

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2017

JAN PIŠTORA



Verifikace souběžného měření odezvy plastické deformace
Diplomová práce

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

Vypracoval:
Bc. Jan Pištora

ZADÁNÍ

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci „Verifikace souběžného měření odezvy plastické deformace“ 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: 20.4.2017

.....

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 a v neposlední řadě také Ing. Michalu Šustrovi a Ing. et. Ing. Petru Dostálovi, PhD. za odborné konzultace.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je prakticky ověřit metodiku souběžného měření odezvy plastické deformace při měření tvrdosti tvrdoměrem a aparaturou akustické emise na kovových materiálech o vyšší tvrdosti.

Klíčová slova: Akustická emise, měření tvrdosti, deformační odezva, tvrdost, plastická deformace.

ABSTRACT

Goal of this diploma work is to practically test method of concurrent hardness and acoustic emission measurement related to their correlation depending on material.

Keywords: acoustic emission, hardness measurement, deformation response, hardness, plastic deformation.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Zkoušky tvrdosti kovů	11
3.1	Definice zkoušek a měření tvrdosti.....	11
3.1.1	Vtiskové zkoušky (vnikací)	12
3.1.1.1	Zkoušky tvrdosti dle Brinela	12
3.1.1.2	Vtisková zkouška dle Vickerse (HV).....	13
3.1.1.3	Vtisková zkouška dle Rockwella (HRC).....	14
3.1.2	Zkoušky vrypové	16
4	Akustická emise.....	18
4.1	Historie a teorie	18
4.2	Zpracování dat z aparatury AE	19
4.2.1	Událost AE jako celková skupina hitů identického zdroje.....	21
4.3	Progresivní aplikace měření AE.....	22
4.4	AE a deformace materiálu.....	23
4.5	Makrotvrdost a deformační procesy.....	27
4.6	Měření tvrdosti jako zdroj AE.....	29
5	Deformační odezva při měření tvrdosti kovů	30
5.1	Stálost a opakovatelnost měření.....	31
5.1.1	Využití metodiky a aparátu měření tvrdosti HRC/AE.....	31
5.2	Faktor korelace výsledků souběžných měření	33
5.2.1	Korelace vrypových zkoušek a AE.....	34
5.2.2	Korelace výsledků při měření tvrdosti dle HRC/AE	38
5.3	AE jako zdroj informací o vlastnostech materiálu.....	38
5.3.1	Odezva AE při měření tvrdosti svarků dle HRB	38

5.3.2	Odezva AE při měření tvrdosti HRC svarků	40
6	Praktické měření odezvy AE na HRC	45
7	Diskuze výsledků.....	56
8	Závěr	58
	Literatura.....	59
	Seznam obrázků.....	60

1 ÚVOD

Tato diplomová práce navazuje na nové teoretické a praktické poznatky v oblasti deformační odezvy materiálu zachyceném aparátem akustické emise. V teoretické části jsou rešeršně shrnuty nejnovější poznatky nejen z oblasti měření tvrdosti materiálů ale hlavně z oblasti nedestruktivního zkoušení – akustické emise, které by mělo potvrdit možnosti korelace záznamu akustické emise a naměřených hodnot tvrdosti. V praktické části se potom tyto poznatky implementují do konkrétních měření při paralelním měření tvrdosti měření tvrdosti tvrdoměrem HRC a aparátem akustické emise sledující akustickou aktivitu vzorku při jeho plastické deformaci. Dosavadní výsledky prokázaly jisté závislosti mezi záznamem AE a průběhem měření tvrdosti tvrdoměrem respektive změny v datovém záznamu byly opakovatelné a přímo reagovali na tvrdost konkrétních vzorků. Hlavním tématem této diplomové práce tak bude na statisticky významném souboru měření popsat a ověřit zmíněné korelace dat z obou měření na vybraném vzorku při sledování trendu souvztažných veličin.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je vypracovat kompilační přehled teorie a nových poznatků v oblastech spojených s touto problematikou a v praktické části vytvořit statisticky významný soubor měření na vybraném materiálu. Na základě odezvy AE při měření tvrdosti kovových materiálů poté vybrat rozhodující parametry či materiálové vlastnosti ovlivňující kvalitu, relevanci a intenzitu signálu souběžného měření.

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI KOVŮ

3.1 Definice zkoušek a měření tvrdosti

Tvrdot je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa (indentoru). Konečná hodnota tvrdosti v sobě kombinuje více charakteristik materiálu jako velikost zatížení, rychlost a čas vnikání indentoru, tvar indentoru a také elastické a plastické deformační odezvy zkoušeného materiálu.

Výhoda zkoušek tvrdosti je operativnost bez nutnosti složitých příprav vzorku. Po zkoušce zůstane v materiálu pouze malá stopa po vpichu bez vlivu na funkčnost. Před zkouškou by však mělo dojít ke kontrole a případné úpravě povrchu, aby byla rovná, homogenní a bez chemikálií či povlaků. Vliv na měřenou tvrdost může mít nauhličený nebo oduhličený povrch.

Obecně se dají popsat dva výsledky zkoušek. První je dosažení stavu plastické deformace u tvrdých materiálu jako je keramika či kovy a nazývá se zkouškou indentační (indentor pronikne pod povrch).

Další zkouška je založena na elastické odezvě zkoušeného materiálu a používá se při měření pryží a plastů. [2]

Ostatní rozdělení se váže především k výběru vhodné zkoušky na vhodný vzorek materiálu a dělí se dle principu a technického provedení kontaktu indentoru se vzorkem:

- Vrypové
- Odrazové
- Vnikací

Dále dle velikosti zatěžovací síly se měří:

- Makrotvrdot
- Mikrotvrdot
- Nanotvrdot

Dle rychlosti působení zatěžovací síly dělíme zkoušky na:

- Statické

- Dynamické

Podle prostředí kde zkoušku provádíme:

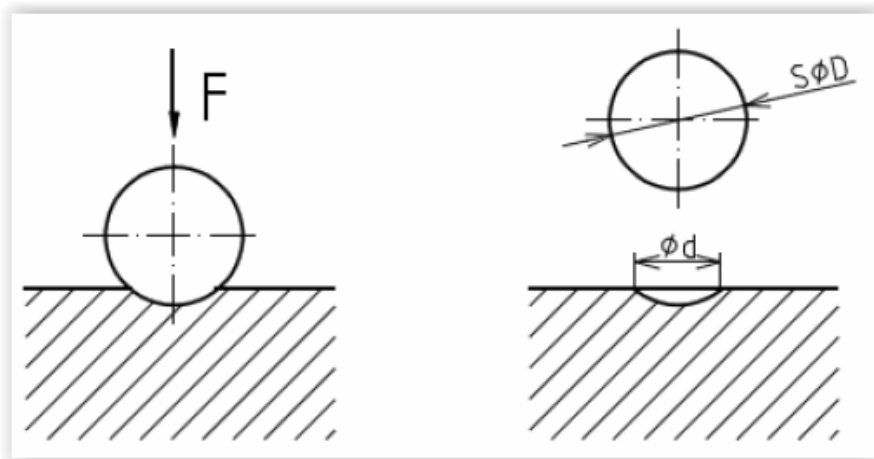
- Prostedí provozní
- Prostedí laboratorní

3.1.1 Vtiskové zkoušky (vnikací)

Principem vnikacích zkoušek měření tvrdosti je zatlačení zkušebního tělesa kolmo do povrchu vzorku. Následkem je plastická deformace materiálu. V první části zkoušky dochází ke kontaktu indentoru s materiálem a dojde k elastické (pružné) deformaci. Tato fáze nám ještě neurčuje nic o tvrdosti materiálu. U extrémně tvrdých materiálu a při nízké zatěžovací síle může dojít k iniciaci pouze elastické deformace (například při měření tvrdosti dle Vickerse). U velkého procenta vtiskových zkoušek se objevuje také deformace plastická (trvalá). Mez pevnosti a mez tvrdosti poté určuje výslednou tvrdost vzorku.

3.1.1.1 Zkoušky tvrdosti dle Brinela

Základem této zkoušky je vtisknutí leštěné a zakalené kuličky z oceli či tvrdokovu o přesně daných rozměrech a danou silou do vzorku. Výsledkem je kulovitý obrazec, který definujeme v průmětu jako kruh o průměru d .



Obr. 1 Zkouška HB [7]

Výsledná tvrdost je odečítána v jednotkách HBW při použití tvrdokovové kuličky a HBS při užití indentoru ocelového. Kuličky z tvrdokovu se používají pro tvrdší materiály díky jejich vysokému modulu pružnosti.

Fyzikální podstata HB zkoušky spočívá v tlaku vznikajícím působení díly indentoru na plochu vzorku.

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

h značí hlouku vtisku indentoru

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

Výsledná tvrdost je vypočítána v jednotkách kp

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

Je-li výsledná síla udávaná v Newtonech je třeba výslednou hodnotu vynásobit korekčním koeficientem 0,102. Moderní tvrdoměry počítají tvrdost automaticky. U starších manuálních aparátů je třeba z tabulek odečíst hodnotu odpovídající vtištěnému průměru, zatěžující síle F a výslednému průměru vtisku d . Doba zatížení se pohybuje mezi 10 až 15 sekundami. Zvolení průměru kuličky D závisí na moci vzorku a jeho mechanických vlastnostech a většinou se jedná o průměr 10mm.

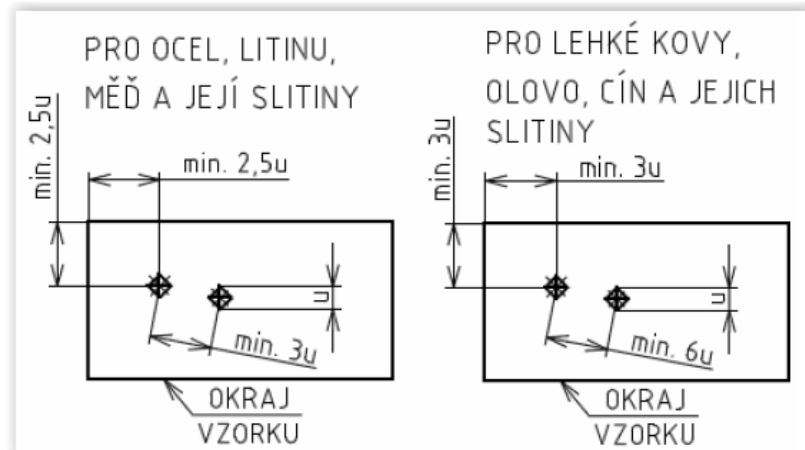
3.1.1.2 Vtisková zkouška dle Vickerse (HV)

Tato zkouška tvrdosti je obvykle prováděna vtiskem čtyřbokého indentoru ve tvaru jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Tato specifický hodnota úhlu byla stanovena kvůli minimalizaci zkreslení výsledků zkoušky třením indentoru o materiál vzorku a také kvůli zvýšení podobnosti výsledků dle zkoušky tvrdosti dle Brinella (HB). Výsledný odečítaný vtisk tvoří úhlopříčka průmětu jehlanu a dosadí se do vztahu:

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

F - zátěžná síla [N]

u - průměrná hodnota úhlopříčky [mm]



Obr. 2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [7]

3.1.1.3 Vtisková zkouška dle Rockwella (HRC)

Princip této vnikací zkoušky spočívá ve vtiskování diamantového kuželu nebo tvrdokovové /ocelové kuličky do materiálu vzorku. Vrcholový úhel jehlanu je v tomto případě stanoven na 120° a poloměrem jeho zaoblení na 0,2mm. Kulička je standartního průměru 1,5875mm (1/16 palce) nebo 3,175mm (1/8 palce).

Tab. 1 Rozsah Rockwellovy stupnice [8]

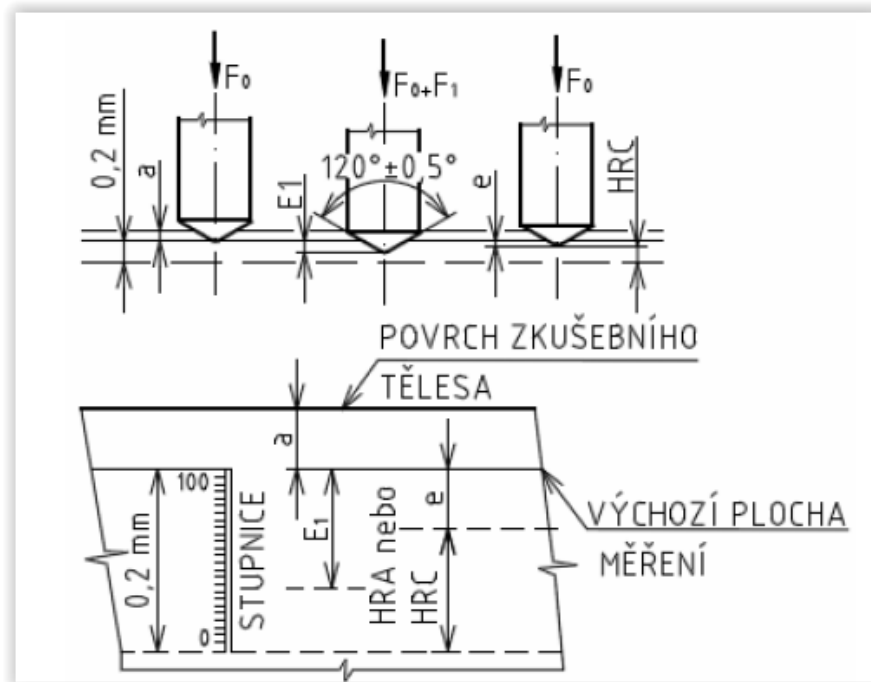
stupnice	indentor	zatížení [N]			rozsah měřitelné stupnice		použití
		F_0	F_1	F_C	počet dílků	hloubka [mm]	
H	ocelová kulička Ø 3,175 mm	98,07	490,3	588,4	130	0,26	litiny, hliníkové slitiny a jiné měkké materiály
E			882,6	980,7			
K			1 173	1471			

Zkouška začíná počátečním zatížením předběžnou silou $F = 98,07\text{N}$ (10kp). Díky této síle se indentor dostane do hlouky a pod povrch vzorku z důvodu eliminace vlivu povrchové vrstvy na výsledek zkoušky tvrdosti. Poté se nastaví na tvrdoměru nulová hodnota. Následně dojde k dotížení přídatnou silou F_p , která je pro každou stupnici definována normou. Celkové zatížení je tedy rovno:

$$F = F_0 + F_1$$

3.5

Po odlehčení se hrot vrátí až za polohu a o délku E .



Obr. 3 Princip Rockwellovy zkoušky [7]

Délka E je už v úměře k tvrdosti materiálu a na stupnici je převedna na HRC. Míru tvrdosti tak reprezentuje hloubka vtisku hrotu do zkoušeného materiálu po odlehčení zatížení.

Základ označení se skládá s písmen HR a dalšího písmene v řadě A-K, které odpovídá tabulkovým hodnotám zatížení. Mezi nejpoužívanější hodnoty patří C a B. V případě použitá kuličky z tvrdokovu jako indentoru se doplní za třídu ještě písmeno W. Za použití kuličky kovové se používá písmeno S. Značení 60 HRBW tedy znamená hodnotu 60 Rockwellů měřenou dle stupnice B za použití kuličkového indentoru z tvrdokovu. Měření tvrdosti dle HRA (skupina A) se používá pro velmi tvrdé materiály a celkové zatížení je pouze 60 kp aby nedošlo k poškození hrotu, který je díky malé hloubce vpichu a poměrně hodně zatížen (z důvodu malé opěrné plochy). Přesnost měření je také hodně závislá na

zvolení vhodného přídatného zatížení, jelikož začátek stupnice je nastaven až po zatížení předběžnou silou F_0 . [3]

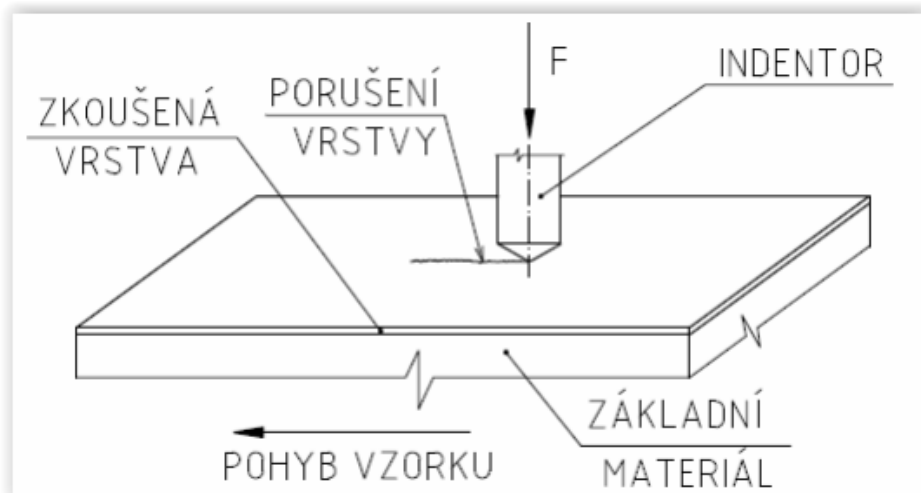
3.1.2 Zkoušky vrypové

V technické praxi se měří tvrdost kovů pomocí vrypových zkoušek především na křehkých a tvrdých materiálech, povlacích nebo na vzorcích extrémně měkkých. Jelikož se vrypové zkoušky tvrdosti dostali to technické praxe měření tvrdosti kovů z oblasti minearologie jsou také stupnice tvrdosti odvozeny od tvrdostí minerálů (Mohsova stupnice tvrdosti).

Tab. 2 Stupnice tvrdosti [8]

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

Zkouška spočívá v pohybu hrotu po povrchu vzorku při zvětšující se zatěžující silou. Standartní rychlost se pohybuje kolem 100 mm/min a nárůst je 100 N/min při průměrné předepsané odchylce hrubosti povrchu $R_a=0,25 \mu\text{m}$. Měřicí aparatura tak snímá a vyhodnocuje průběh tečné a normálové složky síly.



Obr. 4 Scratch test [8]

V poslední době se také můžeme setkat se souběžným měřením tvrdosti vrypovou zkouškou a záznamem aparatury akustické emise. Tento postup se používá například u testování funkčních povrchových úprav technických součástí. Tyto filmy mají zlepšit či změnit funkční povrch a jeho vlastnosti nebo sloužit jako ochranný tribologický film s odolností proti otěru a nízkým třecím koeficientem. Kritický parametr aplikace je míra přilnavosti funkční vrstvy k povrchu základního materiálu. Proto je potřeba kvalitu těchto povrchů laboratorně testovat vrypovými zkouškami. Vrypové zkoušky taky částečně simulují abrazivní provozní zátěž. [1]

Plastické deformace a křehký lom, které se během vrypových zkoušek vyskytují jsou také zdrojem akustických vln které možné sledovat aparátem akustické emise (dále jen AE). Čím větší je síla působící na vzorek (a tím pádem energie celé soustavy) tím by měl být teoreticky i silnější záznam AE. Praktická měření v této oblasti a korelace mezi výsledky tvrdosti a průběhu signálu AE toto potvrzují. Dále lze pozorovat na záznamu AE rozvin deformací během zkoušek tvrdosti jako tvorba trhlin a porušování povrchu vzorku. V případě synchronizace časové osy měření tvrdosti a záznamu AE je pak možné tyto defekty a jiné události rozlišovat na záznamech obou zařízení případně konkrétní mikro i makro mechanické jevy identifikovat s jednotlivými událostmi na záznamu AE. Tato souběžná měření tak mohou více objasnit mechanické vlastnosti jednotlivých filmů jako je celistvost vrstvy, její poruchy a kvalitu přilnutí na základní materiál. Tato metoda se jeví jako progresivní v případech, kdy není možné použít ke zkoumání povrchu po zkoušce mikroskopii (v případech průhledných filmů).

