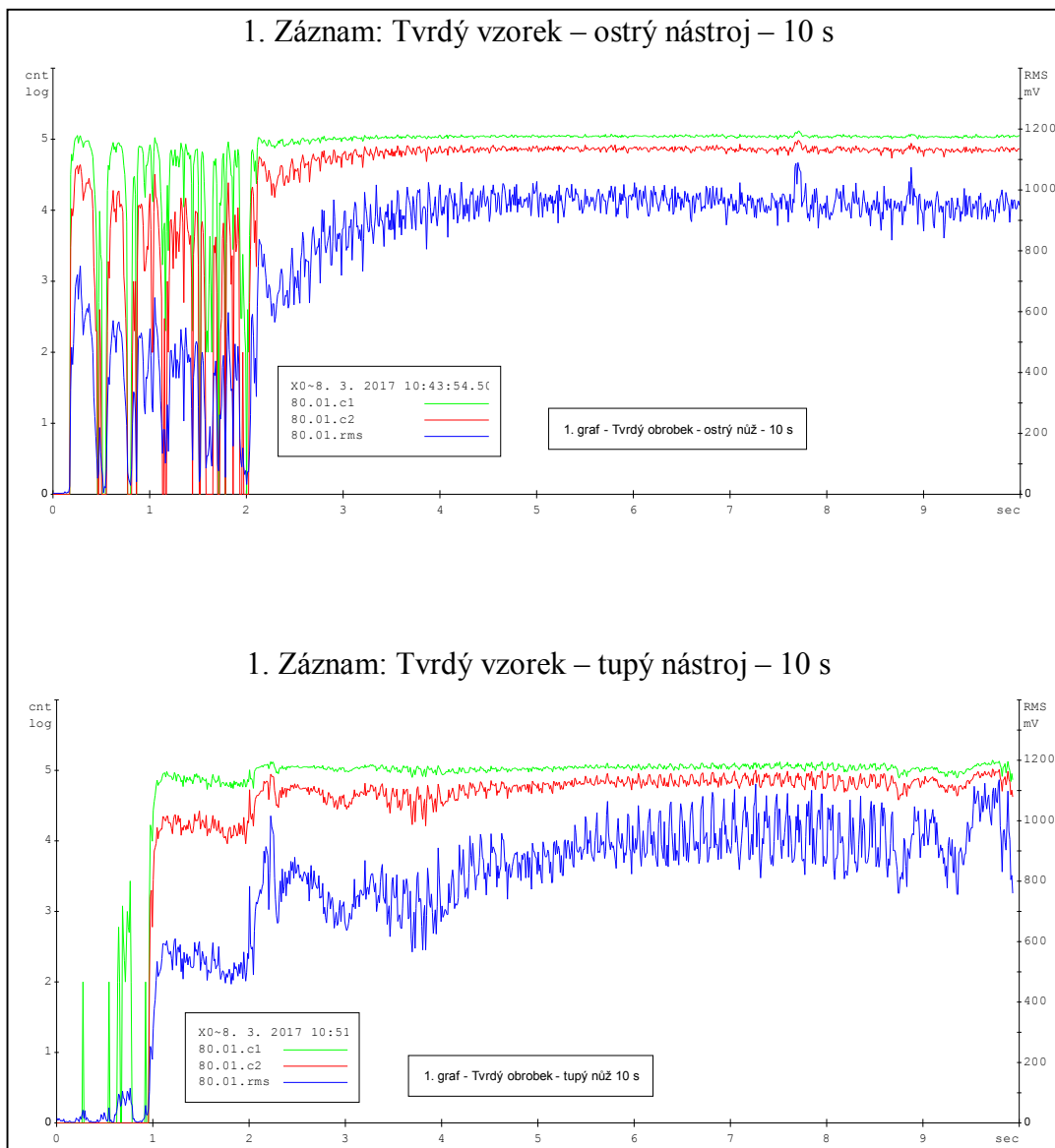
Obr. 38b

Obr. 38 Komparace vizualizací: 3. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor

