

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ  
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BRNO 2015**

**JAN PIŠTORA**

**Mendelova univerzita v Brně**  
**Agronomická fakulta**  
Ústav techniky a automobilové dopravy

---



**Měření hloubky průniku indentoru s využitím deformační odezvy**

Bakalářská práce

*Vedoucí práce:*  
doc. Ing. Michal Černý, CSc.

*Vypracoval:*  
Jan Pištora

---

Brno 2015



### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci Měření hloubky průniku indentoru s využitím deformační odezvy 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: 15. 4. 2015

.....  
podpis

## **Poděkování**

Děkuji především doc. Ing. Michalovi Černému, CSc. za odborné vedení práce, inspirační vliv a praktickou realizaci experimentálních zkoušek. Dále Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D., za konzultace a pomoc při verifikačních měřeních pomocí AE za metodického vedení doc. Ing. Pavla Mazala, CSc.

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je teoreticky popsat a prakticky ověřit odezvu akustické emise na zkoušku měření tvrdosti kovu, respektive porovnat hloubku průniku indentoru a naměřenou tvrdost s odezvou akustického signálu pomocí aparatury akustické emise.

**Klíčová slova:** deformační odezva, akustická emise, tvrdost kovů, měření tvrdosti kovů, plastická deformace

## **ABSTRACT**

Goal of this bachelor work is theoretically describe acoustic emission response to hardness testing in correlation with a depth of indenter and measured hardness by acoustic emission plant.

**Keywords:** deformation response, acoustic emission, metal hardness, metal hardness measurement, plastic deformation

# OBSAH

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Úvod.....   | 9  |
| 2       | Cíl práce.....  | 9  |
| 3       | Měření tvrdosti kovů.....                                       | 10 |
| 3.1     | Princip a definice měření tvrdosti kovů .....                   | 10 |
| 3.1.1   | Zkoušky vnikací (vtiskové) .....                                | 11 |
| 3.1.1.1 | Zkouška tvrdosti podle Brinella .....                           | 11 |
| 3.1.1.2 | Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....                           | 13 |
| 3.1.1.3 | Měření tvrdosti podle Rockwella .....                           | 14 |
| 3.1.2   | Zkoušky vrypové .....   | 16 |
| 3.1.2.1 | Úvod do metody .....  | 17 |
| 3.1.2.2 | Hodnocení a testování .....                                     | 18 |
| 3.1.2.3 | Závěrečné zhodnocení metodiky měření tvrdosti povlaků.....      | 19 |
| 4       | Akustická emise.....  | 19 |
| 4.1     | Historie a teorie .....   | 19 |
| 4.2     | Proces zpracování dat AE .....                                  | 20 |
| 4.2.1   | Událost AE jako komplexní skupina hitů identického zdroje ..... | 22 |
| 4.3     | Moderní trendy aplikace AE .....                                | 23 |
| 4.4     | AE a deformace materiálu.....                                   | 24 |
| 4.5     | Deformace a makrotvrdost.....                                   | 28 |
| 5       | Měření tvrdosti jako zdroj AE .....                             | 29 |
| 5.1     | Praktická verifikace AE u vnikacích zkoušek.....                | 30 |
| 5.1.1   | Měření tvrdosti HRB a HRC na MENDELU .....                      | 31 |
| 5.1.2   | Odezva na měření tvrdosti na ÚK VUT FSI.....                    | 39 |
| 5.2     | Materiálová odezva u měření HRB.....                            | 45 |
| 5.3     | Materiálová odezva u měření HRC.....                            | 45 |

|                      |   |    |
|----------------------|---|----|
| 5.3.1                | Vliv struktury zkoušeného materiálu ..... | 45 |
| 5.3.2                | Vliv metodiky měření (snímače) .....      | 45 |
| 5.4                  | Diskuse výsledků .....                    | 46 |
| Literatura:.....     |   | 48 |
| Seznam obrázků:..... |   | 49 |



## 1 ÚVOD

Fenomén měření akustické emise (dále jen AE) můžeme sledovat již od 60tých let minulého století, kdy se začaly sledovat první akustické odezvy mechanického působení u zkoušeného materiálu. V dnešní době můžeme najít mnohé praktické aplikace této nedestruktivní metody testování v oblastech strojírenských, stavebních nebo přírodovědných.

Nejvíce se AE aplikuje v právě ve strojírenských systémech, zařízeních a soustavách, kde dlouhodobě monitoruje provoz či jednorázově podává informace o aktuálních mechanických vlastnostech materiálu například při cyklickém zatěžování vzorků. Aparát AE použijeme pro zkoumání deformační odezvy při měření tvrdosti kovů. Hlavním zájmem bude hloubka průniku indentoru a její korelace s naměřenou deformační odezvou.

## 2 CÍL PRÁCE

Cíl práce by měl korespondovat s původním zadáním bakalářské práce. Proto je nezbytné, aby dílo detailně, v rámci možnosti bakalanta, dedikovalo vypracování kompilačního popisu poznatků, v souladu s nejnovějšími názory odborné literatury, a to nejen z oblasti měření tvrdosti ocelových konstrukčních materiálů, ale i okruhu metodik nedestruktivního zkoušení (NDT) v oblasti akustické emise (AE).

Dále by měla být navržena a posouzena metodika verifikace průniku indentoru při praktickém měření tvrdosti materiálu normovanými zkouškami v závislosti na zobrazení plastické deformace metodou AE.

Celá navržená (původní) metodika musí být samozřejmě stručně verifikována a následně musí být provedeno sumární zhodnocení navržené metody s ohledem na ekonomické aspekty a její možné využití v technické praxi.

## 3 MĚŘENÍ TVRDOSTI KOVŮ

### 3.1 Princip a definice měření tvrdosti kovů

Tvrdot definuje odborná literatura jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa tzv. indentoru. Výsledná hodnota tvrdosti je funkcí více vlivů, jako například:

- Pružné a plastické odezvy tělesa
- Velikosti zatížení
- Tvaru indentoru
- Rychlosti a doby vnikání indentoru do materiálu apod.

Mezi hlavní výhody zkoušek tvrdosti patří jejich operativnost. Nevyžadují speciální a nákladné přípravy a po zkoušce zůstane poškozena jen malá oblast materiálu. Vlastní zkoušce by však měla předcházet úprava kontaktní zkoušené plochy materiálu. Nežádoucí vrstva změněného povrchu materiálu či povlaku by mohla vézt ke špatnému vyhodnocení výsledné tvrdosti materiálu, pokud by vykazovala menší či naopak větší tvrdost než materiál samotný. K tomuto jevu dochází například při oduhličeném či naopak nauhličeném povrchu ocelí.

Zkoušky tvrdosti se metodicky dělí do různých kategorií. Obecně lze konstatovat, že je možné dosáhnout dvou stavů po interakci indentoru s materiálem. Prvním stavem je dosažení plastické deformace (trvalé). Tato metoda se nejčastěji využívá v oblasti měření tvrdosti keramiky a kovů a jedná se z pravidla o metody intendantní, neboli vnikací (těleso indentoru vnikne pod povrch materiálu).

Druhý způsob je založen na metodě elastické interakce povrchu zkoušeného materiálu a indentoru. Tato metoda má nejhojnější zastoupení při zkoušení pryží a plastů. [2]

Další rozdělení jsou podrobnější a slouží k přesnější specifikaci a výběru vhodné zkoušky na konkrétní vzorek. Dělení podle mechanického principu kontaktu indentoru s materiálem:

- vrypové

- odrazové
- vnikací

Rozdělení podle velikosti síly zatížení indentoru měříme:

- makrotvrlost
- mikrotvrlost
- nanotvrlost

Rychlost působení zatěžující síly dělí zkoušky na:

- statické
- dynamické

Prostředí, ve kterém se zkoušky provádí, je nejčastěji:

- laboratorní
- provozní

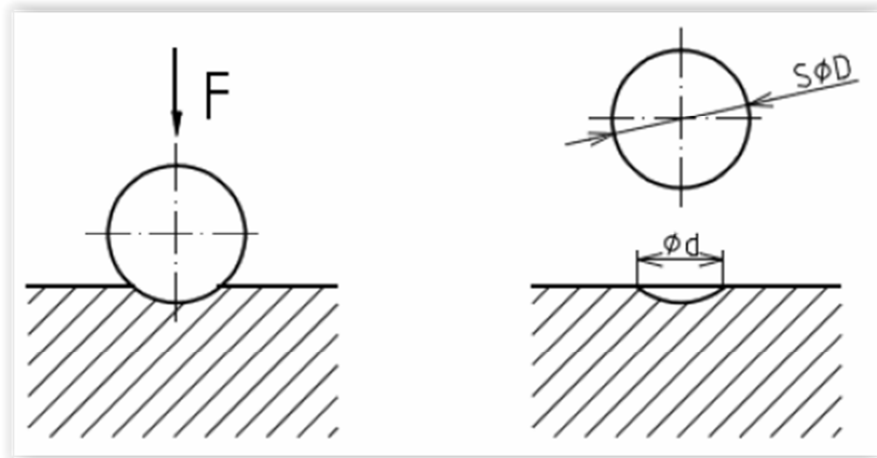
### **3.1.1 Zkoušky vnikací (vtiskové)**

Podstatou většiny vnikacích zkoušek je zatlačení zkušebního tělesa (indentoru) kolmo do povrchu vzorku. Výsledkem je trvalá deformace materiálu. V první fázi kontaktu indentoru s materiálem dochází k pružné (elastické) deformaci materiálu. V této fázi ještě nemůžeme využít hodnoty k určení tvrdosti materiálu. K pouze elastické zdeformování vzorku zkouškou tvrdosti dochází při zkoušení obzvláště tvrdých materiálů nebo při používání nízké síly zatížení například při měření mikrotvrlosti dle Vickerse.

Při většině praktických zkoušek tvrdosti však dominuje deformace plastická. Mez tvrdosti potom spolu s mezí pevnosti slouží pro vyhodnocení výsledné tvrdosti.

#### **3.1.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella**

Podstatou zkoušky tvrdosti podle švédského inženýra Brinella je vtláčování vyleštěné a zakalené kuličky z oceli nebo tvrdokovu, přesně daného průměru, určitou silou a po danou dobu do zkoušeného materiálu. Výsledkem je kulovitý obtisk, který se nám v průmětu zobrazí jako kruh o průměru  $d$ .



Obr. 1 Zkouška HB [9]

Výslednou tvrdost podle Brinella označujeme písmeny HBW při použití indentoru z tvrdokovu a HBS při použití kuličky ocelové. Častěji se používají kuličky z tvrdokovu kvůli vysokému modulu pružnosti.

Fyzikálně představuje tvrdost podle Brinella tlak indentoru (v tomto případě kuličky) vznikající působením síly na plochu zkoušeného vzorku.

$$HBW = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi D h} \quad 3.1$$

Kde  $h$  je kloubka vniku indentoru

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad 3.2$$

Výsledná tvrdost se vypočítá v jednotkách  $kp$

$$HBW = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 3.3$$

Je-li výsledná síla udávána v Newtonech, vynásobí se výsledek korekčním koeficientem 0,102.

V dnešní době se na moderních tvrdoměrech tvrdost vypočítá automaticky. V případě manuálních zařízení se odečte příslušná hodnota z tabulek v závislosti na průměru zkušební kuličky D, použité zatížení F a výsledný průměr otisku indentoru d. Doba zatížení se pohybuje u ocelí mezi 10 až 15 s.

Volba průměru indentoru D je závislá na tloušťce vzorku a jeho druhu. Obvyklý průměr je 10 mm.

### 3.1.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

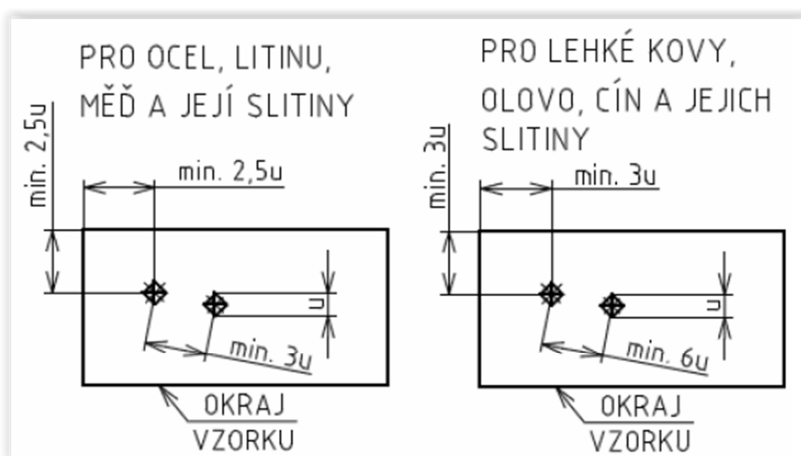
Zkouška se obvykle provádí čtyřbokým diamantovým indentorem ve tvaru jehlanu s vrcholovým úhlem stěn 136° (viz Obr.2). Přesná hodnota úhlu byla takto zvolena proto, aby nedocházelo ke zkreslení zkoušky vlivem tření o zkoušený materiál při vniku. Volbou tohoto úhlu se docílilo také zvýšení podobnosti výsledku při měření tvrdosti dle Brinella. Odčítanou hodnotou po provedení zkoušky je úhlopříčka. Ta se po té dosadí do vztahu:

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2} \quad 3.4$$

F - zátěžná síla [N]

u - průměrná hodnota úhlopříčky [mm]

Výhodou zkoušky je vysoká přesnost a nízká deformace vzorku.



Obr. 2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [9]

### 3.1.1.3 Měření tvrdosti podle Rockwella

Tato vnikací zkouška tvrdosti je pojmenovaná podle společnosti Rockwell (USA), kde byla vymyšlena. Mechanický princip spočívá ve vtlačování diamantového kuželu, tvrdokové nebo ocelové kuličky do materiálu (viz. Tab. 1). Vrcholový úhel kužele je stanoven na 120° s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm. Kulička má průměr 1/16 palce (tj. 1, 5875 mm) nebo 1/8 palce (3,175 mm).