Jakmile povrch dosáhne kritického limitu zatížení vytvoří se spontánně defekt a uvolní se napěťové vlny jako následek tvoření a šíření mikroprasklin. Mikrotrhliny se na povrchu projeví ve formě vrubových poruch důsledkem uvolněného napětí uvnitř povrchové vrstvy či uvnitř základního materiálu. Šíření rázových vln je ovlivňováno geometrií zkoušeného materiálu a odrazivostí jeho povrchu. Na povrchu vzorku se vlny projeví ve formě povrchové vlnění (Raleighových či Lambových vln). Právě tyto vlny jsou dobře zaznamatelné aparátem AE a při emisi těchto vln nazýváme tyto zvukové jevy emisí napěťových vln a jedná se obecně o generování elastických vln uložených ve struktuře materiálu. Podmínkou pro uvolnění a následnou detekci AE je nutnost dobrá vazebná síla mezi povrchem a základním materiálem.

4 AKUSTICKÁ EMISE

4.1 Historie a teorie

První pozorování AE se uskutečnilo v laboratořích výzkumu plastických deformací kovů a toto pozorování bylo definováno jako popraskávání nebo akustický šum generovaný uvnitř materiálu v průběhu mechanického zatěžování a to především při průběhu plastických deformací). Dalšímu rozvoji se metoda dočkala kvůli potřebě zjistit nové informace o procesech, zdrojích emise AE a jejich charakteru při plastické deformaci pod zatížením. V praktickém životě se každý setkal s emisí AE a to ve formě lidským uchem slyšitelných frekvencí jako je třeba praskání dřeva při ohybu. Dynamické porušování dřeva se přenáší z materiálu do vzduchu a ve formě tlakové vlny postupuje do lidského ucha.

Více detailních informací o probíhajících deformačních procesech však lze získat použitím citlivější sensoriky, která snímá elastické napěťové vlny blíže u materiálu.

Norma EN13390 nazývá akustickou emisí elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolňováním napětí mechanického charakteru uvnitř či na povrchu zatěžovaného tělesa. Metodika AE je založena na detekování zdrojů a vln AE. Data jsou dále zpracovávána elektronicky a vyhodnocují se za pomoci speciálního softwaru na základě grafické interpretace.

První úspěšná laboratorní měření AE datujeme do 50 let 20 století, kde se stál u zrodu německý fyzik Joseph Kaiser. Od 60 let se AE počala objevovat i v technické praxi nedestruktivního testování, kde sloužila především pro monitoring a vyhodnocení plastických deformací materiálu a také pro vyhodnocení stavu zatěžovaných konstrukcí, měření úniku médi v tlakových systémech případně pro kontrolu procesu svařování.

V současné době se výzkum a vývoj měření odezvy AE nejvíce rozvinul v těchto oblastech:

- Interpretace jednotlivých zdrojů AE, frekvencí a amplitudové charakteristiky uvolňovaných napěťových vln při daných externích podmínkách
- Pohyb napěťových vln v tělesech konečných proporcí
- Detekování napěťových vln a elektronické zpracování

4.2 Zpracování dat z aparatury AE

Událost akustické emise je fyzikální jev způsobený například posunem dislokací, dynamickým 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 o 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)

Vznik, detekci a hodnocení signálu AE lze dělit na následující fáze:

- Zdroj, hit, událost AE a její mechanismus rozvoje a šíření
- Šíření napěťových vln od zdroje k snímači AE
- Detekování vln snímačem uchycený na povrchu tělesa pomocí transformace signálu AE na elektronický signál
- Analogové zpracování a vedení signálu do aparatury AE
- Vyhodnocení signálu zařízením AE a produkce grafické interpretace

Za událost AE můžeme označit fyzikální jevy jako posun dislokací, dynamický vznik trhlin, teplotní a rozměrové přeměny materiálu atd. Za zdroj je poté považován původ jedné či více událostí. Zdroj je tedy soubor fyzikálních procesů na mechanické bázi generující vlny AE jako jsou plastické deformace provázené pohybem dislokací. Stejně tak je zdrojem AE mechanické porušování materiálu s iniciací počátečních mikrotrhlin či mikroposuvů čel trhlin. [2]

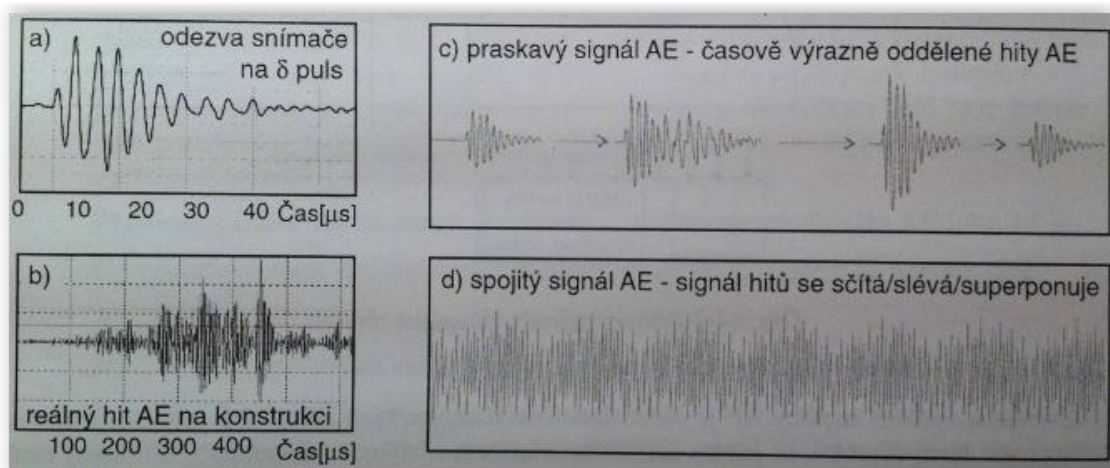
Spojité AE	Bouřlivá AE
Malý rozměr zkušební tělesa	Velký rozměr zkušební tělesa
Hladké zkušební vzorky	Vzorky s vrubem
Izotropní materiál	Anizotropní materiál
Homogenní materiál	Nehomogenní materiál
Jemnozrný materiál	Hrubozrný materiál
Tvářený materiál	Materiál v litém stavu
Nízká pevnost materiálu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

Obr. 1 Spojité a bouřlivá (trhaná, nespojitá) AE [4]

Díky vysoké aktivitě mechanických deformací v materiálu se často setkáváme se spojitým signálem AE. Tyto spojitě signály se často sečítají, superponují a často je také doprovází akustický šum. Tuto mechaniku iniciace spojitěho signálu AE lze dobře demonstrovat na dislokačních posunech při průběhu plastické deformace. Jednotlivá událost uvolní pouze malé a těžko detekovatelné množství energie pro iniciaci AE. V případě že tyto události následují v těsném sledu (například u dynamického zatěžování kovu) začnou se vlny překrývat a nacházejí se ve stavu superpozice. Výsledek je vytvoření spojitěho signálu AE (akustického šumu). Takto charakterizovaný signál již lze detekovat aparátem AE. Analogicky tomu je v případě u mechaniky kontinuálního

proudění média, které lze charakterizovat jako turbulentně rozvinuté a uchem je slyšitelné jako syčení.

V jednom z případů budí AE krátký a z pohledu technických možností detekce AE téměř ideální δ puls na povrchu tělesa v místě snímače a jeho délka se pohybuje mezi 20-30 μs . Ovšem s takto kvalitním a zřetelně rozeznatelným signálem se v praxi nesetkáme a to ani u ostře praskajících pulsů (Obr. 6). Většinou se signál AE rozptýlí úměrně po tělese a dále se šíří po tělese s postupným utlumením. Odezva AE na ostrý budicí signál představuje většinou soubor vzájemně se překrývajících se odrazů vln AE v časovém souběhu.



Obr. 2 Příklady jednotlivých izolovaných hitů [4]

4.2.1 Událost AE jako celková skupina hitů identického zdroje

Standartně se pro aplikace měření AE používá dvou a více piezoelektrických snímačů umístěných na tělese či konstrukci. Události pocházející z identického zdroje se detekují jako hit na snímačích. Každý jednotlivý snímač zaznamenává signál různě a to podle toho, kde je na tělese umístěn kvůli nerovnoměrnému šíření vln tělesem. Tyto diference v detekci se dají rozdělit na:

- 1) Útlum- Disperze energie a utlumení vln průchodem materiálem ovlivňuje silnější detekci signálu snímači umístěné těsněji ke zdroji.
- 2) Disperze- Snímače více vzdálené od zdroje zpravidla zachycují frekvenčně a časově zkreslenější zvuk s tzv. Ořezem horního frekvenčního pásma.

- 3) Časové zpoždění- Časové prodlení detekce signálu AE úměrně narůstá se vzdáleností snímače od zdroje AE.

4.3 Progresivní aplikace měření AE

Směrové aplikace AE se hojně rozvíjí již od svého objevení a používají se především v oblasti strojírenství a v oblasti studia fyzikálních vlastností materiálů. Moderní aplikace se již nezaměřují na prostou detekci přítomnosti emisních jevů, ale především na sledování emisních procesů v čase (kontinuální sledování trendů), intenzitě a charakteru získávaného signálu. Digitalizace a vzrůst výpočetního výkonu počítačové techniky můžeme spolu s prostředky matematického modelování ze získaných dat vyvozovat komplexní závěry a predikovat trendy budoucí. Nejčastěji se setkáme s následujícími aplikacemi:

- Monitoring a hodnocení poruch tlakových systémů při zkouškách těsnosti a tlakové odolnosti jako jsou potrubí, tlakové nádoby, kotle, parovody atd.
- Kontinuální monitoring tlakových systémů a jejich těsnosti
- Sledování aktivity AE při zkouškách pevnosti konstrukcí (betonových, kovových, kompozitních, dřevěných)
- Monitoring signálu emitovaného provozem pevnostních konstrukcí
- Detekování netěsností a úniků systémů pracujícími s tlakovými médii (úniky průchozími prasklinami konstrukce, netěsnými armaturami apod.)
- Kontrola tlakové odolnosti a těsnosti tanků, zásobníků
- Monitoring korozní degradace materiálů detekováním korozního praskání
- Sledování selhávání (opotřebení strojních součástí) a monitoring jejich bezpečného provozu (zadírání ložisek, tuhý chod servomotorů a pneumatických válců) jako třeba doplněk k vibrodiagnostice
- Netradiční biologické aplikace (měření materiálových toků v rostlinách, reakce na počasí a denní cykly) [11]

4.4 AE a deformace materiálu

Z pohledu mikroskopického můžeme hmotu uvažovat jako soustavu částic, které jsou elasticky vzájemně propojeny. Tuto souvislost můžeme sledovat na povaze šíření vln v materiálu kdy deformace elastických svazků hmoty umožňuje šířit vlny dále materiálem obdobným způsobem.

Koná-li částice pohyb ve směru pohybu vlny, jedná se o pohyb podélný (longitudální) a dochází-li k šíření v kolmém směru na pohyb vln je to pohyb příčný (transverzální).

V momentě šíření elastické vlny materiálem dochází k rozkmitání částic v různých směrech s vazbou na postup vlny materiálem. Odezva AE pak zpravidla odpovídá více typům vln: [4]

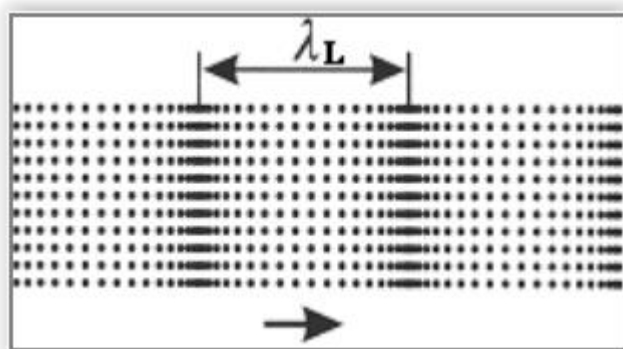
V případě **podélného vlnění (P)** kmitají částice v kladném směru postupující vlny. Tyto vlny se šíří jak v kapalném, plynném tak i tuhém prostředí. Rychlost šíření je definována rovnicí:

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

Jednotlivé indexy značí:

c – rychlost šíření vlnění – index značí druh vlnění [m/s], E , G – modul pružnosti v tahu resp. smyku [Pa], ρ – hustota [kg/m³], ν – Poissonova konstanta [-].

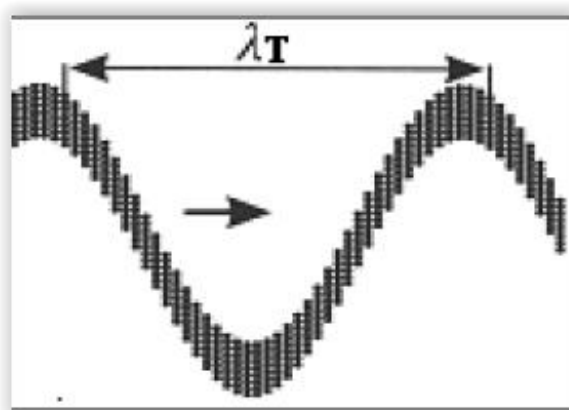
Grafická interpretace podélné P-vlny:



Obr. 3 Podélná vlna [5]

Příčná vlna (T nebo S) způsobuje oscilaci částic kolmo ke směru k šíření vlny (Obr. 8). Šíření této vlny je omezené pouze na pevné prostředí. Rychlost šíření příčné vlny v pevném prostředí je charakterizováno rovnicí:

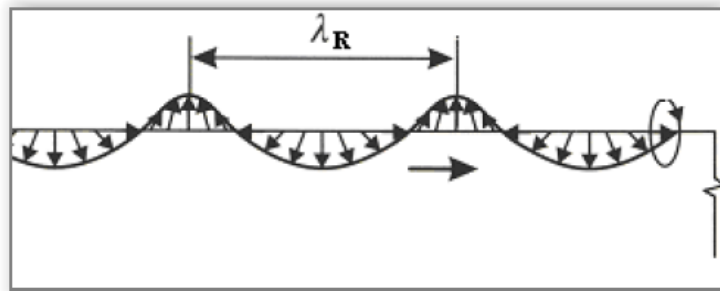
$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad 4.2$$



Obr. 4 Příčná vlna [5]

Vlna povrchová (R - Rayleighova vlna) se vyskytuje pouze na povrchu materiálu a těles. Je to specifický druh příčné vlny, kdy je působící příčná síla větší než síla podélná (Obr. 9). Tím dochází k eliptickému pohybu částic. Podélná silová složka vlny oslabuje s hloubkou materiálu více než silová složka příčná. Takže v hloubce rovnající se délce příčné vlny je povrchová vlna prakticky nulová. Vznik povrchových vln je popsán rovnicí :

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

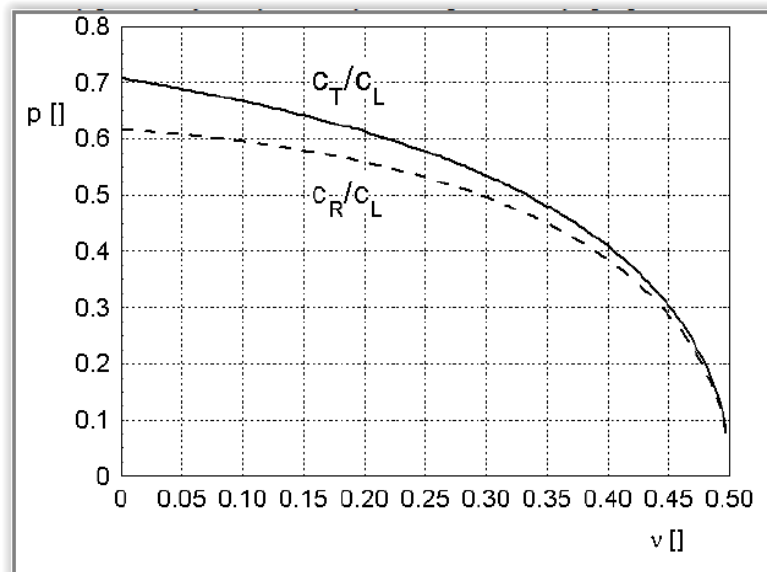


Obr. 5 R-vlna [5]

Desková vlna (L - Lambova vlna) se iniciuje v tělesech, jejichž tloušťka je oproti ostatním rozměrům zanedbatelně malá. Částice se pohybují taktéž po eliptické trajektorii jako R-vlna a to v celém objemu tělesa. Rychlost šíření je úměrná šířce tělesa a frekvenci vlnění. Je rozlišována fázová a skupinová rychlost vlnění.

Čárová vlna se vyskytuje při nízkých frekvencích vlnění v prutových tělesech jako jednoduchá longitudinální vlna. Takové těleso má zanedbatelně malý průřez proti ostatním rozměrům.

Z rovnic šíření vln (4.1 až 4.3) v tělese je zřejmé, že s největší rychlostí se pohybují vlny podélné. Poté následují vlny příčné a nakonec nejpomalejší 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. 5.4 Relativní rychlost šíření příčné vlny (P) k podélné a povrchové vlny k podélné v závislosti na Poissonově konstantě ν [5]

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

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

Deskové Lambda vlny lze označit za frekvenčně citlivé. V pásmu ultrazvuku (20-50 MHz) lze pozorovat podélné, příčné a povrchové vlny nezávislé na frekvenci. Rychlost šíření a vlnová délka je především to, co charakterizuje vlny akustické emise. Přitom každý jednotlivý typ vlny se pohybuje různě rychle v závislosti na materiálu a generace akustických vln může mít různé kombinované zdroje. Uvnitř materiálu to jsou především vlivy deformační a napěťové. Vysoce spolehlivý deformační mechanismus z pohledu detekce signálu AE je generace elastické vlny při růstu špičky trhliny v materiálu. V podstatě každý nárůst a změna tvaru trhliny (mikrotrhliny) je doprovázen generací elastického vlnění v materiálu.

Takováto elastická vlna se postupem v materiálu v čase mění. Především slábne vlnová energie v důsledku tvaru vlny a tlumivého vlivu prostředí pevného materiálu.

