

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje

Autor: **Bc. Václav KRATOCHVÍL**
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslava FULEMOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Václav KRATOCHVÍL
Osobní číslo:	S18N0041P
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie – technologie obrábění
Téma práce:	Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Teoretický rozbor řešené problematiky
3. Návrh a realizace experimentálního řešení
4. Vyhodnocení získaných dat
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- MM Průmyslové Spektrum, dostupné z www.mmspektrum.com
- Strojírenská technologie, dostupné z <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz/>
- SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z www.sandvik.coromant.com

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Kutlwašer, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Těmito řádky bych rád poděkoval vedoucí práce paní Ing. Jaroslavě Fulemové, Ph.D. za její čas, užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování mé diplomové práce, čehož si velmi vážím. Dále děkuji panu Ing. Janu Kutlwašerovi, Ph.D. za odbornou pomoc, zejména při práci s měřicí aparaturou, a panu Martinovi Škoulovi za precizní obsluhu obráběcího stroje během experimentu. V neposlední řadě děkuji celé své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi byli vždy oporou jak ve studiu, tak i v osobním životě. Děkuji.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kratochvíl	Jméno Václav		
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Fulemová, Ph.D.	Jméno Jaroslava		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	60	TEXTOVÁ ČÁST	32	GRAFICKÁ ČÁST	28
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zaměřuje na sledování závislosti signálu akustické emise na opotřebení řezného nástroje a dalších parametrech obrábění. V první části je věnována pozornost teorii a definicím z oblasti opotřebení břitu a akustické emise. Hlavní část práce se pak zabývá experimentem, kdy byl měřen signál akustické emise během obrábění, konkrétně během podélného soustružení vzorku. Výsledky práce prokázaly existenci vazby mezi signálem akustické emise a opotřebením břitu. Byla také zaznamenána závislost na dalších parametrech obrábění a byla rovněž nalezena určitá omezení této metody.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Akustická emise, signál, opotřebení břitu, obrábění, soustružení, monitorování, metoda AE</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kratochvíl	Name Václav	
FIELD OF STUDY	N2301 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Fulemová, Ph.D.	Name Jaroslava	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Study of acoustic emission signals in relation to tool wear		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	60	TEXT PART	32	GRAPHICAL PART	28
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this diploma thesis is the monitoring of dependencies of acoustic emission signal on tool wear and other individual cutting parameters. In the first section the thesis focuses on theory and definitions from the field of tool wear and acoustic emission. In the main part the thesis aims on experimental measuring of acoustic emission during machining, namely, turning of workpiece. The results proved the existence of dependence of the acoustic emission on tool wear and on other parameters and showed that there are also limitations of this method.
KEY WORDS	Acoustic emission, signal, tool wear, machining, turning, monitoring, AE method

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Popis
3D	Trojrozměrný
AE	Akustická emise (Acoustic Emission)
HB	Tvrdost podle Brinella
HRC	Tvrdost podle Rockwella
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizace
KTO	Katedra technologie obrábění
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	Hloubka řezu
D	[mm]	Průměr
f_{ot}	[mm/ot]	Otáčkový posuv
h	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy
KB	[mm]	Šířka žlabu
KF	[mm]	Vzdálenost žlabu od ostří
KM	[mm]	Střední vzdálenost žlabu od ostří
KT	[mm]	Hloubka žlabu na čele
n	[ot/min]	Otáčky
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
RMS	[mV]	Efektivní hodnota signálu AE (Root Mean Square)
r_N	[μ m]	Poloměr zaoblení ostří
T	[min]	Trvanlivost
VB	[mm]	Opotřebení na hřbetě
VB _B	[mm]	Opotřebení na hřbetě v oblasti ostří
VB _C	[mm]	Opotřebení na hřbetě v oblasti špičky
VB _N	[mm]	Opotřebení na hřbetě v oblasti vrubu
VB _{krit}	[mm]	Kriteriální opotřebení hřbetu
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Posuvová rychlost

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce.....	2
3 Teorie opotřebení bříty.....	3
3.1 Formy opotřebení.....	3
3.1.1 Klasifikace typů opotřebení.....	3
3.2 Mechanismy opotřebení.....	7
3.2.1 Opotřebení otěrem.....	8
3.2.2 Opotřebení plastickou deformací.....	10
3.2.3 Opotřebení křehkým lomem.....	11
3.3 Monitorování opotřebení.....	11
3.4 Přímé metody.....	12
3.5 Nepřímé metody.....	14
4 Teorie akustické emise.....	17
4.1 Základní charakteristika akustické emise.....	17
4.2 Signál akustické emise.....	19
4.2.1 Spojitá a nespojitá akustická emise.....	20
4.2.2 Kaiserův jev a Felicity efekt.....	23
4.3 Zdroje akustické emise.....	23
4.4 Akustická emise při procesu obrábění.....	24
4.5 Využití akustické emise.....	26
4.6 Snímače akustické emise.....	29
5 Dostupné práce o akustické emisi při obrábění.....	31
5.1 Čelní frézování obrobku z šedé litiny.....	31
5.2 Vliv změny geometrie obráběcího nástroje.....	32
5.3 Využití AE při hodnocení procesu obrábění.....	33
5.4 Diskuze.....	33
6 Experimentální část.....	34
6.1 Metodika měření.....	34
6.2 Obráběcí stroj.....	36
6.3 Nástroj.....	37
6.3.1 Soustružnický nůž.....	37
6.3.2 Vyměnitelná břitová destička.....	38
6.4 Obráběný vzorek.....	39
6.5 Aparatura pro měření AE.....	40

6.5.1 Snímač.....	40
6.5.2 AE-Coupler.....	41
6.5.3 DAQ Box.....	41
6.5.4 DynoWare.....	42
6.6 Digitální mikroskop.....	43
6.7 Zpracování získaných dat.....	44
6.7.1 Naměřené hodnoty.....	46
6.8 Diskuze a vyhodnocení získaných dat.....	47
6.8.1 AE ve vztahu k opotřebení bříty.....	47
6.8.2 Vliv tvaru odcházející třísky.....	50
6.8.3 Použití řezné kapaliny.....	53
6.8.4 Vliv řezné rychlosti.....	54
6.8.5 Rušivé vlivy.....	55
6.8.6 Trvanlivost bříty.....	56
7 Závěr.....	58
8 Seznam použité literatury.....	59

1 Úvod

Obrábění, jakožto technologický proces, představuje již po dlouhou dobu nezastupitelnou úlohu v průmyslu, zejména v tom strojírenském, kde tvoří i více jak polovinu hodnoty výrobků. Rostoucí nároky na kvalitu, přesnost, produktivitu výroby a také vznik nových konstrukčních materiálů, které se často vyznačují špatnou obrobitelností, sebou nesou také potřebu neustále zvyšovat technickou vyspělost v této oblasti a ustavičně zlepšovat podmínky pro uskutečnění tohoto procesu a dosažení cíle.

Cílem výrobce bylo, je a vždy bude nabytí co nejvyššího zisku, ke kterému je možné dojít několika způsoby, zejména pak zvýšením efektivity výroby, což znamená zkrácením doby jejího trvání a snížením jejích nákladů. Toho lze při obrábění dosáhnout z velké části volbou vhodného řezného nástroje, obzvláště pak jeho správným využitím, aby byl co nejvíce zužitkovan jeho potenciál a bylo dosaženo maximální efektivity.

U řezného nástroje dochází během obrábění ke změnám kvůli silové a tepelné interakci s obráběným materiálem. Vedle povrchových změn jsou podstatné také změny tvaru břitu, které značně ovlivňují přesnost a jakost obrobeného povrchu. Pro dosažení těchto vlastností povrchu a také zajištění spolehlivé funkce nástroje bez nebezpečí jeho úplného selhání je potřeba mít řezný proces pod kontrolou a vědět, kdy nástroj dosáhl své trvanlivosti a je již nutné jej vyměnit nebo přestříhat.

Určit otupení břitu a stanovit, kdy je nástroj již nevhodný k použití, lze několika způsoby. Existují přímé metody měření opotřebení, které jsou velmi přesné, avšak vyžadují většinou přerušování řezného procesu a zkoumání břitu mimo obráběcí stroj například pomocí dílenského mikroskopu. S ohledem na vysokou produktivitu a efektivnost procesu jsou vhodnější nepřímé metody měření, které vycházejí z analýzy průvodních jevů, které se s opotřebením břitu vyvíjejí.

Jedním z těchto průvodních jevů je právě akustická emise, jejíž signál je možné zaznamenat pomocí měřicí aparatury, která je pro tuto potřebu určena. Na základě analýzy získaných hodnot pak lze určit stav otupení břitu i během provozu obráběcího stroje. V případě propracovaného monitorovacího systému pak mohou být dokonce takto získaná data bezprostředně odeslána zpět do obráběcího stroje, který na ně může reagovat úpravou řezných podmínek nebo okamžitou výměnou řezného nástroje, což může vést ke snížení nákladů spojených se zmetkovitostí, zvýšení produktivity a kvality obráběných dílů a částečně lze i eliminovat nebezpečí úplného selhání řezného nástroje. Proto má smysl zabývat se studiem signálu akustické emise ve vztahu k opotřebením řezného nástroje.

2 Cíl práce

Cíl této diplomové práce je možné rozdělit na dvě hlavní části. První by se měla zabývat spíše teoretickou oblastí dané problematiky, což je teorie opotřebení břitu a teorie akustické emise. Ta poslouží jako základ pro praktickou část, což je realizace experimentu, protože bez pochopení základních pojmů a principů problematiky lze experiment provést jen stěží. Jak bylo zmíněno, druhou a možná i hlavní částí této práce je experiment, konkrétně série měření, které by měly, mimo jiné, dokázat existenci vazby mezi opotřebením břitu a signálem akustické emise.

V teorii opotřebení břitu by měly být, kromě jeho samotné definice, popsány také všechny formy opotřebení rezného nástroje, jejich klasifikace a kritéria, pomocí kterých lze míru otupení určit, protože měření některých těchto parametrů bude důležitá část experimentální činnosti. Je také vhodné uvést, jak jednotlivé druhy otupení vznikají, jaké mechanismy stojí za jejich zrodem a pomocí jakých metod lze formu a míru otupení monitorovat.

Co se teorie akustické emise týče, lze opodstatněně tvrdit, že se jedná o obecně méně známou problematiku, než tomu bylo v případě otupení břitu, proto by zde měl být kladen důraz a úplné základy a toto téma by mělo být zpracováno o něco podrobněji. Samozřejmostí by měly být definice pojmů z oblasti akustické emise a charakteristika signálu akustické emise a hodnoty, které z něj lze získat. Dále je důležité uvést, jak akustická emise vzniká a to jak obecně, tak i konkrétně při procesu obrábění. Nakonec bude popsán způsob měření signálu akustické emise a také výhody a nevýhody jejího využití.

Cílem praktické části je naplánování a zejména realizace experimentu, který bude zaměřen na hledání vazby mezi opotřebením břitu a signálem akustické emise. Především je potřeba zvolit metodu obrábění, při níž bude měření signálu AE probíhat. Od vybrané metody se pak bude odvíjet rezný nástroj, obráběný materiál, respektive samotný zkušební vzorek, a neméně důležitá je i volba obráběcího stroje, na kterém bude měření probíhat. Protože je na Katedře technologie obrábění k dispozici poměrně moderní aparatura pro měření akustické emise, bude možné signál AE zaznamenávat a měřit jeho určité parametry. Také je na KTO k dispozici digitální dílenský mikroskop, pomocí kterého bude monitorována míra otupení rezného nástroje.

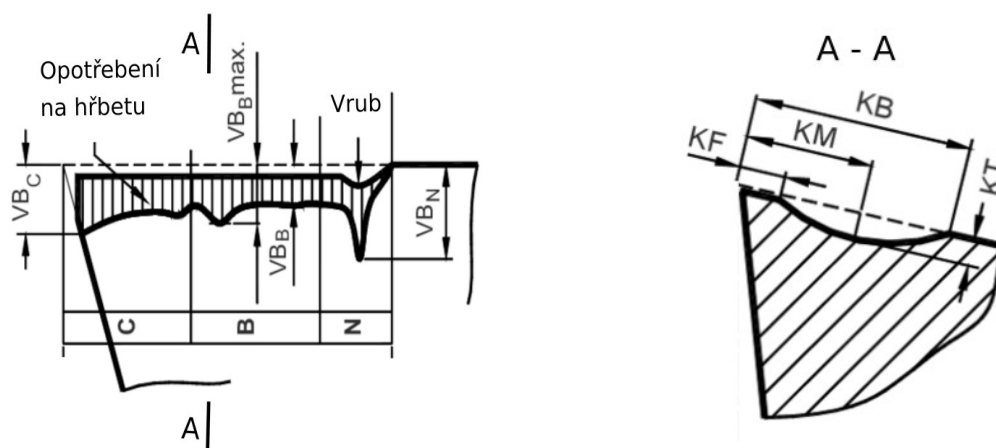
Na základě naměřených dat pak proběhne vyhodnocení. Získané výsledky budou porovnány s určitými teoretickými předpoklady a bude zodpovězena otázka, jestli je zde vazba mezi signálem akustické emise a opotřebením břitu a případně zda je tato metoda vhodný způsob pro monitorování opotřebení. V neposlední řadě poslouží experiment k nalezení dalších faktů, sběru informací a stanovení omezení a úskalí týkajících se metody akustické emise, o které se bude možno opírat v případě podobných budoucích činností.

3 Teorie opotřebení břitu

Během obrábění dochází vlivem silového a tepelného působení mezi materiálem nástroje a obrobku k otupování řezného břitu. Otupováním se ve své podstatě rozumí degradace řezného nástroje v podobě růstu poloměru zaoblení ostří, změna řezných úhlů a obecně tvaru čela i hřbetu. Před samotným experimentem je důležité seznámit se s typy tohoto otupení a ujasnit si, jakými způsoby vůbec opotřebení břitu vzniká a čím je ovlivněno. Za tímto účelem jsou v teoretické části zodpovězeny základní otázky, které se této problematiky týkají.

3.1 Formy opotřebení

Tvar, neboli forma otupení, se vyvíjí na základě vlastností řezného materiálu, jako je jeho houževnatost nebo naopak křehkost, na způsobu práce nástroje, kdy lze očekávat různé opotřebení, je-li nástroj využíván k hrubování a jiné, když je použit na dokončovací operace. Dále mají vliv samozřejmě řezné podmínky, jako je řezná rychlost, posuv nebo hloubka řezu. Míra opotřebení se nejčastěji určuje šířkou opotřebení hřbetu VB nebo hloubkou žlábků KT na čele nástroje. Rozměry opotřebení lze kótovat dle normy ISO 3685 viz Obr. 1. [19]



Obr. 1 Formy otupení dle ISO 3685 [19]

- VB – Opotřebení na hřbetě
 - VB_C → V oblasti špičky
 - VB_B → V oblasti ostří
 - VB_N → V oblasti vrubu
- KT – Hloubka žlábků na čele
- KB – Šířka žlábků
- KF – Vzdálenost žlábků od ostří
- KM – Střední vzdálenost žlábků od ostří

3.1.1 Klasifikace typů opotřebení

Jak je uvedeno v Příručce obrábění od firmy Sandvik Coromant [2], jednotlivá opotřebení břitů byla klasifikována s cílem možnosti posouzení obráběcích operací a tím i možnosti působit pozitivně na produktivitu. Každý nástroj má svůj ideální průběh opotřebení, kterého lze dosáhnout vhodnými reznými podmínkami. Proto kontrola břitů lupou nebo dílenským mikroskopem a určení, jaký typ poškození se na něm převážně vyskytuje, umožňuje monitorovat a optimalizovat trvanlivost.

- **Opotřebení hřbetu břitu**

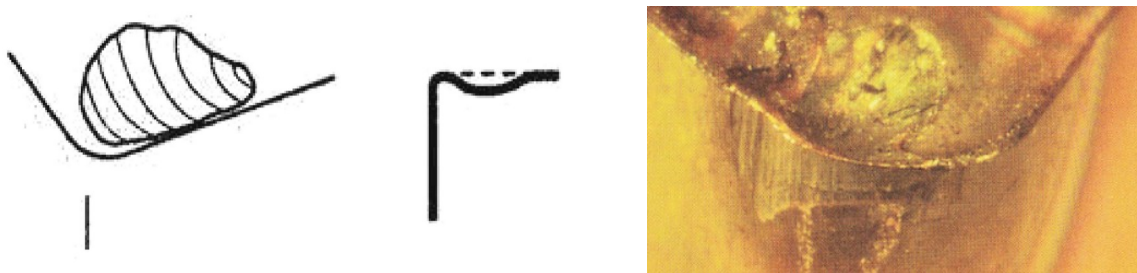
Vzniká abrazivními mechanismy a vyskytuje se na ploše hřbetu viz Obr. 2, která je vystavena působení materiálu obrobku v podstatě během celého procesu utváření třísky. Jedná se o běžný typ opotřebení břitu, jehož rovnoměrně narůstající míra signalizuje ideální stav. Pokud je opotřebení hřbetu příliš velké, projevuje se zhoršením jakosti obrobené plochy. [2]



Obr. 2: Opotřebení hřbetu [2]

- **Opotřebení ve tvaru žlábků**

Vzniká na čele viz Obr. 3 vlivem působení abraze, kdy je částečně ubírán materiál nástroje vlivem brusných mechanismů, které způsobují tvrdé částice v materiálu obrobku, a hlavně vlivem difúze v místě, kde je nejvyšší teplota, tedy v místě, kde dochází ke kontaktu třísky s plochou čela. Příliš velký žlábek mění geometrii břitu, čímž se mění tvar třísky a směry působení rezných sil. Břit je tímto opotřebováním rovněž zeslabován. [2]



Obr. 3: Opotřebení ve tvaru žlábků [2]

- **Plastická deformace břitu**

Vzniká působením vysokých teplot a rezných tlaků a projevuje se vyboulením břitu, jak je patrné na Obr. 4. Pro odolnost rezného materiálu proti tomuto typu opotřebení je klíčovou vlastností tvrdost za tepla, jelikož materiály, které s rostoucí teplotou výrazně ztrácejí svou pevnost, podléhají plastické deformaci podstatně více. Plastická deformace břitu způsobuje

změnu geometrie, změnu směru odchodu třísky a snadno může dosáhnout kritického stavu. [2]



Obr. 4: Plastická deformace [2]

- **Opotřebení ve tvaru vrubu**

Opotřebení ve tvaru vrubu se může nacházet jak na hlavním hřbetu, tak i na vedlejším. Na hlavním hřbetu vzniká vrub jednak v důsledku adhezních mechanismů a jednak vlivem oxidace materiálu břitu. Vrub na vedlejším hřbetě je důsledkem mechanického působení tvrdých částic v materiálu obrobku. Vruby se objevují v místě, kde dochází ke kontaktu břitu s bokem třísky a mohou vést až k lomu VBD. [2]



Obr. 5: Vrub [2]

- **Hřebenovité trhlínky na ostří**

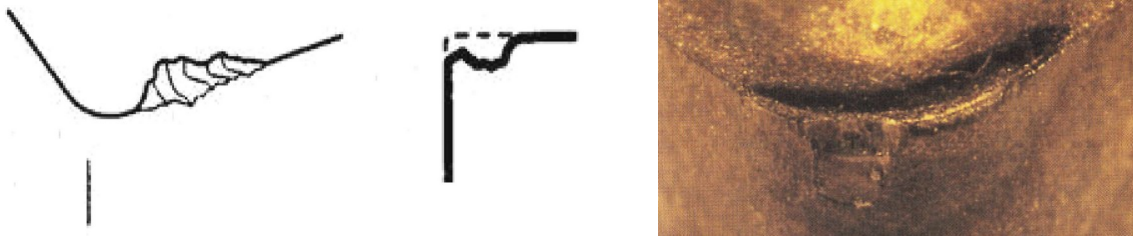
Jsou typem únavového opotřebení, které je důsledkem tepelných šoků. Toto opotřebení je typické pro frézovací nástroje, které jsou vystaveny přerušovanému řezu. Trhlínky se tvoří ve směru kolmém na ostří, jak je patrné na Obr. 6, a mohou vést až k vylamování částí břitu nebo k jeho úplnému selhání. [2]



Obr. 6: Hřebenovité trhlínky [2]

• Únavový lom

Vzniká jako důsledek prudkých změn řezných sil. Jednotlivá zatížení nejsou obvykle natolik velká, aby vedla k lomu, avšak při značném počtu zatěžovacích cyklů dochází k selhání břitové destičky v podobě lomu, jehož plocha je souběžná s ostřím. [2]



Obr. 7: Únavový lom [2]

• Vydrolování ostří

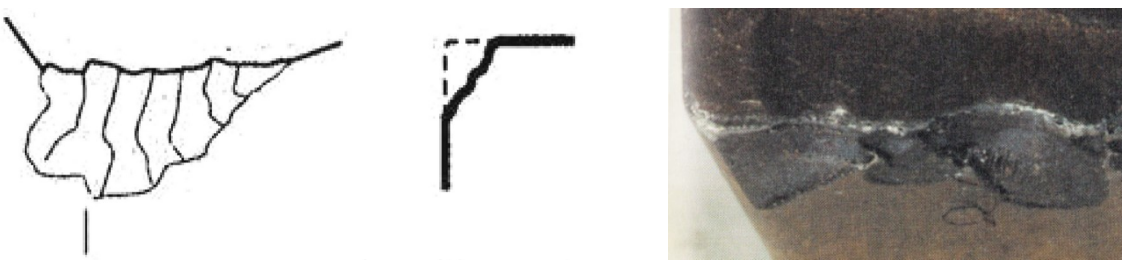
Jedná se o formu opotřebení, kdy se břit rovnoměrně vydroluje viz Obr. 8. Příčinami jsou vysoká rázová zatížení, která způsobují oddělování materiálu z povrchu břitu. Vydrolování je nejčastěji důsledkem přerušovaného řezu. Pokud je vydrolování sledováno, může být upozorněním na blížící se možnost úplného selhání břitu. [2]



Obr. 8: Vydrolování ostří [2]

• Lom

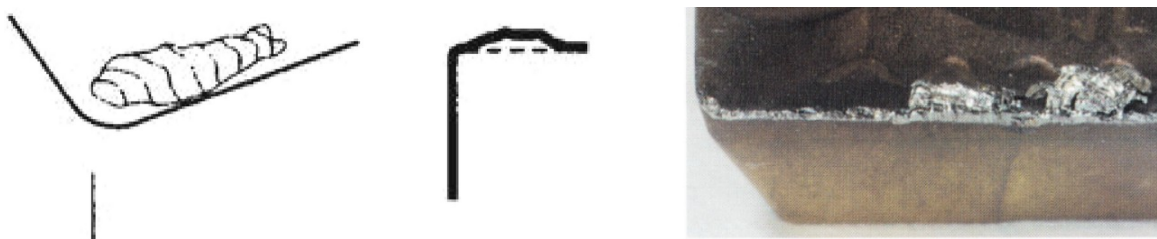
Lom je fatální konec trvanlivosti břitu a mělo by se mu, pokud možno, zabránit. Dochází tak ke značným změnám geometrie, která již neumožňuje dosažení požadovaných přesností a jakosti obrobeného povrchu. [2]



Obr. 9: Lom břitu [2]

• Tvorba nárůstku

Představuje jev, který je nejvíce ovlivněn teplotami, řeznými rychlostmi a afinitou materiálu nástroje a obrobku. Tvorba nárůstku způsobuje změnu geometrie a navíc při jeho odlomení dochází ještě k vytržení části materiálu břitu. Nárůstek je v podstatě výsledkem navařování materiálu obrobku na břit vlivem nižších teplot a vysokých tlaků. Jak je uvedeno v Příručce obrábění, je oblast řezných podmínek, kde dochází k tvorbě nárůstku, dnes již dobře známa, a proto mu lze často zabránit. [2]



Obr. 10: Nárůstek [2]

3.2 Mechanismy opotřebení

Jak píše A. Humár [1], opotřebení je výsledkem vzájemného působení všech strojních součástí, které jsou v kontaktu a vykazují relativní pohyb. V případě obrábění se jedná o relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem a mezi nástrojem a třískou, kdy dochází ke kontaktu nástroje s obrobkem na hlavním a vedlejším hřbetě a na špičce a ke kontaktu odcházející třísky a čela nástroje. To vše samozřejmě podněcuje vznik opotřebení nástroje.

Je pochopitelné, že pracovní podmínky řezného nástroje se od pracovních podmínek obvyklých strojních součástí podstatně liší, což dokazuje i Tabulka 1, kde je pro porovnání uvedeno několik příkladů pracovních podmínek a jejich hodnot.

Pracovní podmínky	Běžná strojní součást	Břit nástroje
Měrný tlak [MPa]	10^2	$10^3 \div 10^4$
Teplota [°C]	$60 \div 100$	$300 \div 1200$
Rychlost ohřevu [°C/s]	-	$10^6 \div 10^9$
Otěr [mm] na dráze 10^3 m	10^{-3}	$10^{-2} \div 10^{-1}$

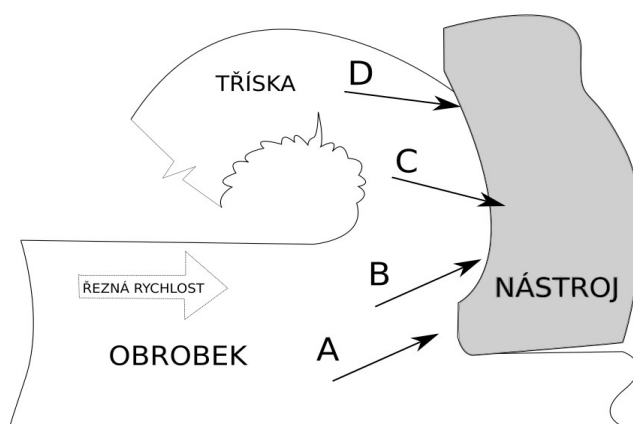
Tabulka 1: Pracovní podmínky [1]

A. Humár [1] ve své publikaci dále píše: „Proces opotřebení je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech (fyzikální a zejména mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí atd.) a v jehož průběhu působí mnoho fyzikálně-chemických jevů (mechanismů opotřebení).“

Vlivem zatěžujících faktorů, které lze během procesu obrábění sledovat, vznikají základní mechanismy opotřebení, a sice opotřebení otěrem, plastickou deformací a křehkým lomem břitu.