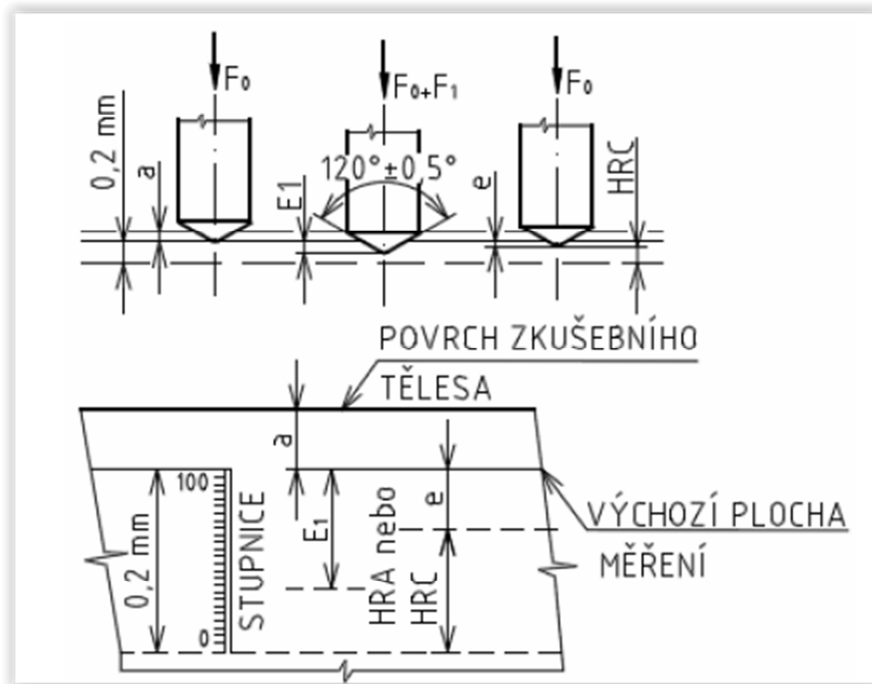
Tab. 1 Rozsah Rockwellovy stupnice a využití [10]

| stupnice | indentor                      | zatížení [N]   |                |                | rozsah měřitelné stupnice |              | použití   |
|----------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------|---|
|          |                               | F <sub>0</sub> | F <sub>1</sub> | F <sub>C</sub> | počet dílků               | hloubka [mm] |   |
| H        | ocelová kulička<br>Ø 3,175 mm | 98,07          | 490,3          | 588,4          | 130                       | 0,26         | litiny, hliníkové slitiny<br>a jiné měkké materiály |
| E        |                               |                | 882,6          | 980,7          |                           |              |   |
| K        |                               |                | 1 173          | 1471           |                           |              |   |

Praktické provedení zkoušky probíhá zatížením indentoru předběžnou silou  $F = 10$  kp (tj. 98,07 N). Tímto zaujme indentor polohu hloubky  $a$  od povrchu vzorku, z důvodu eliminace vlivu povrchové vrstvy. Poté se na tvrdoměru nastaví nulová hodnota. Následně zatížíme indentor po dobu 2-8 sekund další, takzvanou přídatnou silou  $F_p$ . Tato síla je pro každou stupnici přesně určená normou. Celkové zatížení je tedy rovno součtu těchto sil dle vzorce:

$$F = F_0 + F_1 \quad 3.5$$

Po odlehčení se vnikající hrot vrátí do polohy odlišné od polohy  $a$  o délku  $E$  zobrazenou na obrázku při použití kuželového a kuličkového indentoru (Obr. 3)



Obr. 3 Princip Rockwellovy zkoušky [9]

Délka je v přímé úměře k tvrdosti materiálu a na stupnici přístroje je převedena na jednotky tvrdosti Rockwella (HRC). Mírou tvrdosti je tak hloubka vtisku vnikajícího hrotu do materiálu po odlehčení přídavného zatížení.

Výsledná hodnota tvrdosti se pak označí v základu HR a dalším písmenem, které označuje použitou stupnici A až K. Stupnice jsou tabulkově seřazeny spolu s hodnotami zatížení:

Mezi nejpoužívanější stupnice patří C a B. Pokud byla jako indentor použita kulička z tvrdokovu doplní se ještě písmeno W. V případě kuličky kovové písmeno S. Například značení 60 HRBW znamená naměřenou hodnotu 60 Rockwellů měřenou dle stupnice B za použití indentoru ve tvaru kuličky z tvrdokovu. Tvrdost skupiny A (HRA) se využívá pro testování velice tvrdých materiálů. Celkové zatížení je pouze 60 kp aby nedošlo k poškození diamantového kužele indentoru, který je vlivem malé hloubky průniku  $a$  poměrně hodně zatížen (nedostatek opěrné plochy). Přesnost měření se úzce odvíjí na správně zvoleném přídavném zatížení, jelikož se začátek stupnice zvolí až po zatížení silou  $F_0$ . U starších typů tvrdoměrů probíhá tato volba ručně. Zvyšuje se tak možnost nepřesnosti. [1]

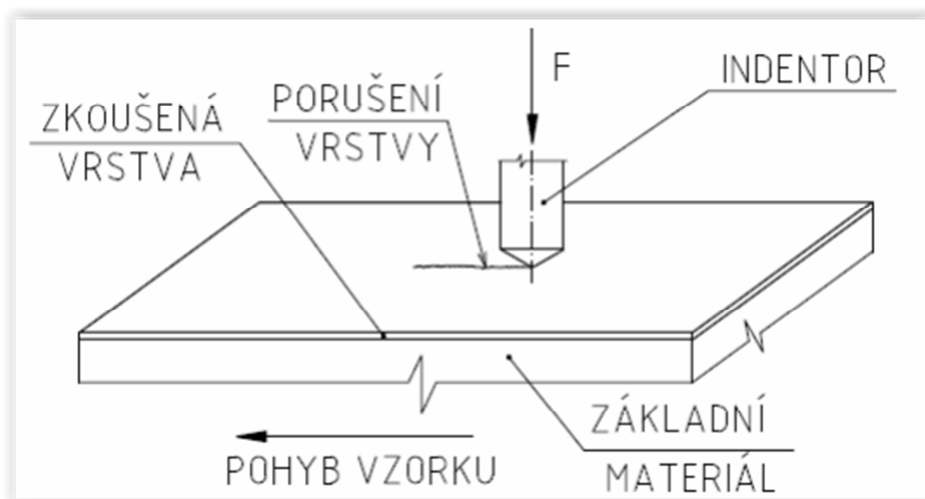
### 3.1.2 Zkoušky vrypové

Metodika vrypových zkoušek se do technické praxe měření tvrdosti kovů přenesla z oboru mineralogie, kde se setkáváme se vzorky tvrdými a křehkými nebo naopak s materiály tvrdosti velmi malé. Tvrdosti materiálů používaných v technické praxi jsou odvozeny právě od tvrdostí přírodních minerálů (Tab. 2)

Tab. 2 Stupnice tvrdosti [10]

| Mohsova stupnice tvrdosti |             | pořadí materiálu používaného ve strojírenství |                   |                         |                        |                 |
|---------------------------|-------------|---|-------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| 1. mastek                 | 6. živec    | grafit<br>0,5                                 | cín<br>1,5        | olovo<br>1,5            | hliník<br>2            | zlato<br>2,5    |
| 2. sůl kamenná            | 7. křemen   | stříbro<br>2,5                                | antimon<br>3,5    | čisté železo<br>4,5     | platina<br>4,5         | měkká ocel<br>5 |
| 3. vápenec                | 8. topas    | iridium<br>6                                  | tvrdá ocel<br>8,5 | nitridovaný Povrch<br>9 | slinuté karbidy<br>9,8 |                 |
| 4. kazivec                | 9. korund   |   |                   |                         |                        |                 |
| 5. apatit                 | 10. diamant |   |                   |                         |                        |                 |

Standartnímu průběhu odpovídá rychlost 100 mm/min a nárůst síly je 100 N/min. Průměrná odchylka hrubosti povrchu materiálu by měla být do  $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ . Přístroj snímá průběh tečné a normálové síly a signál akustické emise.



Obr. 4 Scratch test [10]

Tyto vzorky by mohly zkoušky s větším dynamickým silovým účinkem zcela poškodit povrch bez možnosti zisku relevantního výsledku (Obr. 4). V praxi se tak



nejčastěji setkáme se zkouškou dle Martenze a slouží především k zjištění povrchové tvrdosti materiálu v provozních podmínkách. Jednotka se označuje jako HMA a jejím měřítkem je zatížení kuželíku potřebné pro vryp stanovené šíře.

S novým fenoménem odezvy akustické emise na měření tvrdosti pomocí vrypových zkoušek se můžeme v literatuře již setkat. Například u testování funkčních povrchových úprav technických součástí. Tyto povrchové úpravy mají zlepšit nebo upravit povrch funkčních součástí, nebo sloužit jako ochranný tribologický film s dostatečnou únosností, odolností proti otěru a dobrými kluznými vlastnostmi. Limitním faktorem aplikace je míra přilnavosti této vrstvy k povrchu součásti. Je tedy potřeba v laboratorních podmínkách tuto schopnost adheze ověřovat spolu s mechanickou odolností pomocí vrypové zkoušky. Tato metoda také částečně simuluje abrazivní mechanismy podobné provozním podmínkám. [8]

Nevratné deformace (plastická deformace a křehký lom), které se iniciují během vrypového testování vyvolávají také odezvu v podobě akustické emise. Při narůstající hloubce vrypu spolu s rostoucím zatížením hrotu indentoru je tak možné obdržet jak data vypovídající o tvrdosti vrstvy tak vybuzený signál akustické emise. Využitím odpovídajícího softwaru je možné data AE analyzovat z různých úhlů pohledu v rámci post procesových úprav nezávislých na čase, místě nebo testovacím prostředí. Praktická data například prokazují korelaci odezvy AE (záznamy hitů AE) při tvorbě a šíření mikrotrhlin. Počátek mechanické zkoušky tvrdosti je synchronizován s počátkem záznamu AE a tak se výsledky průběhu zatížení hrotu a zaznamenané události AE dají spárovat na společné paralelní časové ose.

Tato metoda slouží k hodnocení různých povrchových úprav a její nejhodnotnější aplikace je v posouzení křehkosti těchto filmů. Pomůže tak odhalit poruchy celistvosti jak vrstvy, tak vnitřního prostoru materiálu spolu s hodnocením kvality přilnutí vrstvy na upravovaný povrch. Metoda vykazuje také potenciál při hodnocení průhledných filmů v případech, kdy je nepoužitelné mikroskopické skenování.

### ***3.1.2.1 Úvod do metody***

Vrypové zkoušky jsou běžně užívanou metodou pro zkoušení adhezních vlastností tenkých povlakových vrstev. Zkouška se stává z působení narůstajícího či konstantního zatížení na povrch vrstvy pomocí indentoru, kdy se vzorek posouvá konstantní rychlostí.

Indentor způsobuje vzrůst elastických a plastických deformací vrstvy dokud se tyto deformace neprojeví na povrchu. Tyto poruchy se mohou projevat ulpíváním povrchové vrstvy na špičce indentoru (adhesivní poškození) nebo se může vrstva ulamovat (kohezivní poškození). Reálně se setkáme buď s jedním z typů, nebo s jejich kombinací. Adhesivní odolnost vrstvy je definována kritickým zatížením  $L_c$ , které značí nejmenší zatížení při kterém se deformace objeví. [8]

### 3.1.2.2 *Hodnocení a testování*

Standardní a progresivní metodou je zkoumání povrchu vzorku poškozeného vrypovým otěrem pomocí optické mikroskopie nebo SEM (rastrovacím elektronovým mikroskopem). Vzdálenost mezi začátkem a koncem vrypu může tak být vizuálně změřena a porovnána se zvoleným zatížením. Prakticky každý mikroskop lze použít pro toto vyhodnocení. Panoramatické rastrování slouží v tomto případě k hodnocení plné délky vrypu.

Akustická emise, při těchto aplikacích také nazývaná emise napěťových vln, je definována jako generování elastických vln uložených ve struktuře materiálu. Při vrypových zkouškách můžeme akustickou emisi detekovat v případě dostatečné vazebné energie mezi povrchovou vrstvou a podkladem.

Při dosažení kritického limitu zatížení a vytvoření defektu se spontánně uvolní napěťové vlny jako důsledek utváření a šíření mikroprasklin. Mikrotrhliny se na povrchu projevují formou vrubových poruch v důsledku uvolnění napětí uvnitř povrchové vrstvy či podkladového materiálu. Šíření rázových vln je ovlivněno geometrií vzorku a odrazivostí povrchu vzorku, kde se tyto vlny projeví jako povrchové vlnění (Raleighovi nebo Lambovy vlny). [2]

Možné amplitudy a frekvence generovaných rázových vln jsou ovlivněny geometrií vzorku, jeho uchycením a realizací přenosu signálu od indentoru po snímače AE. Zachycený signál musí být zesílen vysokou impedancí precizní elektroniky a taktéž upraven pro vstup do aparátu AE. Každá individuální událost AE odpovídá poškození s amplitudou ve shodě s rozsahem události. Pro potřeby interpretace a možného dalšího zpracování signálu musí být signál AE považován za nespojitý a náhodný (stochastický). Signál se jeví jako náhodný, odpovídající statistickým signálovým teoriím. Ani

amplituda (míra poškození) ani počet opakování (výskyt poškození) není možné předpovídat za předpokladu, že mechanické vlastnosti a některé defekty povlaku (mikrověštky, porozity, mikro trhliny atd.) jsou nesouvisle rozmístěny v materiálu. S ohledem na tato fakta nemůžeme signál hodnotit klasicky deterministicky, ale pomocí statistických metod, tj. hodnocením stochastických signálů. Z důvodů stochastické povahy pravděpodobnosti výskytu defektu se exaktní určení kritického napětí pro určité měření jeví jako neúčelné. Pro relevantní hodnocení vzorku musí být proto provedeno několik statisticky významných souborů vrypových zkoušek.