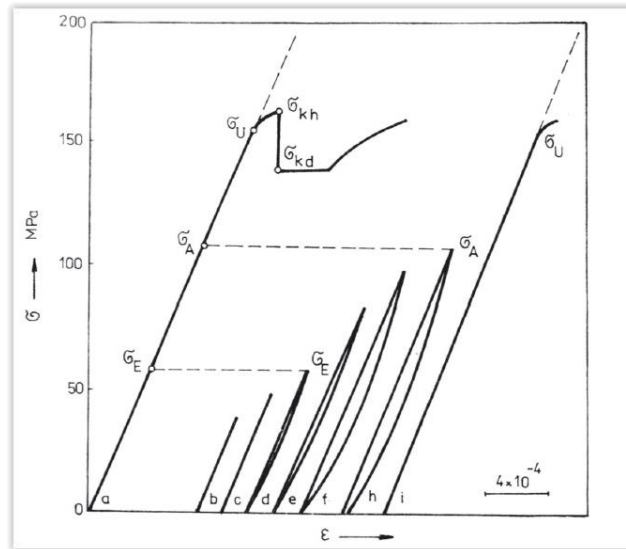
4.5 Makrotvrdost a deformační procesy

Fenomén mikroplastické deformace v souvislosti s měřením makrotvrdosti a její korelaci s výsledkysouběžného měření AE je přítomný při každé takové invazivní zkoušce. Průnik indentoru do vzorku generuje rozvin elastických a plastických deformací mikroskopických rozměrů.

Termín mikroplastická deformace je charakterizován přetvořením materiálu menším než 1% s lokalizací do bodové či lineární oblasti s rozměrem 10^{-4} až 10^{-6} (viz Obr. 11). Nejlépe lze demonstrovat mechaniku mikroplastické deformace na diagramu napětí (σ) a deformace (ε). Data na diagramu jsou shodné s mechanickými vlastnostmi technického železa. Jednotlivé body křivek vznikají narůstající hodnotou zatížení materiálu a pozdějším odlehčením.

Při fázi b a c se těleso navrácí pružně do původního stavu a klesající/stoupající část diagramu $\sigma - \varepsilon$ se stotožní. Po dosažení bodu napětí σ_E (křivka d) lze tuto závislost zřetelně odlišit od fáze stoupající. Finální stav je zase ve shodě s počátkem a výsledná deformace tělesa je tak rovna nule. [6]

Další nárůst zatížení (křivky e a f) se rozezná nárůstem plochy mezi stoupající a klesající zatěžovací křivkou (je to způsobeno vlivem adiabatického děje pružné deformace čili anelasticitou) se shodnou hodnotou konečné deformace $\varepsilon > 0$. Následující nárůst napětí přes σ_U znamená odklon od lineární závislosti průběhu $\sigma - \varepsilon$ a s přibývajícím nárůstem zatížení dojde k projevu meze kluzu $\sigma_k \approx Re$.



Obr. 6 Diagram závislosti $\sigma - \varepsilon$ [5]

Mez elasticity σ_E je definována jako třecí napětí potřebné k zahájení posunu prvních dislokací (hranových segmentů) přes překážky s krátkým dosahem. Samotná mez elasticity je prakticky velmi těžko měřitelná a definuje se spíše jako mez anelascity σ_A jako vyjádření reálného napětí vymezeného prvními nevratnými procesy. Při definování tohoto procesu se vychází z rozdílné pohyblivosti hranových a šroubových segmentů v dislokacích.

Technickou mez pružnosti σ_{TP} lze definovat jako napětí vyvolávající v materiálu nevratnou deformaci. Mez kluzu σ_K je napětí, při kterém dojde k nevratnému přesunu skupiny dislokací a dojde k realizaci spolehlivě měřitelné plastické deformace. Procesy a jevy spojené se zatěžováním materiálu do meze kluzu lze označit jako mikroplastické. Mikroplastickou deformaci lze označit jako heterogenní a lokalizovanou. V těchto případech lze dobře rozeznat anizotropní vlastnosti zrn materiálu a také celéhoobjemu polykrystalické látky (vzorku).

Při rostoucím vnějším napětím vzrůstá počet zrn, ve kterých probíhají plastické deformace. Spolu s časovým postupem klesá délka pohybu dislokací a roste jejich hustota v zrnech materiálu u kterých došlo k deformaci již při nižší hodnotě napětí.

U těchto zrn a v jejich blízkosti dochází k hromadění dislokací a které na blízkých, dosud deformacemi neovlivněných zrn kumulují napětí, které vede k rozvoji nevratného

vnitřního napětí a k vzniku trvalých plastických deformací. Výše uvedené procesy lze označit za první stádium mikroplastické deformace. Po překročení určité meze externího zatížení ve všech zrnech v libovolném průřezu materiálem proběhne plastická deformace. Dojde k zastavení tvoření Lüdersových pásů a začne se plně rozvíjet mechanika a procesy a doprovázející plastickou deformaci. Tuto deformaci provází také viditelné změny- mění se tvar součásti a ztrácí se původní mechanické vlastnosti. [6]

4.6 Měření tvrdosti jako zdroj AE

Hlavním zdrojem AE při měření tvrdosti kovů indentační zkouškou lze označit pohyb dislokací po vniku indentoru do materiálu. V odborné literatuře je uváděn model rozdělení dislokačních smyček v inverzním prostoru smyčka-délka. Rozložení je úměrné rozdělení signálu AE v závislosti na intenzitě deformace. Ve stavu elastické deformace materiálu je rozložení signálu AE symetrické. Následně s vyššími hodnotami deformací asymetrické rozdělení roste. Tato asymetrie je přisuzována vzájemnou interakcí dislokací. Z této teorie vyplývá, že hlavní zdrojem signálu AE je právě pohyb rychlých dislokačních zdrojů. Rozdělení rychlosti AE je úměrné hustotě pohybových dislokací ρ jako funkcí deformace ε_p definované na Gilmanově 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 ρ_s smyková napětí.

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

Sledování jednotlivých mřížkových poruch pomocí AE je podmíněno možností detekovat napěťové pulsy (vlny) vyšších frekvencí (nad 1 MHz). V průběhu plastické deformace dochází k emisi transičních napěťových vln. Tyto vlny mají frekvence v řádu 10^6 Hz a v procesu porušování 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. [6]

5 DEFORMAČNÍ ODEZVA PŘI MĚŘENÍ TVRDOSTI KOVŮ

Využívání aparatury a měření akustické emise (dále jen AE) jako souběžné metody k různým destruktivním či nedestruktivním zkouškám spolehlivosti nebo zkouškám mechanických vlastností vzrůstá a to v rozličných uspořádáních pokusů a výběru testovaných materiálů.

Zvlášť zajímavě se jeví kombinace souběžného měření AE a zkoušek, kdy je budícím signálem průběh nějaké normované vnikací (invazivní) zkoušky a to například zkoušky měření tvrdosti. V tomto případě jsou zajištěny důležité faktory pro úspěšné měření:

- Stálost a opakovatelnost– budící signál může mít vždy stejnou vstupní intenzitu, trvání a charakter
- Faktor korelace výsledků standartních (normovaných zkoušek) s výsledky souběžného měření AE- v případě měření tvrdosti můžeme pozorovat, zda při opakovaných měřeních získáváme korelující průběhy jednotek měřené tvrdosti na tvrdoměrech s průběhem získaného signálu z aparatury AE.
- AE jako zdroj dalších informací o vlastnostech testovaného materiálů- v případě změny výsledků hodnot například tvrdosti během měření na jednom vzorku v různých oblastech můžeme sledovat výsledky AE a jejich průběh a z toho vyvodit materiálové charakteristiky vysvětlující změnu tvrdosti materiálu (například u svarových spojů a tepelně ovlivněných oblastí).

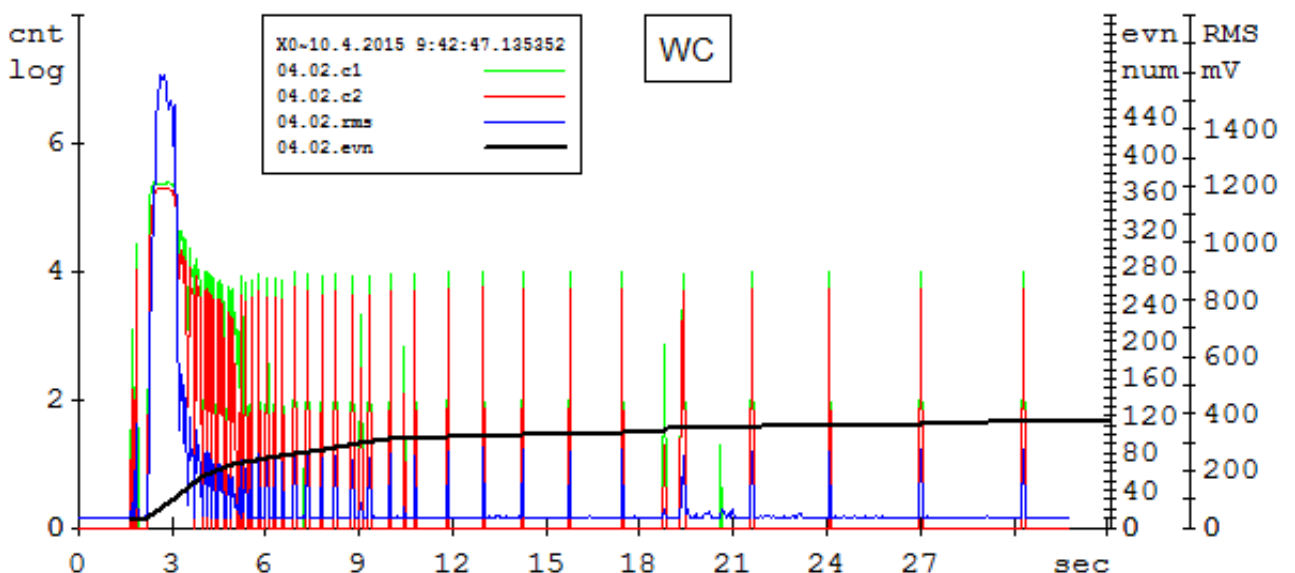
5.1 Stálost a opakovatelnost měření

Pokud chceme vyvozovat přesné a konkrétní závěry ohledně materiálových vlastností zkoušených vzorků, je vhodné využívat podporu již existujícího vybavení schopného generovat opakovaně stejně stabilní, intenzivní a lokalizovaný budící signál AE zatížený co nejmenší chybou.

5.1.1 Využití metodiky a aparátu měření tvrdosti HRC/AE

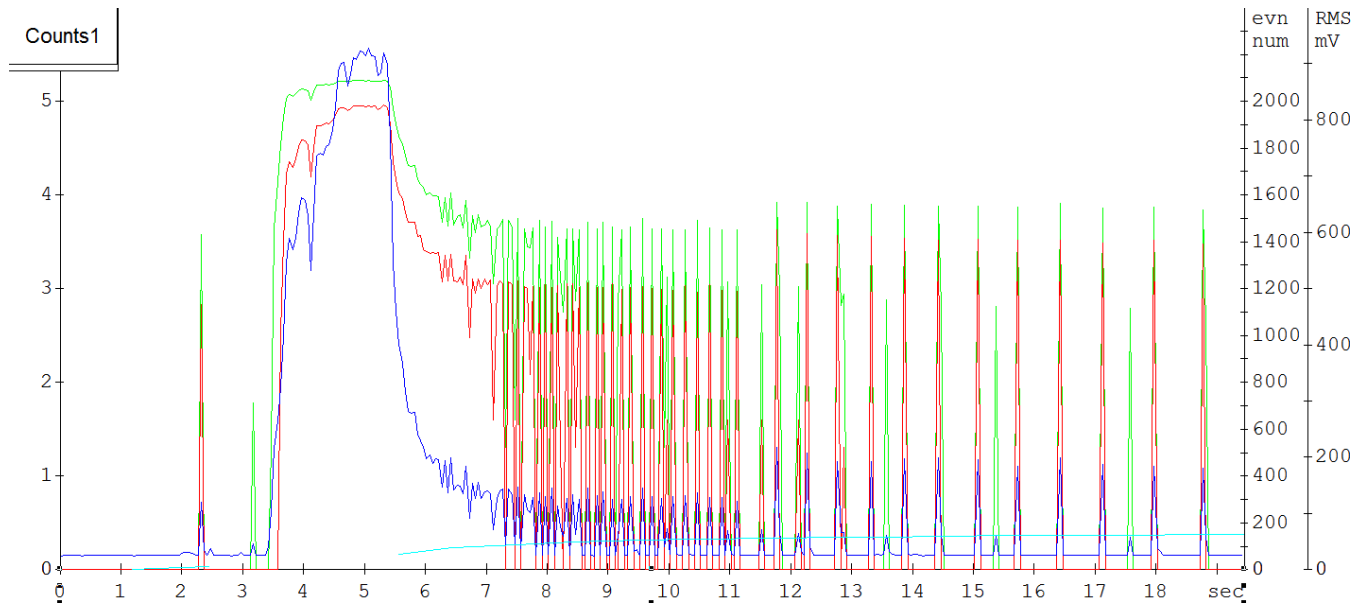
Metodika měření tvrdosti HRC s diamantovým hrotem je vhodná k souběžnému měření kvůli velkému rozsahu možní tvrdosti materiálu, dobrým vnikacím schopnostem tělesa (diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120°) a také kvůli velké a konstantní vnikací síle 1471N.

Velká síla spolu s kuželovým indentorem zajistí u tvrdších materiálů dobrý budící signál na úrovni prvotního kontaktu indentoru do materiálu, následné kladení odporu prvotní elastické deformace materiálu, následné vniknutí a rozvoj plastické deformace jako hlavního odporu proti vnikání jako materiálové charakteristiky (zde také dochází k oblasti největšího buzení signálu AE) a konečný průběh relaxace materiálu po ukončení vnikání a pohybu indentoru směrem hlouběji do materiálu.



Obr. 6 Celkový průběh jednotlivé události vtisku HRC do WC (asi 74 HRC) [12]

Na obrázku 1 můžeme vidět celkový průběh odezvy AE na měření tvrdosti karbidu wolframu (asi 74 HRC). Celková doba události a její odezvy trvá asi půl minuty a jsou na ní jasně rozlišitelné jednotlivé fáze vnikání indentoru a následné mechanické procesy ve zkoušeném materiálu.



Obr. 7 Detailní průběh odezvy měření nástrojové oceli (62 HRC) [12]

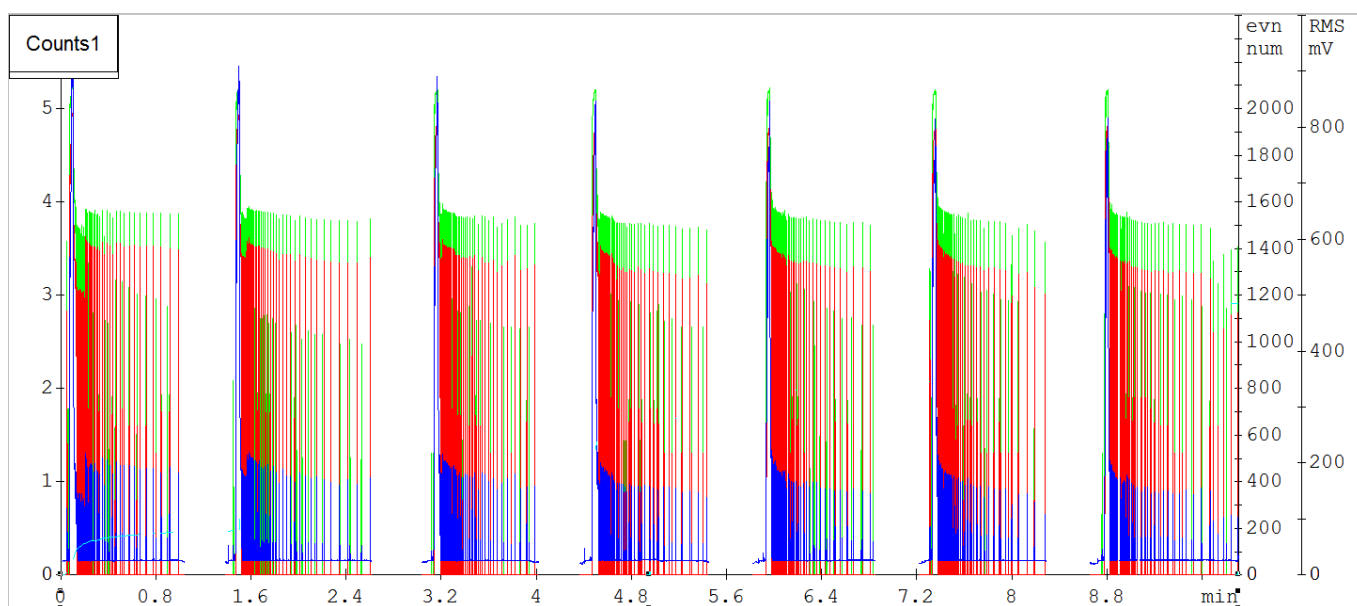
Na obr. 2 jsou dobře vidět jednotlivé fáze zkoušky a odezva zachycená AE. Mezi druhou a třetí sekundou dochází ke kontaktu tvrdoměru se vzorkem a rozvoj elastické deformace.

Od třetí do páté sekundy (vrcholu peaku) dochází k pronikání indentoru do tělesa a plnému rozvoji eleasto-plastické a poté plastické deformace. Od páté do sedmé sekundy vidíme dozvuk plastické deformace a zpomalení pohybu indentoru směrem do tělesa. V této fázi také zřejmě dochází k ukotvování hranových a šroubových dislokací před hranicí zrn a u Cottrelových zón.

Od vrcholu peaku směrem dolů můžeme sledovat jev podobný překročení meze kluzu u tahových zkoušek v diagramu závislosti napětí a prodloužení. V tento moment exponenciálně klesá hodnota RMS (root mean square) čili z našeho pohledu energie úměrná kladení odporu materiálu proti vnikání indentoru.

Od sedmé do jedenácté sekundy můžeme sledovat bouřlivý průběh signálu AE znamenající zastavení pohybu indentoru což by mohlo z pohledu mikoplastických deformací šplhání šroubových dislokací.

Od jedenácté sekundy dále již není hustota a intenzita RMS významná a dochází k postupné relaxaci materiálu. Pravidelné county s lineárně se snižujícím počtem v čase zřejmě odpovídají pohybu dislokací materiálu a vyzařování zbytkové energie dodané vnikem indentoru.



Obr. 8 Průběhy opakovaných měření nástrojové oceli (62 HRC) [12]

Obrázek 3 reprezentuje opakovatelnost zkoušky ve velkém procentu spolehlivosti a shodnosti parametrů. Jednotlivé fáze si v různých měřeních odpovídají jak v intenzitě tak časovém rozsahu.

Lze také identifikovat peak průniku indentoru do tělesa, následné průběhy plastických deformací i délku a intenzitu pohybu dislokací při relaxaci materiálu.