Opotřebení je přirozeným výsledkem zatěžujících faktorů, které na břit působí. Nejvýznamnější faktory jsou zobrazeny na Obr. 11:

- A) Mechanický
- B) Tepelný
- C) Chemický
- D) Abrazivní



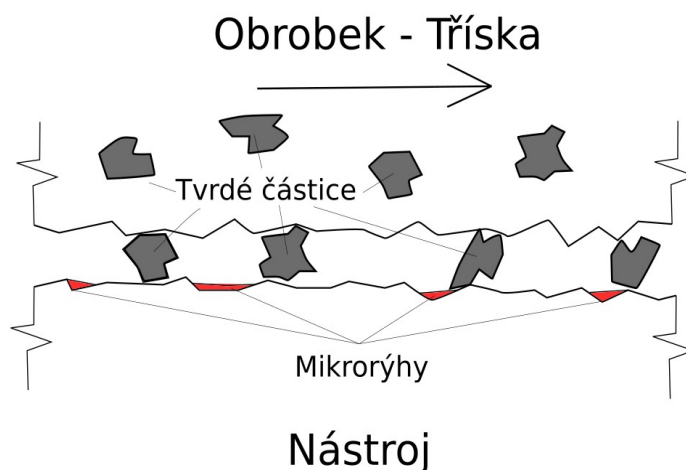
Obr. 11: Zóny působení faktorů [2]

3.2.1 Opotřebení otěrem

Opotřebení otěrem je důsledkem fyzikálních a chemických procesů, které vznikají v dotykových plochách za působení extrémních podmínek. Příčiny otěru lze dle své podstaty rozdělit na **fyzikální**, kterými jsou abraze (brusný otěr) a adheze (přilnavost), a **chemické**, kde působí difúze a chemické reakce kovů, jako je například oxidace. Tyto čtyři mechanismy působí v průběhu času souvisle, i když moment jejich vzniku nemusí být zpravidla stejný. Dá se říci, že příčiny fyzikální povahy vznikají spíše při nižších teplotách, zatímco ty chemické povahy se přiřazují k podstatně vyšším hodnotám teplot. [2]

1) Abraze (brusný otěr)

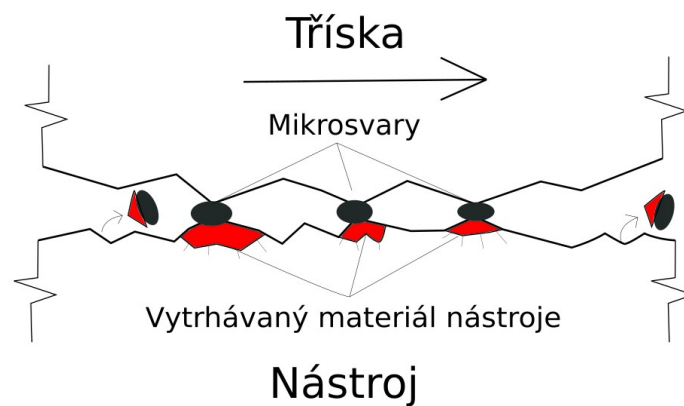
První z fyzikálních mechanismů opotřebení je takzvaný brusný otěr, se kterým se potýkají v podstatě všechny známe řezné materiály, jako jsou nástrojové oceli, rychlořezné oceli, slinuté karbidy, řezná keramika a dokonce i supertvrdé řezné materiály jako je kubický nitrid bóru a diamant. Důvodem vzniku jsou velmi tvrdé mikročástice obsažené v obráběném materiálu, jako jsou např. nitridy, ale i mikročástice, které se již uvolnily z řezného nástroje. Tyto částice následně při kontaktu s nástrojem vyrývají do jeho povrchu mikrorýhy, zejména do měkčích partií struktury v podobě kobaltu, niklu nebo feritu. Na Obr. 12 je schématicky znázorněn mechanismus opotřebení abrazí. [2]



Obr. 12: Mechanismus brusného otěru [2]

2) Adheze (přilnavost)

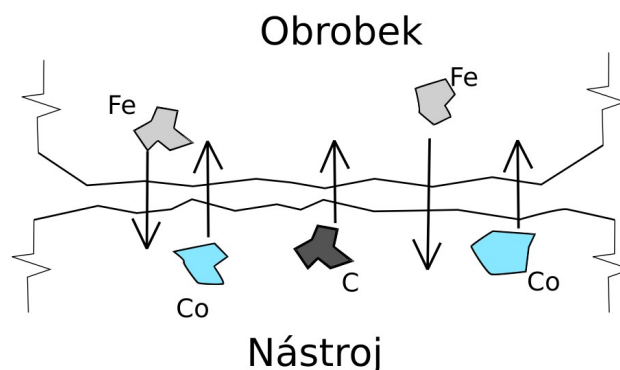
Další z mechanismů opotřebení břitu je adhezní otěr, který se vyskytuje převážně v případech, kdy jsou materiály řezných nástrojů a obráběného materiálu chemicky příbuzné. Jedná se například o obrábění konstrukčních ocelí břity z nástrojových nebo rychlořezných ocelí. Postihuje však i slinuté karbidy a ostatní tvrdé řezné materiály. Tento jev má za následek tvorbu nárůstků mezi břitem a třískou. Jsou to v podstatě o mikrosváry v oblasti bodového dotyku materiálů. Tyto nárůstky se následně odlamují a vytrhávají sebou i části břitu, což vede k jeho úbytku. Vytrhávané částice jsou navíc velmi tvrdé a způsobují proto abrazi břitu. Častým důvodem vzniku tohoto typu opotřebení je také nízká teplota v místě řezu, jelikož s rostoucí teplotou se obvykle rozšiřuje váznuocí vrstva a bodový dotyk je nahrazen plošným a tím klesá intenzita adheze. Na Obr. 13 je schématicky znázorněn mechanismus adhezního otěru. [2]



Obr. 13: Mechanismus adhezního otěru [2]

3) Difúze

První ze skupiny chemických mechanismů otěru je difúze, při níž ve své podstatě dochází k výměně atomů mezi materiálem břitu a obrobku. V příručce od Sandvik Coromant [2] se píše, že difúze vzniká převážně při vyšších teplotách, kdy je dosaženo takzvané disociační teploty prvků, které jsou obsaženy v materiálu nástroje a obrobku. Například již při teplotě okolo 680 °C difunduje ze slinutého karbidu kobalt. To může mít za následek například vznik žlabu na čele řezného nástroje. Příklad difúze mezi slinutým karbidem a ocelí je znázorněn na Obr. 14.



Obr. 14: Mechanismus difúze [2]

4) Chemické reakce

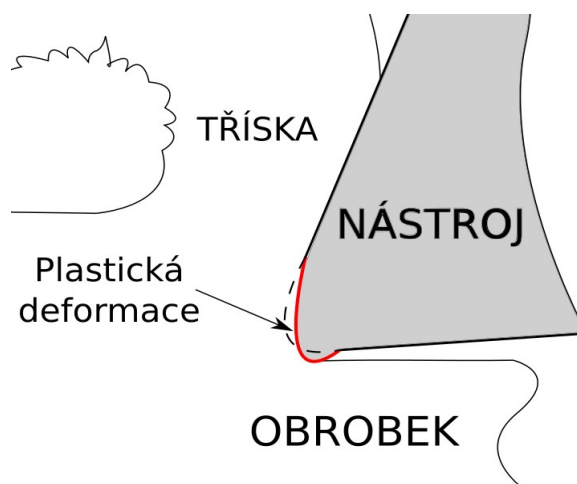
Chemický otěr je důsledkem oxidace. Vysoké teploty a přítomnost vzduchu často vedou k oxidaci velkého množství kovů. Vznik oxidů má však na různé materiály odlišný vliv. Kupříkladu wolfram a kobalt vytváří oxidy, které jsou třískou snadno odnášeny, protože jsou křehké a drolí se, zatímco třeba oxid hlinitý je výrazně pevnější a tvrdší. Díky tomu jsou některé materiály citlivější na oxidaci, než jiné. Nejintenzivněji probíhá oxidace v místě, kde má do řezu přístup kyslík. Tímto mechanismem vzniká typicky žlábek viz Obr. 15. [2]



Obr. 15: Oxidace [2]

3.2.2 Opotřebení plastickou deformací

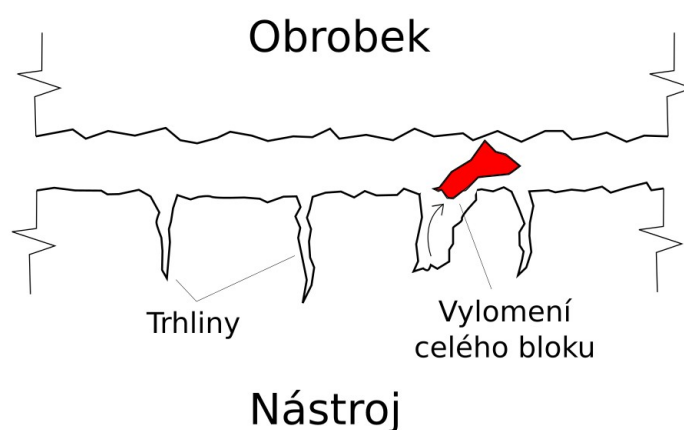
K otupení břitu plastickou deformací dochází dle příručky od Sandvik Coromant [2] při dosažení limitní teploty daného řezného materiálu v kombinaci s řeznými tlaky. Po překročení této teploty dochází k výraznému snížení pevnosti materiálu a ten se tak stává plastickým. K tomu dojde buď jen v tenké povrchové vrstvě o tloušťce řádově 10^2 nm nebo ve větším objemu, což vede k takzvanému lavinovému otupení. Příčinou překročení limitní teploty nástrojového materiálu může být příliš vysoká řezná rychlost nebo špatná tepelná vodivost materiálu břitu nebo materiálu obrobku, což vede k vysoké koncentraci tepla v místě řezu. Plastická deformace může postihnout všechny druhy řezných materiálů, avšak typickými zástupci, kteří jsou k tomuto poškození náchylnější, jsou nástrojové a rychlořezné oceli a slinuté karbidy, kde je jejich pevnost velmi závislá na pojivu, které má obvykle limitní teplotu nižší.



Obr. 16: Plastická deformace břitu [2]

3.2.3 Opotřebení křehkým lomem

Lom vzniká obvykle kombinací tepelných a mechanických vlivů. Prudké změny teploty a namáhání řeznými silami podněcuje rozvíjení trhlin a vydrolování nebo vylomení celého bloku řezného nástroje viz Obr. 17. Různě řezné materiály reagují na toto zatížení odlišně, protože nebezpečí lomu roste s poklesem houževnatosti. Příčinami může být zvýšení pevnosti materiálu obrobku z důvodu výskytu vměstků, nadměrné zatížení břitu vlivem velkého průřezu odebírané vrstvy, přerušovaný řez vedoucí k dynamickým rázům nebo nevhodná geometrie a řezné prostředí vzhledem k obráběnému materiálu. Přerušovaný řez tak způsobuje tepelné šoky, jelikož je břit cyklicky ohříván v řezu a následně chlazen například řeznou kapalinou. [2]



Obr. 17: Opotřebení lomem [2]

3.3 Monitorování opotřebení

Lze bezesporu tvrdit, že kvalita obrobeného povrchu, respektive celého obrobku, odpovídá stavu obráběcího nástroje. Z tohoto důvodu je pochopitelné, že jsou poslední roky vynakládány značné prostředky právě na měření a monitorování míry opotřebení řezných nástrojů. Monitorováním se rozumí sledování stavu nástroje a stanovení nebo předvídání okamžiku, kdy dojde k překročení kritické hodnoty jeho opotřebení.

Monitorování probíhá během nebo po skončení obrábění. Monitorovací systémy pak mohou dávat informace o stavu nástroje obsluze stroje nebo v případě automatizovaných systémů mohou dávat sami podnět stroji k výměně řezného nástroje.

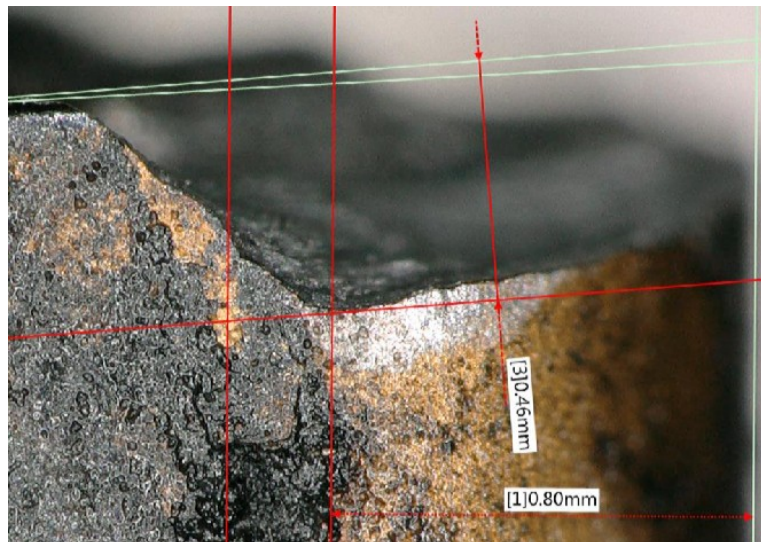
Monitorování stavu řezného nástroje a předvídání jeho selhání má pozitivní vliv na zvýšení spolehlivosti obráběcího procesu, snížení nákladů spojených se spotřebou nástrojů, zvýšení jakosti obráběného povrchu a snížení nákladů plynoucích ze zmetkovitosti.

Metody měření opotřebení řezných nástrojů lze rozdělit na přímé a nepřímé. U přímých metod je měřena hodnota fyzikální veličiny na základě její definice. Při využití nepřímé metody je hodnota žádané veličiny určena na základě vztahů s jinými veličinami, které byly měřeny. Všechny metody mají své pozitivní stránky, ale také svá úskalí a nevýhody.

3.4 Přímé metody

- **Mikrometrická metoda**

Míra opotřebení je zjišťována přímým měřením lineárních rozměrů. K tomuto účelu se nejčastěji využívají dílenské mikroskopy nebo v případě většího opotřebení lze použít lupy s průměrnou stupnicí. Hloubku výmolu na čele lze pak měřit například pomocí číselníkového úchylkoměru. Tato metoda je poměrně přesná, ale časově náročná, jelikož měření probíhá zpravidla mimo obráběcí stroj. Na Obr. 18 je snímek z digitálního mikroskopu, kde je vyznačena hloubka vylovení VBD.



Obr. 18: Mikrometrická metoda

- **Váhová metoda**

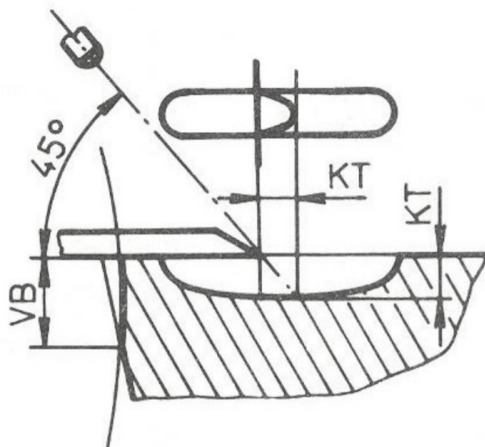
Při využití této metody se jako ukazatel míry opotřebení vyhodnocuje hmotnostní úbytek břitu. Využívá se převážně pro málo hmotné VBD. Úbytek se vypočte jednoduše jako rozdíl hmotnosti nové destičky a hmotnosti destičky po otupení. Stejně jako předchozí metoda, i váhová metoda je velmi přesná, ale taktéž vyžaduje přerušení procesu obrábění a vážení břitu mimo stroj. Navíc mohou být výsledky této metody negativně ovlivňovány v případě, že se na břitu tvoří nárůstek, který pak svou hmotností zkresluje reálný úbytek břitu. [3]

- **Radioizotipová metoda**

Pomocí radioaktivních izotopů je zjišťován hmotnostní úbytek břitu. Břit je nejprve ozáren paprsky radioaktivních částic. Na povrchu materiálu nástroje tak dojde k vytvoření radionuklidů. Při obrábění poté velká část radioaktivních částic odejde společně s třískou. Po přerušení řezu se následně ze vzorků třísky určí, k jak velkému úbytku nástrojového materiálu došlo. Tato metoda patří mezi nejpřesnější způsoby určení opotřebení břitu a další výhodou je, že není negativně ovlivňována tvorbou nárůstku, řeznou kapalinou nebo třeba vibracemi. [3]

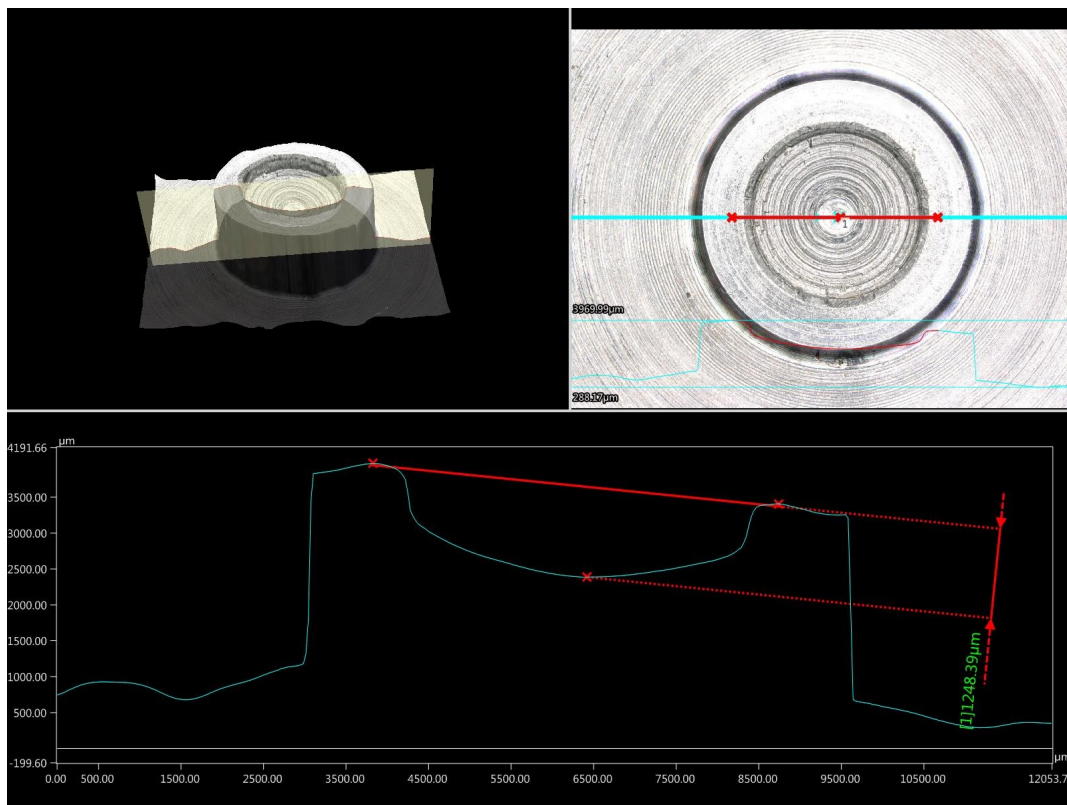
- **Optická metoda**

Hloubku žlabu na čele lze kromě použití číselníkového úchylkoměru měřit také optickou, neboli stínovou metodou. Ta spočívá v tom, že je na čelo nástroje umístěna ostrá hrana, která je nasvícena paprskem světla pod úhlem 45° . vzdálenost tečny ke stínu se pak rovná hloubce žlabu KT viz Obr. 19. [20]



Obr. 19: Stínová metoda [20]

Jedná se však o poměrně zastaralou metodu, která je v dnešní době nahrazena moderními digitálními mikroskopy, které jsou schopny na základě proostření vzorku vytvořit jeho 3D model a pomocí řezu je pak možné změřit hloubku žlabu, jak je demonstrováno na obrázku (Obr. 20).



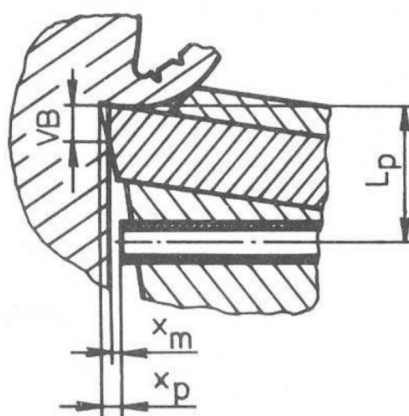
Obr. 20: Demonstrace měření hloubky žlabu pomocí mikroskopu

- **Metoda nanesené odporové vrstvy**

Při použití této metody je na povrch hřbetu řezného nástroje v podstatě nanesen odporový obvod. Opotřebení na hřbetě je následně měřeno snížením nebo zvýšením hodnoty elektrického odporu. Nevýhodou této metody je, že je negativně ovlivňována odcházející třískou, změnou teplot, řeznými silami a také chladicí kapalinou. [3]

- **Pneumatická metoda**

Pneumatická metoda je založena na odporu vzduchu, který je ovlivněn vzdáleností mezi obrobeným povrchem a tryskou. Využívá se při tom pneumatické čidlo. Jak se nástroj opotřebovává, zmenšuje se mezera mezi obrobeným povrchem a ústím trysky viz Obr. 21. Důsledkem je změna odporu vzduchu proudícího z trysky. Jedná se o spolehlivý a jednoduchý způsob monitorování stavu řezného nástroje. [20]



Obr. 21: Pneumatická metoda [20]

3.5 Nepřímé metody

Přímé metody sebou nesou nevýhodu nutnosti provádění měření po přerušení procesu obrábění mimo stroj, proto se řada studií zaměřuje na nepřímé metody, které sledují průvodní jevy, které se vyvíjejí společně s opotřebením nástroje a je často možné je sledovat během obráběcího procesu.

- **Optické metody**

Optické metody zahrnují například metodu založenou na odrazu světla, která funguje na principu světelného paprsku, který dopadá na ostří a profil odraženého světla charakterizuje stav opotřebení řezného nástroje.

Mezi optické metody spadá i například metoda využívající televizní kameru, která se používá zejména pro kontrolu soustružnických nástrojů. Nástroj se po provedení operačního úseku přemístí do definované testovací polohy před kameru, kde je nasnímán jeho obraz ze všech stran a z několika úhlů tak, aby bylo možné zhotovit 3D model. Pomocí mikroprocesoru je pak proveden rozbor, který umožní získání informací o míře opotřebení řezného nástroje. [3]

- **Měření řezné síly nebo kroutícího momentu**

S narůstajícím opotřebením řezného nástroje zpravidla narůstá i řezný odpor. Základem monitorování všech složek řezné síly a kroutícího momentu je měření deformací. K těm dochází v celé soustavě stroj – nástroj – obrobek (S-N-O). Řezné síly i kroutící moment lze měřit za pomoci dynamometrů. Existuje celá řada dynamometrů, které se dělí dle způsobu indikace deformací. Jsou to například mechanické dynamometry, hydraulické, pneumatické nebo skupina elektrických dynamometrů, které zahrnují odporové dynamometry, indukční nebo velmi často využívané piezoelektrické dynamometry. [3]

Hlavní složku řezné síly lze měřit také nepřímo z výkonu pohonu obráběcího stroje. Měření probíhá za pomoci wattmetru. Tato metoda není tolik citlivá na souvislé změny opotřebením řezného nástroje a využívá se výhodněji pro určení úplného selhání nástroje.

- **Detekce mezery mezi nástrojem a obrobkem**

Tato metoda je založena na měnící se vzdálenosti mezi obrobeným povrchem a bodem na nástroji. Tato vzdálenost je přirozeně ovlivněna opotřebením nástroje a lze ji měřit několika způsoby, které ve své práci popsal J. Žižka. [3]

První je dotyková metoda, kdy je použit elektrický mikrometr, jehož dotyk se s rostoucím opotřebením posouvá a z výstupu z měniče je získána charakteristika opotřebením.

Dále existuje bezkontaktní ultrazvuková metoda, kdy je vyhodnocována doba odezvy ultrazvukového pulsu, který je vyslán na obrobený povrch a odražen zpět do přijímače.

Další bezkontaktní je metoda optického mikrometru, která využívá paprsku laseru, který dopadá na obrobený povrch a odráží se pod úhlem 10°. Fotodetektor pak registruje změnu od nastaveného úhlu a lze tak určit úměrné opotřebením nástroje.

- **Měření teplot**

I velikost teploty řezání se mění v závislosti na zvětšujícím se opotřebením nástroje. Proto je vyvinuto několik metod, jak lze měřením teploty stanovit opotřebením řezného nástroje.

Pro měření teploty je možné využít termočlánky. Buď se jedná o přirozený termočlánek, kdy je termoelektrická síla generována přímo v místě kontaktu materiálu obrobku a nástroje, nebo umělý termočlánek, který je zhotoven ze dvou spojených drátů, které produkují dostatečně velkou termoelektrickou sílu. Umělý termočlánek se umísťuje v blízkosti špičky nástroje. [3]

Modernější je infračervená metoda, pomocí níž lze z infračerveného záření určit střední teplotu v místě vzniku třísky. Tato metoda je však omezena pouze na procesy, kde není použita řezná kapalina. [3]

- **Metoda elektrického odporu**

Další ze způsobů stanovením opotřebením nástroje je metoda elektrického odporu. Jak uvádí J. Žižka [3] ve své práci, měření je založeno na elektrickém obvodu, který prochází nástrojem a obrobkem. Měřený odpor je pak funkcí velikosti plochy jejich vzájemného kontaktu, která taktéž charakterizuje míru opotřebením. Nevýhodou této metody jsou nepřesnosti způsobené změnami teplot v místě kontaktu.

- **Měření vibrací**

Jedná se o další nepřímou metodu monitorování opotřebení nástroje. Jak píše J. Žižka [3], princip metody je založen na faktu, že opotřebený nástroj je více namáhán a tím jsou vyvolány vibrace. Úskalím této metody jsou rušivé účinky, takzvané cizí vibrace. Je tedy potřeba se těmito rušivým vibracím vyhnout a měřit pouze ty vibrace, které souvisí s opotřebením nástroje. Tyto vibrace, respektive jejich frekvenční rozsah, je různý podle způsobu obrábění, a proto je nutné je stanovit nejprve experimentálně.