### ***3.1.2.3 Závěrečné zhodnocení metodiky měření tvrdosti povlaků***

Tenké povlaky jsou aplikovány jako funkční povrchy součástí. Tyto filmy by měly zlepšit či modifikovat vlastnosti povrchu v provozu, sloužit jako tribologická ochrana nebo ochrana proti otěru s dobrými kluznými vlastnostmi. Metoda vrypových zkoušek vyvolává abrazivní opotřebení díky mechanické podstatě styku a pohybu indentoru po zkoušeném povrchu. Díky tomu můžeme optickými přístroji sledovat a hodnotit výsledné poškození v korelaci se synchronním záznamem akustické emise. [6]

## **4 AKUSTICKÁ EMISE**

### **4.1 Historie a teorie**

Místem vzniku jevu AE jsou fyzikální laboratoře, kde probíhal výzkum plastických deformací kovů. Tento jev byl definován jako popraskávání či akustický šum emitovaný uvnitř materiálu v průběhu zatěžování (zejména ve stavech probíhající plastické deformace). Cílem hlubšího zkoumání a důvodem dalšího rozvoje této metody bylo zjistit nové informace o procesích, respektive jejich zdrojů a charakteru, probíhajících v kovu při plastické deformaci vlivem zatěžování.

Prakticky se s určitým zdrojem akustické emise setkal každý. Jedná se především o lidským uchem slyšitelné frekvence zvuku doprovázející deformaci materiálů v makrosvětě (například praskání namáhaného suchého dřeva). Dynamické porušování materiálu se přenáší ze dřeva do vzduchu a jako tlaková vlna postupuje až do sluchovodu.

Mnohem detailnější a hodnotnější informace o probíhajících deformačních procesech probíhajících v materiálu však dostaneme při použití citlivější senzorky a přímém napojení na materiál. V materiálu se při počínající deformaci šíří elastické napěťové vlny.

Dle normy EN 13390 nazýváme akustickou emisí právě elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolňováním napětí mechanického charakteru uvnitř či na povrchu zatěžovaného tělesa. Samotná metoda měření AE spočívá v detekci zdrojů a vln AE, jejich elektronické zpracování s počítačovou podporou a jejich vyhodnocení pro konkrétní aplikaci. [2]

Historicky můžeme datovat první úspěšná laboratorní měření AE do 50 let 20 století a hlavním průkopníkem v této oblasti byl německý fyzik Joseph Kaiser. Od let 60 se metoda AE začala úspěšně dostávat do praxe metod nedestruktivního testování, kde se osvědčila nejen při monitoringu a vyhodnocení plastických deformací materiálu, ale také při hodnocení stavu zatěžovaných konstrukcí, detekci úniků medií v tlakových systémech nebo při svařování.

Dosavadní průběh výzkumu v oblasti AE při měření vlastností materiálu lze rozdělit do tří oblastí:

- Fyzikální interpretace jednotlivých zdrojů AE, frekvencí a amplitudové charakteristiky uvolňovaných napěťových vln při daných vnějších podmínkách
- Šíření napěťových vln v tělesech konečných rozměrů.
- Detekce těchto vln a jejich následné zpracování.

## **4.2 Proces zpracování dat AE**

Proces vzniku, detekování a vyhodnocení signálu akustické emise lze rozdělit na několik fází:

- Zdroj, hit, událost AE a její mechanismus
- Šíření napěťových vln od zdroje ke snímači
- Detekce vln snímačem na povrchu tělesa díky transformaci AE na kvantifikovaný elektrický signál
- Analogové zpracování a vedení signálu do výpočetního zařízení
- Vyhodnocení signálu aparaturou a jeho grafická interpretace

Událost akustické emise je fyzikální jev způsobený například posunem dislokací, dynamických vznikem trhlin apod. Za zdroj je tak označován původ jedné či víc událostí. Je to fyzikální proces generující vlny akustické emise, jako například plastická deformace doprovázená pohybem dislokací. Stejným způsobem se také stává zdrojem mechanické porušování materiálů s iniciací počátečních mikrotrhlin či mikroposuvy čela trhliny. [2]

Událostí můžeme také označit jako jednotlivý dynamický ráz, který spouští AE. Pokud takovou vlnu detekujeme, jedná se i izolovaný hit. Posloupnost takto časově izolovaných hitů událostí AE tvoří „praskavý“ signál. Pokud jsou hity četné a překrývají se, jde o spojitý signál AE. (Obr. 5)

| <b>Spojité AE</b>            | <b>Bouřlivá AE</b>           |
|------------------------------|------------------------------|
| Malý rozměr zkušební tělesa  | Velký rozměr zkušební tělesa |
| Hladké zkušební vzorky       | Vzorky s vrubem              |
| Izotropní materiál           | Anizotropní materiál         |
| Homogenní materiál           | Nehomogenní materiál         |
| Jemnozrný materiál           | Hrubozrný materiál           |
| Tvářený materiál             | Materiál v litém stavu       |
| Nízká pevnost materiálu      | Vysokopevné materiály        |
| Nízká deformační rychlost    | Vysoká deformační rychlost   |
| Deformace kluzem             | Deformace dvojčatením        |
| Vysoké teploty               | Nízké teploty                |
| Difúzní typy fázových přeměn | Martenzitické přeměny        |
|                              | Štěpné lomy                  |
|                              | Šíření trhlin                |

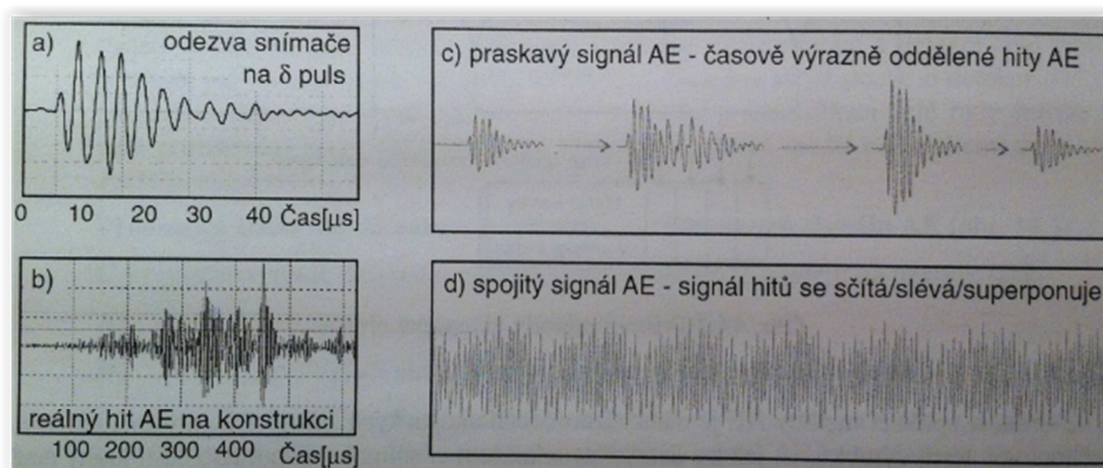
Obr. 5 Spojitá a bouřlivá (trhaná, nespojitá) AE [3]

Právě spojitý signál bývá díky četné aktivitě mechanických deformací v materiálu často detekován. Tyto signály se poté často sčítají, superponují a nedílnou součástí je také vznik akustického šumu. Mechaniku vzniku spojitě AE můžeme dobře demonstrovat na posunu dislokace při plastické deformaci. Sama jedna tato událost uvolní pouze malé, prakticky nedetekovatelné, množství energie pro vznik aktivity AE. Pokud se však tyto události kumulují, jak tomu například u dynamického zatěžování kovu bývá, vlny se překrývají a dochází k jejich superpozici. Výsledkem je vznik spojitěho záznamu AE neboli k záznamu akustického šumu. Tento signál již můžeme

pomocí aparatury detekovat. Podobně je tomu u kontinuálního proudění unikajícího média z tlakového systému, které provází charakteristické tzv. syčení, turbulentně rozvinuté proudění média.

Jako další praktický příklad můžeme demonstrovat na dvou případech detekovaného signálu AE.

V tomto případě budí AE krátký a z pohledu detekce AE téměř ideální  $\delta$  puls na povrchu tělesa v místě snímače. Délka tohoto pulsu je cca 20 a 30  $\mu\text{s}$ . S takto jasným a kvalitním signálem se v praxi nesetkáme ani u ostrých praskajících pulsů (viz Obr. 6). Obvykle je signál AE rozmazán a rozptýlen po tělese, kde se ve slabší intenzitě dále šíří s utlumujícím efektem. Odezva na ostrý budící signál vypadá většinou jako soubor vzájemně se překrývajících odrazů vln AE v reálném tělese.



Obr. 6 Příklady jednotlivých izolovaných hitů [3]

#### 4.2.1 Událost AE jako komplexní skupina hitů identického zdroje

Při měření AE se většinou používá dvou a více piezoelektrických snímačů rozmístěných na měřeném tělese či konstrukci. Události pocházející ze stejného zdroje detekujeme jako hit ve snímačích. Každý snímač však zaznamenává signál odlišně a to podle toho, kde je umístěn, tedy díky nerovnoměrnému šíření vln v tělese. Tyto rozdíly v detekci vln snímači můžeme rozdělit na:

- 1) útlum - rozptýlení energie a tlumení vln materiálem způsobuje intenzivnější detekci signálu snímači blíže zdroji,
- 2) disperze - snímače vzdálené od zdroje také často detekují časově a frekvenčně rozmazanější zvuk s tzv. ořezem horního frekvenčního pásma,
- 3) časové zpoždění - časová prodleva detekce signálu úměrně narůstá se vzdáleností snímače od zdroje.

### **4.3 Moderní trendy aplikace AE**

Směrová aplikace akustické emise se nejvíce rozvíjí již od objevení a osvojení si této techniky v oblasti strojírenství a studia fyzikálních vlastností materiálů. Aplikace AE již dnes není jen otázkou zjištění přítomnosti či nepřítomnosti emisních procesů, ale i sledování trendů proměnných v čase, tj. kontinuální sledování růstu či poklesu této aktivity. Díky digitalizaci signálu a pokročilého matematického modelování můžeme z takto nasbíraných dat vyvozovat komplexnější závěry a činit predikce. Často se můžeme setkat s následujícími aplikacemi: [3]

- Sledování AE při porušování a vzniku defektů tlakových systémů při jejich zkoušení na těsnost a tlakovou odolnost (nádob, potrubí, aparátů atd.).
- Kontinuální detekce AE při kontinuálním provozu tlakových systémů.
- Detekce aktivity AE při zkouškách pevnosti konstrukcí (kovových, betonových, dřevěných, kompozitních).
- Sledování signálu emitujícího se provozem a užíváním pevnostních konstrukcí.
- Detekování netěsností a úniků tlakových systémů (úniky průchozími trhlinami konstrukce, netěsnosti armatur).
- Kontrola těsnosti a funkčnosti zásobníků a tanků.
- Aplikace AE při monitoringu koroze (korozního praskání).
- Observace poruch strojních součástí a monitoring jejich provozu (zadírání ložisek, hladký chod servomotorických systémů), jako osobitý doplněk k vibrodiagnostice.
- Biologické aplikace (měření materiálových toků rostlin)

#### 4.4 AE a deformace materiálu

V mikroskopickém pohledu můžeme materiál uvažovat jako soustavu částic, které jsou vzájemně elasticky spojeny. To se projevuje například vazební povahou šíření vln v materiálu, kdy se vlivem deformace těchto elastických svazků vlna šíří.

Pohybuje-li se částice ve směru pohybu vlny, je to pohyb podélný (longitudinální) a v šíří-li se ve směru kolmém na pohyb vln se jedná o pohyb příčný (transversální).

Při šíření elastické vlny v materiálu se částice rozkmitávají v různých směrech s vazbou na postup vlny. Odezva akustické emise je tímto způsobem zpravidla tvořena větším množstvím typů vln [3]:

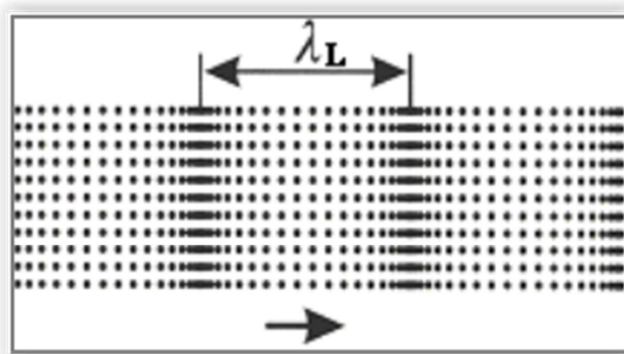
**Při podélném vlnění (P)** částice kmitají ve směru postupující vlny. Tyto vlny se mohou šířit v tuhém, kapalném i plynném prostředí. Rychlost šíření v pevném prostředí charakterizuje tato rovnice:

$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}} \quad 4.1$$

Kde jednotlivé indexy značí:

$c$  – rychlost šíření vlnění – index značí druh vlnění [m/s],  $E$ ,  $G$  – modul pružnosti v tahu resp. smyku [Pa],  $\rho$  – hustota [kg/m<sup>3</sup>],  $\nu$  – Poissonovo číslo [-].