2. Skupina záznamů:

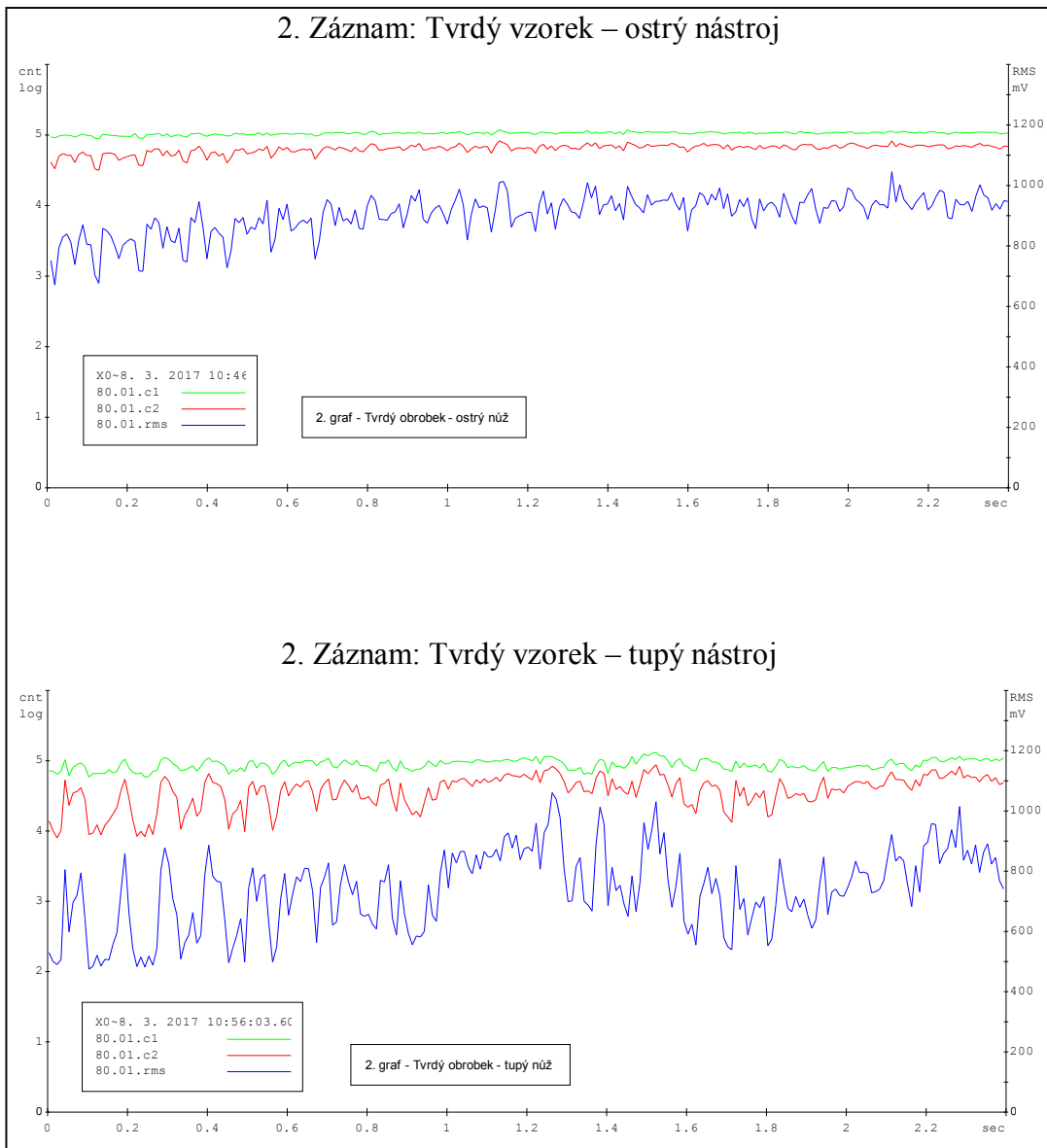


Obr. 39a

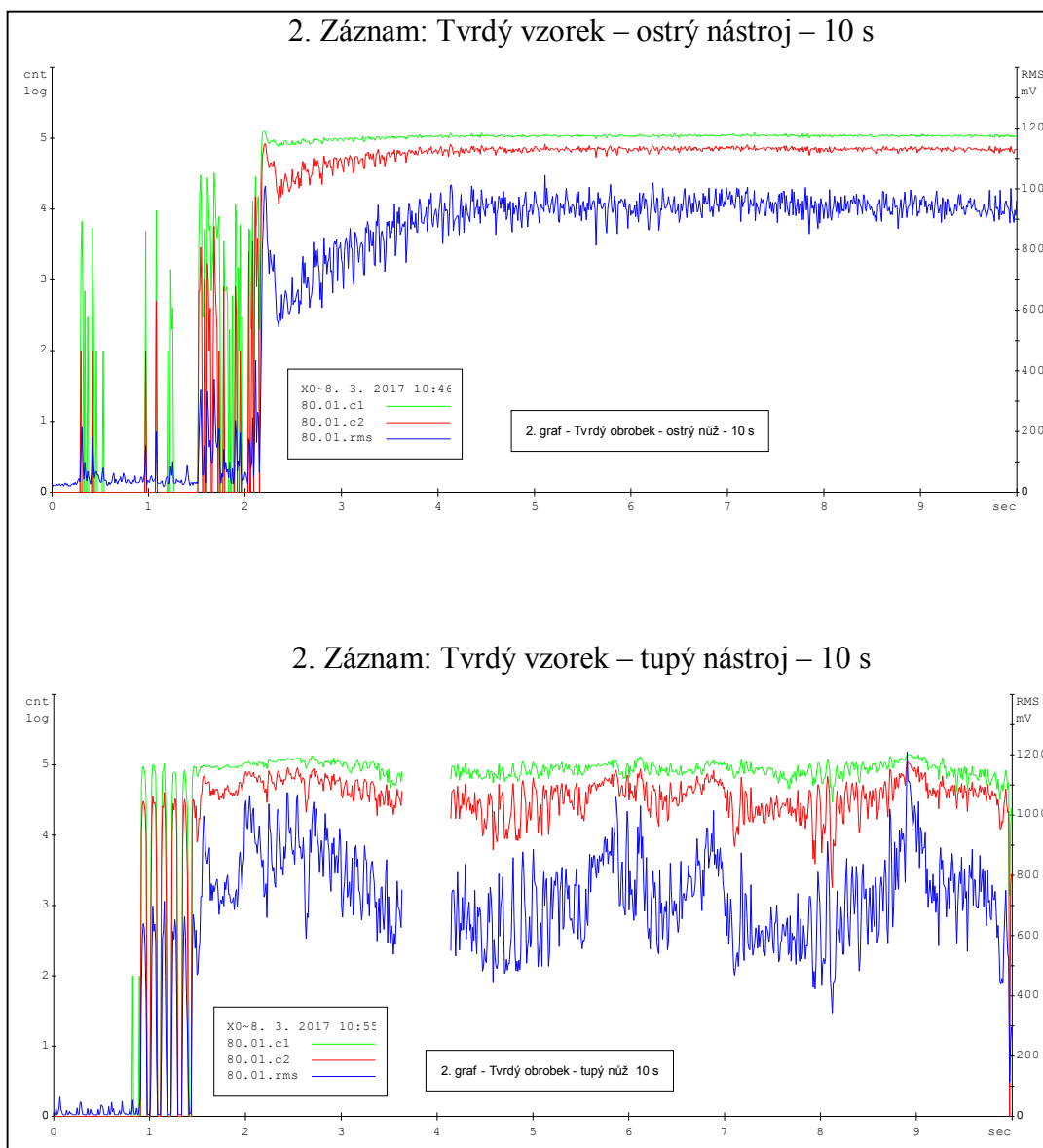


Obr. 39b

Obr. 39 Komparace vizualizací: 1. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor