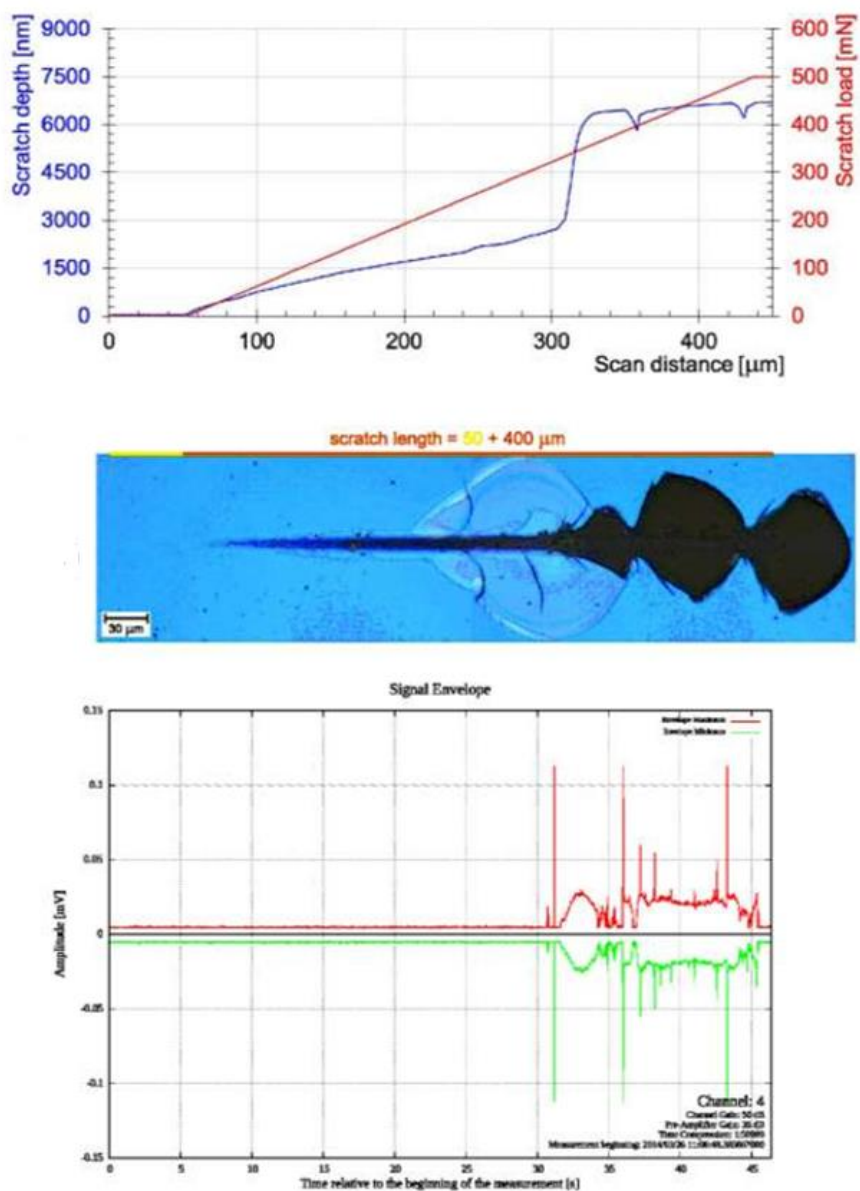
5.2 Faktor korelace výsledků souběžných měření

S velkou spolehlivostí jsme schopni opakovat výsledky primární normované zkoušky s definovaným budícím signálem (respektive s jeho intenzitou) a její nominální hodnotou. Tím pádem lze sledovat tyto podobnosti také u signálu AE na příslušných opakovaných měřeních.

5.2.1 Korelace vrypových zkoušek a AE

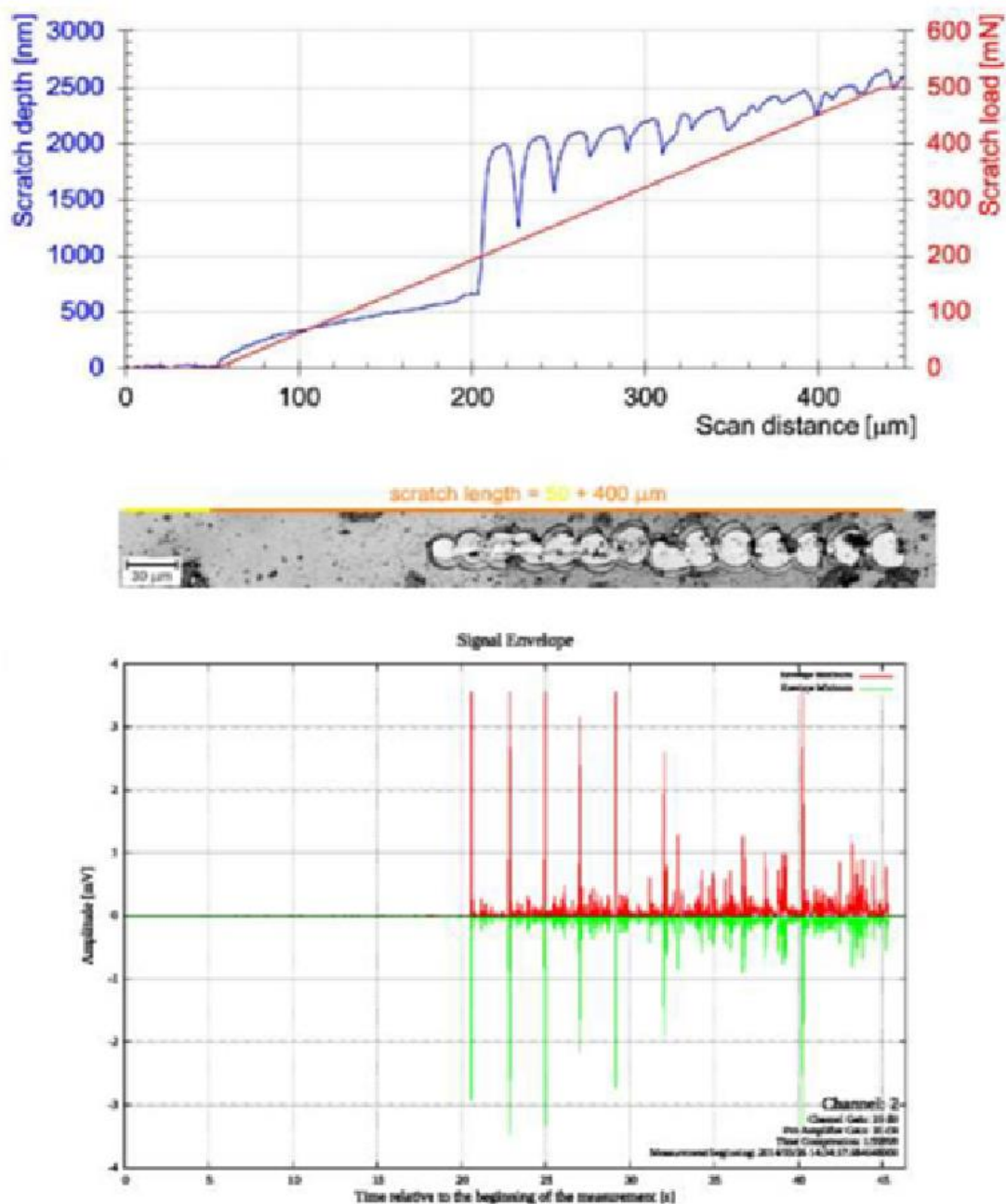
Příkladem této korelace vzhledem k povaze výsledků primární zkoušky jsou výsledky souběžného měření tvrdosti povlaků a signálu AE. Například v článku *Acoustic Emission Generated during Scratch Test of Various Thin Films* se nabízí ještě porovnání s mikrofotografiemi výsledného vrypu po provedení zkoušky tvrdosti vrypovou metodou. Lze tak jistým způsobem porovnávat data z aparatury měření tvrdosti (Hloubku vrypu, délku vrypu, tvrdost, modul pružnosti, zatížení) spolu s daty AE (amplitudu, počty a intenzitu hitů, časový průběh událostí) a výsledný tvarem vrypu zachyceným na mikrofotografii.

Na Obr. 4 můžeme vidět výsledky měkčího filmu DLM002 na bázi skelného substrátu o tvrdosti $H = 3.3 \pm 0.26$ GPa. Na datech z přístroje provádějícího test můžeme vidět korelaci mezi tvorbou trhlin (odštěpování filmu), jejich hloubkou a změnami amplitud signálu AE spolu s fyzickou podobou vrypu.



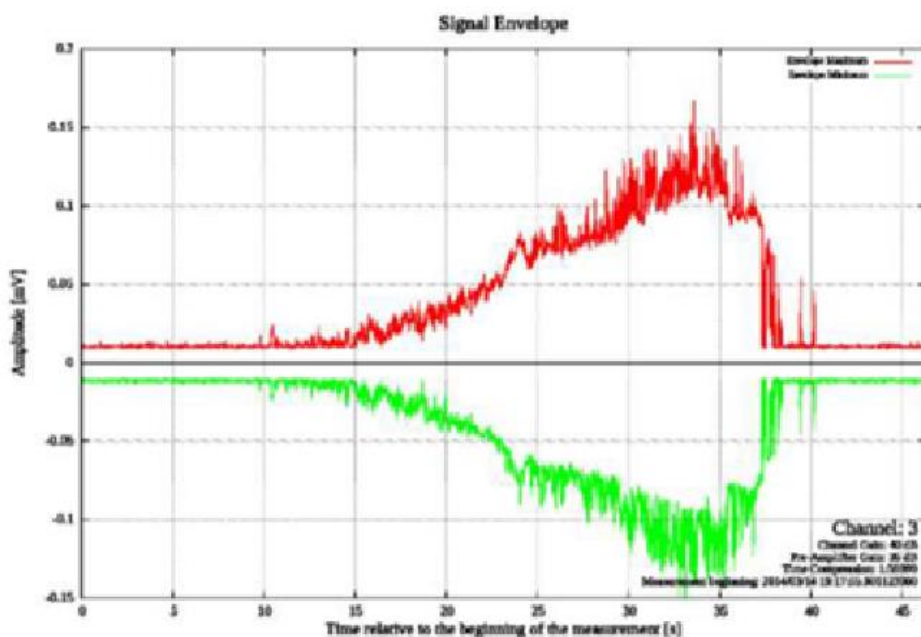
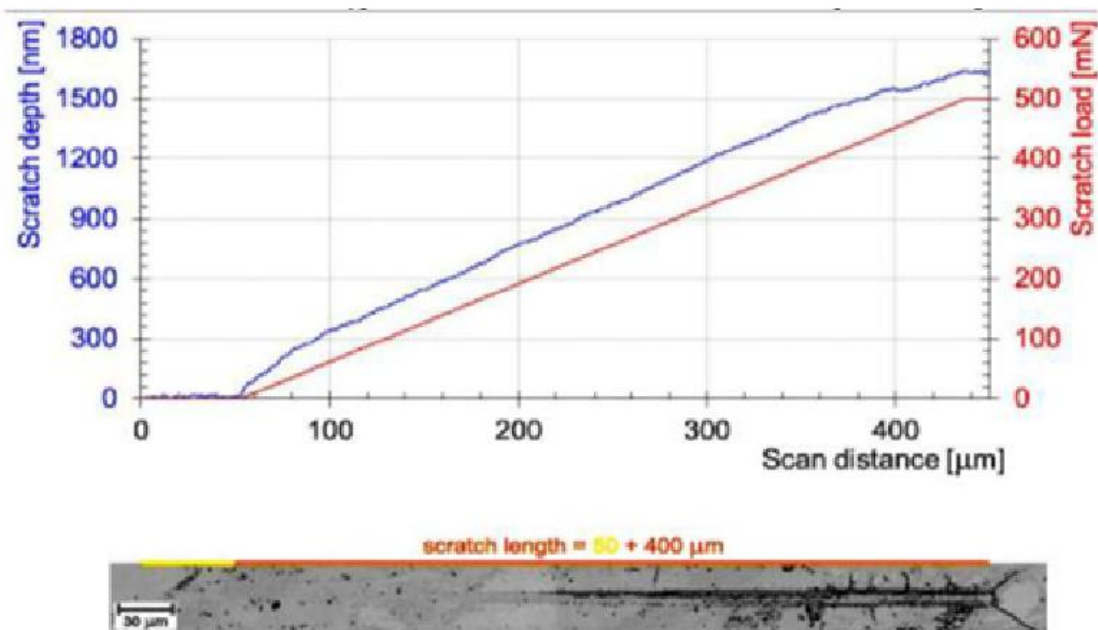
Obr. 9 Testování materiálu DML002 [1]

Na obrázku 5 vidíme výsledky filmu na bázi Si(111) substrátu o výsledné tvrdosti $H = 6.81 \pm 0.52$ GPa. S narůstající tvrdostí vidíme větší počet menších vrypů (prasklin) a jim odpovídající fyzický nález a zachycené události AE.



Obr. 10 Vzorek BHC 1139 [1]

Obrázek 6 zachycuje výsledek vrypové zkoušky chrom-oxidového filmu o tvrdosti $H = 11.72 \pm 0.94$ GPa, který si díky velké tvrdosti a modulu pružnosti ($E_r = 166.39 \pm 6.23$ GPa) zachoval velkou soudržnost při konstantně narůstající hloubce vrypu což vidíme také na záznamu AE opět kopírující měřený i fyzický výsledek zkoušky.



Obr. 11 Vzorek Cr7 [1]

Výsledky a průběhy se spolu s tvrdostí vzorků liší. Zatímco nejtvrdší a nejvíc elastický Cr 7 vykazuje elastický průběh deformace téměř po celé délce vrypu, někdy DML002 se plasticky deformuje velmi brzy a také ze povlak začne brzy ulamovat. Vzorek o střední tvrdosti Ti-C:H (bhc 1139) vykazuje elastickou deformaci pouze z počátku a poté po sobě špička a vzorek kloužou do zatížení 190 mN, kdy dojde k odlamování filmu.

Dle výsledků AE korelujících s mikrofotografiemi a výsledky z testeru můžeme označit tuto metodu za progresivní a mohla by v budoucnu odhalit více detailů ohledně probíhajících mechanických procesů při vrypových zkouškách tvrdosti. [1]

5.2.2 Korelace výsledků při měření tvrdosti dle HRC/AE

Pokud jsme schopni do systému (vzorku) dodat vždy stejnou energii (stejným mechanismem) měli bychom dostávat také podobný budící signál zaznamenaný AE na výstupu a také se změnou charakteru vstupní energie do vzorku (její transformací, disipací vlivem například rozdílné tvrdosti vzorku v různých oblastech) by se signál AE měl měnit.

V jistých případech, jsou-li dodrženy jisté parametry materiálu (struktura, tvrdost, tvar) lze sledovat velmi těsnou korelaci mezi jednotlivými měřeními, kdy se jednotlivá měření liší o 1-3 jednotek HRC a průměrná hodnota je vyšší jak asi 60 HRC. Na vzorcích o nižší tvrdosti se zatím nepodařilo naměřit významné hodnoty odezvy AE s opakovatelným a korelujícím průběhem. Toto je zřejmě způsobeno malou odolností proti vnikání indentoru a nízkou úrovní rozvoje plastických a elastických deformací.

5.3 AE jako zdroj informací o vlastnostech materiálu

Dochází-li k měření proměnných hodnot během měření tvrdosti mimo tolerovanou odchylku kalibraného přístroje, je možné že materiál je nehomogenní. To může být znamením nízké kvality vzorku a případných vad obsažených v materiálu.

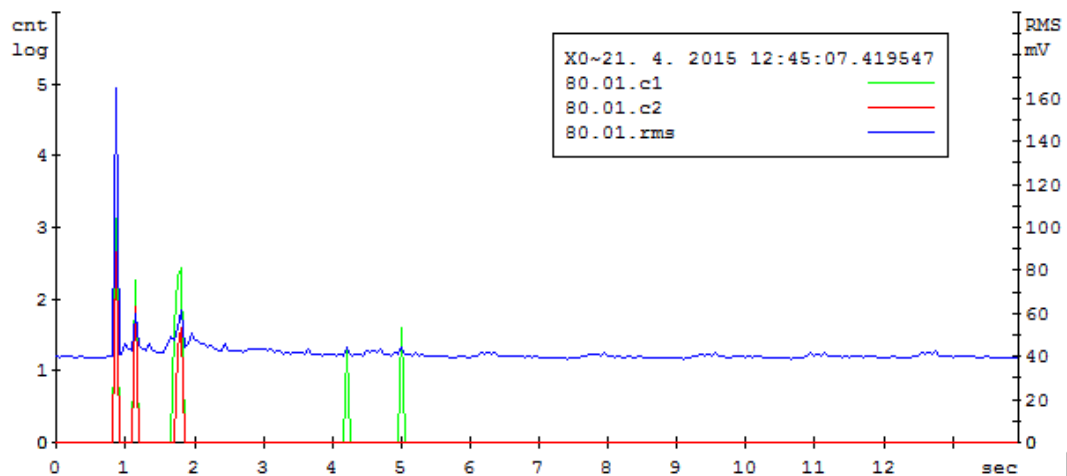
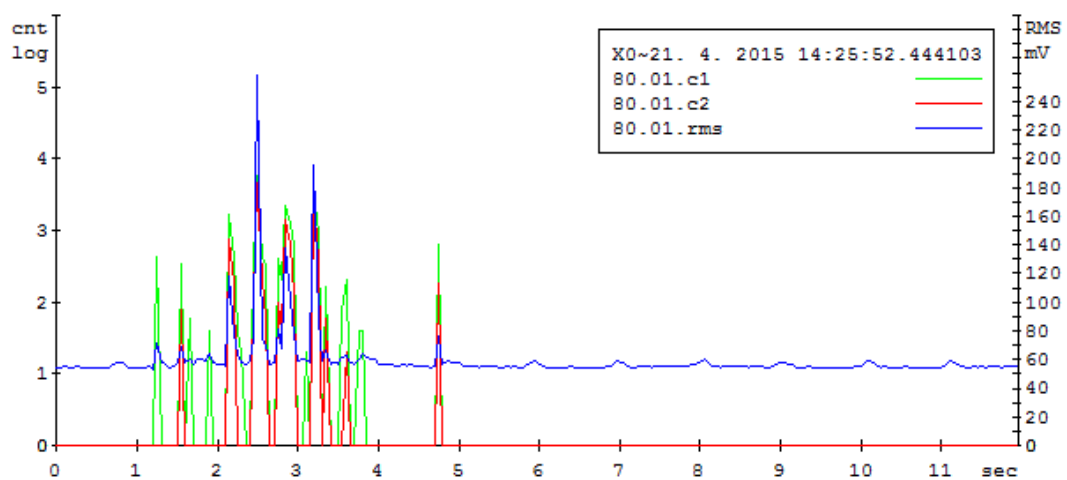
V opačném případě můžeme záměrně měřit nehomogenní vzorek, jako je tomu například u svařovaného kompozitu dvou materiálů. Máme potom kombinaci dvou materiálů, jejich a svar a případně tepelně ovlivněnou oblast, která se může lišit strukturou či tvrdostí. V případě základních materiálů je měření standartní, ale ve svaru, jeho a okolí a tepelně ovlivněné oblasti může docházet k rozličným přeměnám či defektům, které se projeví jak na měřené tvrdosti, tak na signálu AE, který pomůže lépe identifikovat povahu nehomogenit.