Grafická interpretace podélné vlny:

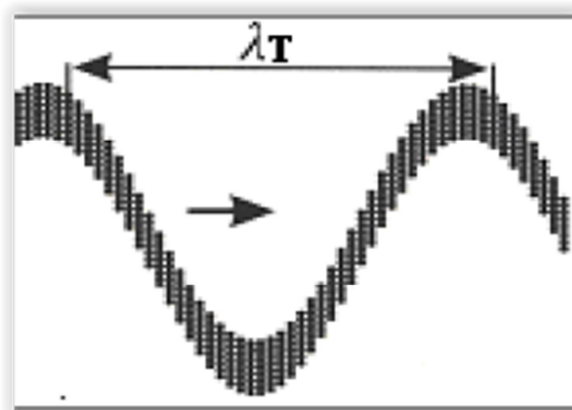


Obr. 7 Podélná vlna [3]



**Příčná vlna (T nebo S)** způsobuje kmitání částic kolmo ke směru k šíření vlny (Obr. 8). Šíření této vlny je možné pouze v pevném prostředí. Rychlost šíření příčné vlny v pevném prostředí charakterizuje rovnice: [3]

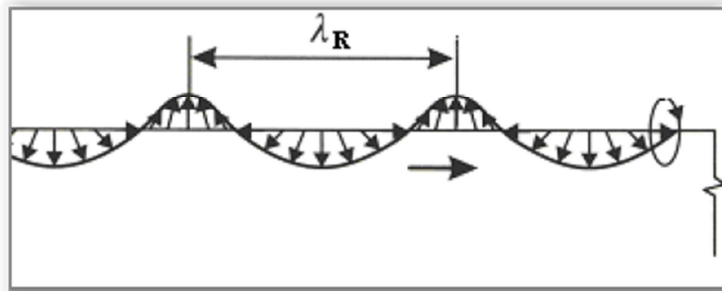
$$c_T = \sqrt{\frac{G}{P}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad 4.2$$



Obr. 8 Příčná vlna [3]

**Vlna povrchová (R - Rayleighova vlna)** se vyskytuje pouze na povrchu materiálu. Je to speciální druh příčné vlny, kdy je působící příčná síla větší než podélná (Obr. 9). Tím dochází k eliptickému pohybu částic. Podélné silová složka vlny se slábne s hloubkou materiálu více než složka příčná. Takže v hloubce rovnající se délce příčné vlny je povrchová vlna prakticky rovna nule. Vznik povrchových vln popisuje rovnice: [3]

$$c_R = \frac{0,87 + 1,2 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 4.3$$

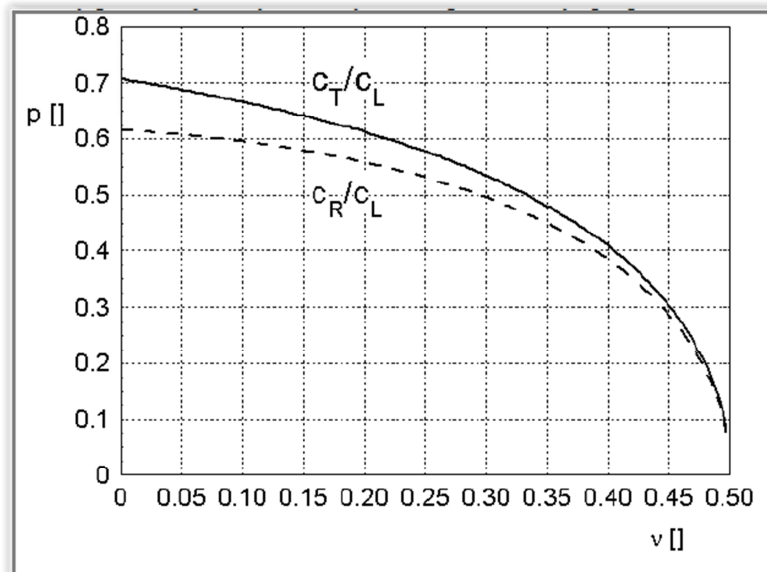


Obr. 9 R-vlna [3]

**Desková vlna (L - Lambova vlna)** se projevuje v tělesech, jejichž tloušťka je oproti ostatním rozměrům zanedbatelná. Částice se pohybují také po eliptické trajektorii a to v celém objemu materiálu. Rychlost šíření je úměrná šířce tělesa a frekvenci vlnění. Rozlišujeme fázovou a skupinovou rychlost vlnění.

**Čárová vlna** se vyskytuje při nízkých frekvencích vlnění v prutových tělesech jako jednoduchá longitudinální vlna. Takové těleso má zanedbatelný průřez proti délce a šířce.

Z rovnic šíření vln (4.1 až 4.3) v tělese je zřejmé, že nejrychleji se pohybují vlny podélné. Poté následují vlny příčné a nakonec povrchové (Obr. 10). Například pro ocel vychází šíření příčné vlny 55% rychlosti šíření vlny podélné a 51% vlny povrchové. Rychlost povrchové vlny je tak 92% rychlosti vlny příčné.



Obr. 10 4 Relativní rychlost šíření příčné vlny (P) k podélné a povrchové vlny k podélné v závislosti na Poissonově čísle  $\nu$ . [4]

Vtah mezi modulem pružnosti v tahu  $E$  a ve smyku  $G$  je určen pomocí Poissonova čísla:

$$G = \frac{\nu \cdot E}{2 \cdot (\nu + 1)} \quad 4.4$$

Frekvenčně citlivé jsou zejména deskové Lambda vlny. V oblasti ultrazvuku (tj. od 20 kHz do 50 MHz) můžeme považovat podélné, příčné a povrchové vlny nezávislé na frekvenci. Vlny akustické emise jsou charakterizovány především rychlostí šíření a vlnovou délkou. Každý typ vlny se pohybuje různou rychlostí v závislosti na materiálu. Samotná generace akustických vln má různé zdroje. Uvnitř materiálu jsou to především vlivy napěťové a deformační. Velice užitečný deformační mechanismus z pohledu zachycení a zpracování signálu AE je vznik elastické vlny při pohybu špičky trhliny. Každá změna (nárůst) trhliny provází elastické vlnění.

Tato elastická vlna se při pohybu v materiálu mění. Postupně slábne její vlnová energie a to především vlivem geometrického tvaru vlny v materiálu a s ohledem na útlumový vliv prostředí.

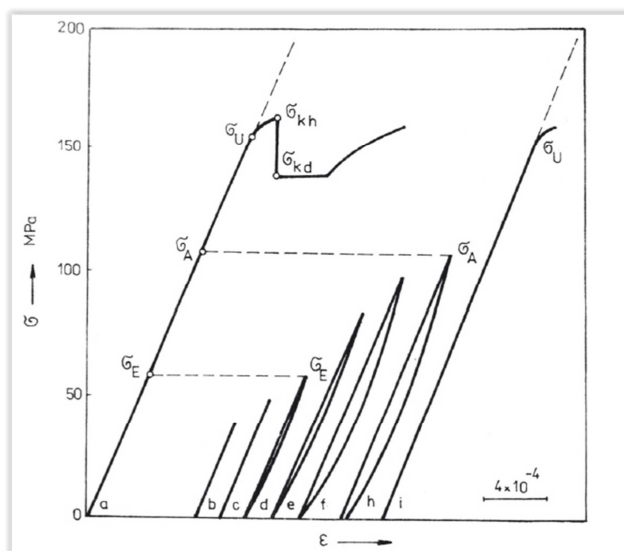
## 4.5 Deformace a makrotvrdost

V souvislosti s měřením makrotvrdosti a její korelace s odezvou AE je důležité zmínit fenomén mikroplastické deformace. Vnik indentoru do materiálu totiž způsobuje elastické a plastické deformace malých rozměrů odpovídající této kategorii.

Mikroplastická deformace je přetvoření materiálu v rozsahu menším než 1% a často lokalizovaná do lineární či bodové oblasti s rozměrem  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$  (viz Obr. 11). Mechaniku mikroplastické deformace nejlépe ilustruje diagram závislosti napětí ( $\sigma$ ) a deformace ( $\varepsilon$ ). Tento diagram odpovídá vlastnostem technického železa. Body pro sestavení křivek dostáváme postupným růstem zatížení vzorku a následným odlehčením.

Při průběhu b a c se těleso vrací elasticky do původního stavu tak, že se stoupající a klesající část závislosti  $\sigma - \varepsilon$  ztotožní. Po dosažení napětí  $\sigma_E$  (křivka d) je již tato závislost zřetelně odlišná od stoupající. Konečný stav se opět shoduje s počátkem a stav deformace tělesa je tak výsledně nulový. [5]

Další zvýšení zatížení (křivky e a f) se projevuje nárůstem plochy mezi stoupající a klesající křivkou zatěžování (vliv adiabatického děje pružné deformace - anelasticita) se stejným hodnotou výsledné deformace  $\varepsilon = 0$  (Obr. 11). Po překročení napětí  $\sigma_A$  a následném odlehčení je již  $\varepsilon > 0$ . Další nárůst napětí nad  $\sigma_U$  způsobí odklon od lineární závislosti průběhu  $\sigma - \varepsilon$  a při dalším nárůstu se začne projevovat mez kluzu materiálu  $\sigma_k \approx Re$ .



Obr. 11 Diagram závislosti  $\sigma - \varepsilon$  [4]

Mez elasticity  $\sigma_E$  je definována jako třecí napětí potřebné k počátku posunu prvních dislokací (hranových segmentů) přes překážky s krátkým dosahem. Mez elasticity je prakticky těžko měřitelná a definuje se spíše mez anelasticity  $\sigma_A$  jako skutečného napětí určeného prvními nereverzibilními procesy. Při této definici se uplatňuje rozdílná pohyblivost hranových a šroubových segmentů v dislokacích.

Technická mez pružnosti  $\sigma_{TP}$  je konvenčně definována jako napětí vyvolávající v materiálu zvolenou nevratnou deformaci. Mez kluzu  $\sigma_K$  je napětí, při kterém se nevratně přemísťuje skupina dislokací a realizuje se dobře měřitelná plastická deformace. Jevy a procesy provázející zatěžování materiálu do meze kluzu označujeme jako mikroplastické. Mikroplastická deformace je charakteristická heterogenitou a lokalizací. Uplatňují se zde anizotropní vlastnosti zrn materiálu (případně anizotropie celého objemu polykrystalické látky).

Při vzrůstu vnějšího napětí vzrůstá počet zrn, ve kterých probíhají procesy plastické deformace. Postupně klesá délka pohybu dislokací a vzrůstá jejich hustota v zrnech materiálu, které se začaly deformovat už při nižší hodnotě napětí.

V těchto zrnech, respektive v blízkosti jejich hranic dochází ke kumulaci dislokací, které v blízkých dosud nedeformovaných zrnech koncentrují napětí vedoucí k rozvoji nevratného vnitřního napětí, tj. ke vzniku trvalé plastické deformace. Tyto procesy představují první stádium mikroplastické deformace. Pro dosažení určité velikosti venkovního zatížení ve všech zrnech, v libovolně zvoleném průřezu, proběhne plastická deformace. Přestanou se vytvářet tzv. Lüdersovy pásy a počínají se rozvíjet procesy a mechanika makroplastické deformaci. Tato deformace je charakterizovaná také svojí jasnou viditelností - poměňuje se tvar součásti a ztrácí se tak její funkčnost. [5]

## **5 MĚŘENÍ TVRDOSTI JAKO ZDROJ AE**

Jako hlavní zdroj AE ve zkoušeném materiálu iniciovaný vtiskem indentoru uvažujeme pohyb dislokací. V literatuře se setkáváme s modelem rozložení dislokačních smyček v inverzním prostoru smyčka - délka. Dané rozložení je úměrné rozložení signálu AE v závislosti na velikosti deformace. V elastickém stavu je rozložení AE symetrické. Při vyšších hodnotách deformace dochází k asymetrii rozložení. Tato asymetrie je interpretována vzájemnou interakcí dislokací. Z toho

vyplývá, že základní příčinou AE je pohyb rychlých dislokačních zdrojů. Rozložení rychlosti AE odpovídá hustotě pohyblivých dislokací  $\rho$  jako funkcí deformace  $\varepsilon_p$  definované na základě Gilmanova modelu:

$$\rho(\varepsilon_p) = m\varepsilon_p - \Delta\varepsilon_p \quad 5.1$$

Kde:  $m$  a  $e$  jsou materiálové charakteristiky,  $\Delta = n/\rho_s$ ,  $n$  je koeficient zpevnění a  $\rho_s$  smyková napětí.

Známe-li hodnotu  $\varepsilon_p$ , pro kterou  $\frac{d\rho}{d\varepsilon_p} = 0$ , lze z charakteristiky AE určit koeficient zpevnění. Hustota pohyblivých dislokací souvisí s deformací, neboli jejich pohyblivost souvisí s rychlostí deformace materiálu. AE je tak úzce spojována s dynamikou dislokačního pohybu. Zaznamenává pohyby dislokací v elastické oblasti zatěžování, což by mohlo při vyšší citlivosti zařízení vést k přímému sledování dislokační aktivity v materiálu. Velkou výhodou AE je možnost sledování pohybu dislokací během zatěžování (na rozdíl od transmisního elektronového mikroskopu).

Sledování jednotlivých mřížkových poruch pomocí AE je podmíněno možností detekovat napěťové pulsy (vlny) vyšších frekvencí (nad 1 MHz). Během plastické deformace dochází k emisi transičních napěťových vln. Tyto vlny mají frekvenci v řádu  $10^6$  Hz a v procesu porušení od  $10^5$  do  $10^4$  Hz. Napěťové vlny se šíří tělesem (např. zkušebním vzorkem, konstrukcí atd.) od místa zdroje směrem k povrchu, kde jsou zachyceny snímači. Amplituda volného pohybu je velmi malá a pohybuje se od  $10^{-12}$  do  $10^{-5}$  m. [5]

### 5.1 Praktická verifikace AE u vnikacích zkoušek

Z teorie akustické emise a teorie mikroplastických deformací vznikajících v průběhu zkoušek měření makrotvrdosti se dá vyvodit přítomnost těchto mechanismů v testovaném materiálu a možnost jejich měřitelnost pomocí aparátu AE. Následně bylo sestaveno a uskutečněno verifikační měření. Bylo vybráno několik ocelových vzorků a karbid wolframu (dále jen WC) s různými tvrdostmi. Základním teoretickým předpokladem byl vliv tvrdosti oceli na výslednou odezvu AE v testovaném materiálu.

Celý proces verifikačního měření byl rozdělen na dvě fáze testování ve dvou nezávislých laboratořích.