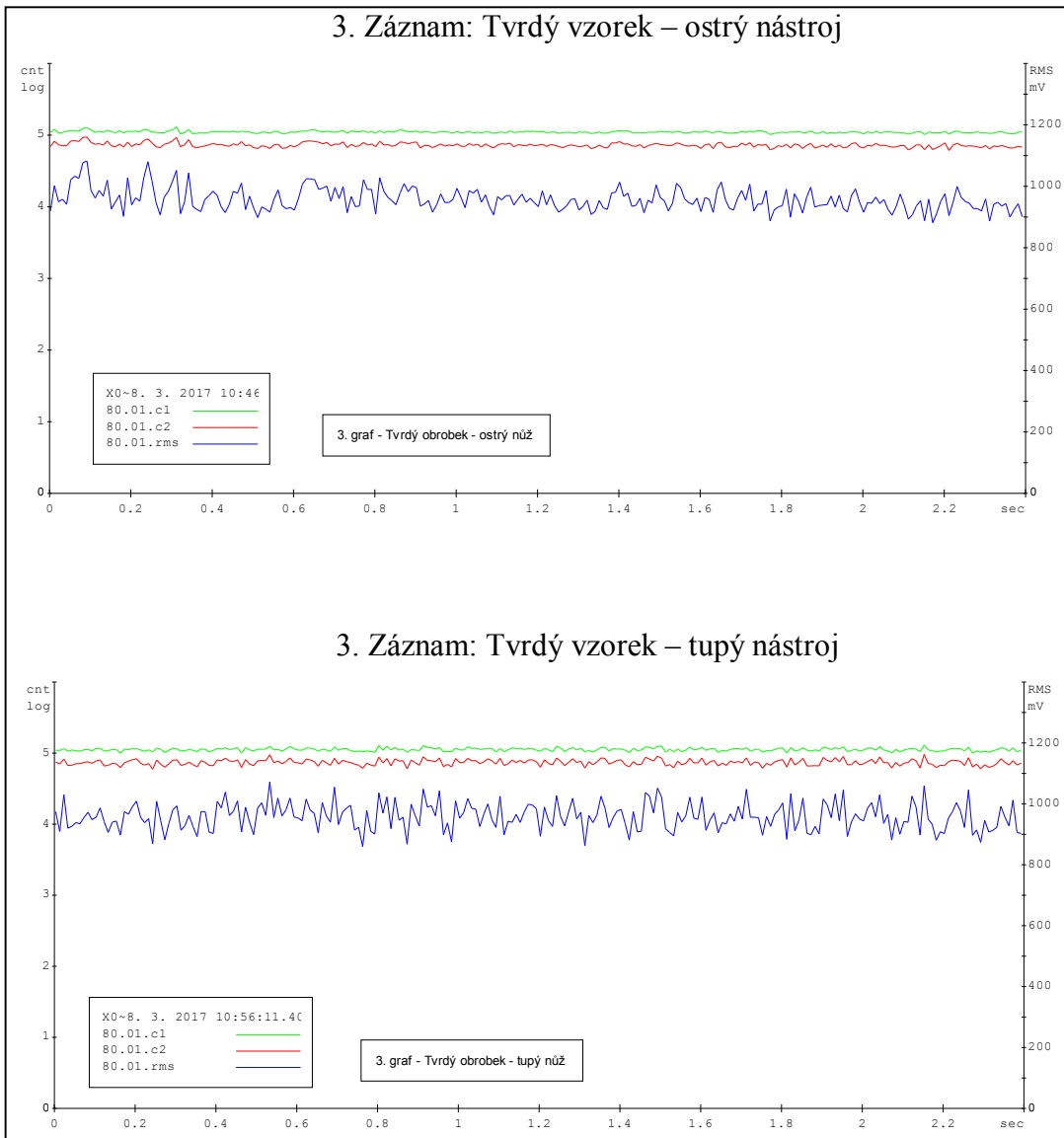


Obr. 40a

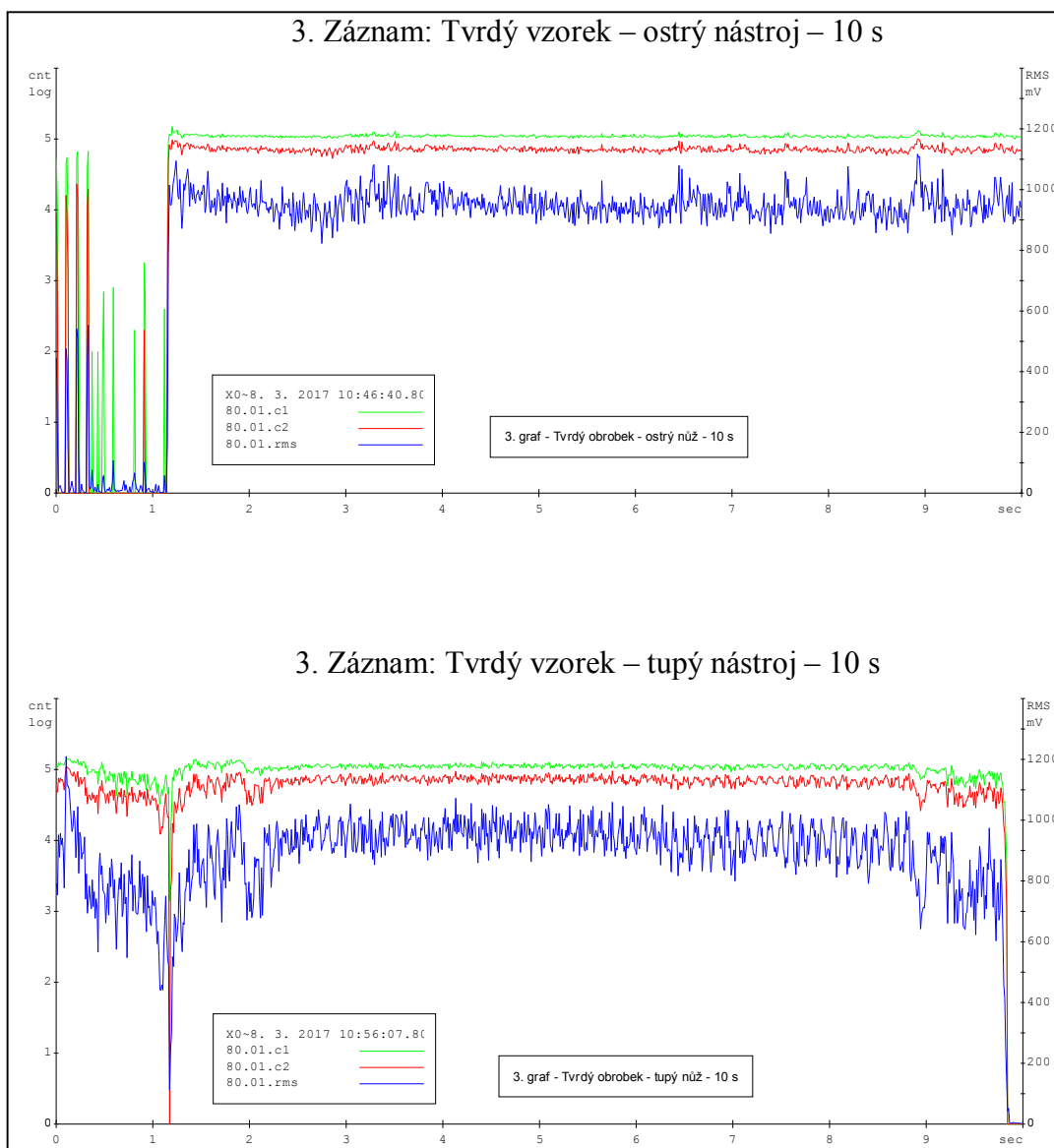


Obr. 40b

Obr. 40 Komparace vizualizací: 2. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor



Obr. 41a



Obr. 41b

Obr. 41 Komparace vizualizací: 3. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor

8.3.1 Diskuse výsledků

Uvedené výsledky experimentálních měření potvrdily nutnost diametrálně rozdílného pohledu na vztah ostrý - tupý nástroj z pohledu jejich aplikace na typ materiálu měkký - tvrdý. Základním ukazatelem velikosti odporu materiálu a hlavně tvaru záznamu AE je charakter odváděné třísky. U měkkého materiálu (Obr. 36 až Obr. 38) lze pozorovat plynulou třísku (možno vidět na Obr. 24), která je determinována poměrně ostrým záznamem (Obr. 36a až Obr. 38a). V dlouhých záznamech (10 s) lze pozorovat u tohoto materiálu menší počet „píků“ (vrcholů) RMS, což svědčí o plastické fragmentaci materiálu – ostrý nástroj. Při tupém nástroji dochází k zobrazení vyšší frekvence RMS, která koresponduje s plastickou fragmentací – tearing (trhání). Je zajímavé, že konečná hodnota RMS nerozhoduje. Svědčí to o náročnosti procesu z hlediska oddělování plastické plynulé třísky, a to jak u ostrého, tak u tupého nástroje.