5.3.1 Odezva AE při měření tvrdosti svarků dle HRB

Zajímavým a progresivním způsobem se k tomuto tématu také postavili autoři ve svém článku *CORROSION RESISTANCE OF GALVANIZED STEEL IN THE*

ENVIRONMENT OF A BIO-REACTOR, kde se zajímá o odezvu AE při měření tvrdosti dle vnikací zkoušky HRB na svařenci hliníkové slitiny EN AW 7075 a galvanizované oceli DX51D. Jako přídatný materiál při svařování byl použit AlSi3.

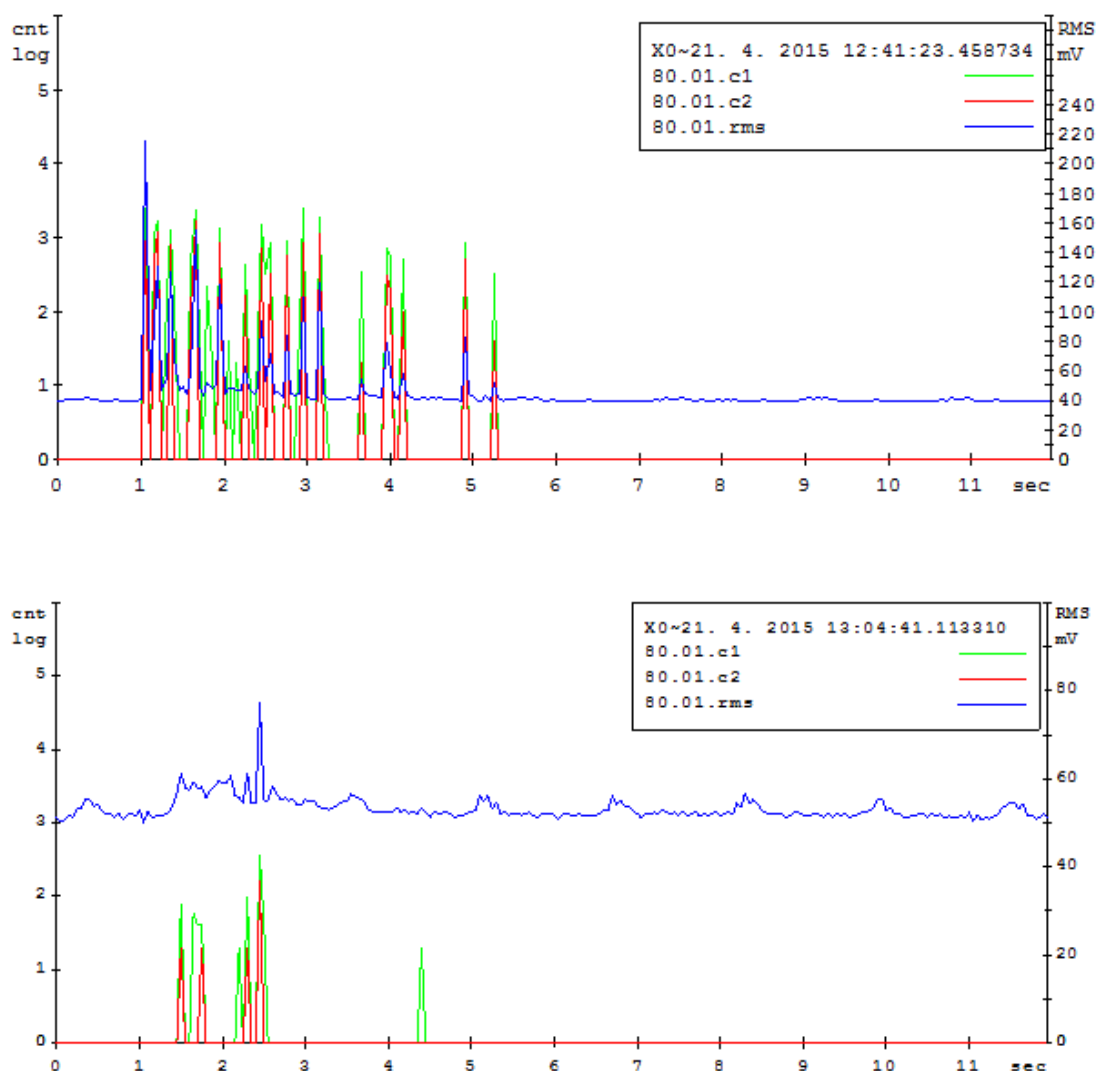
Cílem práce bylo především objasnit úroveň degradace materiálů při řízenému vystavení koroznímu prostředí v bio reaktoru a porovnat výsledky s původními vlastnostmi materiálu. Výsledky prokázaly jak pokles tvrdosti materiálu tak snížení intenzity signálu AE emitovaného během měření tvrdosti HRB. [9]



Obr. 12 Tvrdost a průběh AE před a po korozní degradaci [9]

Na obrázku 7 lze pozorovat jak se mění v čase tvrdost a odezva AE po korozním zatížením vzorku. Průměrná tvrdost se snížila o 7,8% a maximální hodnota RMS odezvy

AE klesla z 280 mV na 180 mV. Zde se tedy jedná o více jak třetinový rozdíl, který je patrně vidět v grafu spolu s nižším počtem detekovaných událostí.

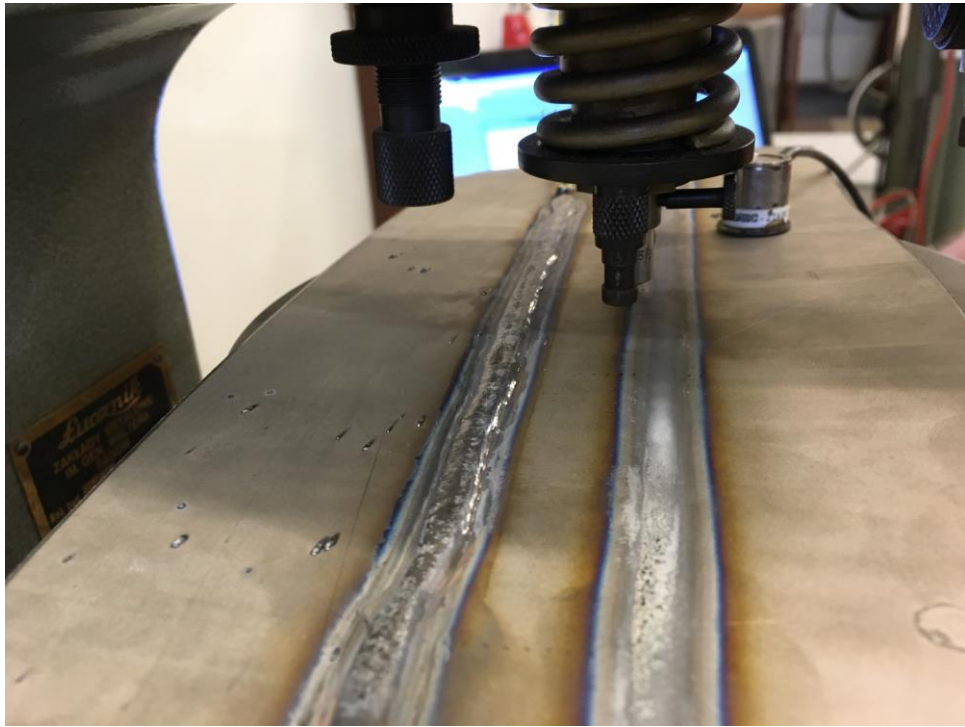


Obr. 13 Výsledek HRB/AE před a po degradaci materiálu DX51D [9]

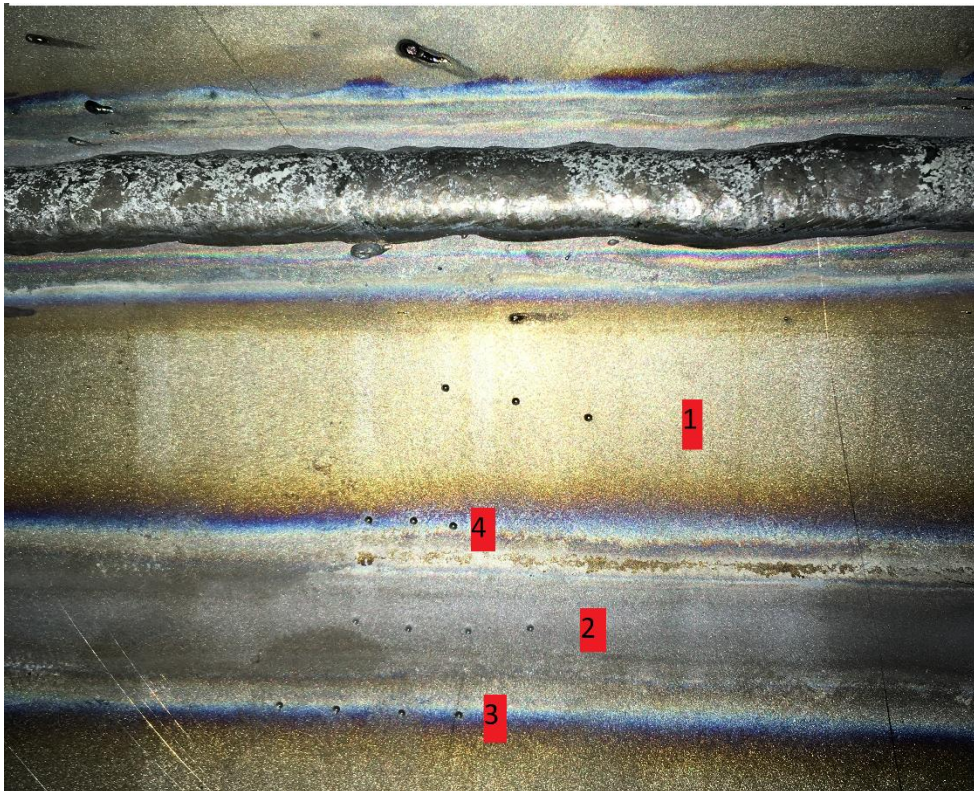
Obázek 8 ukazuje podobný trend na vzorku DX51D kde je pokles intenzity RMS ještě výraznější.

5.3.2 Odezva AE při měření tvrdosti HRC svarků

Na základě výsledků měření tvrdosti HRB měkkých svarků při současném sledování AE jsme přikročili k měření svarků titanových metodikou HRC.

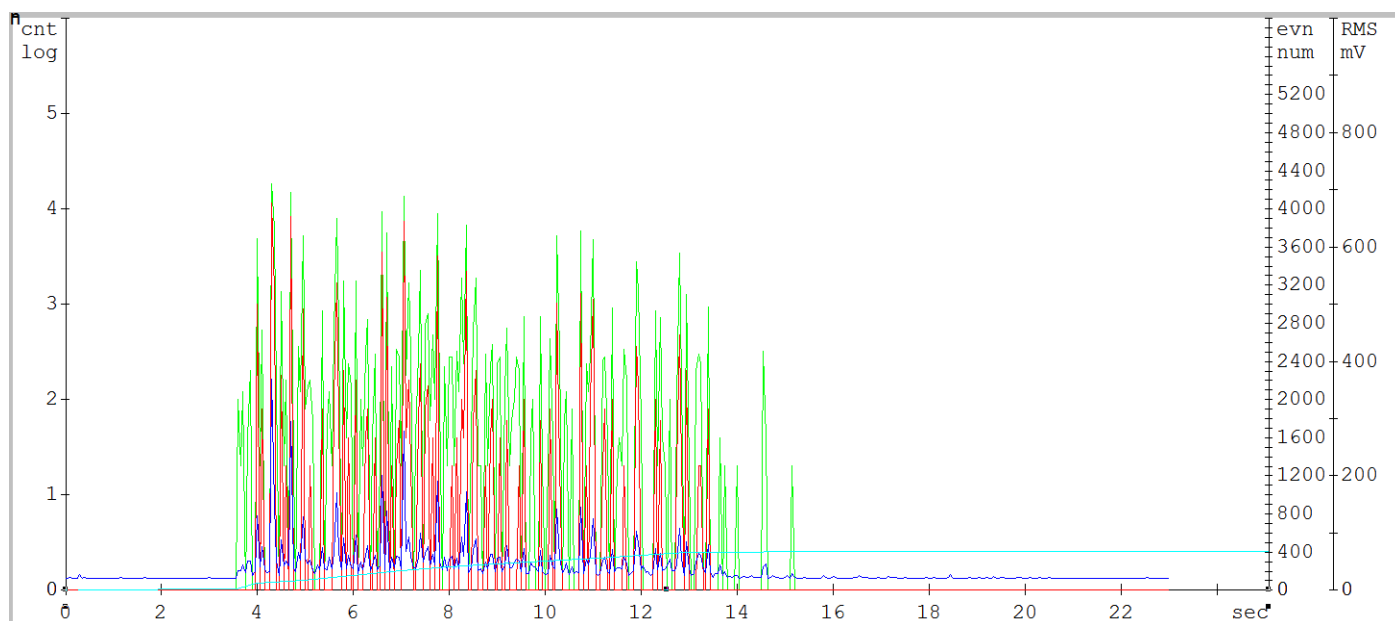


Obr. 14 Uspořádání měření titanového svarku [12]



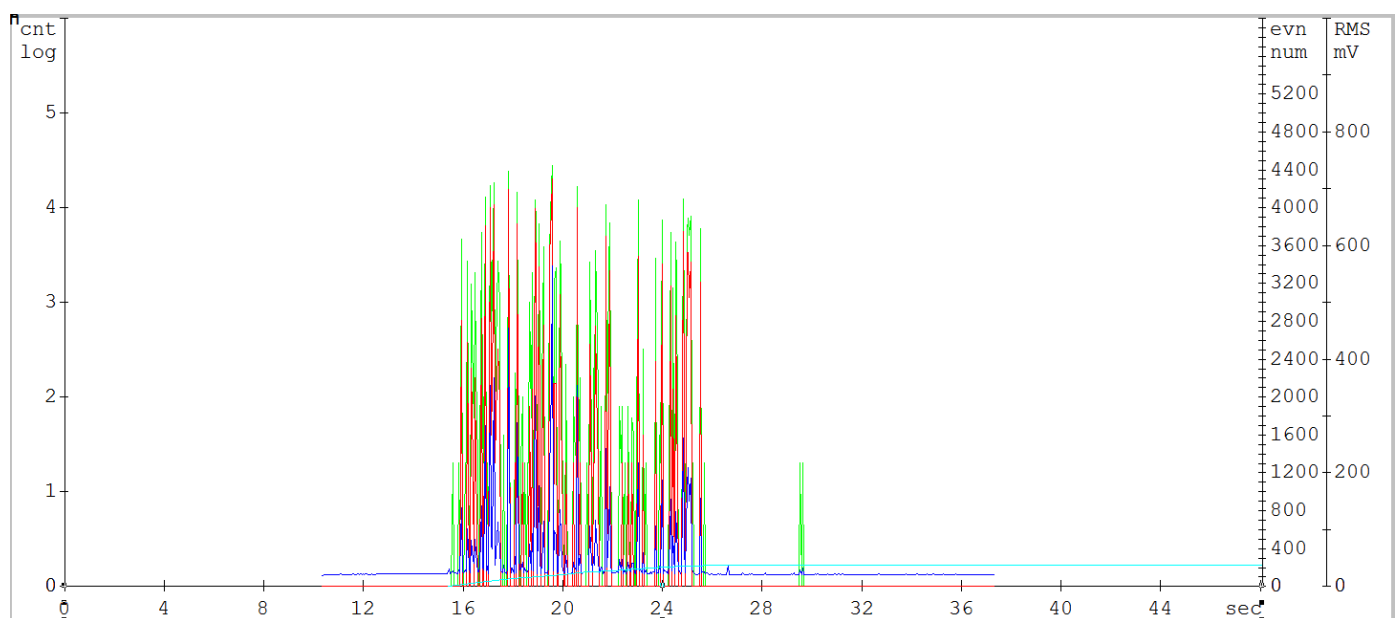
Obr. 15 Rozmístění vpichů na svarku [12]