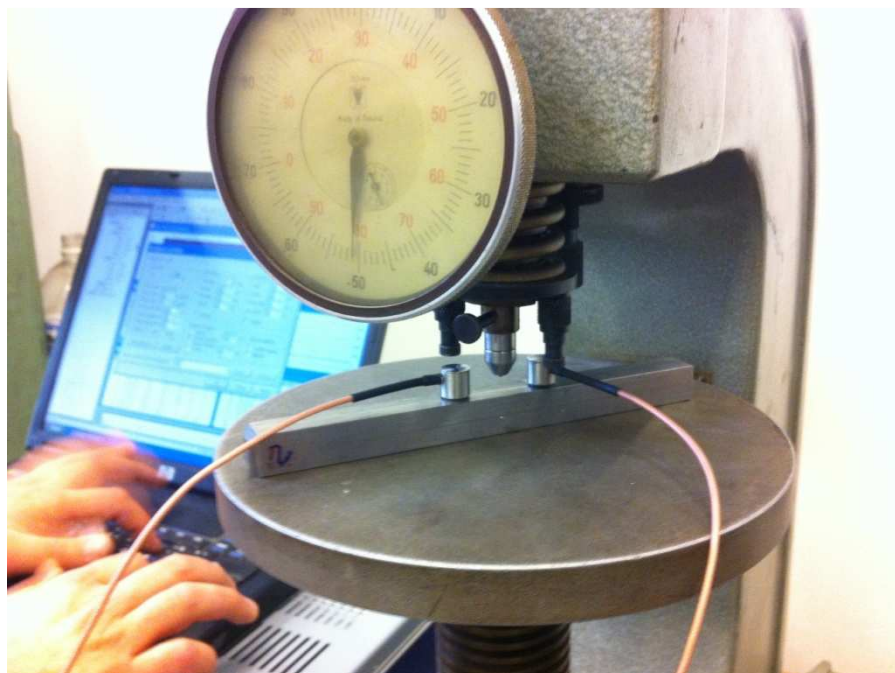
### 5.1.1 Měření tvrdosti HRB a HRC na MENDELU

K první fázi testování na pracovišti ÚTAD AF MENDELU byly vybrány čtyři vzorky a dvě metody měření tvrdosti. V první fázi se testoval etalon ze sestavy Poldi, kde se předpokládala nižší tvrdost. Měření probíhalo na aparatuře XEDO společnosti Dakel se dvěma snímači typu IDK. Senzory byly přichyceny co nejbližší hrotu indentoru pro dosažení co nejmenšího útlumu signálu (Obr. 12).



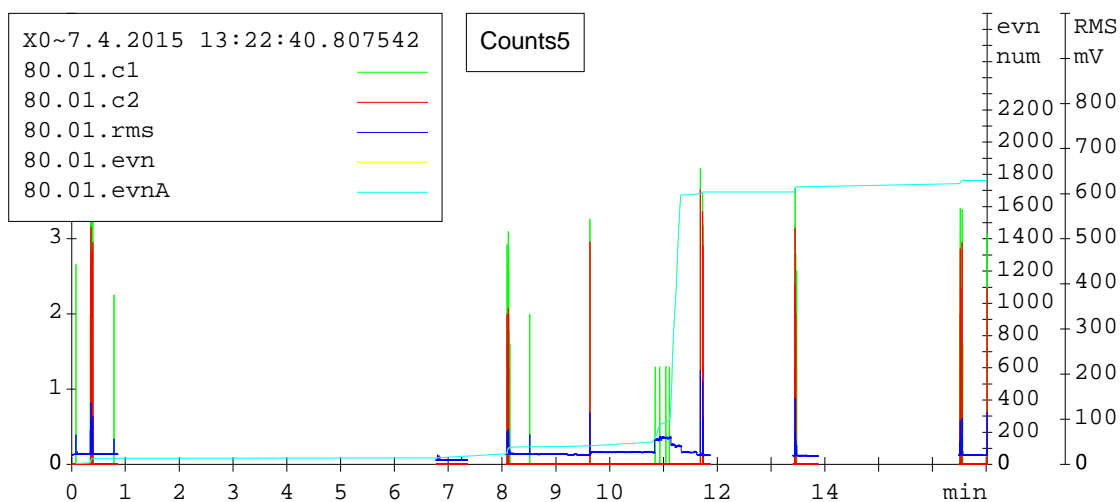
Obr. 12 Měřicí sestava [11]

První měření proběhlo dle metodiky HRB (kuličkovým indentorem) s orientačním výsledkem tvrdosti 84 HRB. Toto měření mělo pouze orientační charakter za účelem obecného určení odezvy AE a průniku indentoru.



Obr. 13 Umístění snímačů na vzorku [11]

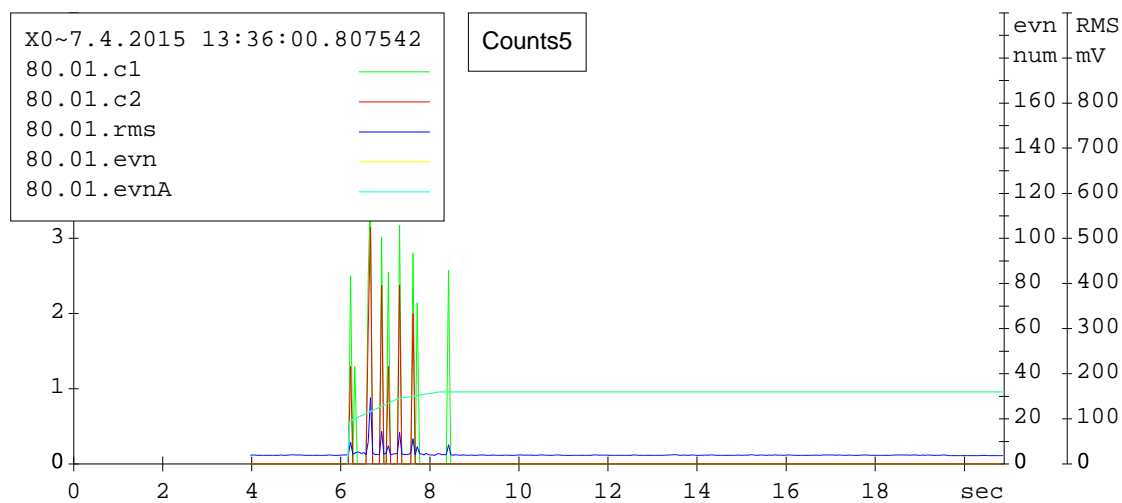
Vpich byl několikrát zopakován a dle očekávání měla tvrdost kovu i tvar indentoru vliv na slabou odezvu AE v materiálu. Na obrázku vidíme celkový záznam měření, kdy jsou časově odděleny jednotlivé vpichy. (Obr. 13)



Obr. 14 Odezva na měření tvrdosti Poldi etalonu [11]

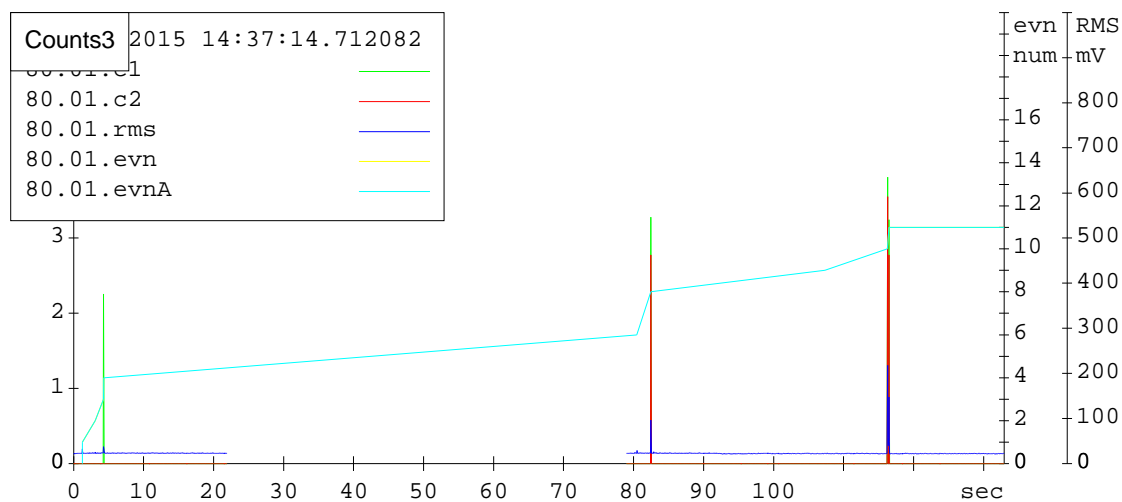


Zde je vybráný jeden reprezentativní vzorek signál (Obr. 15). Hodnota RMS je nízká, taktěž počet překmitů.



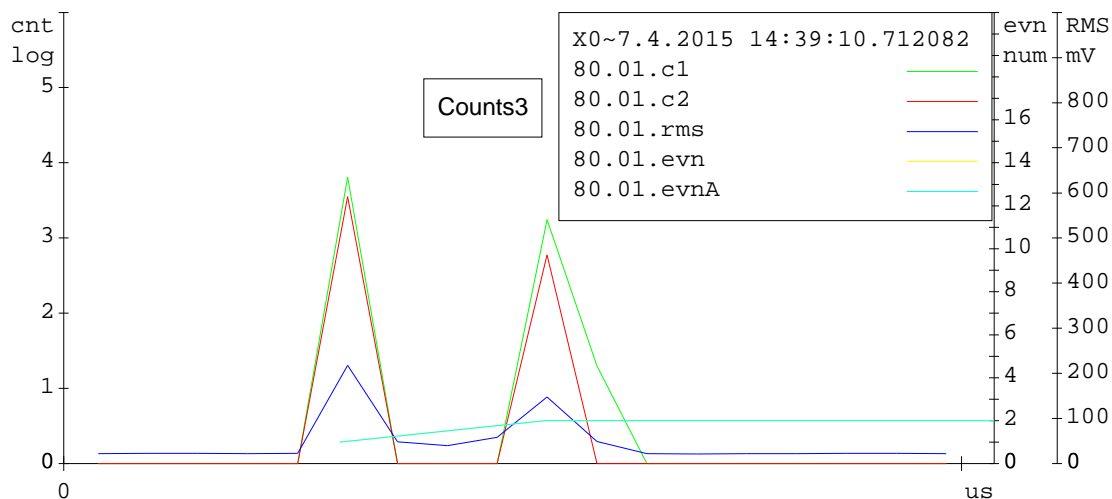
Obr. 15 Detail odezvy Poldi etalonu [11]

Dalším testovaným vzorkem byl vzorek pro hodnocení opotřebení (Obr. 16). Zde už byla zjištěna tvrdost 94 HRB a vzrostly také hodnoty RMS.



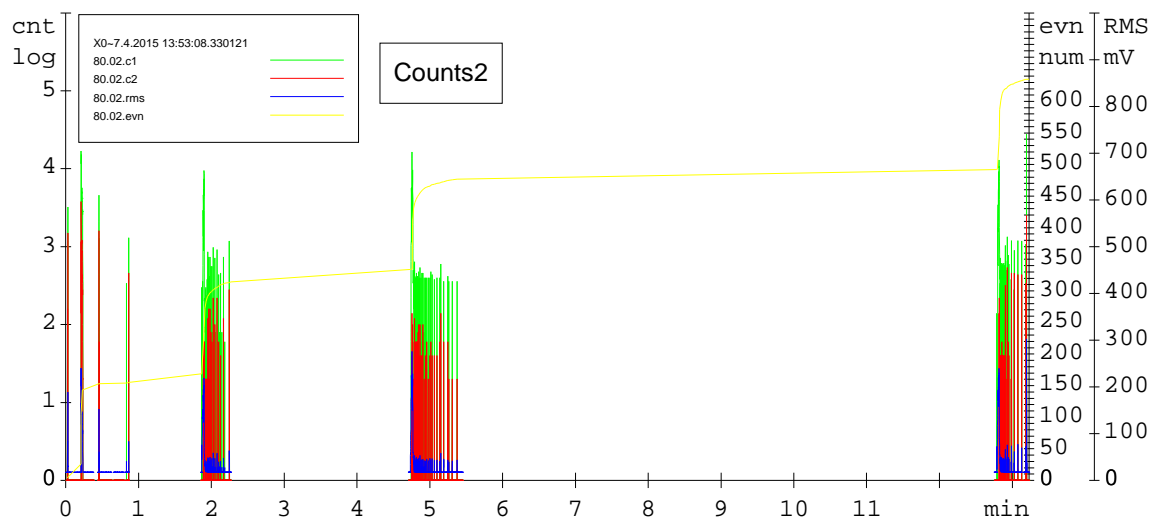
Obr. 16 Celková odezva vtisku [11]

Počet jednotlivých událostí a překmitů nebyl výrazný (Obr. 17). Jednotlivé události měla krátkou dobu trvání a četnost (pouze v jednotkách) a hodnota RMS byla také nízká.



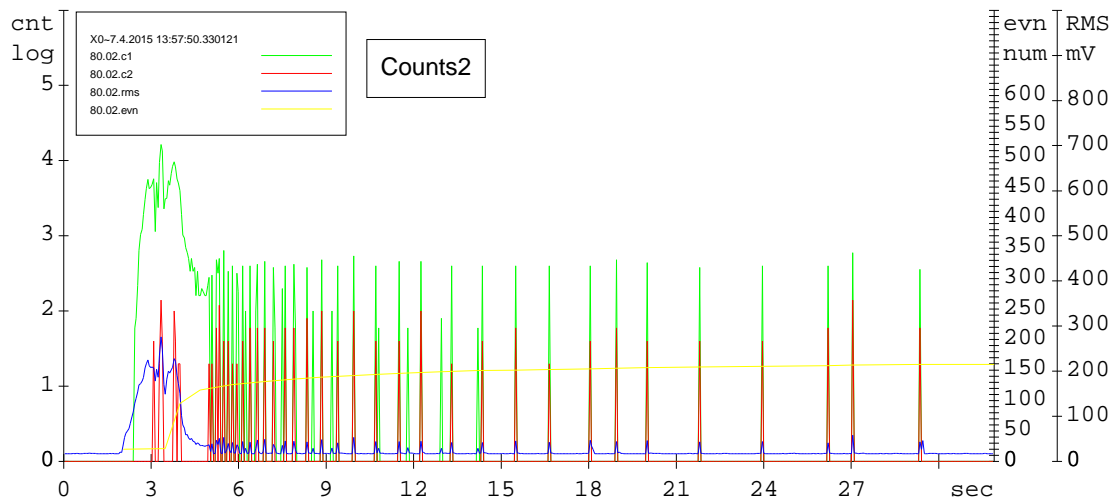
Obr. 17 Detail jednoho vpichu drtícího segmentu [11]

V pořadí třetí testovací vzorek byla fréza k obrábění kovů. Zde se ověřená tvrdost pohybovala kolem 64 HRC. S růstem tvrdosti a použitím kuželového indentoru se značně proměnila charakteristika signálu (Obr. 18). Výsledkem byly řádově silnější odezvy s opakovaným průběhem.