U tvrdého materiálu (ČSN 11 600 - E335 dle EN) je při obrábění za stejných podmínek jako u měkkého materiálu charakteristická drobná (krátká) tříska (lze vidět na Obr. 32). Záznamy charakterizují vyšší hodnoty v charakteru křivky RMS, což svědčí o pseudokřehkém porušování materiálu před břitem nástroje. U tvrdého materiálu jsou ostrým nástrojem oddělovány malé objemy materiálu v rámci třísky, záznam je plynulejší, což je způsobeno snadným prorůstáním ostrého břitu do pevnějšího (křehčího) materiálu. I po dosažení hranice trvanlivosti (otupení zachyceno na Obr. 33) nástroje je ze záznamu zřejmé, že i když vzniká opět drobná křehkolomová tříska jsou oddělované objemy, z důvodu otupení a tím většího poloměru břitu, větší. Trhliny, které vznikají v materiálu před tupým břitem, vyžadují pro svůj pohyb mnohem větší hnací sílu, což zvedá hodnotu dodávané energie procesu (RMS), zejména jeho amplitudy. To je konkrétní důkaz otupení nástroje, kterým je obráběn tvrdý materiál. Akustické vlny vzniklé při oddělování materiálu byly ve všech případech snímány snímačem (Obr. 25), který byl připevněn ke konci soustružnického nože totožným vazebním médiem (Obr. 26). Nejdůležitějším zjištěním pro technickou praxi bude charakteristika vzniklé třísky, která má u měkkého materiálu konkrétní vliv na tvar záznamu, z kterého jak již bylo uvedeno, lze zjistit otupení. Zatímco u tvrdého materiálu je evidentním znakem ztráty životnosti ostří jak tvar záznamu, tak i celková výše energetické náročnosti – okamžité energie signálu.