Vibrace lze měřit například pomocí piezoelektrického akcelerometru, kdy je možné nalézt limitní opotřebení na základě amplitudy. [3]

- **Měření zvuku**

Za pomoci akcelerometru lze měřit i zvukové vibrace, které vznikají třením na hřebu nástroje. Z poměru vysokých a nízkých frekvencí je pak získána informace o opotřebením nástroje.

Zvuk je také možné měřit pomocí mikrofónu analyzovat ho metodou takzvané spektrální analýzy. Jak se postupně zvyšuje míra opotřebení řezného nástroje, objevují se na spektru nárůstky amplitud některých frekvencí. [3]

- **Měření akustické emise**

Při měření akustické emise jsou snímány a vyhodnocovány napětíové vlny, které se šíří materiálem na povrch. Tyto vlny sebou nesou informace o dějích, které probíhají místě tvorby třísky a jsou značně ovlivněny stavem řezného nástroje. [3]

Jelikož se nepřímé metody používají z důvodu efektivity a jednoduchosti stále častěji, než metody přímé, má akustická emise značný potenciál, avšak je třeba počítat s řadou omezení.

Více o metodě akustické emise, která v rámci této práce nejpodstatnější, je pojednáno v následující kapitole.

4 Teorie akustické emise

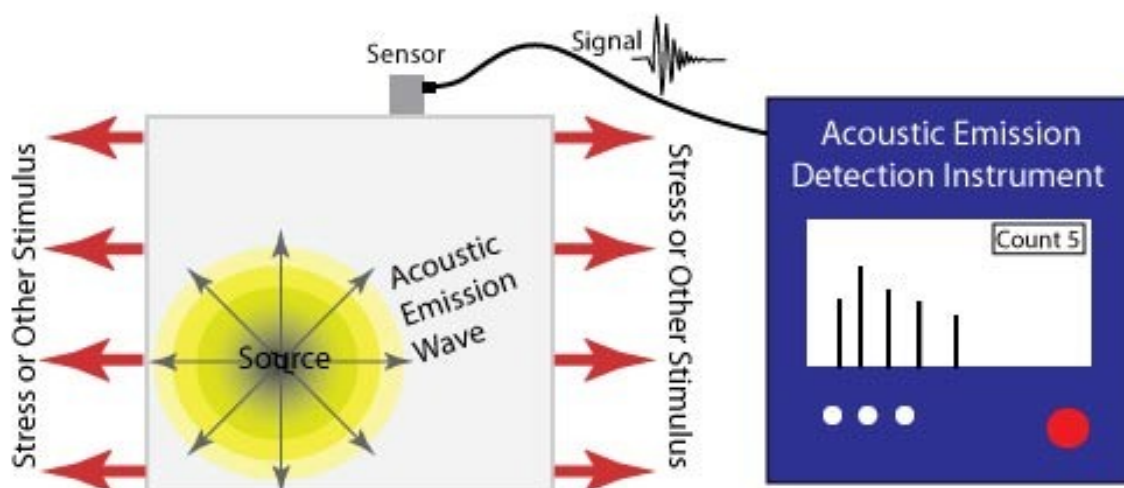
Před samotnou analýzou signálu akustické emise je nejprve důležité si ujasnit, co si přesně pod pojmem akustická emise představit. Je potřeba vycházet z faktů a základních principů, díky kterým lze tomuto tématu porozumět. Proto je na tuto problematiku pohlíženo nejprve ze širšího obecného hlediska, než dojde k samotnému vztahu mezi signálem akustické emise a opotřebením břitu nástroje.

4.1 Základní charakteristika akustické emise

Akustickou emisi lze v širším pojetí chápat jako fyzikální jev, kdy je vlivem vnějších nebo vnitřních sil v materiálu uvolňována určitá část nashromážděné energie. Takové uvolnění energie je doprovázeno pružným napětovým vlněním, které lze zachytit a zaznamenat pomocí snímačů jako elektrický signál.

Ing. Jan Žižka [3] píše, že akumulovaná energie se v materiálu uvolňuje například v podobě prasklin a mikrotrhlinek, které se mohou dále rozšiřovat. Tím jsou emitovány napětové vlny, které se od svého místa vzniku šíří materiálem, až dosáhnou jeho volného povrchu. Během průchodu vlny materiálem je její energie částečně přeměněna na teplo, část vyvolá na volném povrchu takzvanou Rayleighovu povrchovou vlnu a zbylá část energie se vrací do materiálu v podobě odražené vlny. Právě zmíněná povrchová vlna je zachycována daným snímačem a její energie je přeměněna na elektrický signál, zvaný emisní.

Schéma na Obr. 22 zobrazuje proces šíření napětové vlny (Acoustic Emission Wave) po uvolnění energie mikrotrhlinou (Source) v důsledku vnějšího zatížení (Stress or Other Stimulus) a její snímání a záznam pomocí senzoru (Sensor) na povrchu měřicího zařízení (Acoustic Emission Detection Instrument). [4]

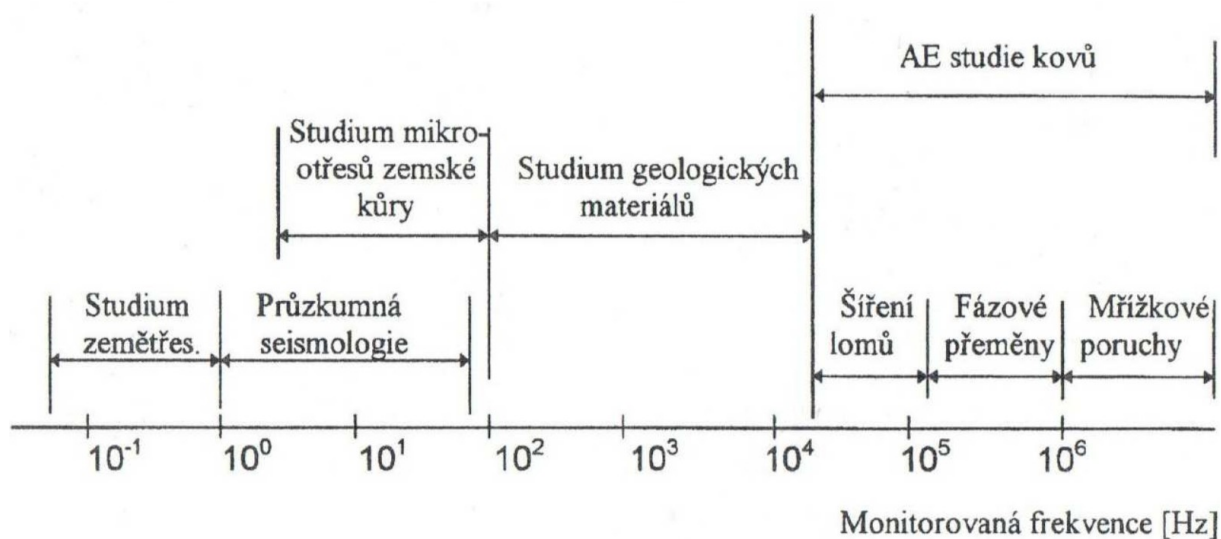


Obr. 22: Schéma vzniku, šíření a snímání signálu AE [4]

Akustická emise je tedy výsledkem degračních procesů, které vznikají na základě zatěžování materiálu. Jedná se o procesy, jako je vznik a šíření trhlin, pohyb dislokací, korozní praskliny atd. Jak ve své práci tvrdí Koula, Vrhel a Lozsi [5], akustická emise poukazuje pouze na ty defekty, které jsou v okamžiku zatížení materiálu aktivní a jsou tak potenciálně nejnebezpečnější, čehož se výhodně využívá například při diagnostice vad materiálu.

Akustickou emisí lze tedy interpretovat jako vznik tranzitních napěťových vln, které jsou výsledkem okamžitého uvolnění energie v materiálu. Náplň metody akustické emise je detekce a lokalizace těchto vln a jejich asociace s konkrétním fyzikálním dějem. [6]

Lze tedy usoudit, že akustická emise má potenciál napříč nejrůznějšími obory. Poskytuje důležité údaje o povaze sledovaných procesů, které je s její pomocí možné také lokalizovat. Uvolňované vlny akustické emise zaujímají širokou škálu frekvencí, kdy nejnižší frekvence okolo 0,1 – 100 Hz může sloužit při studiu seismologických aktivit a na druhé straně při zkoumání například mřížkových poruch nebo šíření lomů je snímána frekvence až 10 MHz. Obr. 23 znázorňuje schématické rozdělení různých oborů využívajících analýzu signálu akustické emise v závislosti na frekvenci uvolňovaných vln. Zleva doprava pak schéma také ukazuje, jak se studie akustické emise rozšiřovala mezi obory i z historického hlediska. [3]



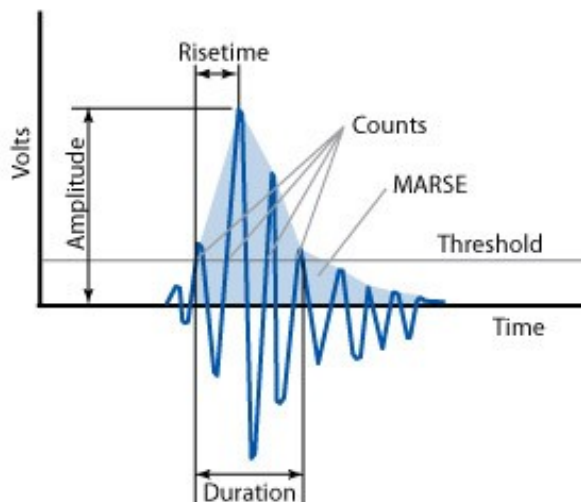
Obr. 23: Rozdělení AE dle frekvence vln [3]

Z pohledu obrábění je akustická emise projevem nastupující deformace materiálu, jako jsou mikrotrhliny, lomy nebo fázové přeměny, které jsou s procesem obrábění úzce spojeny. Takové změny a deformování materiálu, které doprovází vznik třísky, se projevuje v podstatě náhodným signálem na úrovni ultrazvuku, který se tvoří v důsledku uvolňování vnitřní energie materiálu. [3]

Pro monitorování procesu obrábění je vhodné analyzovat signál akustické emise právě v oblasti ultrazvuku, protože disponuje širokým frekvenčním rozsahem. Obvykle se jedná o snímání šířících se vln a vibrací o frekvenci přibližně od 20 kHz do 2 MHz. Při měření akustické emise je proto možné se vyhnout vlivům okolního prostředí nebo vlastním kmitům obráběcího stroje, které se pohybují většinou v oblasti slyšitelného zvuku, tedy přibližně 20 Hz až 20 kHz. Jan Žižka [3] dále uvádí, že lze signál akustické emise měřit neustále během procesu obrábění, protože je jeho vznik úzce spojen s vlastní podstatou tvorby třísky.

4.2 Signál akustické emise

Signál, který byl získán při měření akustické emise, lze běžně popsat počtem napěťových vln o určitém rozsahu amplitudy, které byly uvolněny za daný čas. Dále lze získat data, jako je plocha pod obálkou signálu nebo doba náběhu. Parametry, které signál akustické emise popisují, jsou k vidění na obrázku (Obr. 24), kde je signál vyjádřen hodnotou RMS. [7]



Obr. 24: Ukázka hitu akustické emise [7]

RMS (Root Mean Square)

Je to pravděpodobně nejčastější způsob vyjádření signálu akustické emise. RMS charakterizuje výkon, eventuálně intenzitu signálu a je měřen ve [V] či [mV]. Filip Hort [8] ve své dizertační práci píše, že RMS představuje efektivní hodnotu signálu, která je definována jako součet kvadrátů úrovně signálu v daném časovém intervalu.

Ze záznamu RMS signálu AE je pak možné určit jeho průměrnou hodnotu (Mean RMS), což se využívá jako ukazatel intenzity AE především při delších dobách snímání. Při kratších záznamech o přesně stanovené době trvání se často vyhodnocuje počet překmitů

přes nastavenou prahovou úroveň. Při velmi krátkých záznamech je pak možné běžně popsat samotný Hit akustické emise a jeho maximální amplitudu, dobu náběhu, celkovou dobu trvání a další parametry.

- **Hit = Emisní událost**

Časově omezený signál, který překročil prahovou hodnotu (Threshold) a po nějaké době došlo opět k jeho podkročení. [9]

- **Amplitude = Amplituda**

Maximální amplituda, které signál akustické emise dosáhne v průběhu jedné emisní události (diskrétní materiálová změna způsobující akustickou emisi). [7]

- **Threshold = Prahová hodnota**

Využívá se k eliminování rušivého šumu. Signál s amplitudou nižší, než je nastavená minimální prahová hodnota, není zaznamenáván a vyhodnocován. Práh tedy nesmí být příliš vysoký, aby nevylučoval také signály, které jsou sice slabší a mají nižší amplitudu, avšak mají pro měření určitý význam. [9]

- **Risetime = Doba náběhu**

Doba náběhu představuje čas od prvního překročení prahové hodnoty k dosažení maximální amplitudy signálu. Tento parametr souvisí se šířením vlny mezi zdrojem akustické emise a snímačem. Proto se doba náběhu používá pro kvalifikaci signálu a případně také jako kritérium pro šumový filtr. [7]

- **Counts = Počet překmitů**

Vyjadřuje množství překmitů přes danou prahovou hodnotu. V závislosti na intenzitě emisní události a vlastnostech materiálu může být vyvolán jeden nebo více překmitů v rámci jednoho hitu. Lze je dále rozdělit na překmity potřebné k dosažení maximální amplitudy a na překmity mezi maximální amplitudou a podkročením prahové hodnoty. [7]

- **MARSE**

Představuje plochu pod obálkou daného hitu, která vyjadřuje jeho energii. Parametr MARSE je ovlivněn amplitudou a dobou trvání signálu, ale není závislý na nastavené prahové hodnotě a frekvenci signálu akustické emise. [9]

- **Duration = Trvání**

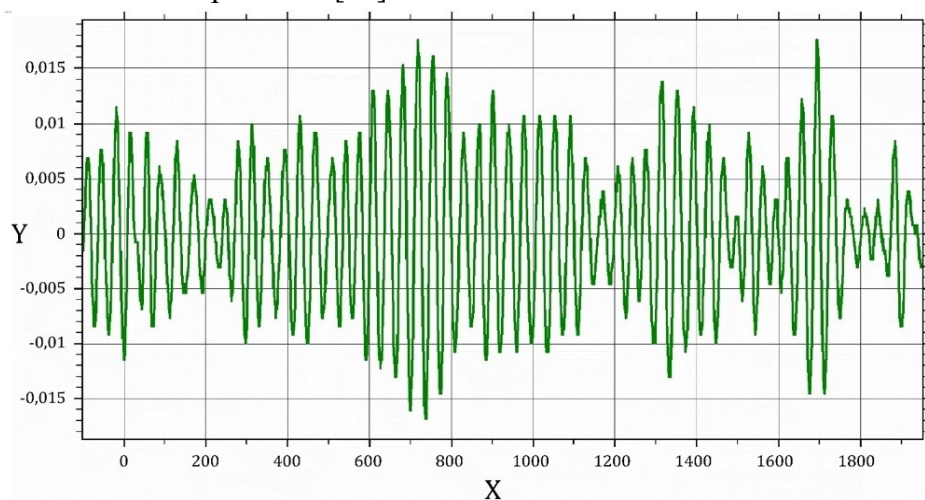
Trvání charakterizuje časový interval mezi prvním a posledním přechodem nastaveného prahu. Tento parametr je možné využít k identifikaci různých typů zdrojů akustické emise a k odfiltrování hluku. Stejně jako počet překmitů, i tento parametr závisí na intenzitě emisní události a akustických vlastnostech materiálu. Lze jej taktéž rozdělit na čas potřebný k dosažení maximální amplitudy, tedy výše zmíněná doba náběhu, a na čas mezi maximální amplitudou a podkročením prahové hodnoty. [7]

4.2.1 Spojitá a nespojitá akustická emise

Signál akustické emise může mít podobu spojitého šumu, jehož amplituda se po delší časový úsek nedostane pod určitou prahovou úroveň, nebo má signál podobu časově oddělených hitů. S ohledem na podobu získaného signálu můžeme akustickou emisi rozdělit na dva základní typy, a sice na spojitou a nespojitou akustickou emisi. Dle charakteru signálu se může lišit i jeho zpracování a vyhodnocení.

1. Spojitý signál AE = Continuous signal

Jedná se o signál vyvolávaný více událostmi (hity), které nejsou vzájemně časově oddělitelné, jak je možné vidět na Obr. 25. Signál pak v takovém případě delší dobu neklesne pod úroveň prahu a má podobu jakéhosi šumu, u kterého není možné přesně stanovit, kdy určitý hit začal a kdy skončil. Vyznačuje se vysokou frekvencí, ale poměrně malou amplitudou. [10]



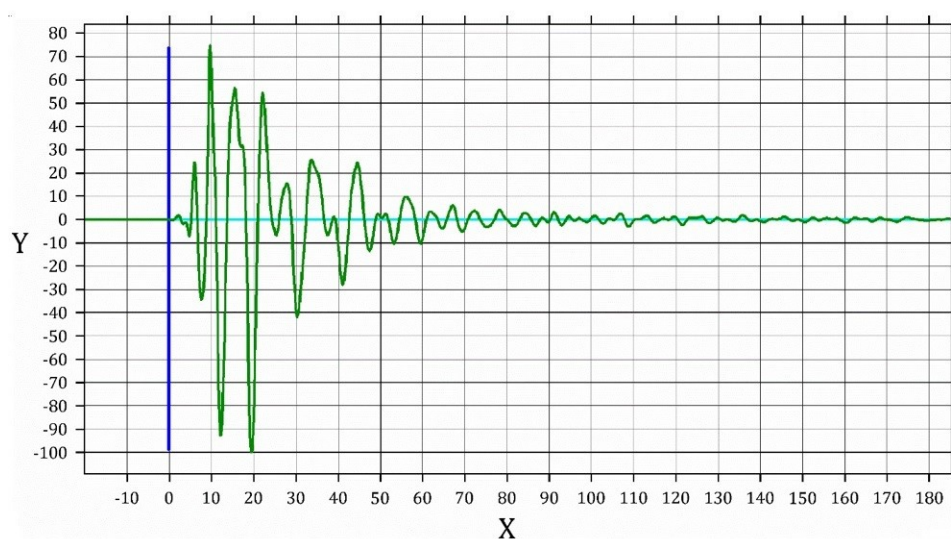
Obr. 25: Spojitý signál AE [11]

Obecně může spojitý signál vznikat celou řadou fyzikálních jevů, jako je kupříkladu kavitace v kapalině, únik média pod tlakem z potrubí, deformování povrchu kovových materiálů při tření nebo pohyb dislokací při plastické deformaci. Dále je spojitý signál generován při opotřebování nástrojů a součástí strojů. [10]

V případě spojitého AE signálu je nejčastěji vyhodnocovaným parametrem především úroveň RMS, tedy energie signálu AE.

2. Nespojitý signál AE = Burst signal

Nespojitý, nebo také impulzní či bouřlivý signál akustické emise, má podobu samostatných časově výrazněji oddělených impulzů, které mají rozeznatelný začátek a konec. Jedná se o náhodně se vyskytující signály s poměrně velkou amplitudou. Příklad nespojitého signálu je k vidění na Obr. 26.



Obr. 26: Nespojitý signál AE [11]

Zdrojem nespojitého signálu je nejčastěji vznik trhliny a její šíření, lom nebo klepání uvolněných součástí atd. V případě nespojité AE jsou jednotlivé emisní události (hity) posuzovány obvykle samostatně. Mezi výchozí parametry patří maximální amplituda, počet překmitů (Counts) jednoho hitu, doba trvání jednoho hitu, doba náběhu (Risetime) a další. [10]

Co se týče obrábění, je spojitý signál přidružován deformaci v primární oblasti, tedy před břitem nástroje, kde dochází ke stříhu obráběného materiálu, a s opotřebením ploch čela a hřbetu rezného nástroje. Nespojité signály jsou pak generovány převážně růstem trhlin v materiálu a také nárazy a lámáním třísky nebo zlomením nástroje. [3]

Jak uvádí ve své práci Jan Žižka [3], povaha akustické emise je ovlivňována celým množstvím faktorů. Rámcově je možné tyto vlivy vystihnout pomocí Tabulka 2 níže. Všechny faktory, které jsou zde uvedené, představují integrální vliv řady defektů. Kupříkladu při plastické deformaci materiálu dochází k vzájemnému působení jednotlivých dislokací, které poté mohou vytvářet různé konfigurace. Každá taková konfigurace pak odpovídá různému průběhu signálu akustické emise. Rozdílný signál vykazuje např. materiál plného objemu nebo materiál obsahující ostrý vrub. Dále může být charakter signálu ovlivněn krystalickou strukturou materiálu nebo například rychlostí deformace.

Spojité AE	Nespojité AE
Malý rozměr zkušební tělesa	Velký rozměr zkušební tělesa
Hladké zkušební vzorky	Zkušební vzorky s vrubem
Isotropní materiál	Anisotropní materiál
Homogenní materiál	Nehomogenní materiál
Jemnozrnný materiál	Hrubozrnný materiál
Tepelně-mechanicky zpracovaný materiál	Materiál v litém stavu
Nízká pevnost materiálu	Materiály s vysokou pevností
Nízká deformační rychlost	Vysoká deformační rychlost
Deformace kluzem	Deformace dvojčatěním
Vysoké teploty	Nízké teploty
-	Štěpné lomy
-	Šíření trhlin
Velká amplituda	Malá amplituda
Velké namáhání	Malé namáhání
Velká deformační rychlost	Malá deformační rychlost
Štěpný lom	Smyk
Malá teplota	Vyšší teplota
Hrubozrnná struktura	Jemnozrnná struktura
Šíření trhliny	Tvárná deformace
Materiál s trhlínami	Materiál bez trhlin

Tabulka 2: Faktory ovlivňující charakter signálu akustické emise [3]

Z Tabulka 2 je patrné, že každý materiál a deformace má svojí vlastní povahu signálu akustické emise. Je tedy možné na základě analýzy parametrů tohoto signálu charakterizovat i procesy, které za vznikem akustické emise stojí. Některé parametry signálu a jimi předávané informace o zdroji AE rovněž uvedl ve své práci J. Žižka [3] viz Tabulka 3.

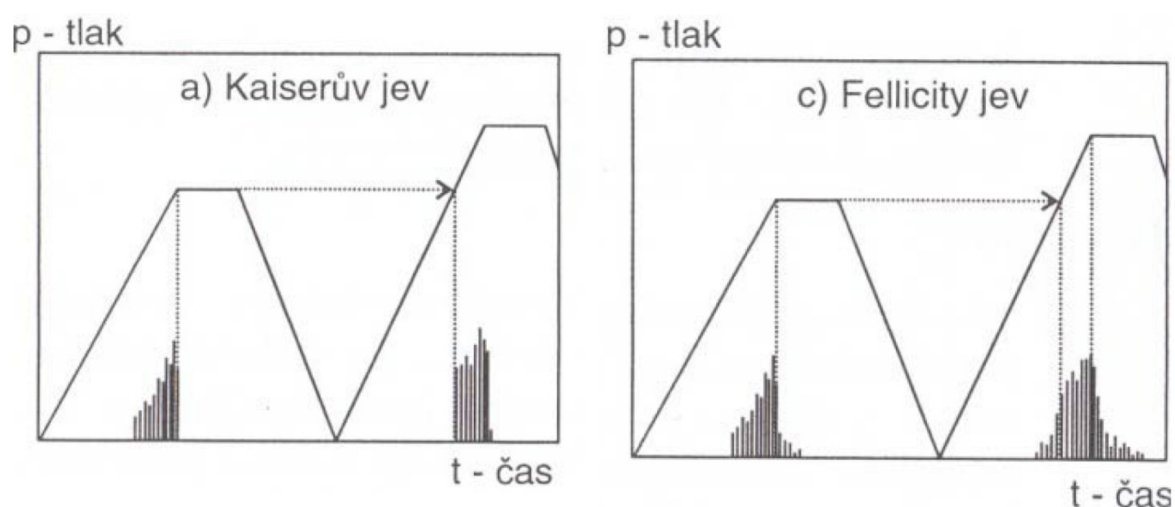
Parametr AE	Předávaná informace
Forma emisní události	Podrobná informace o zdroji AE
Frekvence	Podstata zdroje AE
Amplituda	Energie zdroje AE
Aktivita signálu AE	Deformační rychlost
Doba příchodu signálu AE z více snímačů	Poloha zdroje AE

Tabulka 3: Informace předávaná parametry AE [3]

4.2.2 Kaiserův jev a Felicity efekt

Kaiserův jev, který poprvé zkoumal Joseph Kaiser v roce 1950, popisuje jev, kdy určité materiály při opakovaném zatížení generují akustickou emisi až po překročení úrovně předchozího maximálního napětí. Při zatěžování se pak materiály chovají pružně a není zaznamenávána žádná akustická emise, dokud nedojde k dosažení primárního zatížení. Tento jev je znázorněn na Obr. 27, kde je patrný výskyt akustické emise v závislosti na zatížení (tlak) v průběhu času. [13]

Kaiserův jev ale neplatí pro všechny materiály. Některé materiály vykazují takzvaný Felicity efekt, při kterém vzniká významná akustická emise již při nižší úrovni napětí, než jaká byla maximální úroveň předchozího aplikovaného zatížení. Tento jev lze pozorovat například u kompozitních materiálů. Felicity jev taktéž znázorněn na Obr. 27. [13]



Obr. 27: Kaiserův jev a Felicity jev [13]

4.3 Zdroje akustické emise

Jak již bylo zmíněno, akustická emise je výsledkem uvolnění určitého množství energie v materiálu v důsledku určité změny, která byla vyvolána vnějším zatížením. Šíření akustické emise lze sledovat jak v pevných látkách, tak i v tekutinách, plynech nebo dokonce i v plazmě. Samotné vnější zatížení nemusí být vždy pouze mechanického charakteru. Změnu může taktéž vyvolat i teplotní a magnetické zatížení. Podmínka je však ta, že změna musí být dostatečně rychlá a mít takové množství energie, aby došlo k rozptýlení vlny do zbytku materiálu. [13]

V makroskopickém měřítku může být AE vyvolána například seismickou aktivitou, hřměním nebo únikem kapalin z tlakových potrubí.