Obr. 18 Celkový přehled souboru měření [11]

Zvýšil se jak signál RMS, tak počet detekovaných událostí se silným náběhem při vniknutí indentoru do materiálu a postupným útlumem při jeho dotěžování (Obr. 19). Na vzorku s tvrdostí převyšující 60 HRC byl již patrný opakující se trend signálu v průběhu jednotlivých vpichů.

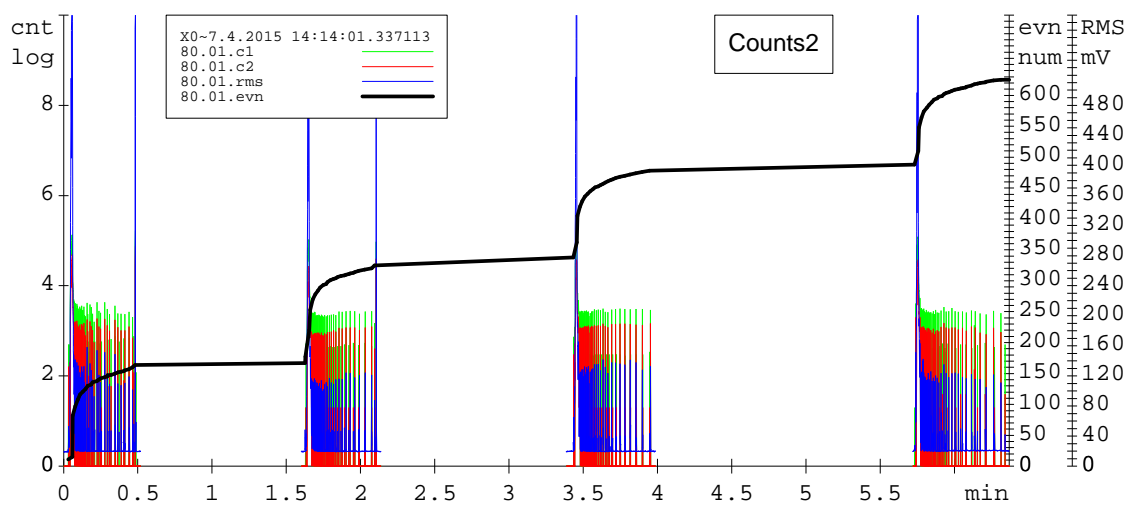


Obr. 19 Detail odezvy měření tvrdosti u frézy [11]

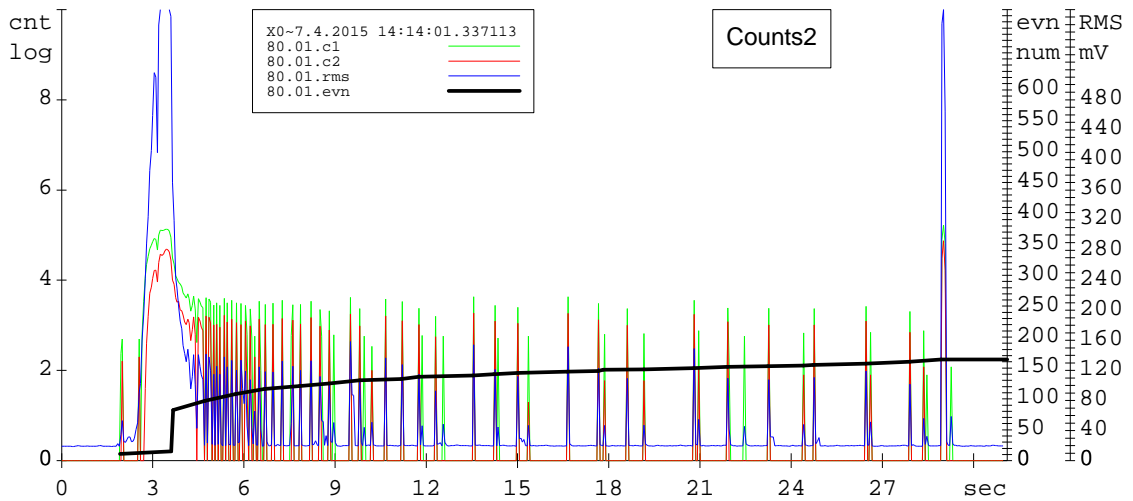
Následně byl také otestován karbid wolframu s největší tvrdostí z testovaných vzorků. Střední hodnota tvrdosti se pohybovala okolo 80 HRC. Značně vrostl počet překmitů na obou sledovaných hladinách a především významně narostla hodnota RMS. A to jak při průniku indentoru tak během dotěžování (Obr. 20).



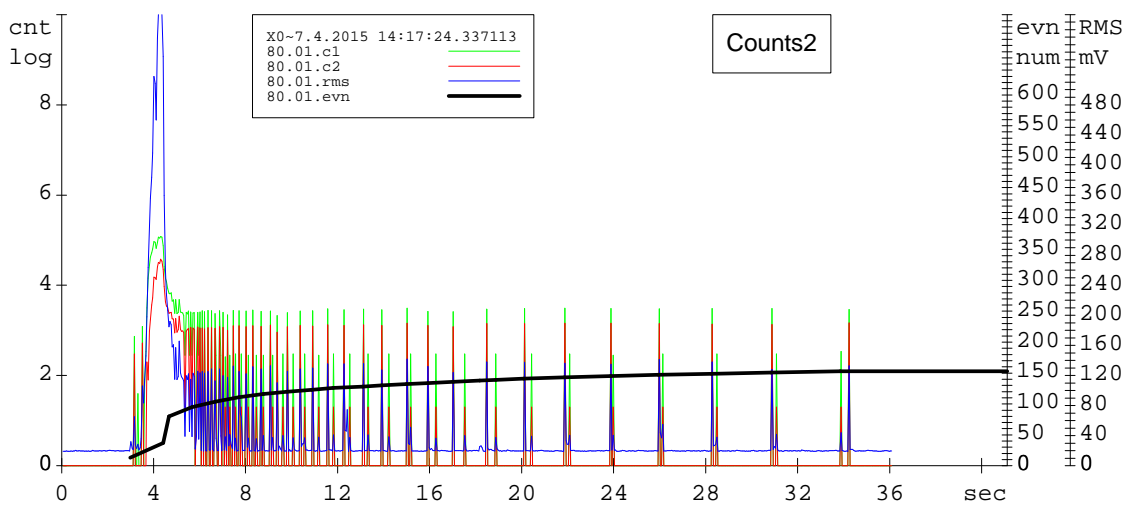
Obr. 20 Umístění snímačů AE na vzorku WC [11]



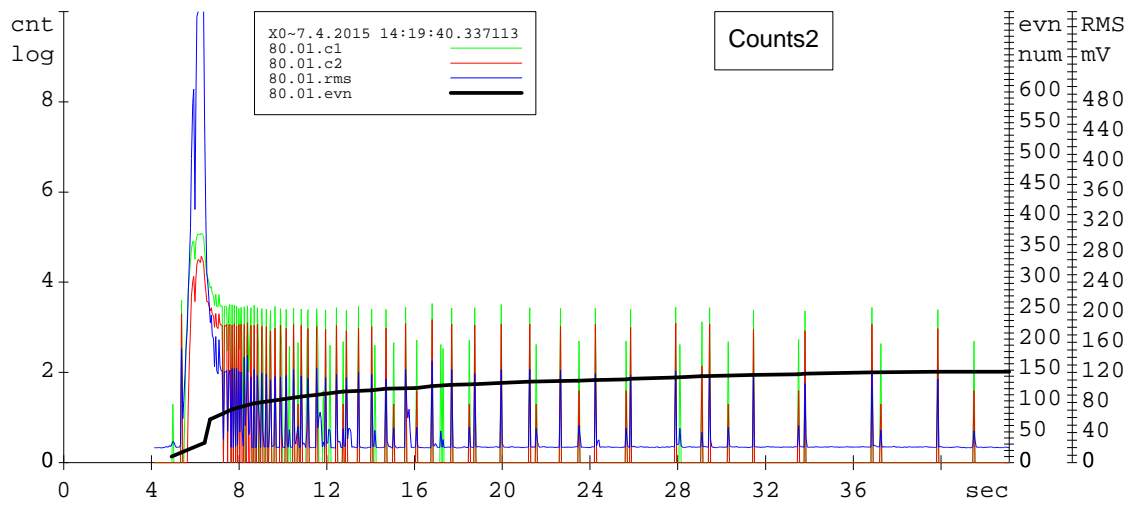
Obr. 21 WC celkový průběh záznamů měření na snímačích MIDI [11]



Obr. 22 Detail záznamu měření tvrdosti na vzorku WC s iniciací AE při předtížení a záznamem tření na konci zkoušky [11]



Obr. 23 Téměř identický záznam měření na druhém snímači u WC [11]



Obr. 24 Verifikační záznam u třetího měření na WC [11]

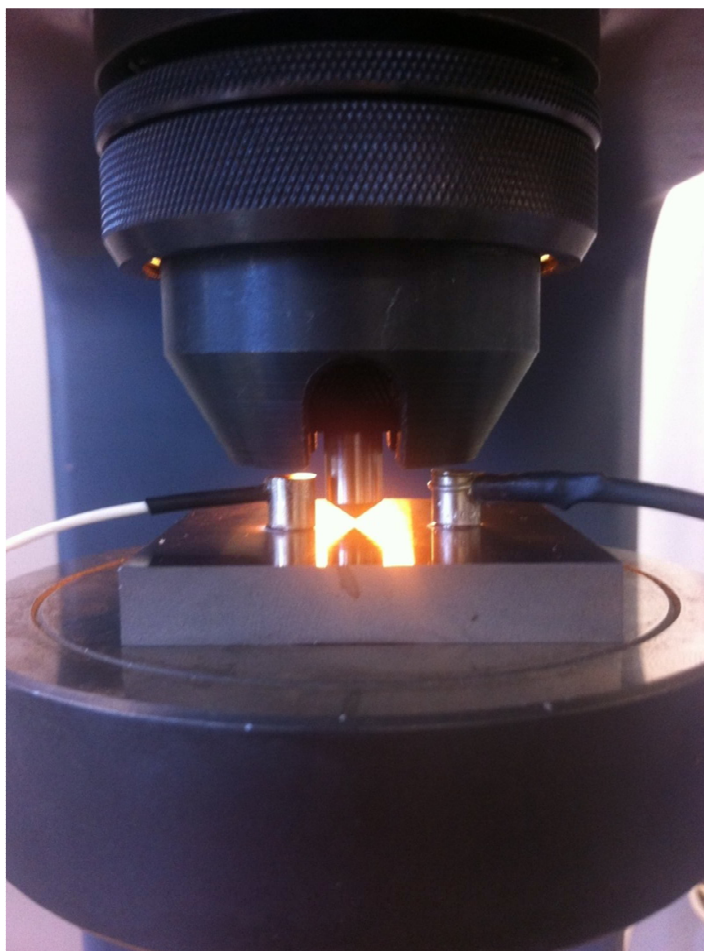
### 1.1.1 Odezva na měření tvrdosti na ÚK VUT FSI

Po ověření správnosti teorie odezvy AE na průběh mikroplastických deformací v materiálu bylo druhé měření uskutečněno na VUT FSI za pomoci zařízení DAKEL XEDO. Pro další měření byly vybrány pouze tvrdé vzorky (fréza a karbid wolframu) a tvrdost byla měřena pouze ve stupnici HRC. První sada měření byla z kontrolních účelů naměřena na snímačích MIDI (DAKEL) s nerezovou kontaktní plochou a poté byly všechny vzorky přeměřeny identickým párem snímačů IDK s korundovým povrchem z Mendelovy univerzity (Obr. 25). Hlavní rozdíl byl v použití nedávno kalibrovaného tvrdoměru, jehož výsledky tvrdosti lze považovat za velice přesné.



Obr. 25 Měřící sestava na VUT FSI [11]

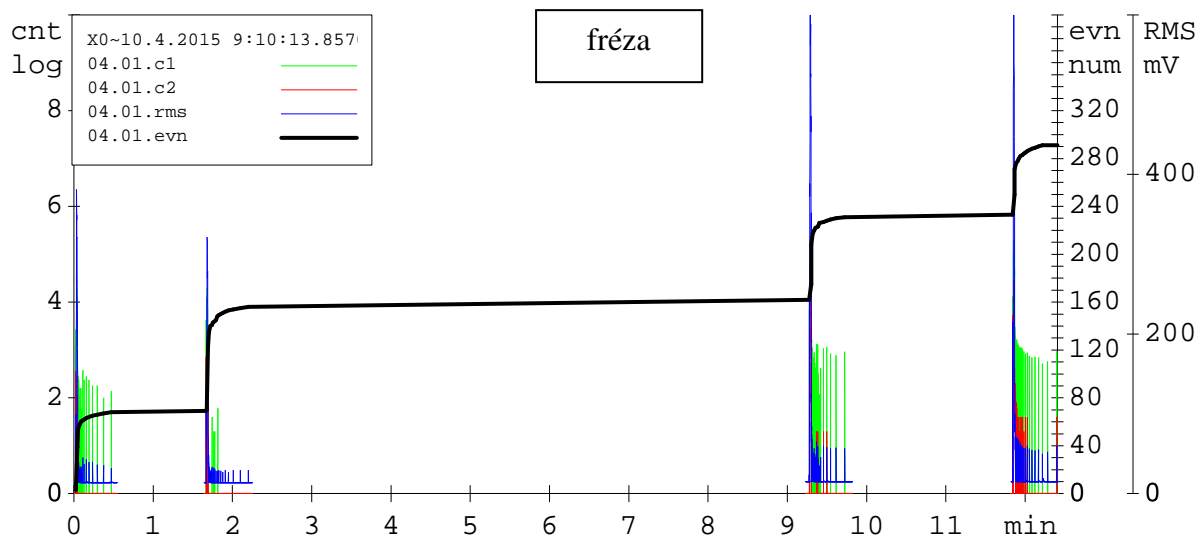
Vybrání čelistí tvrdoměru nám dovolilo ještě větší přiblížení snímačů k indentoru. Na obrázku se nachází MIDI snímače použité k ověření podobnosti charakteristiky signálu na odlišně typy snímačů.