9 ZÁVĚR

Předložený diplomový projekt, s názvem *Stanovení optimálních řezných podmínek na základě vizualizace řezných odporů*, je souborem nejnovějších kompilačních a experimentálních poznatků v oblasti korelace dějů z oboru obrábění a jejich popisu metodou nedestruktivního zkoušení - akustickou emisí.

Rešeršní část obsahuje nejnovější ucelené poznatky z oblasti teorie obrábění, které popisují nejen geometrii obráběcího nože, ale i jeho výslednou interakci s obráběným materiálem. V práci je uvedeno i klasické měření řezných odporů při využití speciálních měřících zařízení, která jsou často značně nákladná. Tuto ekonomickou nevýhodnost klasického měření řezné síly, resp. řezného odporu, odstraňuje metoda měření pomocí AE, která při jejím zapůjčení (měřicí přístroj, resp. služba) velmi snižuje vstupní orientační náklady. Na závěr teoretické části je detailně popsán princip AE a její využití.

Na uvedenou teoretickou část navázala experimentální část práce, která v sobě zahrnuje návrh metodiky měření, materiály pro charakterizování obrobku a jednotlivá měření AE při konstantních zvolených podmínkách obrábění. Závěr experimentu se promítá do výsledné diskuse, která je vedena z pohledu typu materiálu, ostrosti odebírajícího břitu a charakteristického tvaru záznamu akustické emise.

Závěry diplomové práce v plném rozsahu potvrdily výsledky získané z dosavadního výzkumu v této oblasti (Žižka, 2003) a ukazují tak na oprávněnost využití této nedestruktivní metody v přímé technické praxi, kdy po její aplikaci můžeme v kontinuálním procesu obrábění přímo vizualizovat okamžitý stav obráběcího nástroje. Toto zjištění lze při jistém stupni kooperace využít při výměně obráběcího nástroje. Tento aspekt je jasným důkazem, že uvedená měřicí metoda je nejen použitelná, ale při vlastnictví záznamové techniky NDT (AE) se následně podílí na snížení konečných nákladů výroby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOCMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] MÁDL, Jan a SCHUBERT, Vilém. Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění. Praha: ČVUT Praha, 1985.
- [4] KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [5] ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava-Poruba: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní, 2011. 143 s. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [6] *Uživatelská příručka: Diagnostický systém DAKEL - XEDO*, Dakel Praha.
- [7] *Přehled vlastností oceli* [online]. [cit. 2017-30-1]. Dostupné na:
<http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jdrive-s235jrg2>
- [8] *Jakosti oceli* [online]. [cit.2017-30-3]. Dostupné na:
http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [9] *Teorie soustružení* [online]. [cit.2017-30-3]. Dostupné na:
<http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=22451&docGroup=4931&cmd=0&instance=2>
- [10] *Řezné nástroje (4)* [online]. [cit.2017-30-3]. Dostupné na:
http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-4_8516.html
- [11] *Úhly na břítu nástroje* [online]. [cit.2017-1-4]. Dostupné na:
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1189>
- [12] *Tenzometry* [online]. [cit.2017-4-4]. Dostupné na: <http://vtsz.cz/tenzometry>
- [13] *Acoustic emission signals* [online]. [cit.2017-1-4]. Dostupné na:
<http://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=486>
- [14] *AE signal features* [online]. [cit.2017-1-4]. Dostupné na:
http://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.php