V případě mikroskopického měřítko se pak jedná o vznik a šíření trhlin, tření, lom, plastickou deformaci nebo dislokační pohyby. Energie, která je uvolněna z prostého pohybu dislokace je obvykle poměrně nevýrazná. V praxi ale dochází při pohybu dislokací k takzvanému lavinovému efektu, kdy je produkován spojitý signál, který už lze pomocí snímače běžně zaznamenat. [15]

Trhliny, které produkují nejlepší a nejsilnější signál AE, obvykle vznikají v místě s vrubem, jenž působí jako koncentrátor napětí, a v místech, kde je překročena mezní hodnota pnutí. Jak tvrdí Paweł Zawada [13], šíření trhlin vytváří nové povrchy, díky čemuž dojde

k uvolnění daného množství energie v podobě akustické vlny. V případě trhliny účinkuje jako zdroj akustické emise jednak vzájemné tření mezi plochami, které trhlina vytvořila, a také plastická deformace, která vzniká u kořene trhliny, kde lokální napětí značně převyšuje mez kluzu. Takový signál pak vzniká v rychlém tempu, čemuž je potřeba přizpůsobit postup měření.

Zdrojem akustické emise jsou i fázové přeměny, jak píše ve své práci M. Horník [14]. Například martenzitická přeměna, jak je známo, produkuje často i slyšitelný zvuk. To dokazuje, že je také zdrojem intenzivní akustické emise. Jedná se o výsledek bezdifuzních procesů, ke kterým při martenzitické přeměně dochází a které je možné charakterizovat jako smykové. Akustickou emisi lze v tomto případě dobře definovat, protože je přímo ovlivněna objemem transformovaného materiálu.

Dalšími původci akustické emise mohou být zdroje, které se využívají pro její umělé vytvoření. Toho se využívá převážně v laboratorních podmínkách, a to například při kalibrování snímačů. Nejznámější je takzvaný Pen-Test, který je využívá díky své jednoduchosti a rychlosti. Podstatou této metody je lámání 3 mm dlouhé tuhy s průměrem 0,3 mm nebo 0,5 mm o povrch materiálu. Tuha je umístěna ve speciální tužce, která zajistí vždy totožné zlomení. Když tuha tlačí na materiál a následně se zlomí, povrch se rázem odlehčí a je tak uvolněno značné množství energie v podobě akustické emise. Pro kalibrování snímačů je Pen-Test velmi vhodný, protože opakovaně generuje v podstatě stejné vlny. [13]

V ideálním případě je akustická emise ze zdroje vysílána v podobě balíků vln, neboli událostí akustické emise, které se šíří v prostředí, které je konečné, izotropní, stejnorodé a ideálně elastické. Skutečnost je však jiná a ideální stav je samozřejmě těžko dosažitelný, protože jsou vlny při měření značně ovlivňovány povrchy a nehomogenitami, které pak vlny odrážejí a zkresluje. [15]

4.4 Akustická emise při procesu obrábění

Proces obrábění je přirozeně doprovázen vysokofrekvenční akustickou emisí, díky vlivům značné interakce (řezná síla, tepelné účinky) nástroje a obrobku. Soustružení, frézování nebo třeba broušení vytvářejí jedinečnou akustickou emisi na základě příčin, kterými je daný řezný proces specifický. Jednotlivé části signálu akustické emise lze momentálně jen těžko přiřadit ke konkrétním zdrojům, protože se nacházejí příliš blízko sebe.

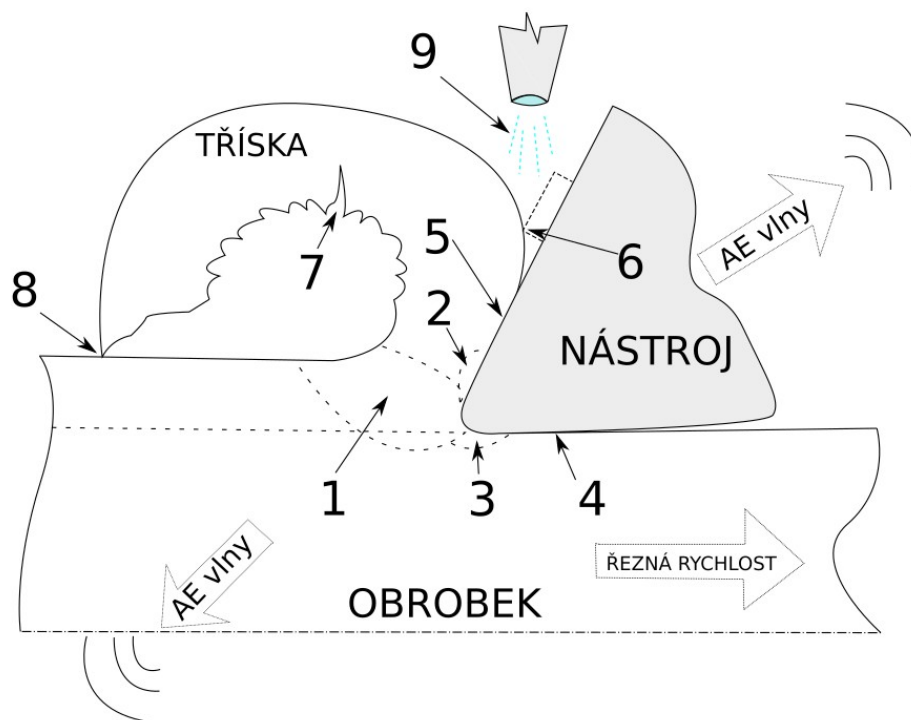
V poměrně plynulém a spojitým signálu akustické emise je však možné relativně snadno rozpoznat nespojité kmity, které mají velkou amplitudu. Tyto kmity vznikají jako účinek nežádoucích jevů, jako je například poškození nebo zničení řezného nástroje. Dalším důsledkem podobných kmitů, i když výrazně méně energetických a více spojitých, může být také tření vlivem kontaktu třísky, nástroje a obrobku. Tyto jevy se využívají při monitorování procesu obrábění. [14]

Akustickou emisí doprovázející proces obrábění lze v oblasti vzniku třísky přiřadit několika základním zdrojům viz Obr. 28, které mají odlišnou fyzikální a mechanickou podstatu. Tyto zdroje lze v podstatě rozdělit do dvou základních skupin, a sice zdroje spojitého signálu a zdroje nespojitého signálu AE. [3]

Mezi zdroje spojitého signálu patří hlavně plastická deformace, která se vyskytuje u kořene třísky. Konkrétně jde o oblasti primární plastické deformace, kde dochází ke kluzu ve smykových rovinách, oblasti sekundární plastické deformace, které vznikají vlivem tření

třísky o čelo nástroje, a nakonec oblasti terciální plastické deformace, kdy je část materiálu obrobku stlačována pod břit rezného nástroje. [14]

Další zdroje, které generují signál akustické emise, se nalézají v místech, kde dochází ke kontaktu nástroje a materiálu obrobku. Jmenovitě jde o tření mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem a tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou. Je-li nástroj opatřen určitým lamačem nebo utvařečem třísky, tak samozřejmě dochází mezi ním a třískou také k významnému tření. Poměrně silným zdrojem akustické emise, jejíž signál vykazuje velké hodnoty maximální amplitudy, je nárůstek, který svým vznikem a následným odtržením způsobuje energetické rázy. Nespojité signály akustické emise generuje rovněž lámání třísky během jejího odchodu. Následný náraz třísky na povrch obrobku je také zdrojem bouřlivého signálu. Při degradaci nástroje v podobě vylamování vydrolování materiálu dochází ke vzniku a šíření trhlinek, které mohou vést až k jeho úplnému zničení. Tento proces je též zdrojem akustické emise. Dokonce i proud rezné kapaliny, za předpokladu, že je při obrábění použita, se na signálu AE projeví. Při tvorbě dlouhé smotané třísky poměrně často dojde k jejímu navinutí na rezný nástroj, případně obrobek. I tento jev se na podobě signálu akustické emise může podepsat. [3]



Obr. 28: Zdroje AE při procesu obrábění [3]

- 1 – Oblast primární plastické deformace
- 2 – Oblast sekundární plastické deformace
- 3 – Oblast terciální plastické deformace
- 4 – Tření mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem
- 5 – Tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou
- 6 – Tření mezi lamačem nebo utvařečem a odcházející třískou

- 7 – Lámání třísky
- 8 – Kontakt třísky s obráběným povrchem (tření nebo náraz)
- 9 – Proud řezné kapaliny

Všechny tyto zdroje společně vytvářejí poměrně rozmanitý signál akustické emise, který se šíří jak materiálem obrobku, tak rovněž i materiálem řezného nástroje. Zde však signál nekončí, protože se šíří dále skrze obrobek i do svěráku či sklíčidla a stejně tak skrze řezný nástroj, kupříkladu v podobě VBD pro soustružení, do nože, do nožového držáku a dále.

Je vhodné podotknout, že se každý z výše uvedených zdrojů akustické emise projevuje v určité frekvenční oblasti, protože má svojí specifickou intenzitu. Signál generovaný plastickými deformacemi (zdroje 1, 2, 3) a třením (zdroje 4, 5, 6, 8) se vyznačuje jako spojitý. V ostatních případech má výsledný tvar signálu AE spíše nespojitý a více energetický charakter s obvykle neperiodickými vrcholky amplitud. [3]

Že se charakter signálu mění s ohledem na zkoumanou metodu obrábění, může dokazovat přítomnost dalších zdrojů, kterými je daná metoda specifická. Například při frézování dochází přirozeně, na rozdíl od soustružení, k přerušovanému řezu. Tento fakt umožňuje vznik dalších původců akustické emise, kterými jsou rázové vlny vznikající při vstupu nástroje (zubů frézy) do řezu a náhlé zlomení třísky při jeho opětovném výstupu z materiálu. [14]

Jak daný řezný nástroj při obrábění postupně degraduje, otupuje se a mění svůj tvar (geometrii). Tím jsou samozřejmě ovlivněny jednotlivé zdroje akustické emise, jako je například tření mezi nástrojem a obrobenou plochou, protože se na hřbetu nástroje vytváří ploška. Stejně tak tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou je ovlivněno vznikem výmolu, který obdobně, jako ploška na hřbetě, mění velikost styčné plochy. Dále také změna úhlu čela γ , ke které dojde kupříkladu vznikem nárůstku, vede ke změně velikosti oblastí plastické deformace. Nárůstek rovněž zvětšuje zaoblení ostří r_N , což vede k tomu, že se břit v tomto místě chová více jako tvářecí nástroj s tupým koncem a oblast plastické deformace samozřejmě narůstá. To vše se pochopitelně promítne i na podobě signálu akustické emise, jehož změna v průběhu procesu obrábění může pak sloužit při monitorování řezného procesu jako ukazatel pro vyhodnocení stavu nástroje. [3]

4.5 Využití akustické emise

Jakožto projev mikroseismické aktivity, byla akustická emise pozorována lidmi už odedávna. Vlnové jevy v pevné fázi, které vznikají při deformování, jsou známy již poměrně dlouho. Jeden z nejznámějších materiálů, které se tímto způsobem projevují v pro člověka slyšitelném spektru zvuku, je například dřevo. Člověk tak mohl pouhým uchem posoudit stav dřevěných konstrukcí po jejich zatížení. Zřejmě první využití akustické emise za účelem kontroly lze datovat do období přibližně 6500 před naším letopočtem, kdy se v hrnčířství během vypalování sledovaly zvuky, které se uvolňovaly z nádob, a mohly tak upozornit hrnčíře na případné výrobky, které byly nějakým způsobem vadné. [14]

Jak již bylo zmíněno dříve, využití akustické emise má dnes určitý potenciál napříč různými obory, což dokazuje schéma Obr. 23 na straně 18. Analýzou jejího signálu je možné získat cenné informace o charakteru jejího zdroje a lze ho také poměrně přesně lokalizovat.

Dle M. Horníka [14], patří mezi nejčastější způsoby využití:

- Výzkum v oblasti lomové mechaniky
- Výzkum mechanických, korozních a jiných vlastností materiálů
- Provozní zkoušky tlakových nádob
- Monitorování stavu jaderných zařízení
- Zjišťování úniku různých médií
- Kontrola svarů
- Sledování technologických postupů
- Monitorování řezného procesu
- Sledování opotřebení
- Lokalizace poruch v reálných konstrukcích
- Diagnostika šíření trhlin v kovových konstrukcích

Průběžné monitorování AE na zařízeních a konstrukcích

Zabezpečuje objevování a lokalizaci aktivních vad za provozu. Dává tak možnost sledovat vznik nových vad, informuje o jejich šíření nebo ověřuje, že se zde žádná další vada nevyskytuje. Je tak zajištěna provozní bezpečnost a spolehlivost chodu. To napomáhá regulaci rizika případné havárie. Jako příklad může být sledování stavu svarů nebo kriticky namáhaných částí konstrukce. Dále se využívá při kontrole, zda nedochází k úniku média z tlakových nádob. [15]

Akustická emise se stále častěji aplikuje na sledování mostů, protože dokáže nepřetržitě shromažďovat data a detekovat změny, které mohou být způsobeny poškozením, aniž by bylo nutné uzavřít některé pruhy nebo celý most. Ve skutečnosti je samotný dopravní tok obvykle využíván jako zatížení při testování akustické emise. [7]

Vyhodnocování AE při tlakových zkouškách

Prospívá k detekci vad v podobě trhlin a technologických defektů svarů na tlakových zařízeních. Měření je realizováno po výrobě a před uvedením do provozu. Výhodou je, že kontrolu lze provádět na celém zařízení, kdy určitá místa nejsou dostupná pro jiné defektoskopické metody. Tím je sníženo riziko náhlého porušení a havárie. Využívá se při kontrole chemických reaktorů, potrubních systémů, kotlů nebo například tlakových zásobníků plynu. [15]

Statické a dynamické zatěžovací zkoušky

Slouží pro nalezení aktivních vad nosných konstrukcí, které mohou být z různých materiálů. Zkoušky se provádějí vnitřním přetlakem. Aplikuje se při zkouškách nosníků a přírubových spojů za účelem snížení nebezpečí selhání. [15]

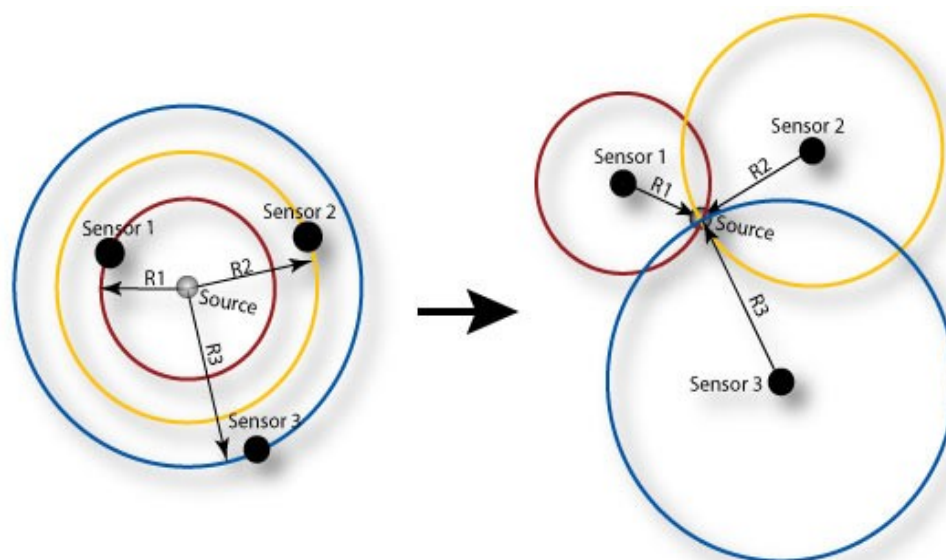
Technologické procesy

Například během svařování, žíhání svarových spojů, chladnutí odlitků nebo vytvrzování laků jsou detekovány a lokalizovány případné vady, čímž je možné kontrolovat kvalitu technologických procesů a snižovat tak zmetkovitost. [15]

Materiálové zkoušky

Používá se pro odhalování vzniklých trhlin a sledování jejich šíření za účelem získání nových informací o charakteru daného materiálu. Sledované procesy je též možné s velkou přesností lokalizovat. Je tak dostupná informace o rozvoji defektu jak z časového, tak i z prostorového hlediska. Využívá se kupříkladu v lomové mechanice, kde je s pomocí akustické emise určován počátek podkritického šíření trhlin. Dále lze získat informace o vzniku a šíření korozních a únavových trhlin. [15]

Lokalizovat zdroj akustické emise lze na základě měření za pomoci minimálně dvou snímačů, měříme-li na přímce (lineární lokalizace), tří snímačů, měříme-li na ploše (plošná lokalizace), případně alespoň čtyř snímačů, jedná-li se o objemovou lokalizaci. Určit polohu zdroje lze pak na základě časového rozdílu příchodu elastických vln do jednotlivých snímačů akustické emise. Příklad plošné lokalizace je k vidění na Obr. 29. [7]



Obr. 29: Lokalizace zdroje akustické emise [7]

Monitorování procesu obrábění

Stav bříty řezného nástroje je jedním z nejdůležitějších parametrů řezného procesu. Již od počátků technologie obrábění si lidé uvědomovali, že signál akustické emise, který vzniká při tvorbě třísky, je značně ovlivněn stavem řezného nástroje. Opotřebení je ovlivněno velkým množstvím parametrů, které jsou těžko identifikovatelné, a proto je vhodné provádět aktivní kontrolu řezného nástroje již během procesu obrábění.

Metoda akustické emise přináší oproti jiným metodám celou řadu významných výhod, ale má i určité zápory. Výpis těch základních uvedl ve své práci M. Horník [14].

Výhody použití metody akustické emise:

- Nedestruktivní metoda
- Okamžité zjištění vzniklé události
- Možnost nepřetržitého sledování jevů
- Indikace pouze aktivních defektů
- Možnost aplikace při běžném provozu, což vede k významným ekonomickým úsporám
- Výborné operativní a rozlišovací schopnosti, kdy lze pozorovat i špatně dostupné díly nebo i celé konstrukce

Nevýhody použití metody akustické emise

- Drahá a relativně složitá měřicí a vyhodnocovací aparatura
- Naměřená data je většinou potřeba zpracovat

4.6 Snímače akustické emise

Měření akustické emise lze provádět v terénu přenosnými nástroji nebo ve stacionárním laboratorním prostředí. Komplexní systémy obvykle obsahují senzor, předzesilovač, filtr a zesilovač, spolu s měřicím, zobrazovacím a paměťovým zařízením (osobní počítač). Pro úspěšnou studii signálu akustické emise je nadmíru důležitý správný výběr snímačů AE. Jak bylo zmíněno dříve, během plastické deformace a lomu materiálu dochází ke generování napěťových vln s frekvencí řádově od 20 kHz do 1 MHz, které se šíří zkušebním vzorkem, nástrojem, konstrukcí atd. od místa zdroje až na povrch, kde jsou snímány kontaktními snímači, které jsou schopny zaznamenat pohyb s amplitudou 10^{-5} až 10^{-12} m. [3]



Obr. 30: Senzory AE [18]

Z toho vyplývá, že snímače musejí zaznamenat značně malé posuvy. Tyto mechanické pohyby (kmity) se na elektrický signál převádějí pomocí převodníků. Elektrický signál je velmi ovlivněn vlastnostmi konkrétního snímače, a protože celkové výsledky testu, dosažené zpracováním signálu, jsou ovlivněny právě elektrickým signálem, jsou typ senzoru a jeho vlastnosti jedny z klíčových faktorů působících na úspěšnost a reprodukovatelnost měření akustické emise. [3]

Ideální senzor by měl dle R. Hejného [15] splňovat následující vlastnosti a požadavky:

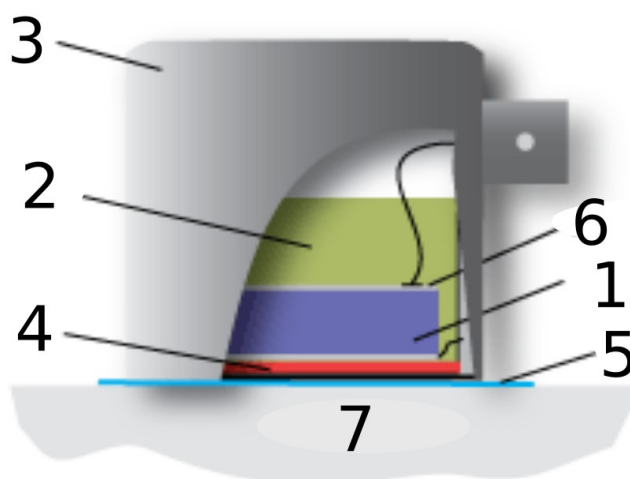
- Vysoce citlivý v celém svém rozsahu
- Spolehlivý přenos signálu
- Snadno připojitelný
- Jednoduchá konstrukce
- Umístění co možná nejbliže ke zdroji AE
- Neměl by omezovat pracovní prostor obráběcího stroje

- Neměl by omezovat řezné podmínky
- Neměl by ovlivňovat statické a dynamické vlastnosti obráběcího stroje
- Odolný vůči vlivům procesu obrábění (tříska, řezná kapalina, teplo atd.)
- Bez nutnosti údržby

Dle typu převodníku lze snímače akustické emise rozdělit na několik základních druhů. Pro převod mechanických kmitů na elektrické se nejčastěji používají piezoelektrické převodníky, které využívají piezoelektrického jevu. Další převodníky mohou být kapacitní, které představují nejjednodušší řešení a v praxi se používají už velmi dlouho. Také je možné se setkat s indukčními převodníky nebo dokonce s laserovými, které využívají optické interferometry, které jsou schopny zaznamenat velmi malé výchylky polohy způsobené právě vlnami akustické emise. [15]

Piezoelektrické snímače

Jak již bylo řečeno, piezoelektrické snímače využívají piezoelektrického jevu, což je ve své podstatě schopnost krystalu generovat elektrické napětí, je-li deformován. Prvek snímače v AE senzoru je téměř vždy piezoelektrickým krystalem, který je běžně vyráběn z keramiky, jako je titaničitan zirkoničitý (označován jako PZT). Piezokeramický element v podobě malého kotoučku definuje vlastnosti snímače, jako je jeho citlivost a měřitelný frekvenční rozsah. Průměr elementu (kotouče) určuje horní hranici snímaných napěťových vln. Na element se ještě umísťuje určitá zátěž. To vede k útlumu akustických vln a zamezení rezonance, díky čemuž může snímač pracovat v širším frekvenčním pásmu. Tato zátěž je obvykle vyrobena ze směsi epoxidového lepidla a prášku o velké hustotě (např. wolfram). [3]

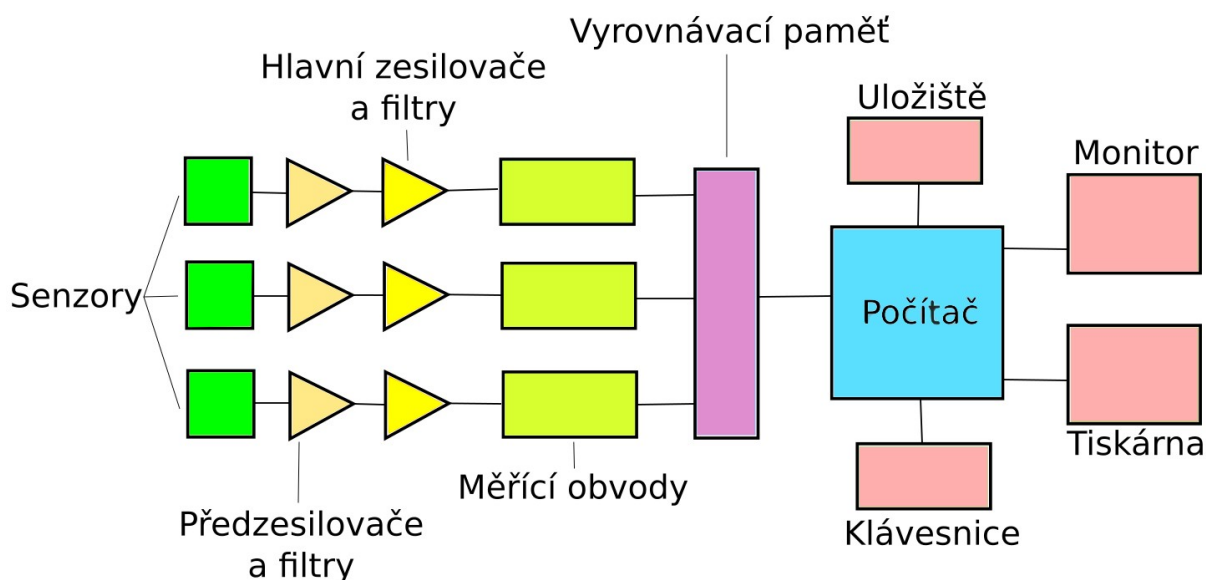


Obr. 31: Piezoelektrický snímač AE [7]

- 1 – Piezokeramický element
- 2 – Zátěž (tlumící hmota)
- 3 – Tělo snímače (nerezové pouzdro)
- 4 – Kovová membrána
- 5 – Couplant (gel pro lepší vedení vln ze vzorku do snímače)

- 6 – Elektroda
- 7 – Zkoumaný objekt

V ideálním případě by signál akustické emise, který dosáhne hlavního počítače, byl bez šumu v pozadí a elektromagnetického rušení. V reálném světě tomu tak bohužel není. Sensory a předzesilovače jsou však navrženy tak, aby pomáhaly eliminovat nežádoucí signály. Nejprve předzesilovač zvyšuje napětí, aby poskytoval zesílení. Aby se minimalizovalo rušení, je předzesilovač umístěn v blízkosti převodníku (dnes je již mnoho převodníků vybaveno integrovanými předzesilovači). Dále je signál předáván do pásmového filtru pro odstranění nízkých frekvencí (šumu v pozadí) a vysokých frekvencí. Po dokončení tohoto procesu se signál posílá do hlavního počítače akustického systému a případně do počítače nebo podobného zařízení za účelem analýzy a uložení. V závislosti na šumových podmínkách může být stále nutné další filtrování nebo zesílení na hlavním počítači. Příklad, jak může měřicí systém vypadat, je schématicky znázorněn na Obr. 32. [7]



Obr. 32: Schéma tříkanálového měřicího systému AE [7]

5 Dostupné práce o akustické emisi při obrábění

Aby bylo možné realizovat hodnotný experiment, je důležité vzít v úvahu způsoby, výsledky a poznatky jiných autorů a pracovišť, které se touto problematikou zabývaly. V této části je stručně popsáno několik vybraných experimentálních činností, které se zabývají zkoumáním signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje a obecně třískovému obrábění.