1) Měření 1.- 3. (oblast mezi svary) – 59,57,56 HRC



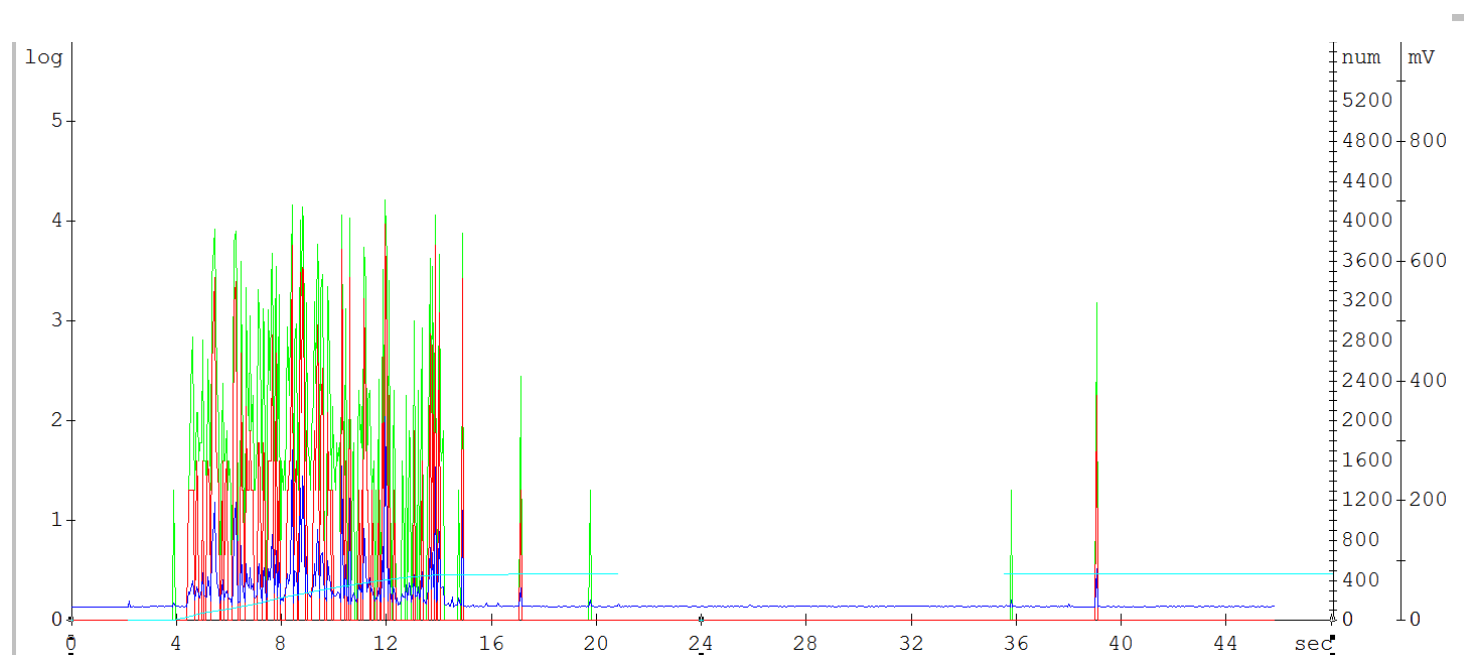
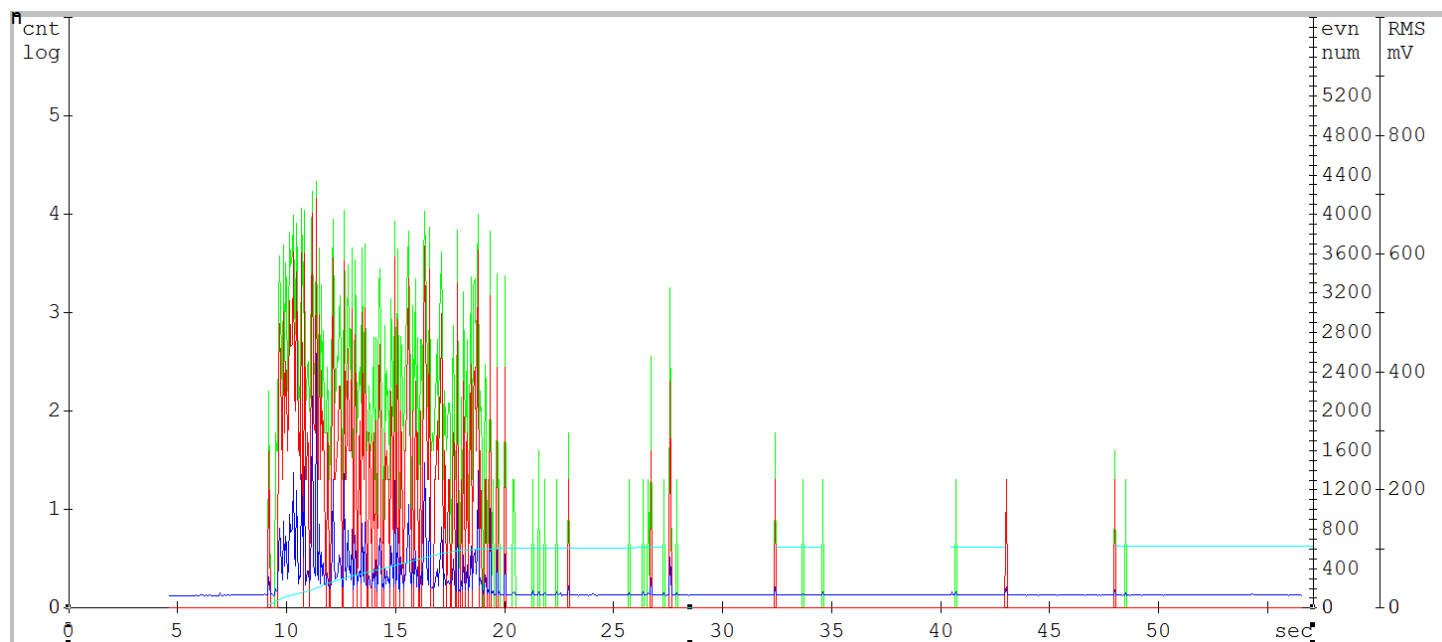
Obr. 16 Oblast mezi svary – 59 HRC [12]

2) Měření 4.-7. (střed svaru) – 58,57,50,54 HRC



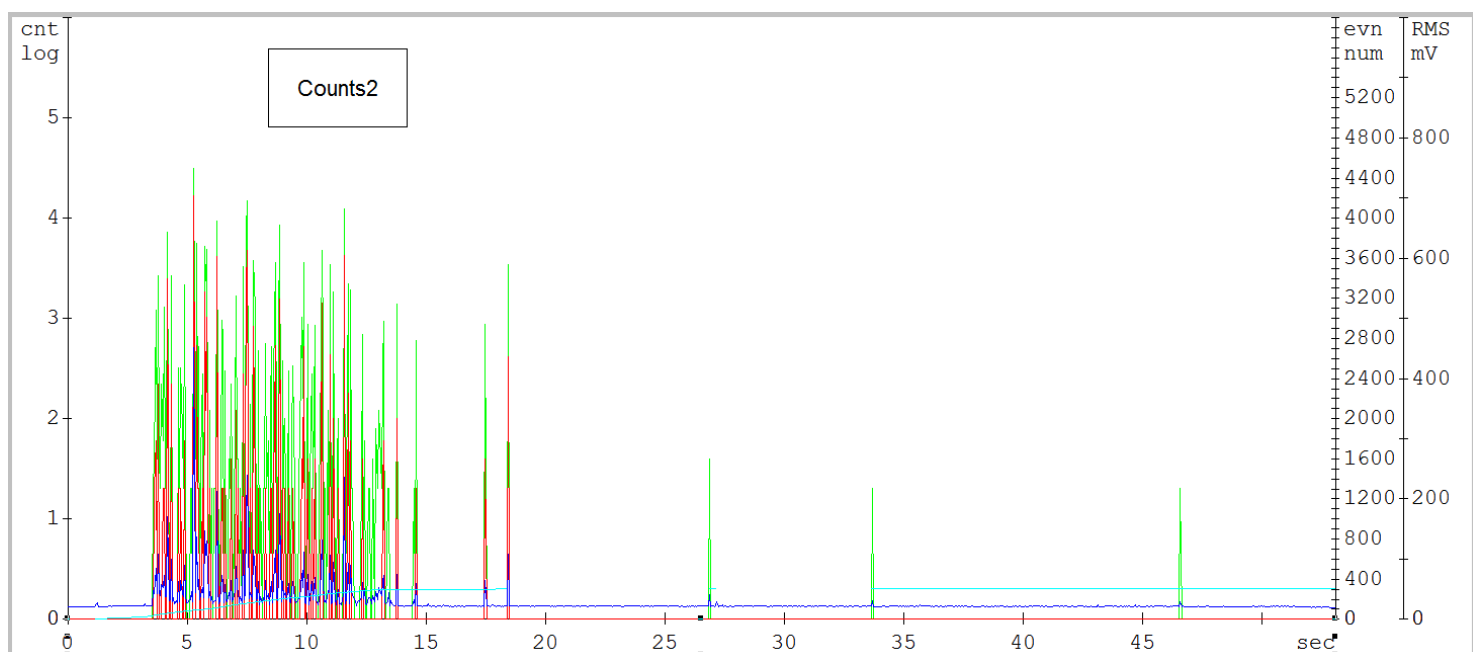
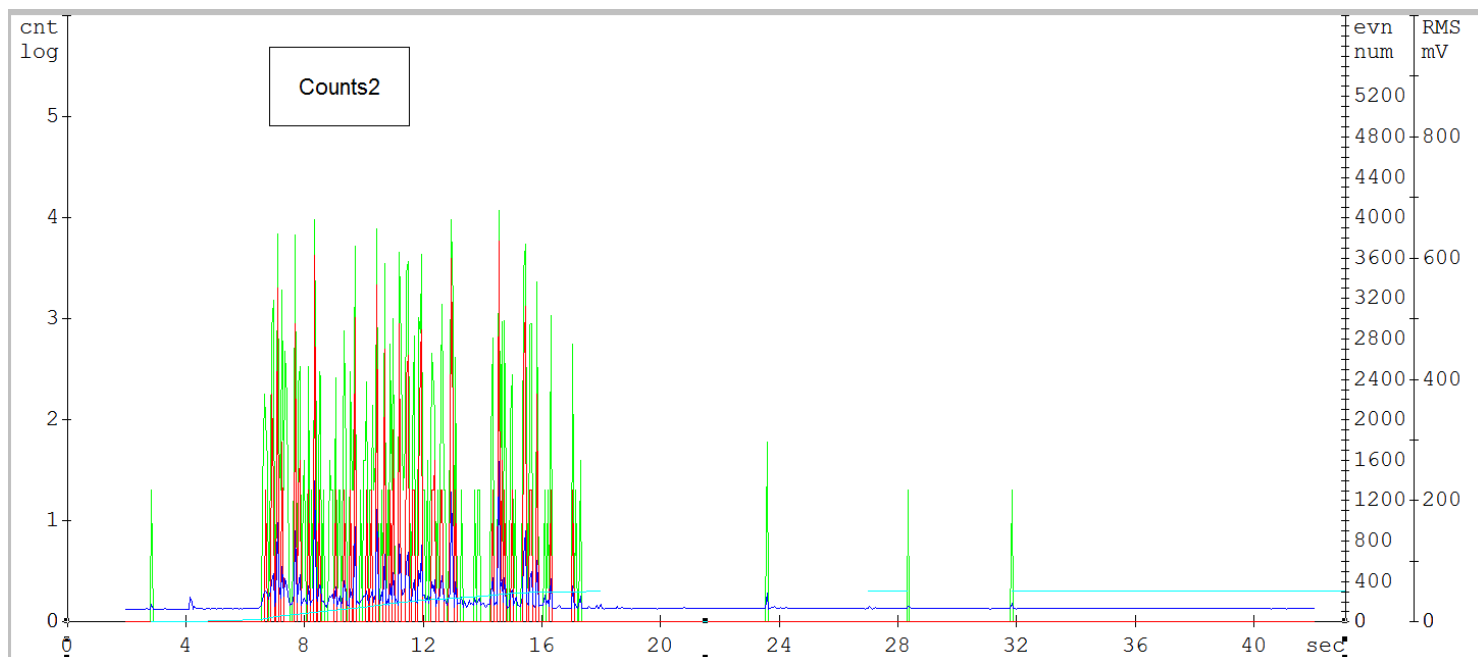
Obr. 17 Střed svaru – 58 HRC [12]

3) Měření 8.-11. (přechodová, teplotně ovlivněná oblast) – 65, 63,5, 64, 62,5 HRC



Obr. 18 Přechodová, teplotně ovlivněná oblast – 65 a 62,5 HRC [12]

4) Měření 12.-14. (přechodová, teplotně ovlivněná oblast 2) – 60, 61, 57,5 HRC



Obr. 19 Přechodová, teplotně ovlivněná oblast 61, 57,5 HRC [12]

Na obrázcích 16-19 jsou uvedeny vybrané záznamy AE s vyčíslením konkrétní hodnoty tvrdosti v uvedených oblastech svarku (viz Obr. 15).

6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ ODEZVY AE NA HRC

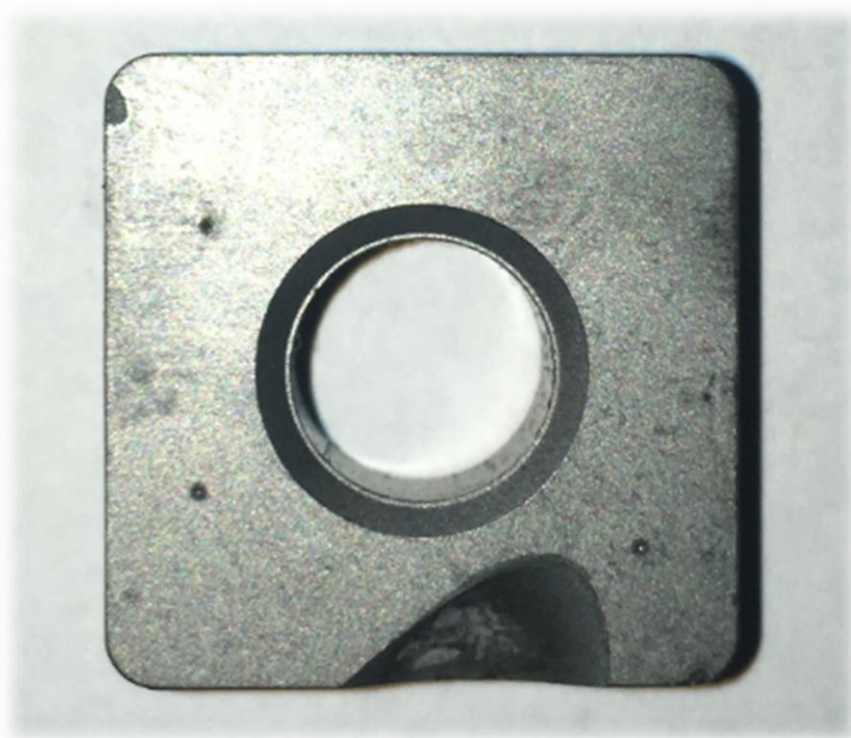
Praktická část přímo navazuje měření tvrdosti karbidů wolframu (WC) s označením H6 na pracovišti VUT FSI ÚK. Pro měření byl použit stejný tvrdoměr s platnou kalibrací a měřicí soustava DAKEL XEDO s MIDI/IDK snímači jako při vypracování bakalářské práce. Na této sestavě se podařilo dosáhnout v posledním měření nejlepších výsledků s velmi jasným rozlišením trendu RMS a počtu překmitů při velké míře opakovatelnosti výsledků. Výsledky se taktéž velmi podobaly iniciačním měřením provedenými na pracovišti MENDELU na jiném tvrdoměru se stejnou aparaturou AE (DAKEL XEDO) a na stejném vzorku WC H6.

Pro první měření byly zvoleny vzorky nepovlakovaných karbidových fréz od společnosti ARNO a to materiál K10F o složení 90% karbidu wolframu a 10% kobaltu a tvrdosti $H = 1730 \text{ HV30}$ což dle převodní tabulky odpovídá asi 73,4 HRC.

Tento materiál byl zvolen především kvůli známé specifikaci materiálu a jeho industrializovanému charakteru. Na již tvarovaných frézách s otvory pro upnutí a ostrými hranami však docházelo k problémům s uchycením snímače, stabilitou na měřicí ploše tvrdoměru a následně také odlamování křehkého materiálu.

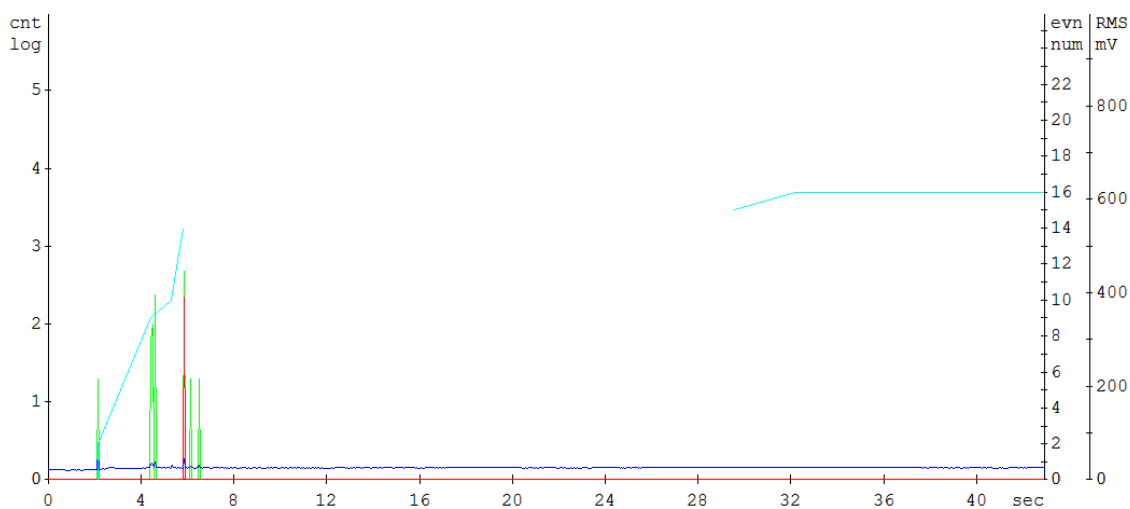
Tab. 3 Převodní tabulka tvrdostí [10]

Hardness Conversion Chart											
Approximate equivalent hardness numbers for carbon and alloy steels											
Rockwell				Rockwell Superficial			Brinell	Vickers	Knoop	Scleroscope	Approx. Tensile Strength of Steel (PSI)
A Scale 60kg Diam. Brale	B Scale 100kg 1/16" Ball	C Scale 150kg Diam. Brale	D Scale 100kg Diam. Brale	15N Scale 15kg Diam. Brale	30N Scale 30kg Diam. Brale	45N Scale 45kg Diam. Brale	3000kg 10 mm Ball		500g or Greater Load		
92	-	80.0	87	97	92	87	-	1865	-	-	-
92	-	79.0	86	-	92	87	-	1787	-	-	-
91	-	78.0	85	96	91	86	-	1710	-	-	-
91	-	77.0	84	-	91	85	-	1633	-	-	-



Obr. 20 Fréza ARNO K10F [12]

I když se povedlo zachovat během zkoušek tvar vzorku neporušený, tak nebyla odezva AE nijak významná a nebyly zřetelné žádné charakteristiky tvaru ani hodnot výsledků vzorků s tvrdostí nad 60 HRC. Tomuto výsledku byla přikládána za příčinu především geometrie vzorku, kdy velký kruhový otvor může ovlivňovat při relativně velkém objemovém poměru vůči masě vzorku šíření signálu AE.



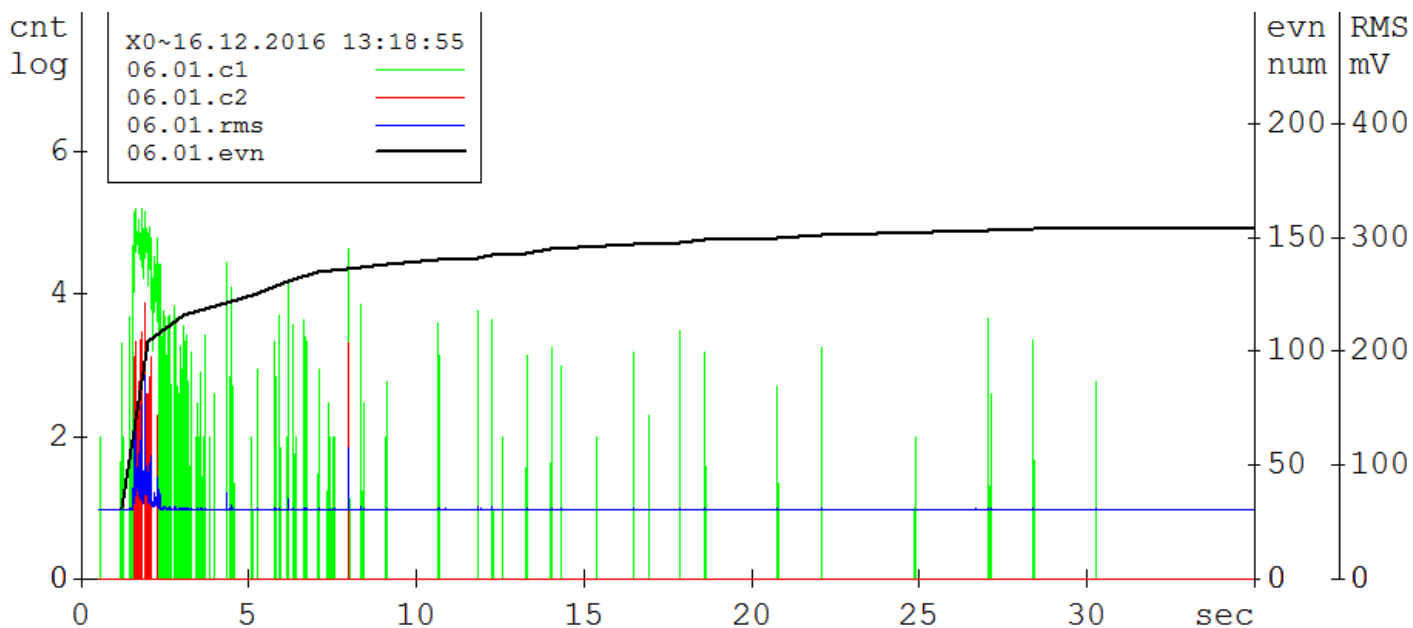
Obr. 21 Záznam AE na vzorku ARNO K10F [12]

Z důvodu podezření vlivu velikosti a geometrii vzorku byl měřen také monoblok surového materiálu K10F. Zde se podařilo lépe umístit snímače a provézt více měření bez poškození vzorku.