- [15] *Akustická emise* [online]. [cit.2017-1-4]. Dostupné na:
http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=6390&typ=html
- [16] *Návod na obsluhu: Univerzálny hrotový sústruh*. [online]. [cit.2017-1-4].
Dostupné na: <http://www.tumlikovo.cz/download/>
- [17] MADĚRKOVÁ, Marcela. *Technologie II* [online]. [cit. 2017-1-4]. Dostupné na:
http://www.ssprool.cz/omto/texty_zamecnik/za_technologie_2.pdf
- [18] PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění* [online]. [cit.2017-2-4]. Dostupné na:
<http://slideplayer.cz/slide/3078782/>
- [19] *Katalog Pramet: Nástroje a destičky pro soustružení* [online]. [cit.2017-2-4].
Dostupné na: http://www.mav.cz/data/katalog/k_soustr_pramet.pdf
- [20] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. Část* [online]. 2003
[cit.2017-3-4]. Dostupné na:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [21] HUBÁLEK, Jaromír a kolektiv. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*
[online]. 2012 [cit. 2017-04-04]. Dostupné na:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/absn/filesp/skripta_mikrosenzory_hubalek.pdf
- [22] *Laboratory proving rings* [online]. [cit.2017-3-4]. Dostupné na:
<http://www.siscoindia.co/search.html?ss=proving+rings>
- [23] *Kistler: 3 - Component dynamometer* [online]. [cit.2017-4-4]. Dostupné na:
<http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-152e-12.09.pdf>
- [24] VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [25] ŽIŽKA, Jan. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec: Technická univerzita, 2003.
- [26] *Snímač AE, typ IDK - 09* [online]. [cit 2017-10-4]. Dostupné na:
<http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/mtr5>