5.1 Čelní frézování obrobku z šedé litiny

Michal Horník [14] se ve své diplomové práci zabýval zkoumáním signálu AE při frézování obrobku z šedé litiny. Podstatou experimentu bylo použití frézy se dvěma VBD, kdy autor zkoumal kombinace ostrých ($VB = 0,1$ mm) a tupých ($VB = 0,5$ mm) břitů destičky a sousledného a nesousledného způsobu frézování. Zároveň byly měněny řezné podmínky, a sice tloušťka odřezávané vrstvy h [mm], řezná rychlost v_c [m/min] a rychlost posuvu v_f [mm/min]. Nástroj obráběl polovinou svého průměru a v řezu byl vždy po dobu dvanácti

otáček, což umožnilo následné statické vyhodnocování. Snímač signálu akustické emise byl v tomto experimentu připevněn na povrchu obráběného vzorku.

Právě fakt, že fréza byla v záběru vždy stejný počet otáček, umožňoval autorovi měřit parametr counts, neboli počet emisních překmitů přes nastavenou úroveň signálu, na základě čehož jednotlivá měření nakonec vyhodnocoval.

Ve svých výsledcích M. Horník [14] uvádí, že byl dle signálu AE schopen určit, kolik břitů je v řezu a zda jsou v řezu dva ostré nebo dva tupé břity. Hůře lze pak ale poznat kombinace ostrého a tupého břitu. Dále tvrdí, že je signál citlivý na změnu tloušťky odřezávané vrstvy h , kdy se zvětšující se tloušťkou roste četnost překmitů ve vyšších energetických hladinách. Také je možné rozlišit, zda se jednalo o sousledné, či nesousledné frézování. Autor dále uvádí fakt, že akustická emise související s tvorbou třísky má mnohem vyšší intenzitu, než akustická emise vznikající třením nástroje o obrobenou plochu.

Na základě výše zmíněných poznatků autor doporučuje metodu akustické emise pro sledování procesu frézování, avšak dodává, že je signál průkaznější při vyšším úběru materiálu, proto se hodí spíše pro hrubovací operace.

5.2 Vliv změny geometrie obráběcího nástroje

Další experiment, který zkoumá vazbu mezi opotřebením břitu a signálem akustické emise, realizoval v rámci své práce Jiří Novotný [26]. Jako metoda obrábění bylo v tomto případě zvoleno podélné soustružení konstantními otáčkami $n = 710$ [ot/min] při nastavené hloubce řezu $a_p = 0,5$ [mm]. Jako nástroj byl použit soustružnický nůž s vyměnitelnými břitovými destičkami, kdy byly použity 3 typy VBD, a sice nová, opotřebená a uštíplá. Autor v tomto experimentu použil 2 snímače AE. První snímač byl umístěn na těle soustružnického nože a druhý na nožové hlavě viz Obr. 33, proto byly získány z každého měření dva výsledky.



Obr. 33: Měření akustické emise [26]

Při měření byly sledovány parametry counts a RMS signálu AE. Na základě získaných dat autor uvádí, že opotřebený nástroj generuje větší množství countů, neboli překmitů přes danou prahovou hodnotu, než nový nástroj. Ze záznamů signálů AE uvedených v práci je také patrné, že nejvyšší hodnoty RMS bylo dosaženo při obrábění uštíplou VBD, o něco méně opotřebenou destičkou a nejmenší hodnoty RMS signálu AE generovala destička nová. Jak by se dalo předpokládat, daleko výraznější signál byl naměřen pomocí snímače na noži, než

na nožové hlavě, kdy hodnota RMS signálu AE je na nožové hlavě přibližně 4x nižší. J. Novotný [26] závěrem uvádí, že při stanovení kritické úrovně překmitů, by bylo možné predikovat selhání řezného nástroje a včas provést jeho výměnu.

5.3 Využití AE při hodnocení procesu obrábění

Jiří Dostál [25] se ve své diplomové práci zaměřil na hodnocení procesu frézování za pomoci snímání signálu akustické emise. Jako obráběný vzorek byly použity dva druhy materiálu, houževnatější ocel tř. 11 a ocel tř. 12. Pro měření byly zvoleny řezné podmínky, kdy byly stanoveny konstantní otáčky $n = 56$ [ot/min], tloušťka odřezávané vrstvy $h = 1$ [mm] a byla měněna posuvová rychlost v_f [mm/min] ve třech stupních (28; 40; 80). Jako nástroj byla zvolena fréza se šesti VBD a snímač akustické emise byl upevněn na spodní stranu obrobku.

Při tomto experimentu tedy nebyl vyhodnocován přímo vliv opotřebení nástroje na signál akustické emise, ale právě další vlivy, jako je posuvová rychlost a charakter obráběného materiálu. Přesto je vhodné vzít tento experiment v potaz, jelikož i v případě vlastního experimentu bude docházet k interakci signálu akustické emise a dalších jiných vlivů, než je pouze opotřebení břitu nástroje.

Ve svých výsledcích J. Dostál [25] uvádí zajímavá zjištění, která poukazují na rozdílný vývoj signálu akustické emise ve dvou odlišných materiálech při zvyšování posuvové rychlosti. V případě oceli třídy 12 dochází zvyšováním posuvové rychlosti k nárůstu počtu překmitů přes nastavené prahové hodnoty a rovněž stoupá RMS signálu akustické emise. U houževnatější oceli třídy 11 je však tento trend opačný a počet countů i RMS signálu AE klesají se zvyšující se posuvovou rychlostí. Při frézování tvrdšího materiálu jsou na signálu AE dle autora rovněž lépe patrné záběry jednotlivých zubů podle celkové energie signálu RMS. Autor nakonec uvádí, že lze metodu akustické emise aplikovat pro monitorování procesu obrábění, ale není možné na jejím základě s určitou přesností hodnotit řezné podmínky, jako je řezná rychlost, úběr atd.

5.4 Diskuze

Na základě výše zmíněných prací a experimentů je patrné, že lze k měření signálu akustické emise ve vztahu k obrábění přistupovat celou řadou způsobů. Autoři měřili a studovali akustickou emisi při různých metodách obrábění, používali odlišné nástroje a měnily řadu řezných podmínek, aby zjistili, jak se bude signál po jejich změně lišit.

Co však mají zmíněné studie společné je to, že nesledují vývoj opotřebení břitu a signálu AE v reálném čase. Proto by bylo vhodné naplánovat experiment, kdy by byl při dané metodě obrábění sledován vývoj opotřebení břitu nástroje od jeho nového stavu až po jeho selhání za současného měření signálu akustické emise. Takový experiment by poskytl informace o tom, jak se signál vyvíjí z dlouhodobého hlediska a zda je možné určit moment, kdy je potřeba nástroj vyměnit za nový. Protože J. Novotný [26] ve svém experimentu při soustružení zachoval řeznou rychlost konstantní, bylo by rovněž vhodné ve vlastním experimentu rychlost v několika stupních měnit, aby bylo možné určit její vazbu na signál akustické emise a říci, jakým způsobem jej ovlivňuje.

6 Experimentální část

Experimentální část spočívala ve sledování signálu akustické emise a jeho vývoji v závislosti na zvětšující se míře opotřebení řezného nástroje. Cílem experimentu bylo získání patřičného množství údajů a dat, která dokazují vazbu mezi opotřebením řezného nástroje a signálem akustické emise, a rovněž určení vhodnosti této metody pro monitorování opotřebení. Dále bylo potřeba najít další faktory, které mohou během řezného procesu signál akustické emise nějakým způsobem ovlivňovat. V neposlední řadě bylo záměrem experimentu i nalezení omezení a úskalí této metody.

Experiment proběhl v halových laboratořích RTI (Regionální technický institut), což je moderní strojírenské a technologické centrum Fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni a uskutečnil se v období od 27.1. 2020 do 31.1. 2020.

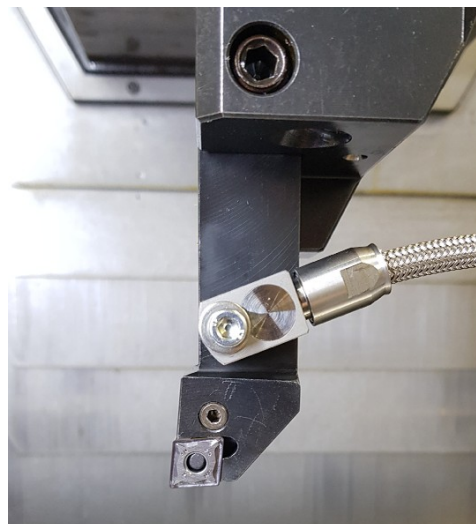
6.1 Metodika měření

Experiment byl realizován jako vnější podélné soustružení vzorku v podobě válcového polotovaru za pomoci přímého uběracího nože s vyměnitelnou břitovou destičkou. Jako obráběcí stroj bylo využito multifunkční soustružnické centrum CTX Beta 1250. Vzorek byl upnut do univerzálního tříčelist'ového sklíčidla a na druhé straně podepřen otočným hrotem. Snímač akustické emise byl připevněn na tělo nože s použitím šroubu viz Obr. 34 a triaxiální kabel, který propojuje snímač s dalšími díly měřící aparatury, byl z pracovního prostoru stroje vyveden příslušným otvorem. Snímač, stejně jako další prvky aparatury pro měření akustické emise, je od výrobce Kistler a je detailněji popsán v kapitole 6.5 spolu s informacemi o konkrétní konfiguraci.

Způsob upnutí obráběného vzorku



Nástroj se snímačem akustické emise

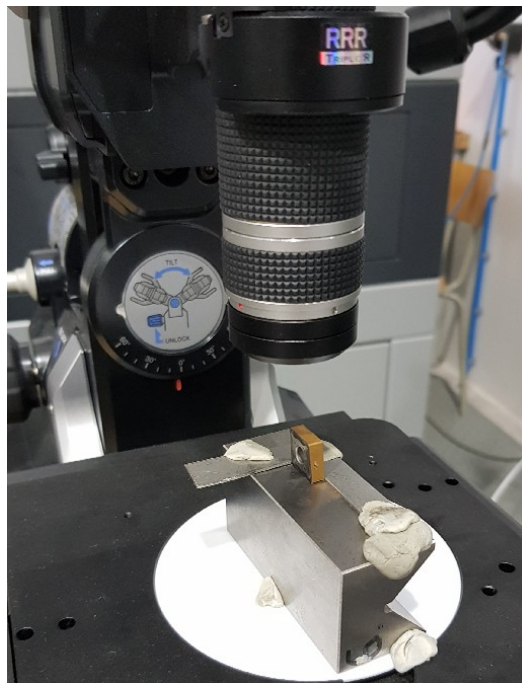


Obr. 34: Upnutí vzorku a snímač akustické emise

Pro sběr, analýzu a další práci s naměřenými daty byl použit počítač vybavený softwarem DynoWare, který je pro tento účel uzpůsobený. Součástí vybavení, které bylo pro experiment potřebné, byl také digitální dílenský mikroskop Keyence VHX-6000, který sloužil ke sledování vývoje opotřebení břitové destičky.

Před samotným experimentálním obráběním byla ze vzorku soustružením odebrána vrstva materiálu, aby nebylo měření negativně ovlivňováno povrchovými nerovnostmi. Jako kontrola správnosti zapojení aparatury pro měření akustické emise byl proveden jednoduchý test, kdy byla tělo nože zlomena grafitová tuha, což se po úspěšném zapojení projevilo jako skokový nárůst signálu AE.

Samotný experiment probíhal tak, že byla použita nová VBD, se kterou bylo prováděno podélné soustružení za současného měření signálu akustické emise. Po určité smluvené době byl řez přerušen, záznam signálu akustické emise byl v systému DynoWare uložen pod patřičným označením a břitová destička byla vyjmuta a přenesena na pracoviště s digitálním dílenským mikroskopem viz Obr. 35. Tam byla přeměřena míra opotřebení na hlavním hřbetu VBD, tedy hodnota VB, která byla zaznamenána a snímek z mikroskopu byl rovněž pod správným označením uložen pro případné pozdější potřeby. Poté byla VBD umístěna zpět do nožového držáku, systém DynoWare byl nastaven pro další zaznamenávání signálu akustické emise a celý proces se opakoval do té doby, než bylo dosaženo smluveného kritériálního opotřebení VB_{krit} , které bylo stanoveno jako $VB_{krit} = 0,3 \text{ mm}$.



Obr. 35: VBD na stolku mikroskopu

Poté byla použita nová VBD, respektive nové ostří, a experiment se buď opakoval za stejných řezných podmínek nebo byla pozměněna řezná rychlost. Cílem bylo změnit řeznou rychlost alespoň v pěti stupních a pro každou rychlost měření alespoň dvakrát opakovat. Kromě řezné rychlosti byly ostatní řezné podmínky konstantní, tedy hloubka řezu a_p a posuv na otáčku f_o se neměnily. Přehled řezných podmínek použitých v experimentu je k vidění v Tabulka 4.

Parametr	Hodnota	Jednotky
a_p	0,5	mm
f_o	0,15	mm/ot
v_{c1}	60	m/min
v_{c2}	100	m/min
v_{c3}	120	m/min
v_{c4}	140	m/min
v_{c5}	160	m/min

Tabulka 4: Řezné podmínky

6.2 Obráběcí stroj

Podélné soustružení probíhalo na obráběcí stroji CTX Beta 1250 TC (Obr. 36) výrobce DMG MORI, což je multifunkční soustružnicko-frézovací centrum, které je součástí strojového vybavení RTI a disponuje řídicím systémem Sinumerik 840D. Základní technické parametry stroje uvedené výrobcem jsou k vidění v Tabulka 5.



Obr. 36: CTX Beta 1250 TC

Parametr	Hodnota	Jednotky
Výkon hlavního vřetena	32	kW
Kroutící moment hlavního vřetena	360	Nm
Maximální otáčky hlavního vřetena	5 000	ot/min
Výkon protivřetena	32	kW
Kroutící moment protivřetena	360	Nm
Maximální otáčky protivřetena	5 000	ot/min
Výkon frézovacího vřetena	22,5	kW
Kroutící moment frézovacího vřetena	120	Nm
Maximální otáčky frézovacího vřetena	12 000	ot/min
Maximální délka soustružení	1 200	mm
Maximální průměr soustružení	500	mm
Posuv v ose X	490	mm
Posuv v ose Y	±125	mm
Posuv v ose Z	1 300	mm
Přesnost výroby	0,01	mm
Počet nástrojů v revolverové hlavě	12	-
Počet nástrojů v zásobníku	24	-

Tabulka 5: Technické parametry stroje CTX Beta 1250 TC [21]

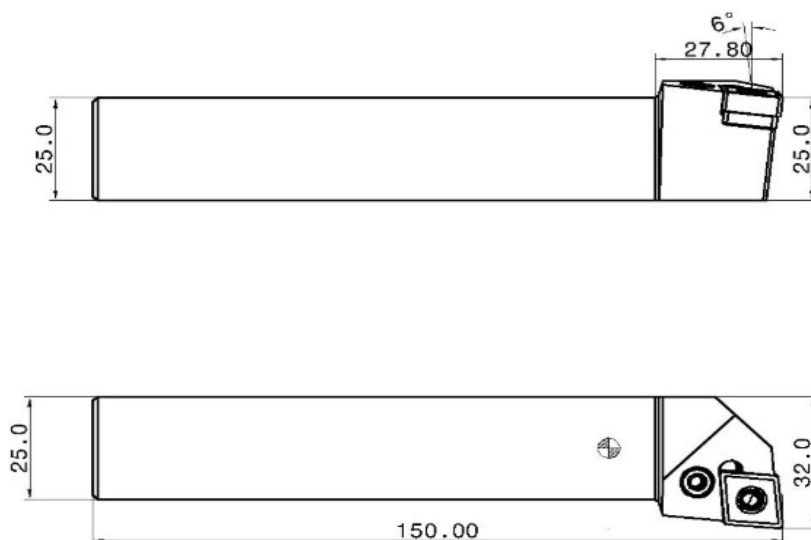
6.3 Nástroj

6.3.1 Soustružnický nůž

Pro experiment byl zvolen radiální soustružnický nůž s označením PCLNL 2525M-12 viz Obr. 37. Jedná se o přímý uběrací nůž levý od výrobce ISCAR. Nástroj byl před experimentem upraven výrobou díry se závitem pro potřeby uchycení snímače akustické emise pomocí šroubu.

Parametry soustružnického nože dle označení:

P	Upínání VBD za díru
C	Pro VBD tvaru C
L	Geometrie nože typu L
N	Úhel hřbetu VBD $\alpha_n = 0$ [°]
L	Levostranné provedení
25	Výška stopky $h = 25$ [mm]
25	Šířka stopky $b = 25$ [mm]
M	Délka nástroje $l_1 = 150$ [mm]
12	Velikost VBD (délka ostří) $l = 12$ [mm]



Obr. 37: Soustružnický nůž [22]

Další rozměry:

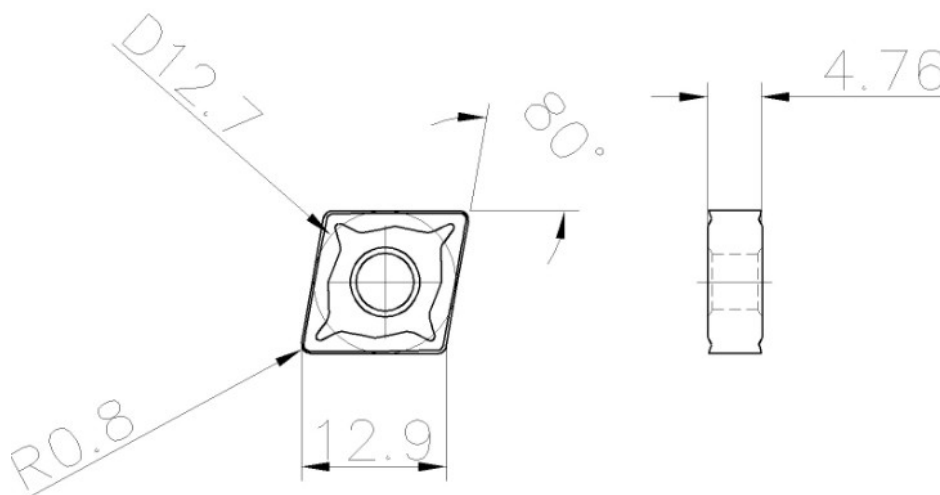
Vzdálenost destičky k ose držáku	$f = 32$ [mm]
Délka hlavy	$l_2 = 27,8$ [mm]
Axiální úhel čela	$\gamma_a = -6$ [°]
Radiální úhel čela	$\gamma_r = -6$ [°]

6.3.2 Vyměnitelná břitová destička

Jako VBD byly pro experiment použity destičky s označením CNMG 120408-NF viz Obr. 38. Jedná se o VBD, které jsou, stejně jako samotný soustružnický nůž, od výrobce ISCAR. Jsou to oboustranné kosočtverečné destičky, které nabízejí celkem čtyři použitelná ostří. Jejich využití je dle výrobce především v oblasti předdokončování a dokončování.

Parametry VBD dle označení:

C	Tvar VBD typu C 80°
N	Úhel hřbetu VBD $\alpha_n = 0$ [°]
M	Tolerance
G	VBD typu G
12	Velikost VBD (délka ostří) $l = 12$ [mm]
04	Tloušťka destičky $s = 4$ [mm]
08	Poloměr špičky $r_E = 0,8$ [mm]
NF	Geometrie NF (dokončování)



Obr. 38: VBD [22]

VBD použita pro experiment byla z materiálu IC807, což je obchodní označení slinutého karbidu firmy ISCAR. Jedná se houževnatý submikronový substrát, který byl vyvinut pro obrábění velmi tvrdých ocelí, žáruvzdorných a nerezových ocelí.

Destička navíc disponuje povlakem tenkých vrstev TiAlN (titan aluminium nitrid) a TiN (nitrid titanu), které byly nanášeny metodou PVD (fyzikální depozice z plynné fáze). Ty zaručují odolnost proti vysokým teplotám a otěruvzdornost.

V rámci experimentální části bylo použito dohromady pět vyměnitelných břitových destiček typu CNMG 120408-NF, se kterými byla proměřována závislost signálu akustické emise a opotřebení na celkem sedmnácti rezných hranách (břitech).

6.4 Obráběný vzorek

Materiál obrobku

ČSN	EN / DIN	W. Nr.
16 343	34 CrNiMo 6	1.6582

Po konzultaci s materialisty byla experimentální činnost realizována na materiálu **34CrNiMo6**, který díky své horší obrobitelnosti zajistil při soustružení dostatečnou intenzitu opotřebování rezného nástroje, která byla pro ideální průběh měření žádoucí. Jedná se o ušlechtilou konstrukční ocel, která se využívá pro vysoce namáhané strojní součásti, protože nabízí dobré vlastnosti, které kombinují výhodný poměr pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Díky svému obsahu uhlíku (cca 0,34 % C) je tato ocel poměrně dobře kalitelná. Nejčastěji se tento materiál používá pro vysoce namáhané součásti automobilů, respektive motorů. Typickými výrobky jsou klikové hřídele, hnací hřídele, převodové části, nápravy a další součásti řízení.

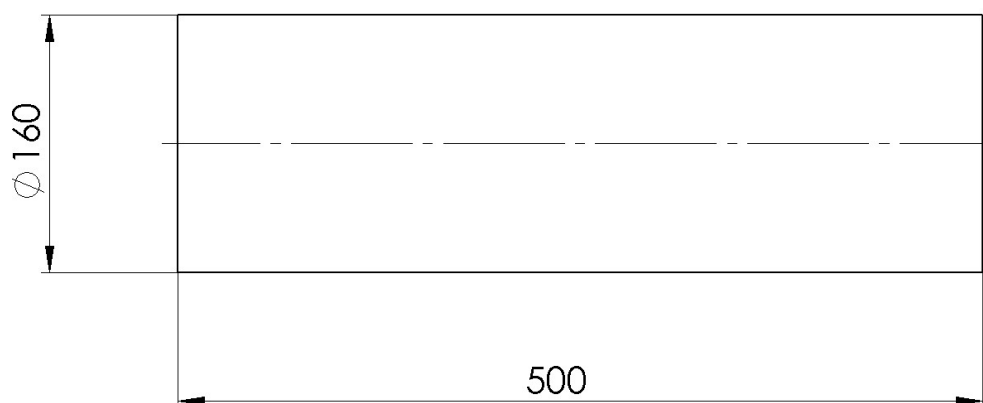
Chemické složení

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	V
Obsah [%]	0,34	0,36	0,58	0,01	<0,001	1,62	1,63	0,29	0,06	0,005	0,03

Tabulka 6: Chemické složení materiálu vzorku [23]

Polotovary

Polotovarem pro soustružení byla tyč $\varnothing 160 - 500$. Použitý vzorek byl před samotným experimentem navíc zušlechťen na pevnost v tahu $R_m=1450$ MPa a tvrdost 40 HRC / 420 HB.



Obr. 39: Zkušební vzorek

6.5 Aparatura pro měření AE

Klíčovým vybavením, které bylo pro experimentální část použito, byla aparatura pro měření a zpracování signálu akustické emise. Ta se skládala z piezoelektrického snímače, dále z takzvaného coupleru, digitalizační karty a počítače se softwarem DynoWare.

6.5.1 Snímač

Základem aparatury pro měření akustické emise je snímač. V tomto případě byl použit piezoelektrický snímač Kistler 8152C050500 s ocelovým opletením kabelu, jak je možné vidět na Obr. 40. Snímač se skládá z pouzdra, měřicího prvku a integrovaného převodníku.

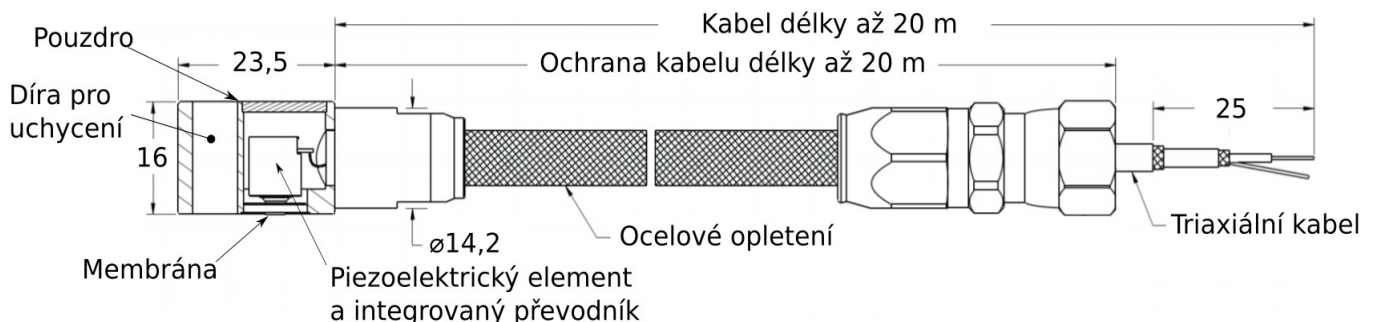
Konstrukce snímače ve své podstatě odpovídá dříve popsanému schématu viz Obr. 31 na straně 30. Měřicí prvek je v tomto případě z piezoelektrické keramiky a je namontován na velmi tenké ocelové membráně. Jeho typ určuje jak citlivost snímače, tak i jeho frekvenční rozsah. Kontaktní povrch membrány, která je k pouzdru přivařena, mírně vyčnívá přes dosedací plochu pouzdra, což při montáži umožňuje dosažení přesně definované přitlačné síly. To zajišťuje konstantní a reprodukovatelné spojení snímače akustické emise a zkoumaného vzorku. Měřicí element je specificky designovaným pouzdrům akusticky izolován a chráněn před vnějšími vlivy. Tento senzor, jak uvádí výrobce, má vysokou hodnotu citlivosti na snímání povrchových (Rayleighových) vln a pokrývá frekvenční rozsah 100 – 900 kHz. [24]



Obr. 40: Piezoelektrický snímač

Miniaturní převodník, který je součástí senzoru, umožňuje, aby byl nízkoimpedanční napěťový signál schopný výstupu. Napájení senzoru a prvotní zpracování signálu zajišťuje takzvaný coupler, neboli vazební člen, který je se senzorem propojen pomocí triaxiálního kabelu, který může být buď s flexibilní polyurethanovou ochranou nebo, jako tomu bylo v našem případě, s ocelovým opletením a nabízí délku až 20 m. V případě tohoto experimentu však zcela postačil kabel o délce 5 m. [24]

Další charakteristiky senzoru jsou k vidění na Obr. 41.