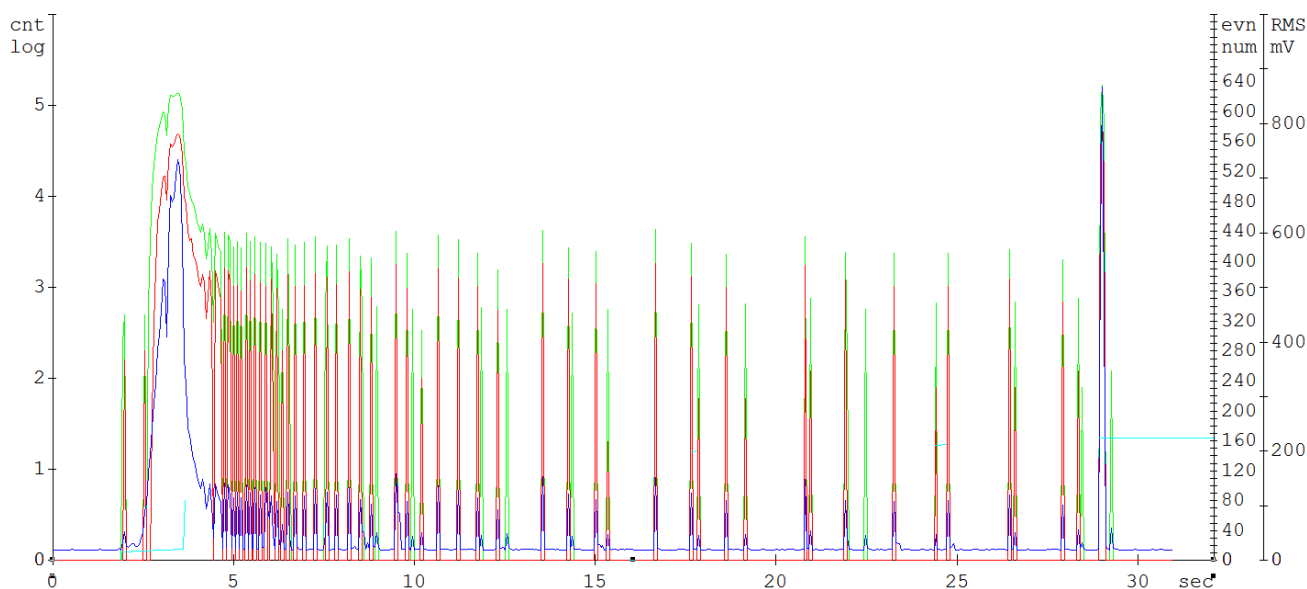
Obr. 22 Monoblok karbidu ARNO K10F [12]

Po provedení série několika měření na různých místech vzorku a při různém uchycení snímače se podařilo dosáhnout lepších výsledků z pohledu intenzity měřené akustické odezvy, avšak tvarem a celkovou intenzitou RMS se nepodobaly předchozím měřením karbidů wolframu.



Obr. 23 Výsledek měření odezvy AE vzorku karbidu ARNO K10F [12]

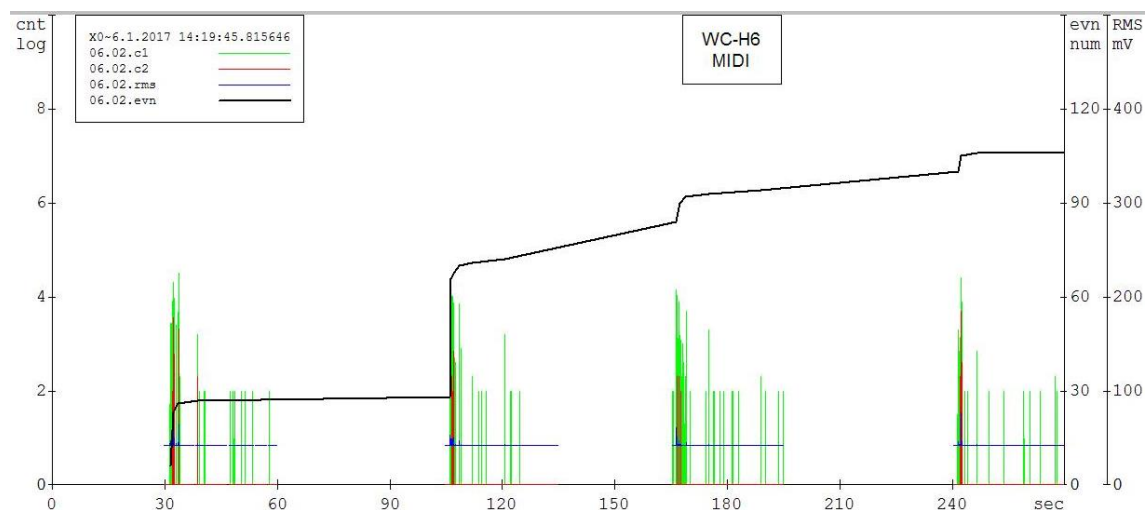
Vzhledem k tomuto vývoji a dosaženým výsledkům byl v další etapě opět měřen vzorek karbidu wolframu pod označením H6, který před dvěma lety na tomto pracovišti a aparatuře vykazoval velmi stabilní trendy intenzity a opakovatelnost měření. Ikdyž vezmeme jedno z původních měření, které korelovalo průměrně méně, tak počet událostí i hodnota RMS několikrát překračují v intenzitě měření na karbidech ARNO K10F.



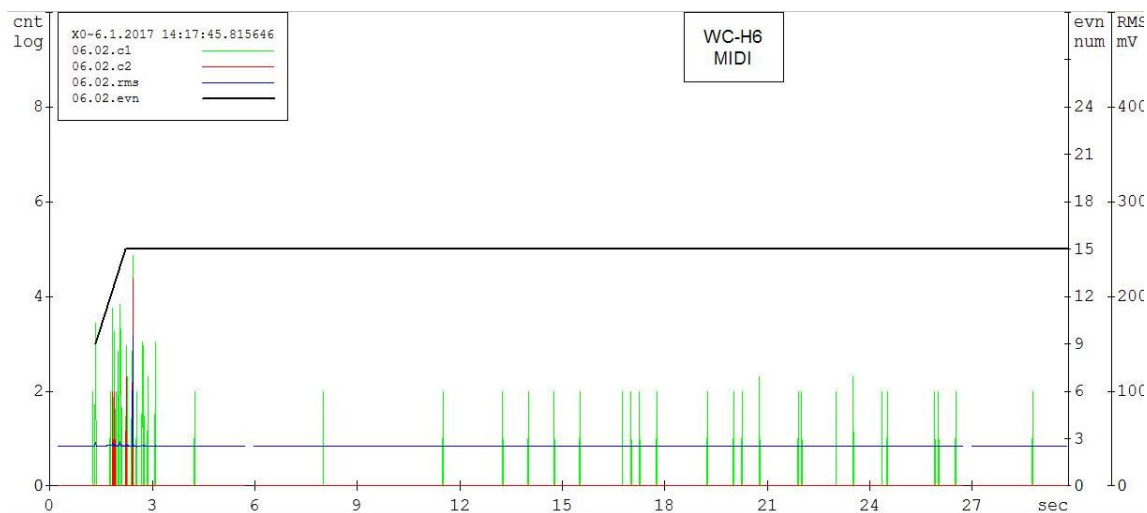
Obr. 24 Ukázka měření karbidu WC H6 2015 [12]

Zvláště výrazným prvkem těchto měření, které můžeme označit za významné je tvar maxima křivky v momentě průniku indentoru do vzorku, který strmě stoupá vzhůru, doprovázený zpravidla dvěma „V“ lokálními poklesy RMS před maximální hodnotou RMS jednotlivé události ohraničující proces vtačování indentoru do materiálu. Tento trend je možno sledovat u více měřených materiálů o tvrdosti přesahující 60 HRC a lze mu přiřadit korelující souslednost mikroplastických jevů doprovázejících vnikací zkoušky tvrdosti a následnými jevy jako ukotvování dislokací, které se také zpravidla při této iniciaci ve vysoké míře spolehlivosti dostaví a to opět u různých druhů materiálů přesahujících 60 HRC (karbidy, nástrojová ocel).

Při pokusu o opakované měření z roku 2015 na VUT FSI ÚK se vzorkem WC H6 však nedošlo k replikaci původních a ani podobných výsledků. Hodnoty countů i RMS byly nevýrazné a nevykazovaly ustálené trendy předchozích měření. Aparatura AE zaznamenala řádově nižší hodnoty RMS a také několikanásobně nižší hodnoty počtu událostí v souslednosti s jednotlivými měřeními tvrdosti.



Obr. 25 Přehled měření tvrdosti HRC na WC H6 [12]



Hodnota RMS byla řádově nižší bez významné amplitudy připisované energii

Obr. 26 Jednotlivé měření WC H6 dle HRC [12]

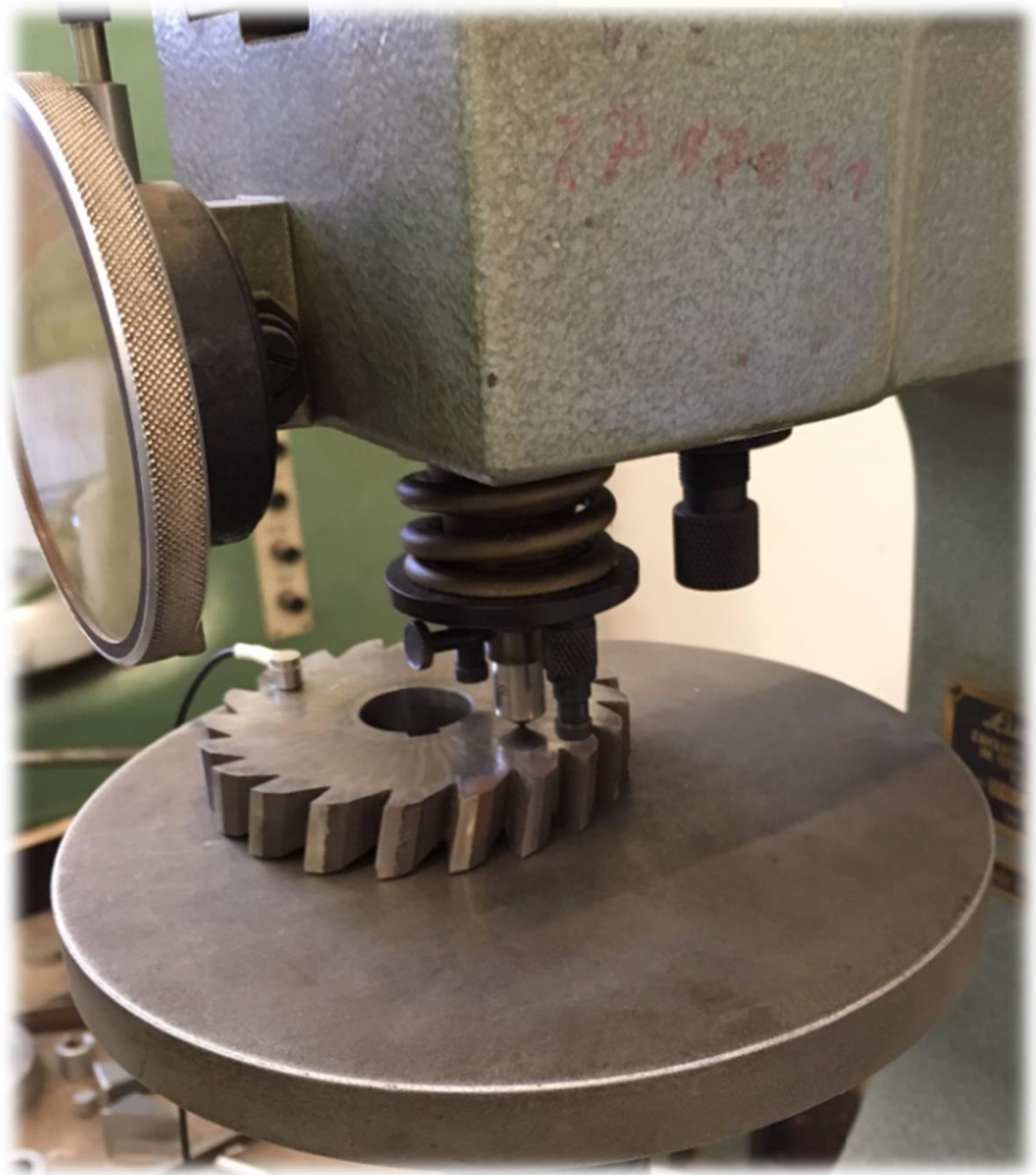
uvolněné plastickou deformací způsobenou vnikáním hrotu tvrdoměru do materiálu. Při měření bakalářské práce výsledky odpovídaly trendu, že čím tvrdší materiál (nad 60 HRC) tím silnější a spolehlivější odezva byla. Dalším charakteristickým rysem byl počet překmitů sledující jednotlivé události a jeho útlum. Tyto měřené události byly připisované pohybu dislokací a jejich postupnému slábnutí při relaxaci materiálu po zastavení vnikání indentoru. Ani tento jev nebyl při těchto navazujících měřeních znovu pozorován.

V návaznosti na měřené výsledky bylo variováno s podmínkami měření a jejich vlivem na rozličnost měřených výsledků. V první fázi jsme vyměnili snímače za nové bez znatelného zlepšení. Poté jsme zkusili jinou aparaturu včetně nejnovějšího modelu DAKEL ZEDO. Dále jsme se zabývali myšlenkou, zda nemůže být chyba v tvrdoměru. Tvrdoměr jsme rekalibrovali a průměrné výsledky tvrdosti během měření odpovídají předpokládané tvrdosti materiálu.

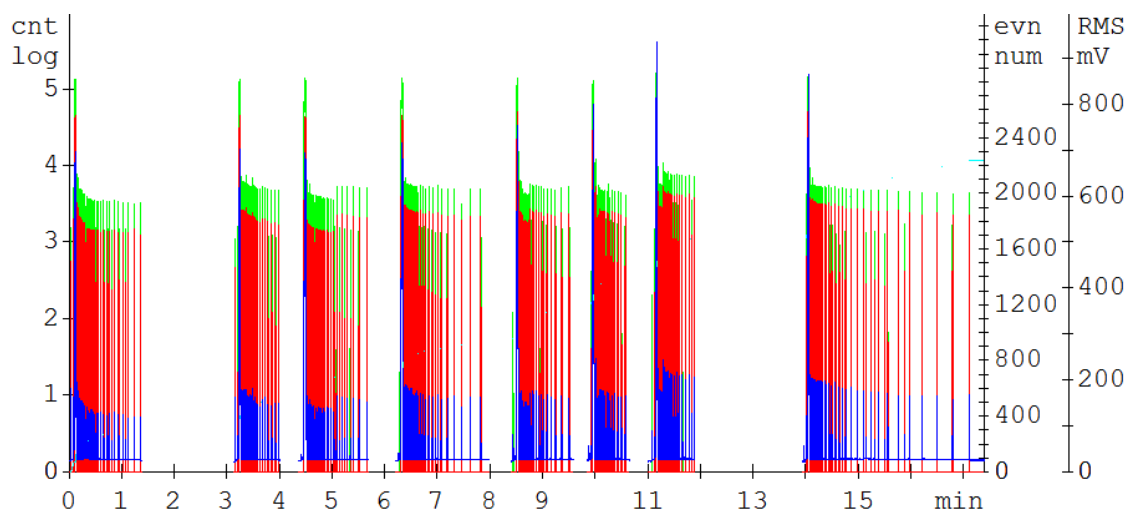
V dalším kroku jsme se tedy rozhodli měření přesunout zpět na pracoviště MENDELU UTAD, kde se povedlo již v minulosti první dobré výsledky naměřit. Ani zde ovšem odezva na měření karbidů neodpovídala původnímu měření a byla identicky slabá a nevýrazná jako na VUT FSI. Rozhodli jsme se ještě naměřit pro porovnání frézy z nástrojové oceli o průměrné tvrdosti 63 a 62 HRC a v tomto případě se podařilo zreplikovat dřívější úspěšné výsledky s očekávanými trendy.