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Základní druhy ploch u vybraných typů obrábění [18] | 10 |
| Obr. 2 Řezné pohyby u různých typů obráběcích procesů [17]..... | 12 |
| Obr. 3 Pohyby nástroje a obrobku při podélném soustružení [1] | 13 |
| Obr. 4 Řezné síly a odpory při soustružení [20] | 13 |
| Obr. 5 Popis soustružnického nože, foto: autor | 15 |
| Obr. 6 Základní nástrojové úhly soustružnického nože [11]..... | 16 |
| Obr. 7 Křehký lom břitu nástroje [19]..... | 18 |
| Obr. 8 Opotřebením hřbetu způsobené abrazivním otěrem [19] | 18 |
| Obr. 9 Nalepování obráběného materiálu na břit nástroje [19] | 19 |
| Obr. 10 Plastická deformace špičky nástroje [19] | 19 |
| Obr. 11 Mechanický dynamometr třmenový [3] | 23 |
| Obr. 12 Mechanický dynamometr prstencový [22] | 23 |
| Obr. 13 Pneumatický dynamometr [24] | 24 |
| Obr. 14 Indukční snímač sil [3] | 26 |
| Obr. 15 Piezoelektrický dynamometr Kistler 9265B [23]..... | 26 |
| Obr. 16 Polovodičový tenzometr bez podložky a s podložkou [12]..... | 27 |
| Obr. 17 Schéma měření akustické emise, zdroj: autor | 28 |
| Obr. 18 Charakter spojitého signálu AE [13], překlad: autor..... | 30 |
| Obr. 19 Charakter nespojitého (praskavého) signálu AE [13], překlad: autor | 30 |
| Obr. 20 Parametry signálu AE [14], překlad: autor | 31 |
| Obr. 21 Řez snímačem AE, zdroj: autor..... | 32 |
| Obr. 22 Vzorok kruhových tyčí pro měření AE, zdroj: autor..... | 35 |
| Obr. 23 Vzorok připravený k měření, zdroj: autor..... | 36 |
| Obr. 24 Umístění snímače akustické emise na noži, zdroj: autor..... | 37 |
| Obr. 25 Snímač akustické emise IDK - 09, zdroj: autor | 38 |
| Obr. 26 Vysokopevnostní lepidlo Loctite Super attak universal, zdroj: autor | 38 |
| Obr. 27 Konfigurace měřícího kanálu v SW Daemon, zdroj: autor..... | 39 |
| Obr. 28 Uspořádání soustruhu a měřící soupravy při měření, zdroj: autor | 40 |
| Obr. 29 Měřící souprava AE, zdroj: autor | 41 |
| Obr. 30 Analyzátor AE Xedo - box, zdroj: autor..... | 42 |
| Obr. 31 Blokové schéma zapojení měřícího systému [6]..... | 43 |
| Obr. 32 Řezný nástroj obrábějící tvrdý materiál, zdroj: autor..... | 44 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 33 Ostří nástroje po dosažení hranice trvanlivosti, zdroj: autor | 45 |
| Obr. 34 Detail uměle otupeného ostří řezného nástroje, zdroj: autor | 45 |
| Obr. 35 Povrch vzorků po experimentu (shora – měkký, tvrdý), zdroj: autor..... | 46 |
| Obr. 36 Komparace vizualizací: 1. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor | 48 |
| Obr. 37 Komparace vizualizací: 2. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor | 50 |
| Obr. 38 Komparace vizualizací: 3. záznam - měkký vzorek, zdroj: autor | 52 |
| Obr. 39 Komparace vizualizací: 1. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor..... | 54 |
| Obr. 40 Komparace vizualizací: 2. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor..... | 56 |
| Obr. 41 Komparace vizualizací: 3. záznam - tvrdý vzorek, zdroj: autor..... | 58 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1 Komparace velikosti zatížení běžných součástí a řezných nástrojů [2] | 17 |
| Tab. 2 Kategorie mechanismů opotřebení břitu [2] | 17 |
| Tab. 3 Řezné podmínky a typ nástroje, zdroj: autor | 36 |
| Tab. 4 Technické parametry použitého snímače IDK – 09. [26]..... | 37 |
| Tab. 5 Vybrané technické parametry stroje TOS SN 50B [16]..... | 41 |
| Tab. 6 Technické parametry měřící kanálové jednotky [6]..... | 44 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol/zkratka | Jednotka | Popis |
|----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| A_D | [mm ²] | jmenovitý průřez třísky |
| a_p | [mm] | tloušťka třísky |
| A_α, A_α' | [-] | plochy hřbetu soustružnického nože |
| $A_\gamma, A_{\gamma 1}, A_{\gamma 2}$ | [-] | plochy čela soustružnického nože |
| C | [F] | elektrická kapacita |
| D | [mm] | průměr obrobku nebo nástroje |
| f | [mm] | posuv na otáčku |
| F | [N] | celková řezná síla/ obecná zatěžující síla |
| F_c | [N] | řezná síla |
| F_f | [N] | posuvová síla |
| F_p | [N] | pasivní síla |
| k_c | [MPa] | měrný řezný odpor |
| L | [H] | vlastní indukčnost |
| l | [m] | délka obrobku |
| n | [min ⁻¹] / [-] | otáčky / počet břitů na jedné straně destičky |
| p | [-] | počet použitelných ostří břitové destičky |
| P_{fc} | [-] | pracovní boční rovina |
| $P_{už}$ | [W] | užitečný výkon při obrábění |
| R | [Ω] | elektrický odpor |
| R_{eH} | [MPa] | mez kluzu |
| R_m | [MPa] | mez pevnosti v tahu |
| S | [-] | hlavní ostří soustružnického nože |
| S' | [-] | vedlejší ostří soustružnického nože |
| T | [min] | trvanlivost břitu řezného nástroje |
| T_i | [min] | jednotlivé trvanlivosti |
| t | [ms] | čas |
| U | [mV] | elektrické napětí |
| v_c | [m.min ⁻¹] | řezná rychlost |
| v_e | [m.mm ⁻¹] | rychlost řezného pohybu |
| v_f | [mm.min ⁻¹] | posuvová rychlost |
| \check{Z} | [min] | životnost břitu řezného nástroje |
| α | [°] | úhel hřbetu soustružnického nože |
| β | [°] | úhel břitu soustružnického nože |
| γ | [°] | úhel čela soustružnického nože |
| δ | [°] | úhel řezu soustružnického nože |
| $\Delta t,$ | [ms] | rozdíl času |
| η | [°] | úhel řezného pohybu |

| | | |
|------------|------|------------------------------------------|
| κ_r | [°] | nástrojový úhel nastavení hlavního ostří |
| φ | [°] | úhel posuvového pohybu |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| ADC, A/D | [-] | analogově digitální převodník |
| AE | [-] | akustická emise (acoustic emission) |
| AJ | [-] | Anglický jazyk |
| BNC | [-] | Bayonet Neill - Concelman konektor |
| ČSN | [-] | Česká státní norma |
| DC | [-] | direct current (stejnoseměrný proud) |
| DMA | [-] | direct memory access |
| DSP | [-] | digitální signálový procesor |
| EN | [-] | Evropská norma |
| HW | [-] | hardware |
| NDT | [-] | nedestruktivní testování |
| PC | [-] | personal computer (osobní počítač) |
| RAM | [-] | random-access memory (operační paměť) |
| RMS | [mV] | okamžitá energie signálu |
| SK | [-] | slinutý karbid |
| SNO | [-] | soustava stroj – nástroj – obrobek |
| SW | [-] | software |
| ÚTAD | [-] | Ústav techniky a automobilové dopravy |