Obr. 41: AE senzor typ 8152C [24]

6.5.2 AE-Coupler

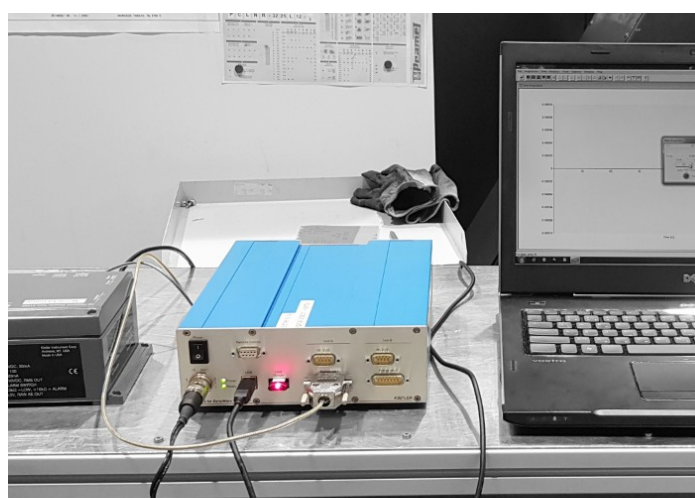
Další částí měřicí aparatury je AE Coupler typ 5125C viz Obr. 42, který slouží pro zpracování vysokofrekvenčního signálu, který vystupuje ze snímače. Jedna z jeho zásadních funkcí je filtrování signálu pomocí dvou sériově zapojených filtrů, kdy jsou odstraněny velmi nízké frekvence a také naopak příliš vysoké frekvence, které by neměly být součástí měření akustické emise. Coupler má také vestavěný RMS převodník. To je zařízení, které konvertuje střídavé napětí RMS signálu na reprezentativní úroveň stejnosměrného napětí za účelem vyšší přesnosti. Coupler je dále připojen k takzvanému DAQ boxu pomocí kabelu typu RS-232C. [24]



Obr. 42: AE Coupler

6.5.3 DAQ Box

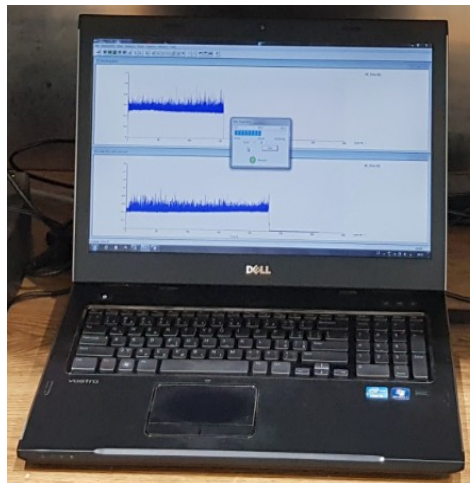
Posledním článkem mezi snímačem akustické emise a počítačem je DAQ box, což je ve své podstatě digitalizační karta. Jeho hlavní částí je 16-ti bitový A / D převodník pro konverzi dat do podoby digitálního signálu, který pak může počítač zpracovat. DAQ box je pak propojen s osobním počítačem přes USB 2.0 porty. [24]



Obr. 43: DAQ Box

6.5.4 DynoWare

Posledním prvkem aparatury pro měření akustické emise je osobní počítač s nainstalovaným systémem DynoWare, který je zachycen na Obr. 44. Snímek byl pořízen během měření akustické emise, kdy je možno v horní části monitoru vidět průběh signálu AE v reálném čase, zatímco ve spodní části je konečný záznam z předchozího měření. DynoWare je softwarový program specializovaný na měřicí systémy. Je vhodný pro měření sil pomocí dynamometrů a pro měření pomocí dalších jedno a vícesložkových senzorů. Sbírá signály ze senzorů a dynamometrů a převádí je na čitelné informace a výstupy, ze kterých lze získat výsledky ve vypovídajícím formátu. Pro analýzu signálu nabízí DynoWare vizualizaci měřené křivky spolu s dalšími grafickými a výpočtovými funkcemi. Kromě snadné konfigurace hlavního měřicího přístroje, umožňuje samozřejmě dokumentaci měření a ukládání naměřených dat.



Obr. 44: Počítač + DynoWare

DynoWare umožňuje měřit až na osmi kanálech najednou. To lze využít eventuálně v případech, kdy je potřeba měřit akustickou emisi více senzory současně. V případě tohoto experimentu byl použit pouze jeden snímač, proto postačil jeden kanál, jak lze vidět na Obr. 45, kde bylo třeba pojmenovat měřený parametr (AE_Rms), zadat jednotky měřené veličiny (V) a stanovit měřicí rozsah (0 – 10 V) viz Obr. 45.

Channel	Label	Measuring Range [M.U.]	Unit	FS [V]	Range 1 [pC]	Sensitivity [pC/M.U.]
1	AE_Rms	10,00	V	10,00	N/A	N/A

Obr. 45: DynoWare – Hardware

Další důležitý parametr, který je třeba stanovit, je vzorkovací frekvence, která byla nastavena na hodnotu 10000 Hz viz Obr. 46. Před každým samotným měřením je vždy nutné zadat čas [s], po který bude DynoWare sbírat data ze snímače. Proto je potřeba se před začátkem obrábění dobře rozmyslet, aby byla měřením signálu akustické emise pokryta celá doba řezu.

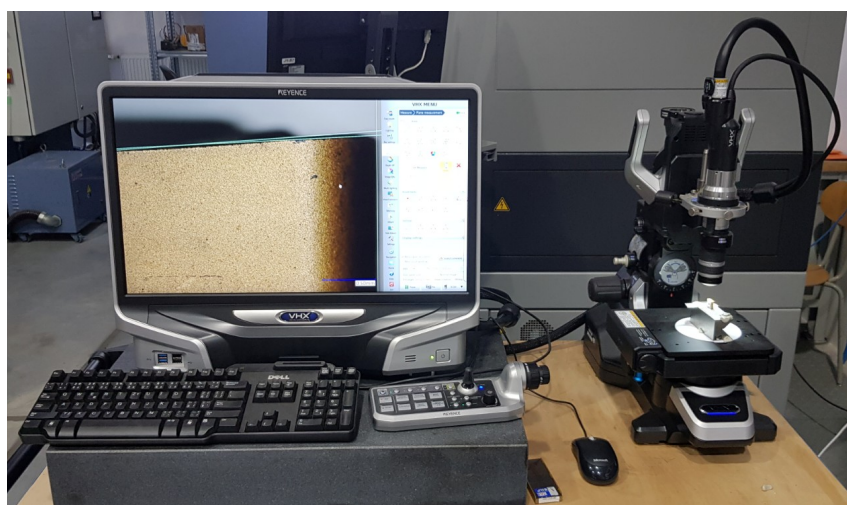
Parameters	Channels	Data Manipulation
Measuring Parameters		
Measuring Time:	400	Seconds
Sample Rate:	10000	Hz
Cycles:	1	<input type="checkbox"/> Continuous
Trigger Delay Time:	0	Seconds
<input checked="" type="checkbox"/> Save DynoWare dwd file <input checked="" type="checkbox"/> Display data <input type="checkbox"/> Export after each cycle Configure... <input checked="" type="checkbox"/> Show realtime updates during acquisition		
Information		
Number of Channels: 0		
Samples / Channel: 4000000		
RAM Space / Cycle: 1,0 KB		
Save		
File:	vc100_f015_ap05_rez10.dwd	Browse...
Directory:	D:\DP_Kratochvil\vc140 ap05\	
<input checked="" type="checkbox"/> Save configuration		

Obr. 46: DynoWare – Edit Acquisition

Tato doba se lišila s ohledem na řezné podmínky, respektive řeznou rychlost v_c . Nakonec je třeba před spuštěním měření pojmenovat záznam a určit adresář, kam bude uložen, aby nedošlo k nepřehlednosti naměřených dat nebo dokonce k jejich záměně.

6.6 Digitální mikroskop

Jak již bylo zmíněno, za účelem měření vývoje opotřebení na hřbetě břitové destičky a následným provázáním naměřených hodnot s hodnotami signálu akustické emise bylo nutné použít digitální mikroskop s možnostmi měření. Na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni je k dispozici mikroskop Keyence VHX-6000, který bylo možné, díky jeho velikosti, přemístit bezprostředně do místa konání experimentu a poskytoval tak možnost rychlého měření míry opotřebení nástroje.



Obr. 47: Keyence VHX-6000

Mikroskop Keyence VHX-6000 dává možnost zkoumat objekty a vytvářet jejich snímky pro měření a vyhodnocování. Získaná data lze ukládat a dále s nimi pak pracovat. Kamera mikroskopu je vybavena snímačem CMOS s rozlišením 1920×1080 pixelů a snímkovou frekvencí 50 fps. Kamera vyniká velkým dynamickým rozsahem (HDR+) a také hloubkou ostrosti. Také možnost automatického ostření značně urychluje proces měření a velmi dobré osvětlení zkoumaného objektu vede k získání vysoce kvalitních snímků. [29]

Součástí standardního vybavení mikroskopu je LCD monitor s rozlišením 1920×1080 pixelů (FullHD) a úhlopříčkou 23“, díky kterému je možné zkoumat v reálném čase vzorky ve vysoké kvalitě. Přímo na monitoru je pak možné provádět měření vzdáleností např. dvou rovnoběžných přímek, což byla v případě tohoto experimentu nejčastěji používaná funkce. Prohlížení vzorků je usnadněno motorizovaným posuvem stolku, který se řídí pomocí křížového ovladače (joystick). Rozsah pojezdu stolku je $100 \times 100 \times 30$ mm (X \times Y \times Z) s krokem 1 μ m v rovině XY a v ose Z 0,1 μ m pro dosažení dostatečně jemného zaostřování. [29]

Tento digitální mikroskop umožňuje použití zoomovacích objektivů, které nabízí zvětšení od 20x až do 2000x. V případě tohoto experimentu byl použit standardní objektiv s rozsahem zvětšení 20x až 200x.

6.7 Zpracování získaných dat

Jak již bylo zmíněno, v experimentální části byla snaha provést měření při minimálně pěti stupních řezné rychlosti v_c [m/min] a každé měření alespoň dvakrát opakovat. Ve skutečnosti se sice povedlo změnit řeznou rychlost celkem pětkrát, avšak s ohledem na průběh otupování břitu nástroje a časovou náročnost experimentu se nepodařilo v některých případech realizovat dvě opakování, která by mohla zodpovědět otázku reprodukovatelnosti této metody. Mimo hlavní měření bylo provedeno i několik vedlejších zkušebních řezů, které sloužily zejména pro určení vhodných řezných podmínek nebo pro ověření dalších vlivů, jako bylo kupříkladu použití řezné kapaliny. Jednotlivá měření a jejich podmínky jsou pro přehlednost uvedeny v Tabulka 7.

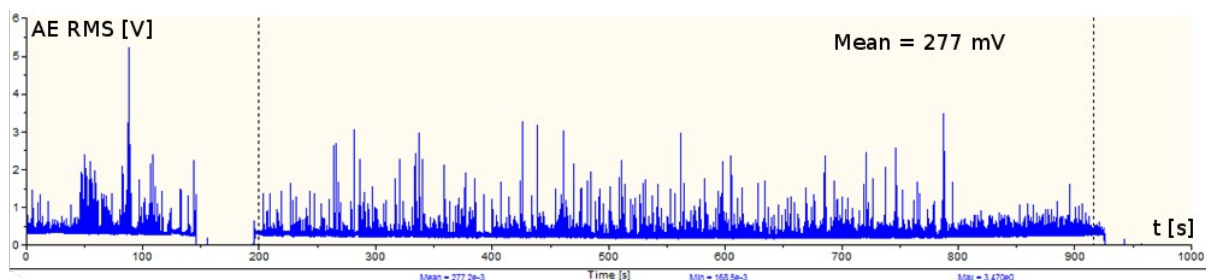
v_c [m/min]	Opakování	a_p [mm]	f_{ot} [mm/ot]	Poznámka
60		0,5	0,15	
60	1.	0,5	0,15	Nedokončeno
100		0,5	0,15	
100	1.	0,5	0,15	
120		0,5	0,15	
120	1.	0,5	0,15	
120	2.	0,5	0,15	
140		0,5	0,15	
140	1.	0,5	0,15	
140	2.	0,5	0,15	
140	3.	0,5	0,15	
160		0,5	0,15	
160	1.	0,5	0,15	
160	2.	0,5	0,15	
45		1	0,15	Zkušební řez
50		1	0,15	Zkušební řez
50		1	0,15	Řezná kapalina
100		1	0,15	Zkušební řez

Tabulka 7: Přehled měření

Během experimentu byly získány záznamy signálů akustické emise, ze kterých byla v softwaru DynoWare vypočtena střední hodnota RMS signálu, tzv. Mean RMS [mV]. Tato hodnota vhodně reprezentuje úroveň signálu akustické emise v průběhu jednoho řezu a lze ji tak lehce přiřadit k odpovídající hodnotě opotřebení řezného nástroje VB [mm].

Při získávání hodnoty Mean RMS umožňuje DynoWare na časové ose ručního výběru rozsahu signálu, ze kterého bude tato hodnota určena. Toho bylo využito v případech, kdy musel být například řez přerušen během měření z důvodu omotání třísky kolem nástroje, což vedlo k riziku utržení snímače akustické emise. Během tohoto pozastavení signál

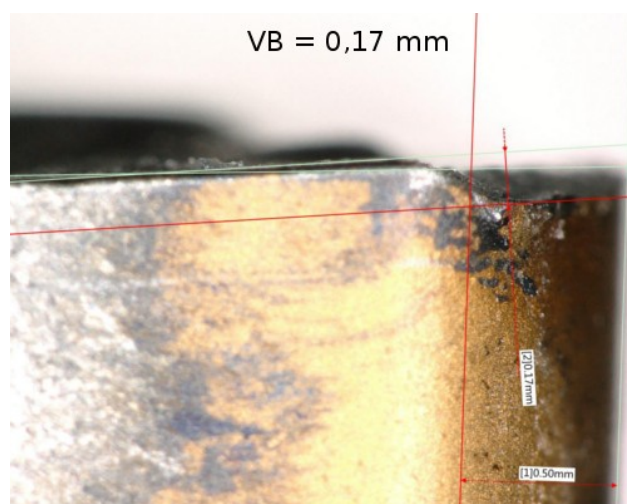
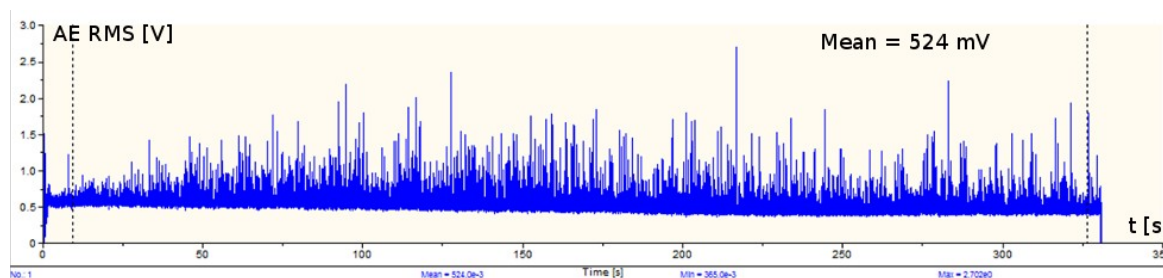
pochopitelně vykazoval téměř nulové hodnoty nebo hodnoty, které byly generovány mechanickým odstraňováním namotané třísky. To by v případě zahrnutí celého záznamu signálu do výpočtu hodnoty Mean RMS vedlo ke značnému zkreslení výsledků, a proto byl vždy vybrán takový úsek signálu, který ho pro účel experimentu nejlépe charakterizoval. Na Obr. 48 je patrné, že hodnota Mean RMS signálu byla získána kvůli přerušení z úseku začínajícím v čase 200 [s] a končícím přibližně 915 [s]. Hodnota Mean v tomto úseku odpovídá hodnotě 277 mV. Dále je zde zobrazena též maximální hodnota (3,47 V) a minimální (168 mV), které však pro účely experimentu nemají takový význam.



Obr. 48: Příklad záznamu signálu AE

V průběhu experimentu bylo nasbíráno poměrně velké množství dat v podobě záznamů signálu akustické emise a snímků opotřebení břitu. Pro přehlednost je však v této části uvedeno pouze několik reprezentujících případů.

Jako typický představitel naměřených hodnot je níže uveden záznam signálu akustické emise s vypočtenou hodnotou Mean RMS a snímek VBD z digitálního mikroskopu se změřenou hodnotou opotřebení břitu VB. Snímky byly získány při druhém opakování řezné rychlosti $v_c = 120$ [m/min] při řezu číslo 7 viz naměřená data v příloze.



Obr. 49: Záznam signálu AE a odpovídající opotřebení břitu

6.7.1 Naměřené hodnoty

Veškeré naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek (Tabulka 8), ze kterých byly následně vytvořeny grafy (Obr. 52), které znázorňují závislost RMS signálu akustické emise a míry opotřebení břitu nástroje VB a na jejichž základě je možné výsledky experimentu hodnotit. V tabulce je uvedeno pořadové číslo řezu daného břitu, čas jednotlivých řezů, celkový čas, po který byl břit v záběru, opotřebení hřbetu VB, které bylo naměřeno po dokončení jednotlivých řezů a v neposlední řadě hodnota Mean RMS, která byla pro každý řez změřena pomocí systému DynoWare.

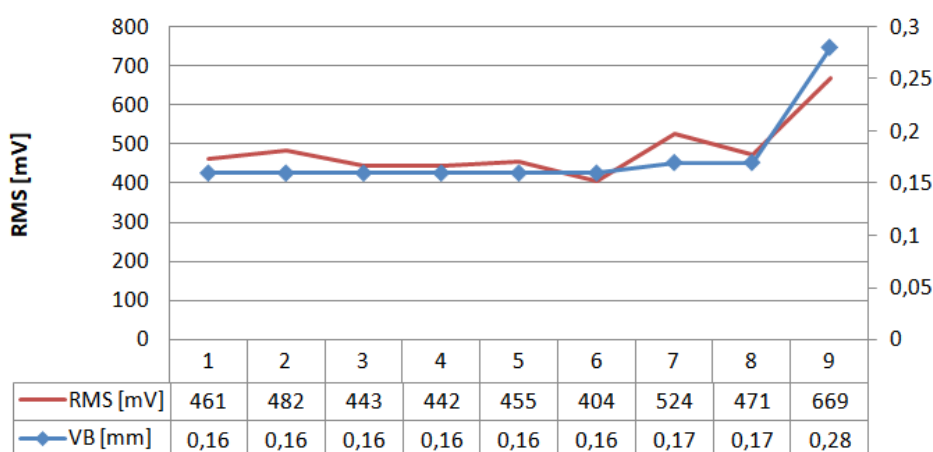
$v_c = 120$ [m/min]

2. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	5	5	0,16	461
2	4	9	0,16	482
3	5	14	0,16	443
4	6	20	0,16	442
5	5,5	25,5	0,16	455
6	5,5	31	0,16	404
7	5,5	36,5	0,17	524
8	5,5	42	0,17	471
9	5,5	47,5	0,28	669

Tabulka 8: Naměřené hodnoty $v_c=120$; $a_p=0,5$; 2. opakování

$V_c = 120$ m/min
2. opakování



Obr. 50: Graf závislosti $v_c=120$; $a_p=0,5$; 2. opakování

Levá svislá osa grafu představuje hodnotu RMS signálu akustické emise (červená), pravá svislá osa znázorňuje opotřebení břitu VB (modrá). Vodorovná osa pak reprezentuje jednotlivé řezy, kterým dané hodnoty signálu AE a opotřebení břitu přísluší.

Veškerá naměřená data v podobě tabulek a k nim náležící grafy jsou součástí příloh.

6.8 Diskuze a vyhodnocení získaných dat

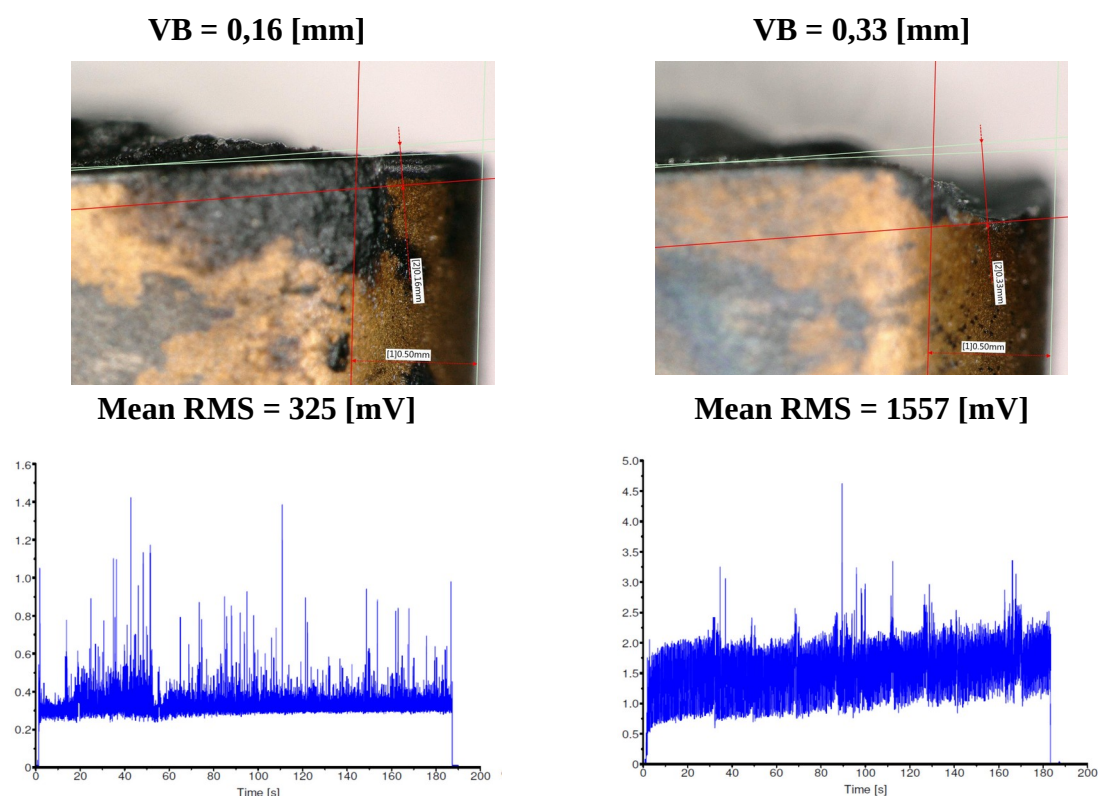
Z výsledků experimentu, jako jsou zpracované grafy ukazující závislost RMS signálu akustické emise na míře opotřebení břitu, je možné vyčíst několik základních informací. Rovněž samotné záznamy signálu akustické emise poskytují relevantní poznatky a poukazují na další faktory, kterými je signál AE ovlivňován.

6.8.1 AE ve vztahu k opotřebení břitu

Z výsledných dat v podobě grafů znázorňujících průměrnou úroveň RMS signálu akustické emise ve vztahu ke stupni opotřebení ostří řezného nástroje je možné vyzorovat, že se skutečně úroveň RMS signálu AE měnila s narůstajícím otupením břitu.

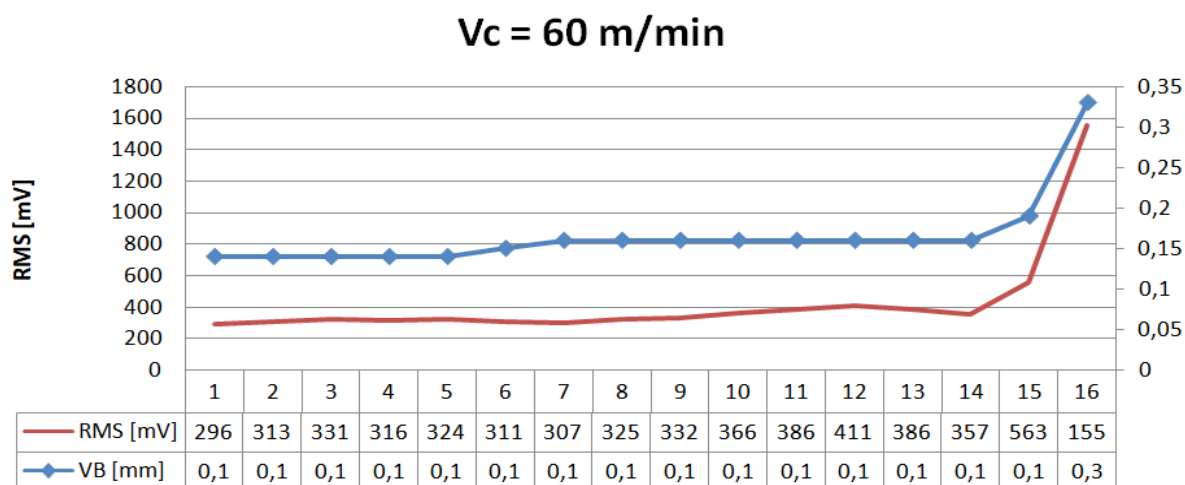
Co se průběhu opotřebení břitu týče, je zde důležité zmínit, že se vyvíjelo vždy v podstatě podobným způsobem, kdy došlo při prvním řezu nového nástroje nejprve k zařiznutí a vzniku tzv. pracovní geometrie a po vyjmutí VBD a přeměření na digitálním mikroskopu bylo pozorováno pouze abrazivní opotřebení na hřbetu. Toto opotřebení se s několika dalšími řezy téměř neměnilo nebo rostlo jen velmi zvolna až do chvíle, kdy došlo k většímu, či menšímu ulomení špičky řezného nástroje, které znamenalo konec správné činnosti nástroje dosažení jeho trvanlivosti. Takový průběh opotřebení byl dle teorie obrábění způsoben menší zvolenou hloubkou řezu.