Obr. 26 Detail snímačů a hlavice indentoru HRC [11]

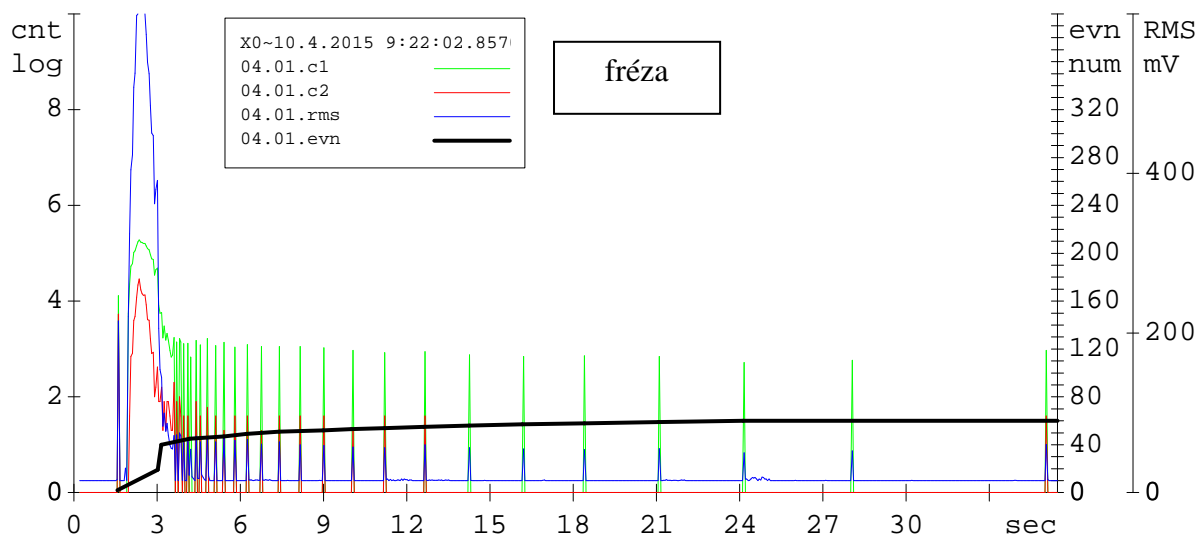
Pro druhé verifikační měření byla vybrána fréza a WC díky jejich vyšším hodnotám tvrdosti (nad 60 HRC). Jako první byla měřena hlavice obráběcí frézy. Oba vzorky byly měřeny v prvním kole snímači MIDI (Obr. 26).





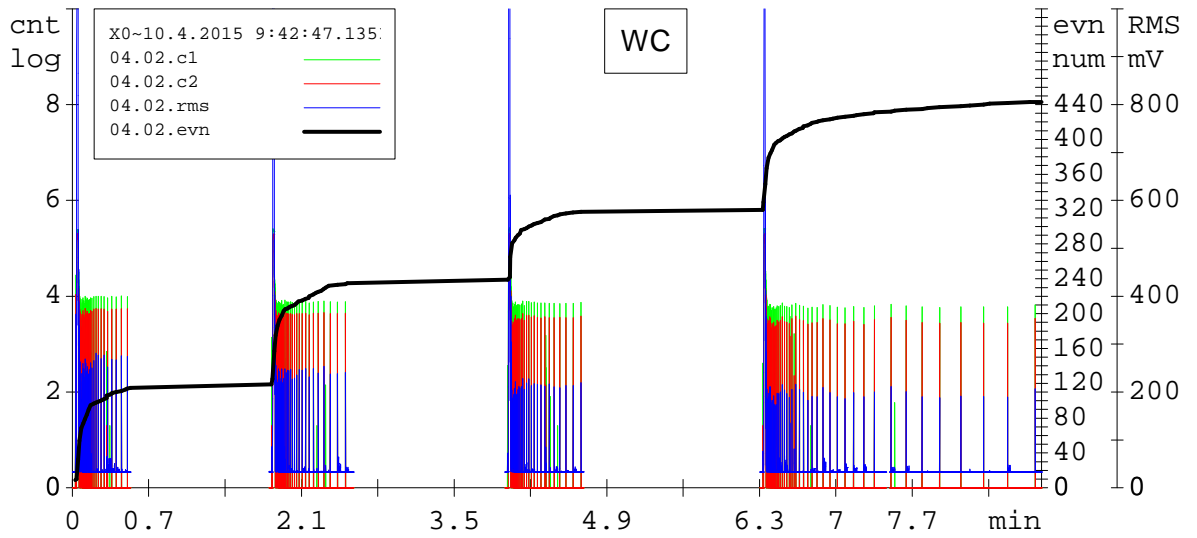
Obr. 27 Celkový průběh sady měření u frézy [11]

Charakteristika signálu i doba detekce signálu byla velice podobná výsledkům z Mendelovy univerzity (Obr. 28).

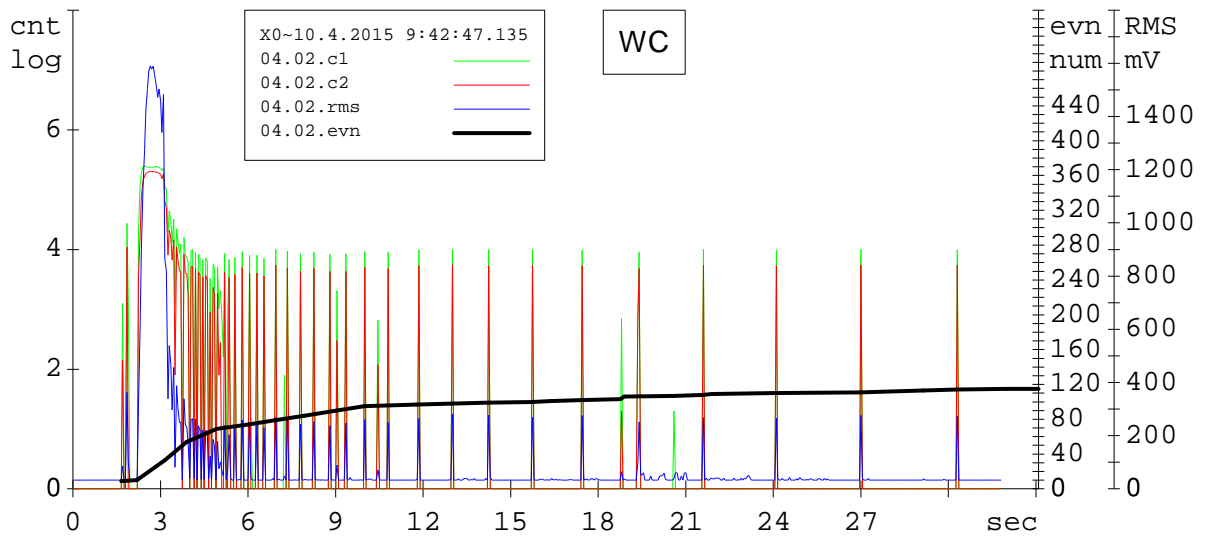


Obr. 28 Fréza [11]

Karbid wolframu opět vykazoval vyšší hodnoty RMS a vyšší hustotu signálu v čase.

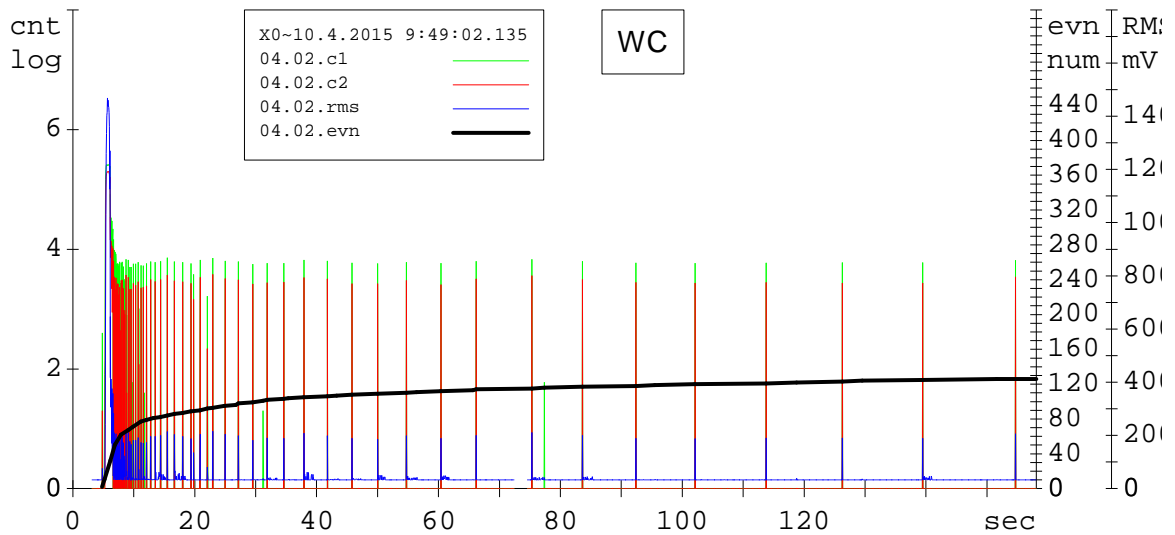


Obr. 29 Celková sada měření MIDI snímači na materiálu WC [11]



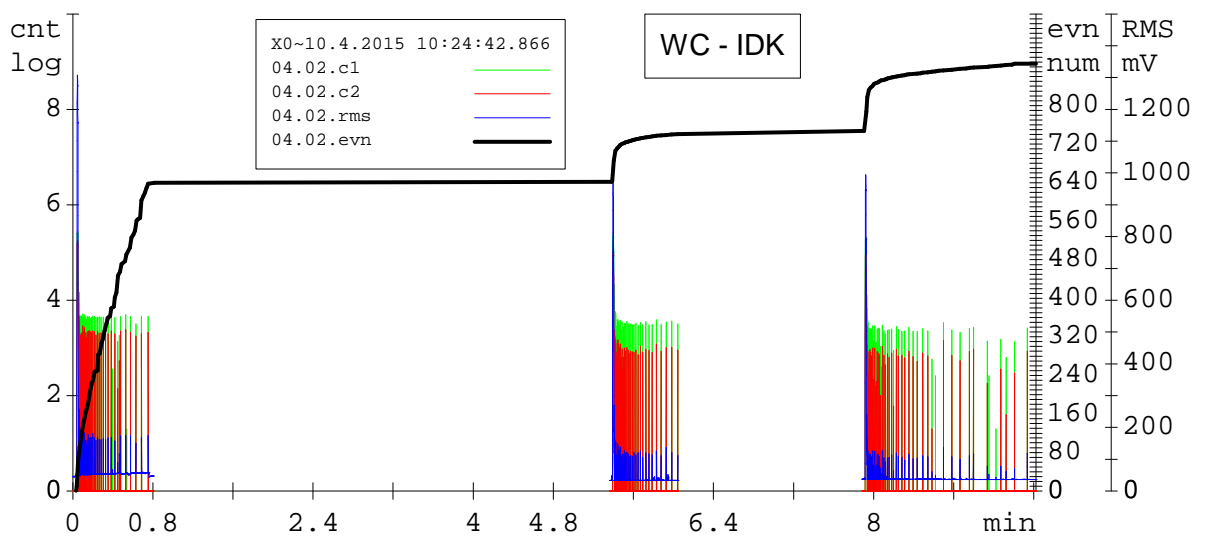
Obr. 30 Detail záznamu z jednoho měření u materiálu WC [11]

Kromě uvedeného bylo cílem měření zjistit dobu, po kterou ještě měřící zařízení detekuje zdroje AE, které se v čase postupně utlumují. Až po dobu 140 sekund byly patrné překmity nad obě sledované hladiny s charakteristickou hodnotou RMS (Obr. 31).



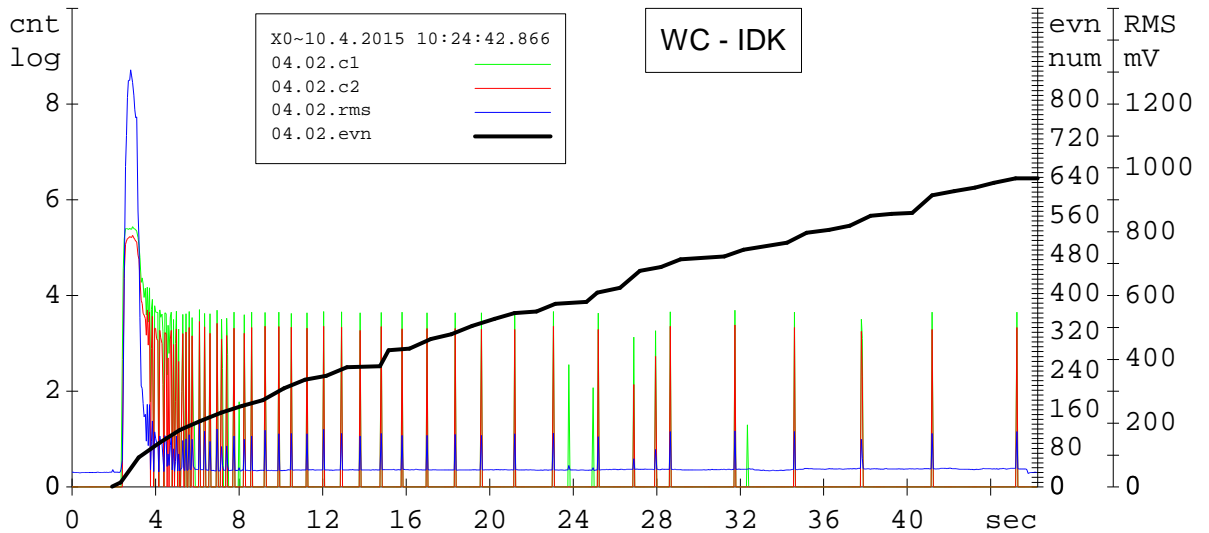
Obr. 31 Shodný záznam měření u MIDI snímače u vzorku z WC [11]

Po sérii validačních měření na snímačích MIDI došlo k výměně za identické snímače IDK použité na MENDELU v první fázi měření.