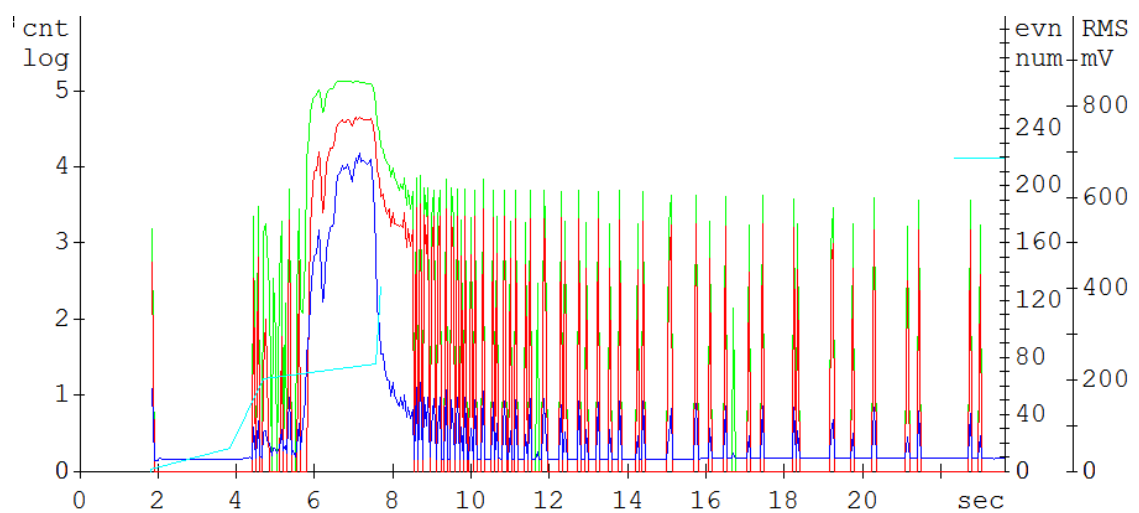
Obr. 27 Fréza 62 HRC [12]



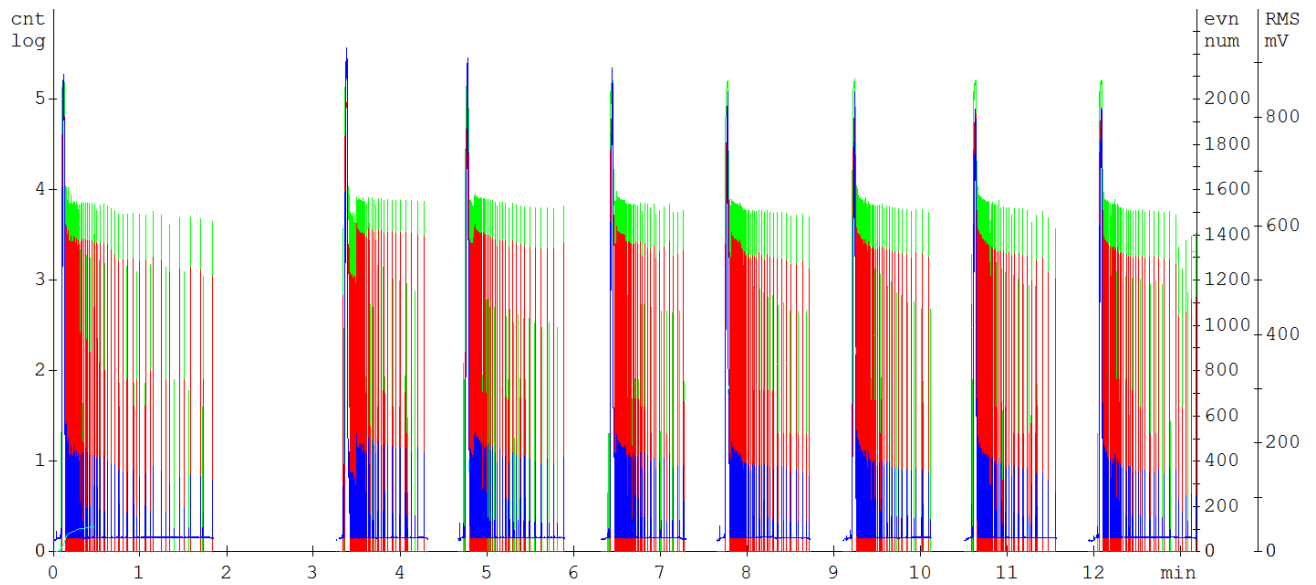
Obr. 28 Fréza 63 HRC [12]



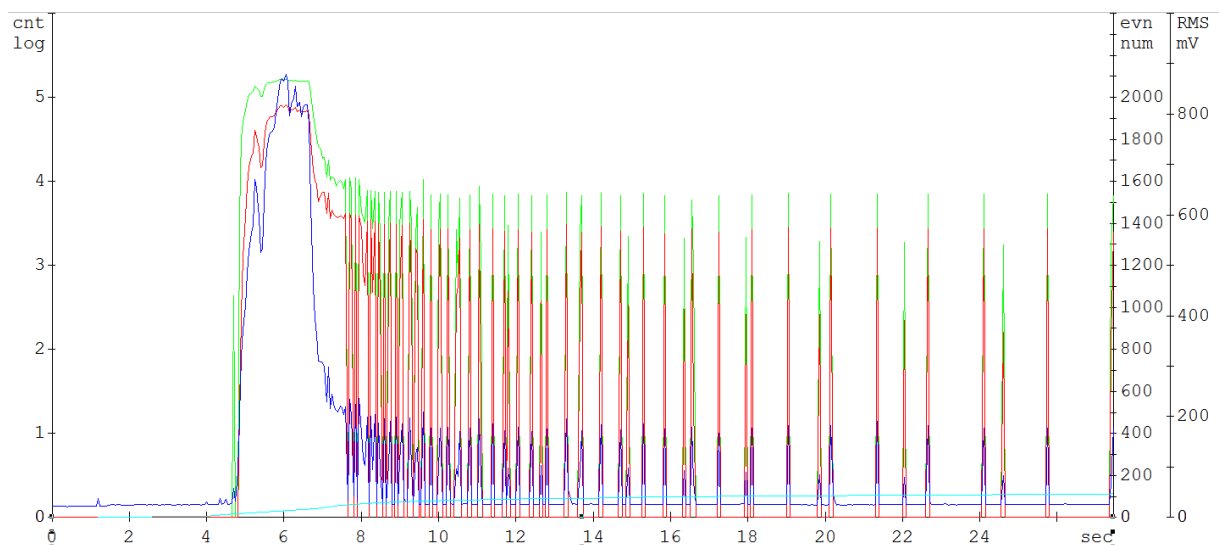
Obr. 29 Celkové měření frézy 62 HRC [12]



Obr. 30 Jednotlivé měření frézy 62 HRC [12]



Obr. 31 Fréza 63 HRC celkový záznam [12]



Obr. 32 První jednotlivý záznam frézy 63 HRC [12]

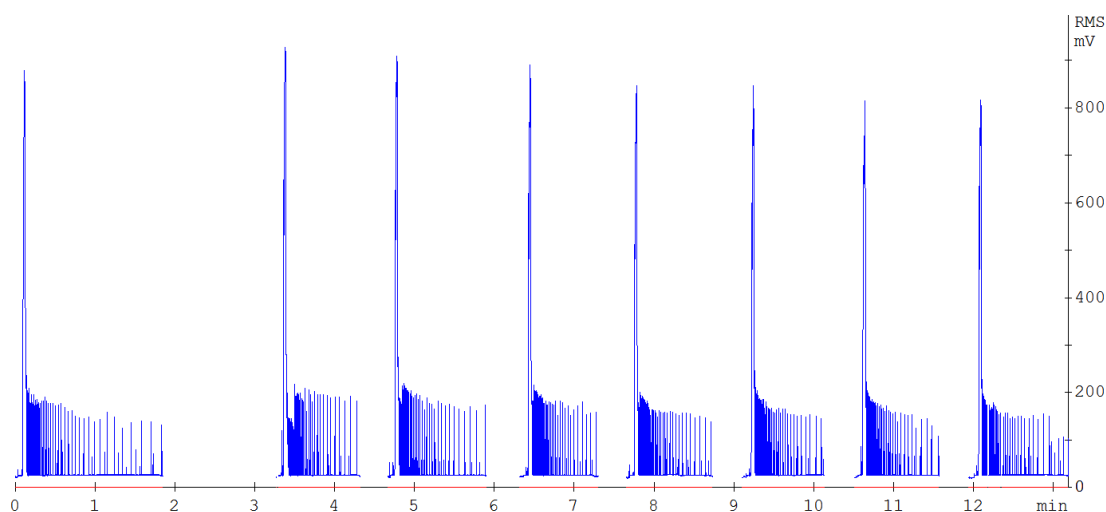
Nástrojová ocel frézy vykazovala výraznou amplitudu RMS s vrcholem v momentě vniknutí indentoru, velkým počet překmitů během celého měření a jeho postupným útlumem s velkou úrovní homogenity jednotlivých měření, jejich opakovatelnosti a spolehlivosti čili takovou, jako se povedla iniciovat v roce 2015 na vzorcích nástrojových ocelí a také wolframových karbidů.

Výše zveřejněný obrázek 30 znázorňuje typické uchycení snímače na vzorku přilepeného gelovým vteřinovým lepidlem s dobrou vazebnou funkcí pro kvalitní vedení zvukového signálu k piezoelektrickému snímači bez zkreslení či útlumu.

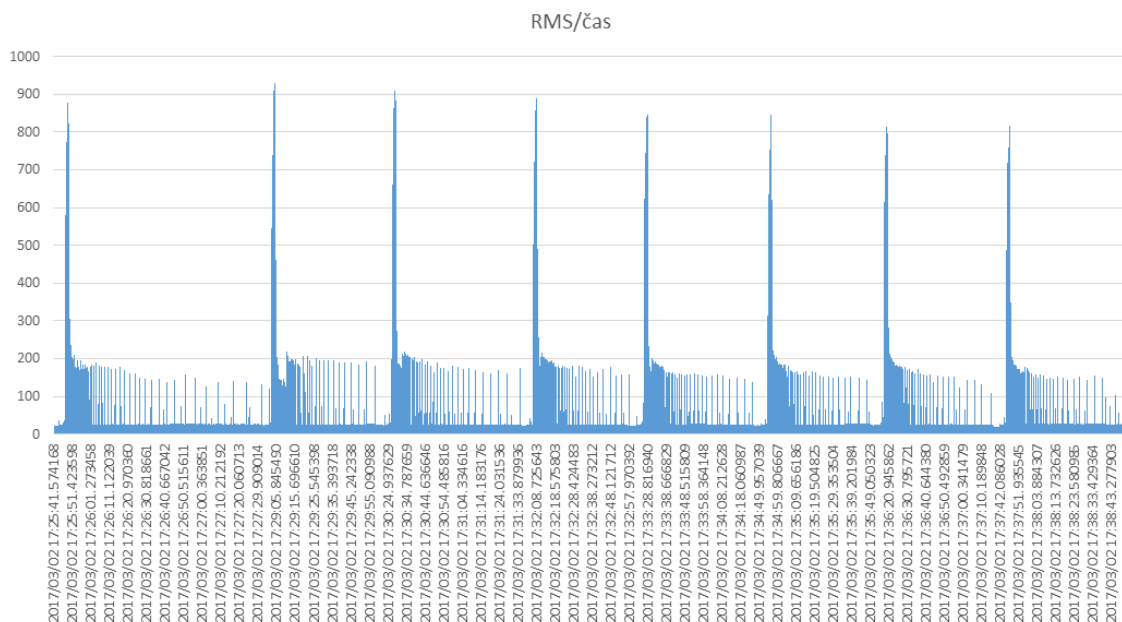
Následně jsme jednu frézu naměřili opět na VUT FSI a opět bez validní odezvy AE. Na základě tohoto měření proběhla ještě výměna hrotu tvrdoměru za starší hrot, na kterém byla provedena předchozí kladná měření. Ani toto měření se starším hrotem na materiálu frézy neukázalo validní výsledky srovnatelné s trendy měřenými dříve a na MENDELU.

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Po provedení opakovaných měření na rozličných vzorcích se tak podařilo ověřit podobnost mezi výsledky tvrdosti materiálu a signálu AE. Nejlepší výsledky se dají demonstrovat na vzorcích obráběcích fréz z nástrojových ocelí s tvrdostí 62-63 HRC. Pokud tedy například vybereme reprezentativní měření sedmi po sobě jdoucích vpichů indentoru a srovnáme jak měřenou tvrdost tak maximální hodnotu (peakovou) RMS jednotlivých zkoušek dostaneme následující výsledky a podobnost:



Obr. 33 Průběh RMS/čas vzorku fréza 63 HRC v Dakel Daemon [12]



Obr. 34 Průběh RMS/čas vzorku fréza 63 HRC v MS Excel [12]

Pokud se zaměříme na hodnotu lokálních maxim RMS a srovnáme s měřenou tvrdostí dostaneme následující výsledky:

Tab. 4 Výsledky měření RMS/HRC [12]

	1	2	3	4	5	6	7	\bar{X}	σ
Max. RMS (mV)	879,2	928,5	909,2	890,0	847,6	846,4	816,0	873,8	39,4
tvrdost (HRC)	63,2	63,1	62,8	63,0	62,5	63,0	62,7	62,9	0,2

Z průměrných hodnot tvrdosti, maximálních hodnot RMS a směrodatné odchylky je zřejmé, že se výsledky nachází v rozptylu 2σ a můžeme tak s vysokou spolehlivostí eliminovat hrubé chyby měření a potvrdit vhodnost této metodiky srovnání. Praktické měření a aplikování statistických metod hodnocení výsledků tak ukázaly, že s velkou spolehlivostí existují korelace mezi intenzitou signálu AE, tvarem grafické interpretace, lokálními maximy RMS a výsledků tvrdosti HRC kovových vzorků s tvrdostí vyšší jak 60 HRC.

U materiálu nástrojových ocelí můžeme obecně konstatovat homogenitu materiálu uvnitř i na povrchu vzorku, která může určovat významnost odezvy AE a její korelaci s měřenou tvrdostí narozdíl od karbidů wolframu, kde může charakter slinutého materiálu s pojivem ovlivňovat deformační odezvu a její šíření v materiálu.

Tvarové (geometické) vlivy se neukázaly být zásadní pro přenos a kvalitu měření signálu odezvy respektive i na tvarově složitých frézách s válcovým vybráním uprostřed byly naměřeny výsledky relevantní.

8 ZÁVĚR

Předložený diplomový projekt s názvem Verifikace souběžného měření odezvy plastické deformace byl zpracován na úrovni jak teoretické tak i v oblasti experimentální verifikace.

Kompilační část obsahuje nejen poznatky rozšiřující vědomosti o klasickém měření průnikové tvrdosti, ale je navíc doplněna statí o dalším možném způsobu měření tzv. vrypovou zkouškou. V této části jsou i posuzovány výsledky dosažené v pilotním projektu bakalářské práce Měření hloubky průniku indentoru s využitím deformační odezvy.

Na tyto výsledky navazuje i experimentální část práce, která přímo reaguje na cíl projektu, kterým mělo být stanovení korelačního vztahu mezi zjištěnou tvrdostí a záznamy AE. Základní vztah byl potvrzen s upozorněním na možnost neúplné realizace uvedené korelace. Objasnění tohoto faktu se stalo předmětem mnoha opakovaných měření jak na VUT FSI ÚK, tak na MENDELU ÚTAD v Brně.

Problematika byla konzultována s předními odborníky v oblasti měření AE v rámci skupiny ČNDT v Brně na VUT FAST i VUT FSI, kteří se následně zúčastnili ukázkového měření na MENDELU UTAD. Zvoleny byly měřeny karbidy ARNO K10F, a to bez zajímavější odezvy. Následné měření bylo provedeno i na fréze 63 HRC s korelujícím trendem. Diskutováno bylo nastavení aparatury (prahy, citlivost a zesílení) a jejich manipulace s nimi neměla zásadní vliv na výsledek. Dalším bodem hodnocení výsledků byl vliv hrotu, zda jeho otupení či deformace a deformace celé soustavy tvrdoměru při měření tvrdých karbidů nemůže měření zkreslovat. Jako doporučení pro další navazující experimentální měření bylo doporučeno umístit snímače také na podpůrnou plochu tvrdoměru a na tělo tvrdoměru, případně samotný hrot a sledovat výskyt dalších událostí AE během měření na těchto součástech. Další diskuze byla vedena ohledně možnosti degradace vzorků a zejména jejich povrchu v případě wolframových karbidů, které jsou jako materiál z hlediska mikrostruktury nehomogenní (spékání karbidů wolframu s kobaltovým pojivem). Vliv distorze vln nebyl prokázán.

Celkově lze zhodnotit přínos diplomové práce jako velmi významný v oblasti aplikace pro technickou praxi. Umožňuje po ověření přímou aplikaci AE při určení tvrdosti materiálu.

LITERATURA

- [1] BOHÁČ, Petr, Jan TOMAŠTÍK, Radim ČVRTLÍK, Martin DRÁB, Václav KOULA, Karel CVRK a Lubomír JASTŘABÍK. Acoustic Emission Generated during Scratch Test of Various Thin Films. , 8. DOI: e-Journal of Nondestructive Testing 19. Dostupné také z: http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/378_Boha-.pdf
- [2] KOPEC, B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. (Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [3] MACHEK, V.: Zpracování a zkoušení kovových materiálů. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8.
- [4] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2. Opravené a rozšířené vydání, Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] Dvořáček, J.: Vývoj nové generace zařízení s pokročilou diagnostikou pro stanovení kontaktní degradace. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s.
- [6] 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] 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
- [8] Zkoušky_tvrlosti [online]. 2005 [cit. 2010-02-10]. Dostupný z WWW: www.ateam.zcu.cz/Zkoušky_tvrlosti.pdf
- [9] ŠUSTR, Michal, Petr DOSTÁL a Jaroslav ZAČAL. Corrosion Resistance of Galvanized Steel in the Environment of a Bioreactor. ACTA [online]. 2016, **2016**(2) [cit. 2017-04-12]. DOI: 10.1515/ata-2016-0007. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/ata.2016.19.issue-2/ata-2016-0007/ata-2016-0007.pdf>
- [10] Hardness Conversion Chart. *NDT Resource Center* [online]. [cit. 2017-04-12]. Dostupné z:

<https://www.nde-ed.org/GeneralResources/HardnessConv/HardnessConvPrint.pdf>

[11] PÍŠTORA, Jan. Měření hloubky průniku indentoru s využitím deformační odezvy. Mendelova univerzita Brno, 2015. Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Černý, CSc.

[12] Archiv autora

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zkouška HB [7]	12
Obr. 2 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [7]	14
Obr. 3 Princip Rockwellovy zkoušky [7]	15
Obr. 4 Scratch test [8]	17
Obr. 5 R-vlna [5]	25
Obr. 6 Celkový průběh jednotlivé události vtisku HRC do WC (asi 74 HRC) [12]	31
Obr. 7 Detailní průběh odezvy měření nástrojové oceli (62 HRC) [12]	32
Obr. 8 Průběhy opakovaných měření nástrojové oceli (62 HRC) [12]	33
Obr. 9 Testování materiálu DML002	35
Obr. 10 Vzorek BHC 1139	36
Obr. 11 Vzorek Cr7	37
Obr. 12 Tvrdost a průběh AE před a po korozní degradaci [9]	39
Obr. 13 Výsledek HRB/AE před a po degradaci materiálu DX51D [9]	40
Obr. 14 Uspořádní měření titanového svarku [12]	41
Obr. 15 Rozmístění vpichů na svarku [12]	41
Obr. 16 Oblast mezi svary – 59 HRC [12]	42
Obr. 17 Střed svaru – 58 HRC [12]	42
Obr. 18 Přejížděvací, teplotně ovlivněná oblast – 65 a 62,5 HRC [12]	43
Obr. 19 Přejížděvací, teplotně ovlivněná oblast 61, 57,5 HRC [12]	44
Obr. 20 Fréza ARNO K10F [12]	46
Obr. 21 Záznam AE na vzorku ARNO K10F [12]	46
Obr. 22 Monoblok karbidu ARNO K10F [12]	47
Obr. 23 Výsledek měření odezvy AE vzorku karbidu ARNO K10F [12]	48
Obr. 24 Ukázka měření karbidu WC H6 2015 [12]	48
Obr. 25 Přehled měření tvrdosti HRC na WC H6 [12]	49

Obr. 26 Jednotlivé měření WC H6 dle HRC [12].....	50
Obr. 27 Celkové měření frézy 62 HRC [12].....	53
Obr. 28 Jednotlivé měření frézy 62 HRC [12].....	53
Obr. 29 Fréza 63 HRC celkový záznam [12].....	54
Obr. 30 První jednotlivý záznam frézy 63 HRC [12].....	54
Obr. 31 Fréza 63 HRC [12]	52
Obr. 32 Fréza 62 HRC [12]	51