Na Obr. 51 jsou k vidění snímky, které byly pořízeny digitálním mikroskopem a znázorňují břit nástroje s abrazivním opotřebením hřbetu a stejný břit po ulomení špičky při rychlosti $v_c = 60$ [m/min]. K vidění jsou též tomu odpovídající záznamy signálu akustické emise, kde je patrný nárůst RMS signálu AE z 325 [mV] na téměř 1560 [mV] po lomu. To s jistotou dokazuje vazbu mezi akustickou emisí a stavem břitu řezného nástroje.



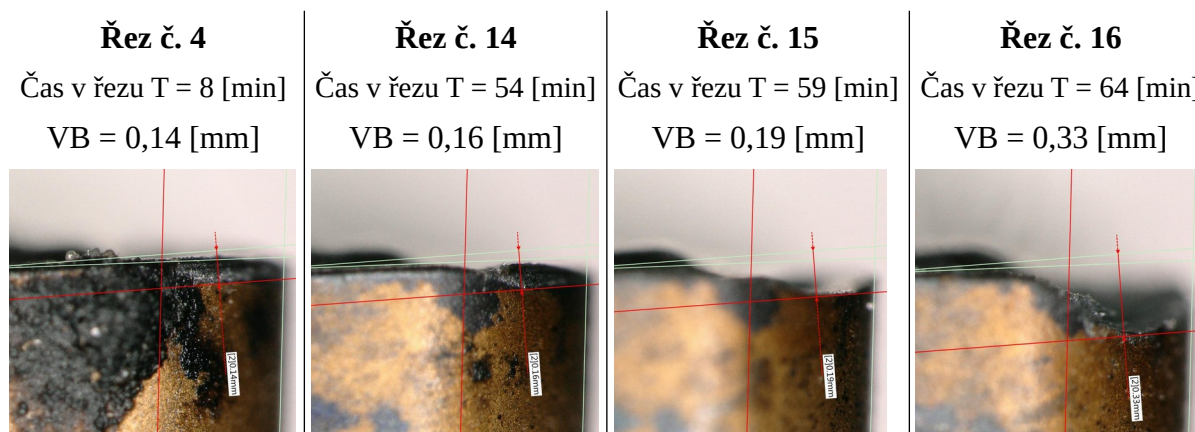
Obr. 51: AE a opotřebení břitu nástroje

Změny RMS signálu AE v mnohých případech odpovídali teoretickým předpokladům, a sice že s narůstajícím opotřebením se zvyšuje i akustická emise. To se potvrdilo zejména při nižších řezných rychlostech, jako byla například $v_c = 60$ [m/min], kde je patrné z grafu na Obr. 52, že křivka znázorňující průběh opotřebení je v podstatě kopírována křivkou znázorňující RMS signál akustické emise. Podobný a možno říci, že ideální stav, lze dále pozorovat až do řezné rychlosti $v_c = 120$ [m/min]. V těchto případech lze až výjimky vidět, že RMS signál AE víceméně stagnuje nebo kolísá na určité úrovni až do chvíle, kdy dojde k prudkému nárůstu otupení břitu v podobě lomu špičky, pak se dostavuje rovněž strmý nárůst signálu akustické emise, a to nejčastěji až na téměř několikanásobek původní hodnoty RMS.



Obr. 52: Graf závislosti $v_c=60$; $a_p=0,5$

Tento případ potvrzuje rovněž výše popsáný způsob vývoje opotřebení, kdy ještě po 54 minutách obrábění bylo po skončení řezu č. 14 změřeno pouze abrazivní opotřebení hřbetu o hodnotě $VB = 0,16$ [mm], ale po dalších dvou řezech již došlo k lomu špičky a prudkému nárůstu opotřebení, jak je možné vidět na Obr. 53.

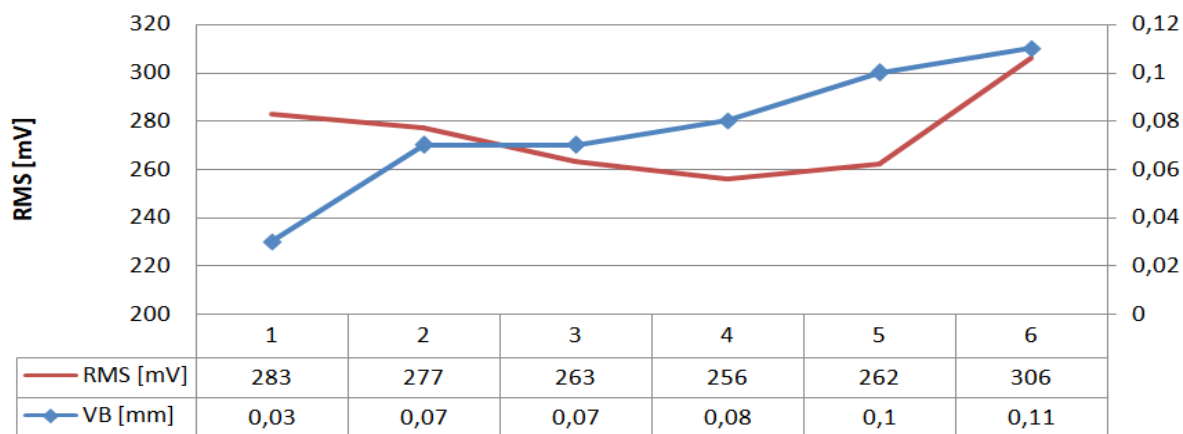


Obr. 53: Rozvoj opotřebení

Zmíněné výjimky ve vývoji akustické emise představují situace, kdy došlo s rostoucím opotřebením břitu k poklesu úrovně signálu AE. Jedním z těchto případů je například 1. opakování rychlosti $v_c = 60$ [m/min] viz Obr. 54, kde je tento pokles, byť jen malý, dobře patrný. To může být zapříčiněno faktem, že ne každá změna pracovní geometrie, která je způsobena opotřebením, má na signál akustické emise negativní vliv, ve smyslu zvýšení jeho hodnot. Někdy může opotřebení břitu úroveň signálu akustické emise naopak snižovat, kdy

například určitá deformace špičky vede ke snížení tření mezi hřbetem nástroje a obrobenu plochou.

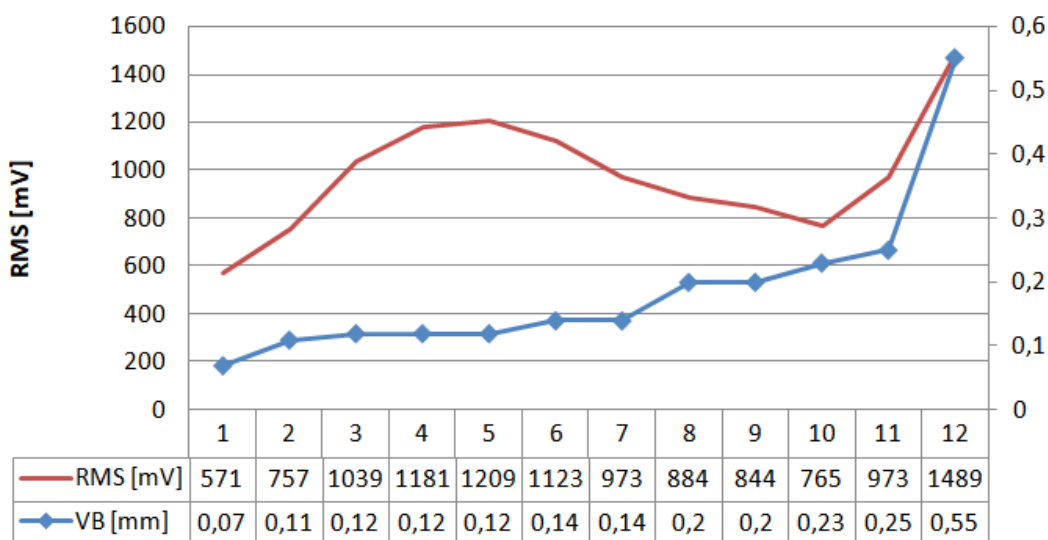
V_c = 60 m/min 1. opakování



Obr. 54: Graf závislosti $v_c=60$; $a_p=0,5$; 1. opakování

Při vyšších rychlostech, jako byla $v_c = 140$ [m/min] a $v_c = 160$ [m/min] již průběh křivky signálu AE tolik neodpovídá křivce vykreslující průběh opotřebení břitu, jak je patrné například z grafu závislosti na Obr. 55, kde lze vidět nejprve nárůst RMS hodnoty signálu akustické emise, zatímco se opotřebení příliš nezvětšuje. Následně vykazuje hodnota RMS pozvolný pokles až do chvíle, kde dojde k výraznému nárůstu opotřebení a lomu špičky nástroje.

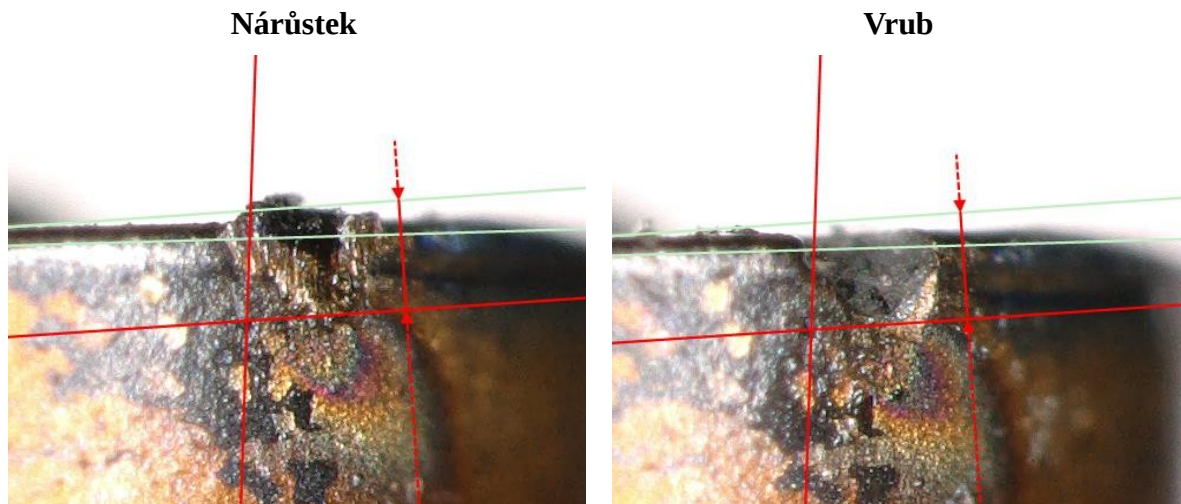
V_c = 160 m/min



Obr. 55: Graf závislosti $v_c=160$; $a_p=0,5$

Svůj díl viny na takovémto vývoji signálu akustické emise může mít i nárůstek, který se při těchto rezných podmínkách vyskytoval a jehož tvorba, působení a odlomení během procesu řezání mohlo určitou mírou výsledky měření ovlivnit. Na Obr. 56 lze vidět snímek břitu s nárůstkem po 6. řezu rychlosti $v_c = 160$ [m/min] a snímek pořízený po uskutečnění

dalšího řezu, kdy byl břit již bez nárůstku a navíc s vrubem, který mohl vzniknout vytržením materiálu společně s nárůstkem. Takovýto scénář se i během dalšího zkoumání VBD na dílenském mikroskopu několikrát opakoval, což tvorbu a zánik nárůstku při těchto podmínkách s jistotou dokazuje.

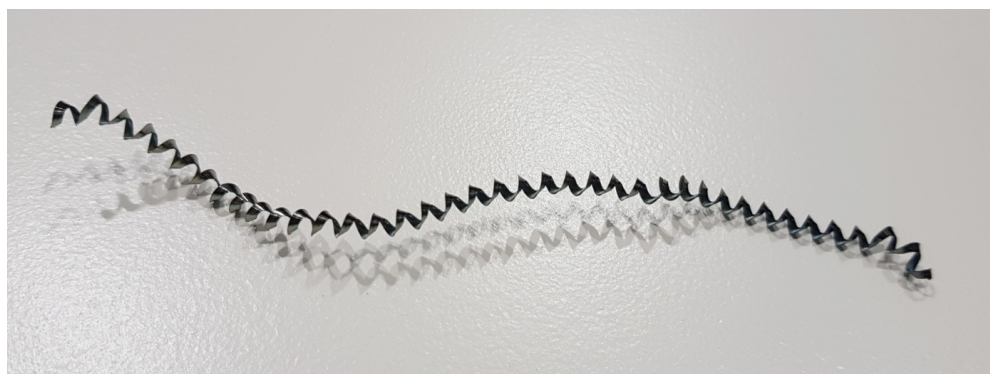


Obr. 56: Nárůstek při $v_c = 160$ m/min

Že signál akustické emise vykazoval při daných podmínkách takové charakteristiky bylo pravděpodobně způsobeno rovněž tím, že při vyšších rychlostech, respektive otáčkách a z toho plynoucí i vyšší posuvové rychlosti v_f , se do signálu akustické emise více odrážejí vlivy i dalších faktorů řezného procesu, než je pouze opotřebení břitu řezného nástroje.

6.8.2 Vliv tvaru odcházející třísky

Prvním faktorem, kterým byl signál akustické emise vedle opotřebení břitu řezného nástroje nejvíce ovlivněn, je tříška, respektive její tvar. Po většinu času obrábění docházelo k tvorbě dlouhé vlnuté třísky, kterou lze dle ISO označit jako 2.1 viz Obr. 57, kde je vzorek této třísky zachycen. Při vzniku tohoto typu třísky byl signál akustické emise spíše spojitý a nevykazoval příliš velké rozdíly v amplitudách jednotlivých vln.



Obr. 57: Tříška ISO 2.1

Menší zvolená hloubka řezu $a_p = 0,5$ [mm] způsobovala to, že stačila pouze malá změna pracovní geometrie řezného nástroje vlivem jeho opotřebení, aby došlo ke změně tvaru třísky. Z toho důvodu se kromě výše zmíněného tvaru třísky vytvářely i jiné.

Dalším typem třísky, který se během experimentu objevoval byla ISO 2.3, tedy vinutá tříška smotaná, která je k vidění na Obr. 58. Ta byla velmi často příčinou pozastavení experimentu z důvodu jejího namotání na řezný nástroj, kdy se jednak svým kontaktem o piezoelektrický snímač výrazně projevovala na záznamu signálu akustické emise v podobě jeho nárůstu a výrazných peaků (vrcholů), ale také podstatně zvyšovala nebezpečí utržení samotného snímače AE.



Obr. 58: Tříška ISO 2.3

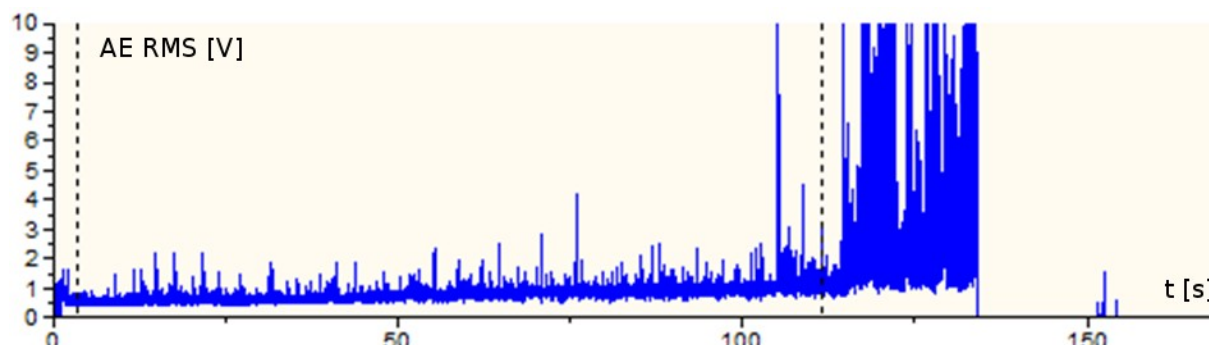
Poslední tvar třísky, který se během obrábění tvořil, byla krátká vinutá tříška s označením dle ISO 2.2 viz Obr. 59. Tento typ třísky nejvíce ovlivnil měřený signál akustické emise, jelikož došlo k jeho značnému nárůstu a byl výrazně “bouřlivý“ s vysokými peaky. Lze odůvodněně předpokládat, že toto zvýšení akustické emise a peaky představují energii uvolněnou při lámání třísky, jelikož se jedná o jediný typ třísky v průběhu experimentu, u kterého docházelo k dělení.



Obr. 59: Tříška ISO 2.2

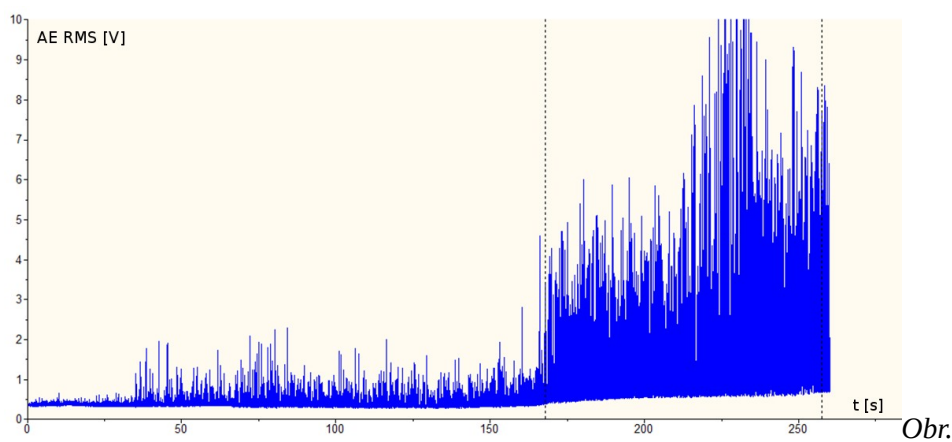
Na Obr. 60 je záznam signálu akustické emise, který byl generován při 6. řezu pro řeznou rychlost $v_c = 100$ [m/min], kde je velmi dobře patrné, jak byl signál ovlivněn změnou tvaru třísky a jejím zachycením na řezném nástroji. V první fázi docházelo k tvorbě dlouhé vinuté třísky (ISO: 2.1), kdy je viditelné, že byl signál poměrně spojitý a klidný s malými a vyrovnanými peaky. Přibližně v čase 110 [s] došlo ke změně tvaru třísky (ISO: 2.3) a jejímu namotání na nástroj v místě, kde byl upevněn snímač akustické emise a docházelo tak ke značnému vzájemnému kontaktu mezi třískou a snímačem. To se projevilo silným nárůstem signálu, kdy jeho vrcholy dokonce přesahovaly nastavenou maximální měřitelnou

hodnotu RMS signálu AE (10 V). To vedlo v čase cca 130 [s] k vynucenému pozastavení experimentu a obsluha stroje musela namotanou třísku ručně odstranit. Jelikož byl během odstraňování třísky proces měření signálu akustické emise stále aktivní, je v čase okolo 150 [s] zřetelný nárůst signálu AE z nulové polohy, vlivem doteku třísky nebo nástroje k odstraňování třísky a piezoelektrického snímače.



Obr. 60: Vliv namotané třísky

Příklad toho, jak se signál akustické emise změnil, když se tvořila krátká lámavá tříska, je k vidění na Obr. 61. Při třetím opakování řezné rychlosti $v_c = 140$ [m/min] se během 6. řezu tvořila zprvu jako obvykle dlouhá vinutá tříska (ISO: 2.1). Ta se již v čase cca 30 [s] začala lámat na kratší kusy, což se na signálu akustické emise okamžitě projevilo výskytem o něco výraznější vrcholů (peaků). Zhruba v čase 160 [s] došlo zřejmě vlivem opotřebení ke změně geometrie břitu a začala se tvořit krátká lámavá tříska (ISO: 2.2) a to vedlo opět k velmi výraznému nárůstu signálu akustické emise, kdy některé peaky znovu přesahovaly měřitelné maximum (10 V).



Obr. 61: Vliv lámání třísky

V některých případech došlo ke změně tvaru odcházející třísky, aniž by byl na mikroskopu pozorován výraznější nárůst opotřebení na hřbetě nástroje. Lze tak předpokládat, že změnu mohlo způsobit zejména opotřebení čela VBD, kde byl často patrný žlab, který může mít na odchod třísky z řezu a její tvar značný vliv.

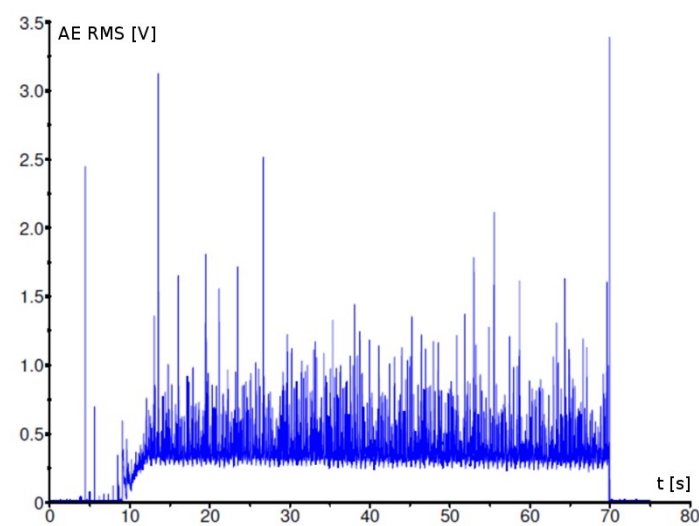
Že má tvar třísky a obecně mechanismus jejího vzniku na výsledný signál akustické emise značný vliv, potvrzuje ve své práci i M Horník [14], který tvrdí, že procesy související s tvorbou třísky se projevují ve vyšších energetických hladinách, než kupříkladu tření nástroje o obrobenou plochu. Toto tvrzení je ve své podstatě v souladu s výsledky tohoto experimentu.

6.8.3 Použití řezné kapaliny

Při jednom ze zkušebních náměrů, které sloužily zejména pro nalezení vhodných řezných podmínek, byla použita i řezná kapalina, aby se ověřilo, zda má na signál akustické emise nějaký vliv. Tento test proběhl při řezné rychlosti $v_c = 50$ [m/min], hloubce řezu $a_p = 1$ [mm] a posuvu $f_o = 0,15$ [mm/ot]. Ještě před tím byl uskutečněn řez za stejných podmínek, ale bez použití emulze, aby bylo možno výsledky porovnat. Naměřené hodnoty RMS signálu akustické emise ukázaly, že proud řezné kapaliny má na signál tak velký vliv, že dokonce přehlušil samotné obrábění. Rozdíl mezi signálem AE z řezu bez použití a s použitím řezné kapaliny je k vidění na Obr. 62. To vede k závěru, že jedno ze zásadních omezení této metody je právě použití řezné kapaliny.

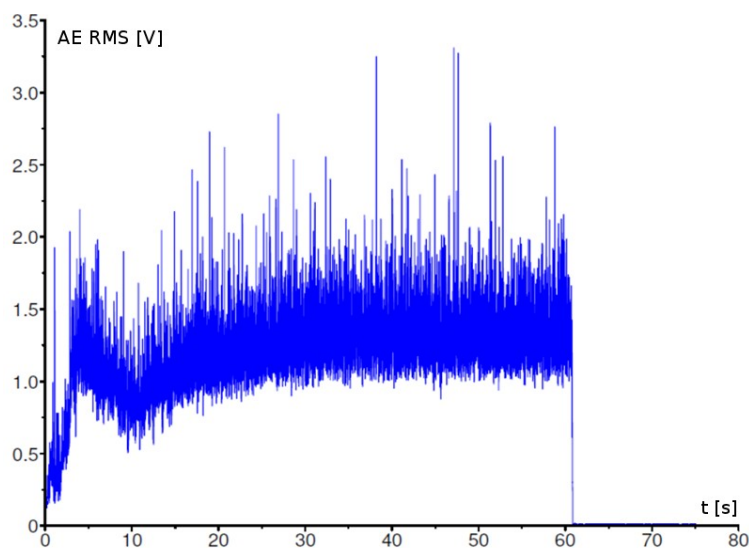
Bez řezné kapaliny

Mean RMS = 370 [mV]



S řeznou kapalinou

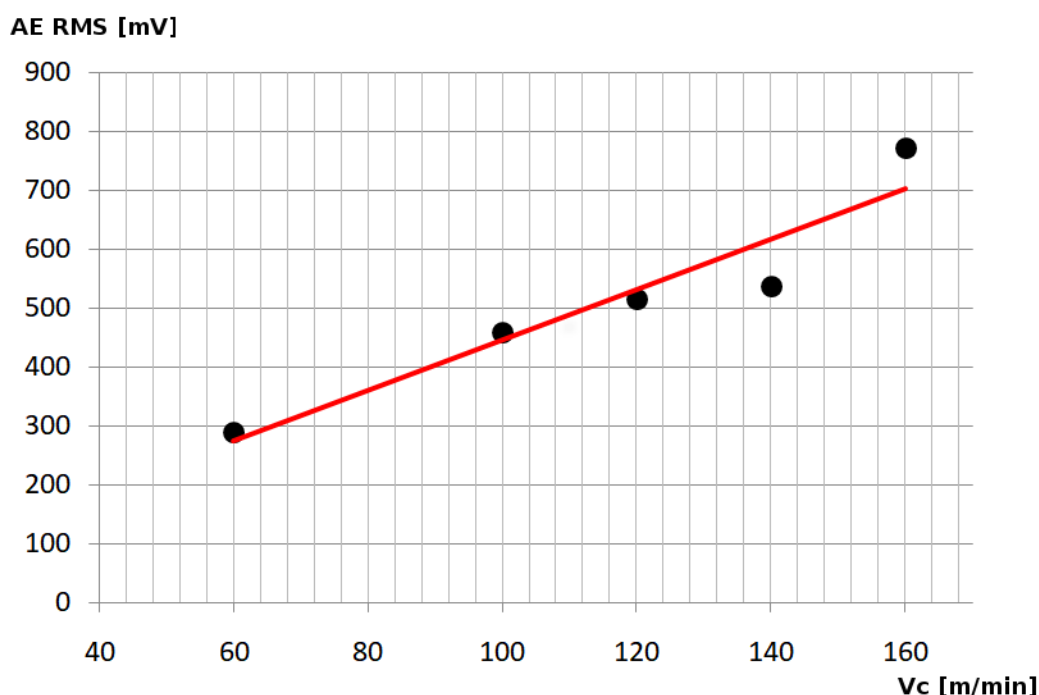
Mean RMS = 1230 [mV]



Obr. 62: Vliv řezné kapaliny

6.8.4 Vliv řezné rychlosti

Při dalším zkoumání naměřených dat a získaných výsledků se ukázalo, že je signál akustické emise ovlivněn rovněž řeznou rychlostí. Na Obr. 63 je k vidění graf, kde svislá osa představuje aritmetický průměr hodnot Mean RMS, které byly naměřeny vždy při prvních řezech pro danou rychlost, jelikož lze v tomto případě očekávat, že u nového břitu nebyl signál AE ještě příliš ovlivněn opotřebením. Jak byly tyto hodnoty pro graf získány je znázorněno v Tabulka 9. Vodorovná osa pak představuje řeznou rychlost v_c [m/min]. Závislost řezné rychlosti a signálu akustické emise je pak patrná ze spojnice trendu, kdy se s rostoucí řeznou rychlostí zvyšuje i hodnota RMS signálu akustické emise.