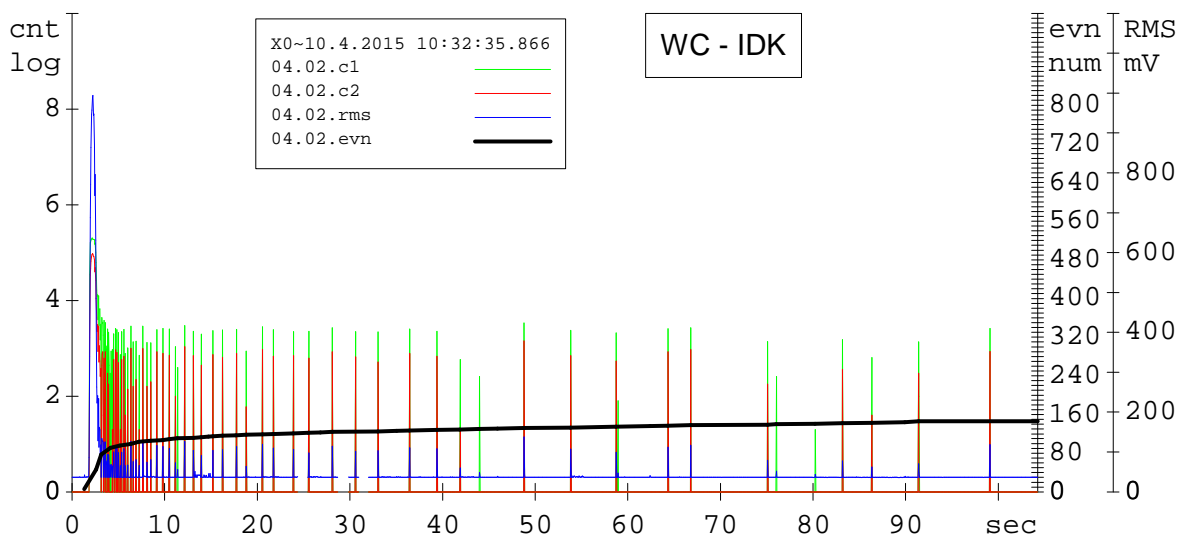
Obr. 32 Soubor měření u materiálu z WC, snímače IDK [11]

Snímače IDK vymezily při měření kovových vzorků větší citlivost respektive odlišnou charakteristiku jednotlivých událostí. Hodnoty počtu událostí a RMS však zůstaly podobné hodnotám získaným na snímačích MIDI (Obr. 33).



Obr. 33 Detail jednoho měření (aplikace WC a snímače IDK) [11]

V posledním měření byl opět ponechán delší čas pro záznam dobíhajících událostí.



Obr. 34 Materiál WC, snímače IDK a tzv. dlouhý záznam [11]

## **1.2 Materiálová odezva u měření HRB**

Metodika HRB se neprokázala být zcela progresivní a to z následujících důvodů. Prvním je jistě tvar indentoru, kterým je ocelová kulička. Díky větší ploše nedochází k iniciaci takového množství mikroplastických deformací jako u indentoru kuželového a ubývají tím zdroje AE, které by bylo možné vztáhnout k hodnotě tvrdosti. Dále je to také rozsah zkoušky, který je omezen přítláčnou silou 980 N a již na kraji tohoto rozsahu se může negativně, a tím zkresleně, projevit deformace materiálu indentorem. HRB je tak vhodná pro měření měkkých a středně tvrdých materiálů. Pro další praktické měření a vyvození nové metodiky měření tvrdosti pomocí AE je tedy HRB nevhodné.

## **1.3 Materiálová odezva u měření HRC**

Metodika HRC se ukázala dle praktického měření jako vhodná pro korelativní měření AE. Jednak z důvodu velkého rozsahu měření tvrdosti až do síly 1471 N (až 100 HRC). Dále tvarem kuželového indentoru, který je schopný materiálem a geometrickým tvarem odvolávat velkým zátěžným silám při velkém tření mezi materiálem a špičkou indentoru při nízké úrovni deformace indentoru, která by mohla především výsledky odezvy AE značně zkreslit.

### **1.3.1 Vliv struktury zkoušeného materiálu**

Má vliv pórovitost a homogenita na tvorbu a frekvenci nesouvislého signálu při dotěžování po vniku? Zcela jistě se v akustickém, tedy původně vlnovém spektru projevuje homogenita martenzitické matrice tvořená martenzitickými pakety jehlic resp. desek (byť se zbytkovým austenitem) v porovnání s homogenitou porézního spékaného karbidu wolframu, který je velice vzdálený mechanickému kontinuu a kde hlavním původcem tvrdosti jsou extrémně tvrdé částice uložené v kobaltovém pojivu. Průnik indentoru není tedy možné přesně specifikovat, protože nelze určit jednoznačně z mikropohledu ani směr pohybu jehlanu v martenzitu ani možnost deformace pojiva v karbidu při posunutí (odtlačení) karbidů diamantem.

### **1.3.2 Vliv metodiky měření (snímače)**

Pro měření mikrodeformační odezvy při měření tvrdosti kovů pomocí HRC se ukázalo vhodnější využít klasické snímače Dakel IDK - 09 s korundovým povrchem. Snímače typu MIDI vykazovaly během měření nižší citlivost (viz Obr. 11). Když pomíneme vliv vazebního média, je zřejmé, že korundový povrch snímače IDK - 09 je

při měření tvrdosti u velmi tvrdých materiálů svou odolností příbuznější, než nerezový povrch MIDI snímače.

#### **1.4 Diskuse výsledků**

Během praktických ověřovacích zkoušek byl vyzkoušen vliv metodiky měření tvrdosti kovů (HRB a HRC) na odezvu AE (kap. 5.2 a 5.3), vliv struktury a typu materiálu respektive jeho tvrdost jako mechanická vlastnost odporu proti vniku indentoru (kapitola 5.3.1) i vliv typu snímače (kap. 5.3.2).

Na korelaci mezi tvrdostí materiálů a odezvou AE má zřejmě vliv tvrdost a struktura materiálu. Respektive čím tvrdší testovaný materiál byl, tím silnější, čitelnější a pravidelnější byla i odezva AE. Hlavními hodnocenými veličinami byla zvolena energie signálu - RMS, která s tvrdostí vzrůstala, stejně jako další významný indikátor - počet překmitů a úhrnné kumulativní kvantum událostí.

Se zvyšováním tvrdosti materiálů a tím také nárůstem „vnikacího“ odporu dochází ke zvyšování diskontinuitních signálů nespojitě AE s velmi pravidelným útlumem. Tento trend zřejmě dle provedených měření odpovídá hodnotě naměřené tvrdosti materiálu bez ohledu na momentální přesnost měřícího zařízení a dle četnosti těchto událostí (respektive frekvence) by zde byla možnost u více statisticky významných měření ustanovit škálu tvrdosti závislé na hodnotě těchto nespojitých signálů.

Jako velmi zajímavá souvztažná hodnota mezi tvrdostí a odezvou AE je iniciační amplituda RMS při vniku indentoru do tělesa, která se zvyšuje s narůstající tvrdostí materiálu a roste také během nespojitého signálu v průběhu dotěžování indentoru při jeho diskontinuálním pohybu ve struktuře měřeného materiálu při vnikací zkoušce.

Diskutovaný vliv homogenity struktury, případné porosity či přítomnosti měkkých vměstků je námětem pro rozlišení měření z makropohledu nebo mikropohledu. Tento aspekt lze zcela jednoznačně vyloučit se vzrůstajícím počtem měření tvrdosti, kdy by se nutně projevil vliv statistického vyhodnocení.

Korelativní otázkou je rovněž doporučení časové relace měření, hodnocení tvaru signálů z pohledu přítomnosti pružné deformace - anelasticity (viz kap. 4.5), která je

patrně funkci struktury měřeného materiálu a vnitřního napětí. Zcela jistě se bude z tohoto pohledu lišit měření tvrdosti požitím AE u materiálu rozdílného technologického původu (odlitek, hutní polotovar, výkovek, produkt práškové metalurgie apod.) a důsledek jeho následného tepelného zpracování. Detailní rozbor tvaru signálu, četnosti překmitů přes jednotlivé hladiny, růst RMS i celkový tvar hitů je tedy zřejmě jednoznačně proveditelný až po vytvoření náročné souvztažné procedury u předem stanovené metodiky měření AE v průběhu zkoušky tvrdosti materiálu.

## 2 Závěr

Předložená bakalářská práce s názvem Měření hloubky průniku indentoru s využitím deformační odezvy je vypracována na základě koncentrace stávajících rešeršních odborných poznatků z oblasti měření tvrdosti materiálů a aplikace nedestruktivní metody měření v oblasti zkoušení materiálu, a to pasivní verifikační metodou akustické emise.

Výsledek propojení uvedených oblastí destruktivního a nedestruktivního zkoušení materiálu je založen na uvedení přehledových teoretických poznatků z oblasti měření tvrdosti materiálu, jako jedné z nejvýznamnějších materiálových charakteristik a podrobného stanovení podmínek záznamu vlnové odezvy zkoušeného materiálu při deformaci v průběhu vnikací zkoušky za použití mezinárodní normou stanovené metodiky měření - vnik indentoru v rámci tzv. Rockwellovy zkoušky.

Následně je v práci popsána postata iniciace akustických vln při pohybu dislokací během plastické deformace, která je rozvinutím elastické deformace v úvodu vnikání indentoru a proces jejich snímání z povrchu měřeného materiálu za použití profesionálních snímačů akustické emise (AE). Nastíněno je i zpracování elektrického signálu, frekvenční otázky a nejdůležitější otázky popisu záznamu měření.

Uvedená teoretická část je doplněná verifikačním měřením, které bylo z důvodu objektivity provedeno na dvou nezávislých pracovištích (Mendelova univerzita - ÚTAD a Ústavu konstruování VUT FSI - akreditované pracoviště ČNDT). Všechna provedená měření jednoznačně ukazují na možnost progresivního využití AE při měření tvrdosti. Měření je doposud podmíněno profesionálním stanovením vstupní antecedence měření Po zohlednění zmíněných okrajových vstupních podmínek je více než reálná verifikace

tvrdosti materiálu u tvrdších struktur (nad 60 HRC) v technické praxi, a to bez ohledu na přesnost mechanického zkušebního zařízení.

## LITERATURA:

[1] MACHEK, V.: Zpracování a zkoušení kovových materiálů. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8.

[2] KOPEC, B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. (Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

[3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I.2. Opravené a rozšířené vydání, Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

[4] Dvořáček, J.: Vývoj nové generace zařízení s pokročilou diagnostikou pro stanovení kontaktní degradace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s.

[5] Černý, M., Mazal, P., Filípek, J.: Visualization of stress and deformation with use of AE. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2005, LIII, No. 2, pp. 63-74

[7] MACHÁČ, M.: Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

[8] BOHÁČ, P., TOMAŠTÍK, J., ČVRTLÍK, R., DRÁB, M., KOULA, V., CVRK, K., a JASTŘABÍK, L.: Acoustic Emission Generated during Scratch Test of Various Thin Films. e-Journal of Nondestructive Testing 19. Dostupné z: [http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/378\\_Boha-.pdf](http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/378_Boha-.pdf)

[9] LUDVÍK, Jan; BÍLEK, Karel; LUDVÍK, Štěpán. *zkousky\_tvrlosti* [online]. 2002 [cit. 2010-03-04]. Zkoušky\_tvrlosti. Dostupné z WWW: <[http://www.metrotest.cz/zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.metrotest.cz/zkousky_tvrlosti.pdf)>.

[10] Zkoušky\_tvrlosti [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z WWW: <[www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)>.

[11] Vlastní archiv autora.



## SEZNAM OBRÁZKŮ:

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Zkouška HB [9] .....   | 12 |
| Obr. 2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [9] .....  | 13 |
| Obr. 3 Princip Rockwellovy zkoušky [9] .....  | 15 |
| Obr. 4 Scratch test [10] .....  | 16 |
| Obr. 5 Spojitá a bouřlivá (trhaná, nespojitá) AE [3].....   | 21 |
| Obr. 6 Příklady jednotlivých izolovaných hitů [3] .....   | 22 |
| Obr. 7 Podélná vlna [3].....  | 24 |
| Obr. 8 Příčná vlna [3] .....  | 25 |
| Obr. 9 R-vlna [3].....  | 26 |
| Obr. 10 Relativní rychlost šíření příčné vlny (P) k podélné a povrchové vlny k podélné v závislosti na Poissonově čísle $\nu$ . [4] ..... | 27 |
| Obr. 11 Diagram závislosti $\sigma - \varepsilon$ [4] .....   | 28 |
| Obr. 12 Měřicí sestava [11] .....   | 31 |
| Obr. 13 Umístění snímačů na vzorku [11].....  | 32 |
| Obr. 14 Odezva na měření tvrdosti Poldi etalonu [11] .....  | 32 |
| Obr. 15 Detail odezvy Poldi etalonu [11].....   | 33 |
| Obr. 16 Celková odezva vtisku [11] .....  | 33 |
| Obr. 18 Celkový přehled souboru měření [11].....  | 34 |
| Obr. 19 Detail odezvy měření tvrdosti u frézy [11].....   | 35 |
| Obr. 20 Umístění snímačů AE na vzorku WC [11].....  | 36 |
| Obr. 21 WC celkový průběh záznamů měření na snímačích MIDI [11].....  | 36 |
| Obr. 22 Detail záznamu měření tvrdosti na vzorku WC s iniciací AE při předtížení a záznamem tření na konci zkoušky [11] .....             | 37 |
| Obr. 23 Téměř identický záznam měření na druhém snímači u WC [11].....  | 37 |
| Obr. 24 Verifikační záznam u třetího měření na WC [11] .....  | 38 |
| Obr. 25 Měřicí sestava na VUT FSI [11].....   | 39 |
| Obr. 26 Detail snímačů a hlavice indentoru HRC [11].....  | 40 |
| Obr. 27 Celkový průběh sady měření u frézy [11] .....   | 41 |
| Obr. 28 Fréza [11].....   | 41 |
| Obr. 29 Celková sada měření MIDI snímači na materiálu WC [11] .....   | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 30 Detail záznamu z jednoho měření u materiálu WC [11] .....    | 42 |
| Obr. 33 Detail jednoho měření (aplikace WC a snímače IDK) [11] ..... | 44 |
| Obr. 34 Materiál WC, snímače IDK a tzv. dlouhý záznam [11] .....     | 44 |