Obr. 63: Závislost AE a řezné rychlosti

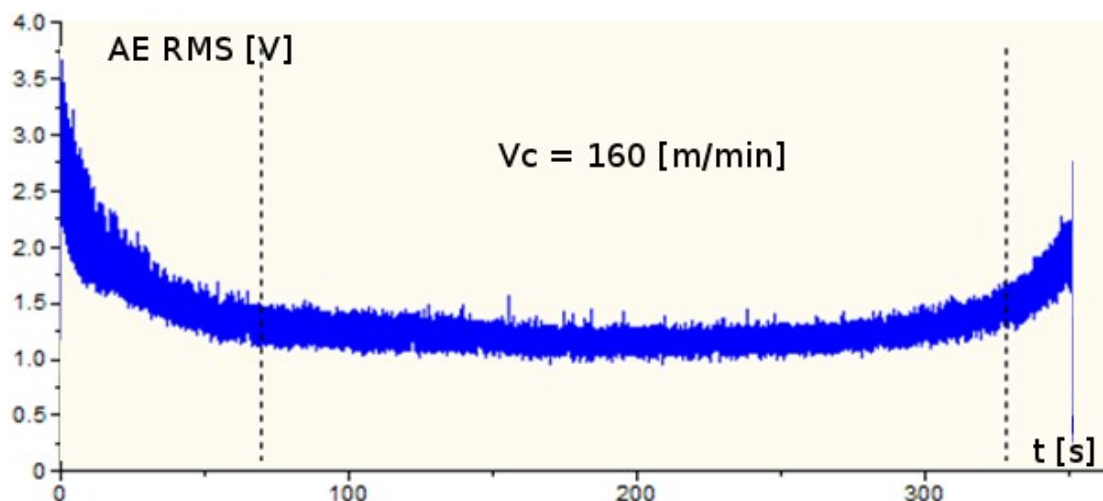
		v_c [m/min]				
		60	100	120	140	160
Mean RMS [mV] pro nový břit	0. opak.	296	467	518	610	571
	1. opak.	283	452	569	404	742
	2. opak.	-	-	461	614	1004
	3. opak.	-	-	-	524	-
	Průměr	289,5	459,5	516	538	772

Tabulka 9: Hodnoty Mean RMS při novém břitu

Je však potřeba zdůraznit, že tato závislost platí pro podmínky tohoto experimentu a není jisté, jak by se situace vyvíjela například s dalším navyšováním řezné rychlosti nebo se změnou materiálu obráběného vzorku.

6.8.5 Rušivé vlivy

Během experimentu si bylo možno povšimnout zvláštního jevu, kdy po najetí do řezu na jedné straně obrobku došlo k poklesu hodnoty RMS signálu akustické emise na určitou hladinu a ke konci řezu, tedy na druhém konci testovaného vzorku, došlo opět k nárůstu RMS signálu. Tento jev se nevyskytoval při nižších řezných rychlostech, ale až při vyšších rychlostech, konkrétně při $v_c = 140$ a 160 [m/min]. Zejména při nejvyšší řezné rychlosti byl záznam signálu AE tímto jevem nejvíce ovlivněn, jak je patrné na Obr. 64, kde je záznam signálu akustické emise z celé délky řezu při rychlosti $v_c = 160$ [m/min].



Obr. 64: Rušení při $v_c = 160$ [m/min]

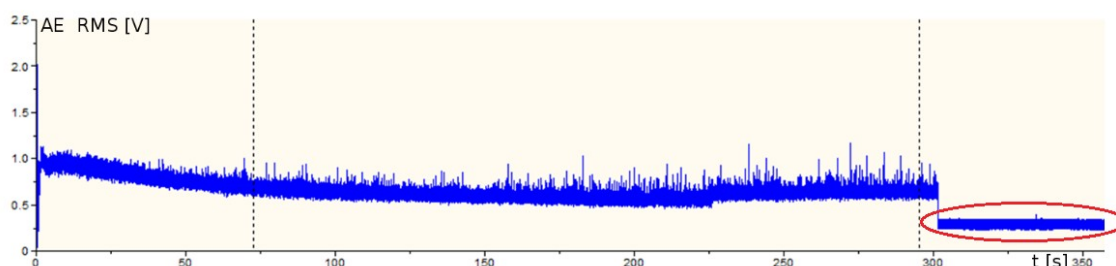
Je poměrně pravděpodobné, že tento jev nesouvisí ani tolik s řeznou rychlostí, jako spíše s otáčkami vřetena. Objevily se dvě teorie, proč by tento jev mohl vznikat.

První souvisí s možným elektromagnetickým rušením, které způsobuje motor pohánějící hlavní vřeteno, respektive protivřeteno obráběcího stroje. Jak se tedy nástroj se snímačem přibližuje a oddaluje od vřeten, tak rušivý signál roste a klesá, což se na signálu akustické emise projeví zmíněným způsobem. Piezoelektrický snímač by však měl být do značné míry schopen těmto rušivým vlivům odolávat.

Druhá teorie bere v potaz vliv valivých ložisek hlavního vřetena a opěrného hrotu. Je známo, že valivá ložiska jsou zdrojem akustické emise a dokonce se metoda AE používá pro jejich diagnostiku. Protože je piezoelektrický snímač velmi citlivý, je možné, že jsou vlny akustické emise, které pocházejí právě z ložisek, přenášeny přes obrobek až na nástroj, kde jsou snímačem zachycovány. Jak se zvyšuje řezná rychlost, respektive otáčky vřetena, roste i intenzita akustické emise produkovaná ložisky. Jak se nástroj vzdaluje od místa, kde se obrobek dotýká otočného hrotu, jsou vlny postupně utlumeny samotným obrobkem, dokud se nástroj opět nepřibližuje ke sklíčidlu. Proto je tento jev patrný pouze v blízkosti míst, kde je vzorek upnut.

Tuto teorii by bylo možné v budoucnu potvrdit či vyvrátit experimentem, kdy by se použil menší obrobek, který by byl upnut pouze na jedné straně do sklíčidla, takzvané letmo. Záznam signálu by pak ukázal, zda byla data na straně opěrného hrotu skutečně ovlivněna jeho přítomností a akustickou emisí jeho valivých ložisek. Za zvážení rovněž stojí provedení experimentu na jiném obráběcím stroji, kde by mohla být objasněna také první zmíněná teorie.

Další rušivý vliv, který se během experimentu objevoval, souvisel přímo s měřicí aparaturou. Náhodně se na záznamu akustické emise v programu DynoWare vyskytoval rušivý signál, který byl viditelný ve chvíli, kdy neprobíhalo obrábění, tedy když by měl být signál akustické emise za normálních okolností téměř nulový. V případě rušení se však hladinu signálu AE udržovala na hodnotě AE RMS přibližně 0,3 [V], jak je možné vidět na Obr. 65, kde řez skončil přibližně v čas 300 [s] a dále následuje už jen červeně zvýrazněné rušení.

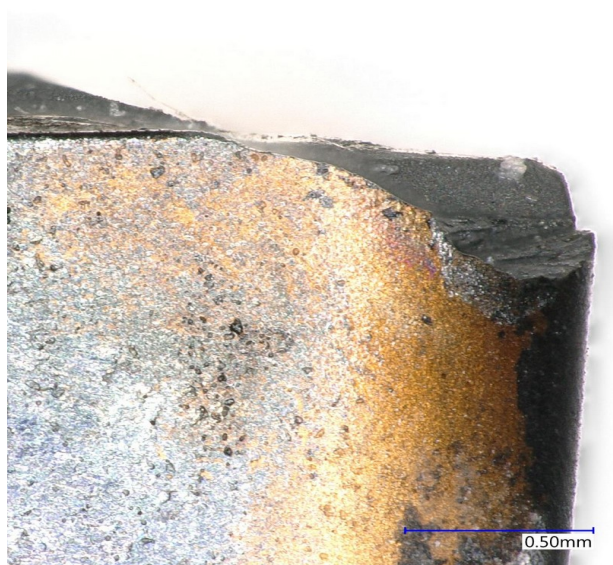


Obr. 65: Rušivý signál

Není jisté, zda se tento rušivý signál nějakým způsobem negativně odrázel na výsledném signálu AE, jelikož ve většině případů, kdy se na začátku měření nevyskytoval, ale na jeho konci ano, nebyla na signálu patrná žádná výrazná skoková změna úrovně, která by naznačovala jeho počátek. Na výše přiloženém záznamu signálu je však v čase 225 [s] patrný malý schodový nárůst, ale v současné době nelze s jistotou říci, zda souvisí se vznikem rušení, nebo zda s nárůstem otupení bříty. Pro jeho odstranění bylo nutné odpojit měřicí aparaturu od elektrického zdroje a opětovně jí připojit.

6.8.6 Trvanlivost bříty

Dalším faktem, který je vhodné zmínit, jsou rozdíly v trvanlivosti bříty, kterých bylo během jednotlivých opakování řezných rychlostí dosahováno. Kupříkladu při řezné rychlosti $v_c = 100$ [m/min] bylo dosaženo trvanlivosti bříty $T_0 = 26,5$ [min]. Při 1. opakování této rychlosti však dosáhla trvanlivost hodnoty $T_1 = 95,5$ [min], což je téměř čtyřnásobek. Protože byla všechna měření realizována na jednom vzorku a obrábění tedy probíhalo na měnícím se průměru obrobku, nabízí se teoreticky jako možná příčina nehomogenita tepelně zpracovaného obrobku, kdy by se s ohledem na výše zmíněný nárůst trvanlivosti mohlo zdát, že směrem ke středu roste jeho obrobiteľnosť.



Obr. 66: Břit VBD po dosažení trvanlivosti

Avšak při dalších řezných rychlostech, jako byla například $v_c = 160$ [m/min] bylo při prvním měření dosaženo téměř dvojnásobné trvanlivosti, než při 2. opakování, jak je možné vidět z naměřených dat v Tabulka 10 a Tabulka 11, což je v rozporu s první teorií. Zjištění přesné příčiny velkých rozdílů v trvanlivosti bříty by vyžadovalo další zkoumání.

$v_c = 160$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	7,25	7,25	0,07	571
2	7,25	14,5	0,11	757
3	7,25	21,75	0,12	1039
4	7,25	29	0,12	1181
5	7	36	0,12	1209
6	7	43	0,14	1123
7	7	50	0,14	973
8	7	57	0,2	884
9	6,75	63,75	0,2	844
10	6,75	70,5	0,23	765
11	6,75	77,25	0,25	973
12	2,25	79,5	0,55	1489

Tabulka 10: Naměřené hodnoty $v_c=160$; $a_p=0,5$

$v_c = 160$ [m/min]

2. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	10	10	0,05	1004
2	11,75	21,75	0,11	1227
3	11,5	33,25	0,2	1241
4	7	40,25	0,87	1522

Tabulka 11: Naměřené hodnoty $v_c=160$; $a_p=0,5$; 2. opakování

Aby byl vyloučen vliv výše zmíněných měnicích se faktorů (D , n , v_f) na trvanlivost a také na samotnou akustickou emisi, bylo by vhodné uskutečnit experiment, kdy by byly použity například tři různé břity, kdy jeden by byl nový, druhý mírně opotřeбенý a třetí již za hranicí trvanlivosti. S těmito břity by pak byl proveden měřený řez na jednom průměru, čímž by byly zaručeny stejné podmínky a rozdíly v naměřeném signálu akustické emise by byly z největší části ovlivněny pouze mírou otupení břitu rezného nástroje, jak je žádoucí.

7 Závěr

Podstatou diplomové práce bylo zkoumání signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení řezného nástroje. Struktura práce byla dle zadání rozdělena na dvě hlavní části. První dílčí část práce obsahuje převážně rešeršní poznatky, které se týkají opotřebení břitu, jako jsou mechanismy vzniku otupení, klasifikace otupení a metody jeho měření a monitorování. Dále je zde zpracován teoretický základ pro samotnou akustickou emisi, kde jsou popsány základní pojmy z problematiky, charakteristiky signálu akustické emise, její vznik, využití a možnosti jejího snímání.

Hlavní pozornost byla věnována praktické části, kde bylo úkolem naplánovat a realizovat experiment, který by objasnil otázky ve vztahu akustické emise a opotřebení břitu při obrábění. Experiment se uskutečnil v halových laboratořích RTI (Regionální technický institut) na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni, kdy bylo jako metoda obrábění zvoleno podélné soustružení na stroji CTX Beta 1250 a pro snímání a měření signálu akustické emise byla použita aparatura výrobce Kistler. Za účelem měření opotřebení břitu byl pak využit digitální mikroskop Keyence.

Nejen v průběhu experimentu, ale i během analýzy a zpracování získaných dat a výsledků bylo zjištěno několik hlavních poznatků, skutečností a závěrů, které je proto vhodné sumárně připomenout a shrnout:

- Získané výsledky dokazují existenci vazby mezi úrovní signálu akustické emise a mírou opotřebení břitu řezného nástroje.
- Ze signálu akustické emise je možná poznat, kdy na břitu došlo ke kritickému opotřebení v podobě lomu.
- Na základě signálu akustické emise nebylo možné včas predikovat vznik kritického stádia opotřebení, tedy dosažení trvanlivosti řezného nástroje.
- Signál akustické emise je citlivý na změnu tvaru třísky, respektive na energii, která se uvolňuje při lámání třísky.
- Ze signálu akustické emise je možné určit charakter tvořící se třísky. Lze tedy dobře rozeznat, zda se tvoří plynulá nebo krátká dělená tříska.
- Pro použité řezné podmínky a obráběný materiál platí, že při vyšší řezné rychlosti stoupá rovněž úroveň signálu akustické emise. Proto je nutné provádět snímání a vyhodnocování signálu AE pouze při konstantních řezných podmínkách.
- Akustická emise generovaná proudem řezné kapaliny zcela přehluší akustickou emisi řezného procesu, proto je její použití při měření vyloučeno.
- Signál akustické emise snímáný na nástroji může být rušen faktory, které přímo nesouvisí s řezem a tvorbou třísky.

Na základě výše zmíněných poznatků je možné usoudit, že snímání signálu akustické emise za účelem monitorování opotřebení břitu řezného nástroje a obráběcího procesu obecně má jistý potenciál. Ukázalo se, že prokazatelnějších výsledků bylo dosaženo při nižších řezných rychlostech, proto lze doporučit metodu akustické emise spíše pro hrubovací operace. Do budoucna by bylo jistě vhodné realizovat další výzkumné kroky, které by zodpověděly vzniklé otázky a další nejasnosti.

8 Seznam použité literatury

- [1] HUMÁR, A. *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno: VUT Brno, 2003.
- [2] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – kniha pro praxe*. Přel. M. Kudela, 1.vyd., Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
- [3] ŽIŽKA, Jan. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec: Technická Univerzita. 2003. ISBN: 8070836881.
- [4] LICHT, T. *Acoustic Emission*. Technical Review. Brüel and Kjaer. 1979, NO. 2, s. 3-36.
- [5] KOULA, V. – VRHEL, J. – LOZSI, I. *Detekce poruch v pásnici hlavního nosníku křídla letounu L59 metodou akustické emise*. NDT welding Bulletin, 6, 1998, č. 1, s. 11-17.
- [6] DUŠEK, F. – BUCHAR, J. – JUDA, P. *Akustická emise*. [Výzkumná zpráva]. Brno. Ústav fyzikální metalurgie ČSAV 1975, 62s.
- [7] NDT. *Introduction to Acoustic Emission Testing*. [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Index.htm
- [8] HORT F. *Využití metody akustické emise pro zpřesnění diagnostiky vzniku poškození radiálních ložisek*. [Dizertační práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
<http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/655/Dizertacni-prace-Filip-Hort.pdf/>
- [9] GHOLIZADEH, Samira & LEMAN, Z. & BAHARUDIN, B T.. *A review of the application of acoustic emission technique in engineering*. Article in *Structural Engineering & Mechanics*. 2015, 54, 1075-1095, 10.12989/sem.2015.54.6.1075.
- [10] ADA. *Akustická emise*. [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://www.adandt.cz/>
- [11] ČSN EN 1330-9. *Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí*. [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/80853#id-80853>
- [12] DAKEL. *Akustická emise*. [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://dakel.cz/>
- [13] ZAWADA, P. *Planar Localization of Acoustic Emission Sources*. Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering. Department of Applied Mechanics, 2018, 35 s.
- [14] HORNÍK M. *Akustická emise při čelním frézování obrobku z šedé litiny*. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2001. 84 s.
- [15] HEJNÝ, R. *Využití metody akustické emise pro identifikaci stádia poškození při mechanických zkouškách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI. 2006. 38 s.
- [16] ILYNINYKH, O. *Porovnání výzkumů v oblasti analýzy akustické emise při obrábění*. Západočeská univerzita v Plzni. FST. 2013. 30 s.
- [17] YAN, Gang & TANG, Jianfei. *A Bayesian Approach for Localization of Acoustic Emission Source in Plate-Like Structures*. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. 1-14. 10.1155/2015/247839.

- [18] Fujicera. *Acoustic Emission Sensor*. [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <http://www.fujicera.co.jp/en/product/ae/>
- [19] ISO 3685. *Tool Life Testing With Single-Point Turning Tools*. 1990
- [20] BILÍK, O. *Obrábění II*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5
- [21] DMG MORI. *CTX BETA 1250 TC 4A-Technical Data* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/products/lathes/turn-mill-complete-machiningcentres/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc-4a#Technic>
- [22] ISCAR. *E-Katalog nástrojů*. [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <http://iscar.com/ecatalog/Index.aspx>
- [23] STEEL NAVIGATOR. *Material data sheet*. [online]. [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/34crnimo6/>
- [24] KISTLER. *Instruction manual - Non-Hazardous and Hybrid/Mixed Area System: AE-Piezotron® Sensor and Coupler*. Kinstler Group. Winterthur. Switzerland. 2016
- [25] DOSTÁL, J.: *Využití akustické emise při hodnocení procesu obrábění*. Diplomová práce. Mendelova Univerzita v Brně. Agronomická Fakulta. Brno. 2017
- [26] NOVOTNÝ, J.: *Vizualizace vlivu změny geometrie obráběcího nástroje*. Bakalářská práce. Mendelova Univerzita v Brně. Agronomická Fakulta. Brno. 2013
- [27] SANDVIK COROMANT. *Opotřebení břitu*. [online]. [cit. 2019-11-6]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [28] STANĚK, J., NĚMEJC, J. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň: ZČU, 2005, ISBN 80-7043-363-9
- [29] KEYENCE. *Digitální mikroskop řada VHX-6000*. [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-6000/>

Přílohy

k diplomové práci

Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje

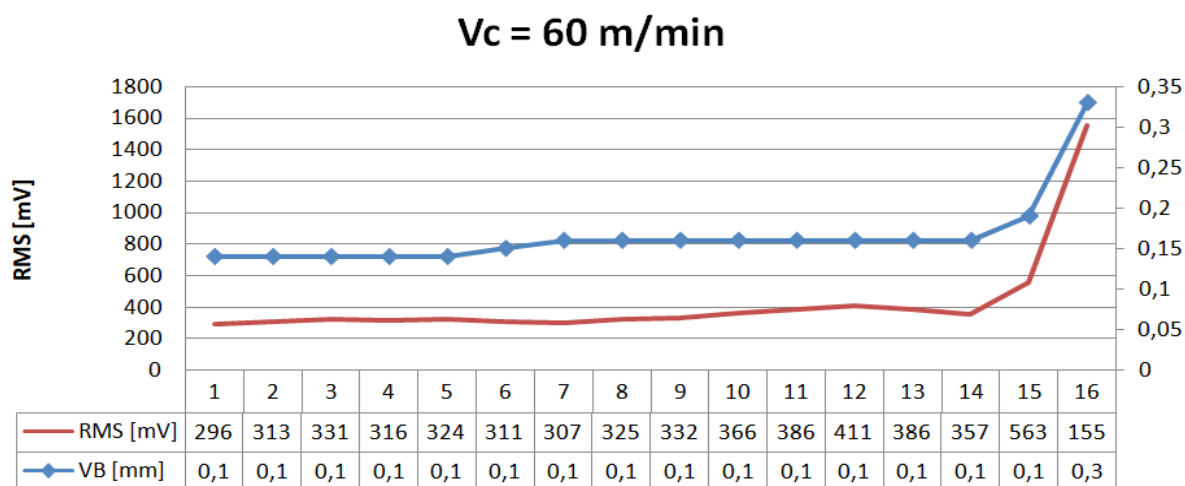
P1. Naměřené hodnoty a grafy závislosti signálu akustické emise na míře opotřebení břitu

Veškeré naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, ze kterých byly následně vytvořeny grafy, které znázorňují závislost RMS signálu akustické emise a míry opotřebení břitu nástroje VB a na jejichž základě bylo možné výsledky experimentu hodnotit.

$v_c = 60$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	1	1	0,14	296
2	2	3	0,14	313
3	2	5	0,14	331
4	3	8	0,14	316
5	3	11	0,14	324
6	5	16	0,15	311
7	5	21	0,16	307
8	3	24	0,16	325
9	5,5	29,5	0,16	332
10	5	34,5	0,16	366
11	5	39,5	0,16	386
12	5	44,5	0,16	411
13	4,5	49	0,16	386
14	5	54	0,16	357
15	5	59	0,19	563
16	5	64	0,33	1557

Tabulka 1: Naměřené hodnoty $v_c=60$; $a_p=0,5$



Obr. 1: Graf závislosti $v_c=60$; $a_p=0,5$

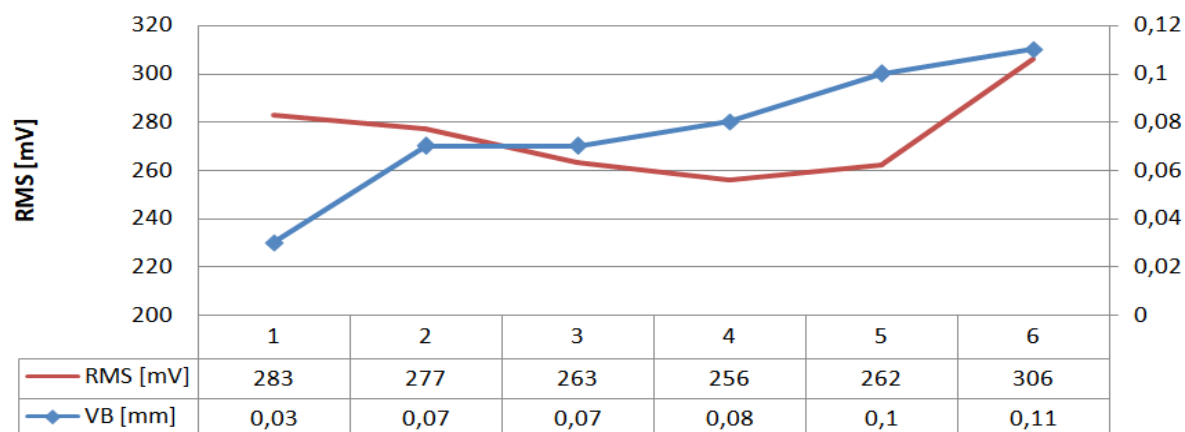
$v_c = 60$ [m/min]

1. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	11	11	0,03	283
2	14,5	25,5	0,07	277
3	14,5	40	0,07	263
4	14	54	0,08	256
5	14	69	0,1	262
6	28	96	0,11	306

Tabulka 2: Naměřené hodnoty $v_c=60$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$V_c = 60$ m/min
1. opakování



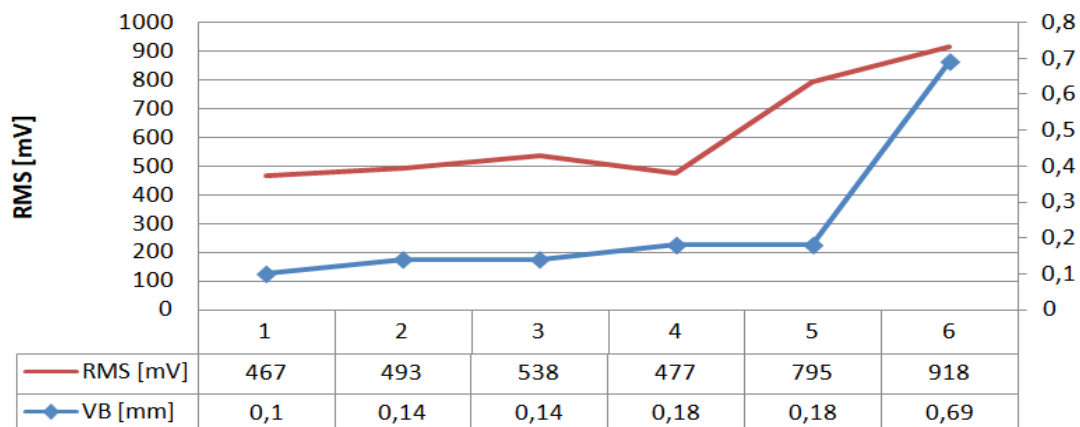
Obr. 2: Graf závislosti $v_c=60$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$v_c = 100$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	3	3	0,1	467
2	4	7	0,14	493
3	5	12	0,14	538
4	5	17	0,18	477
5	4,5	21,5	0,18	795
6	5	26,5	0,69	918

Tabulka 3: Tabulka 9: Naměřené hodnoty $v_c=100$; $a_p=0,5$

Vc = 100 m/min



Obr. 3: Graf závislosti $v_c=100$; $a_p=0,5$

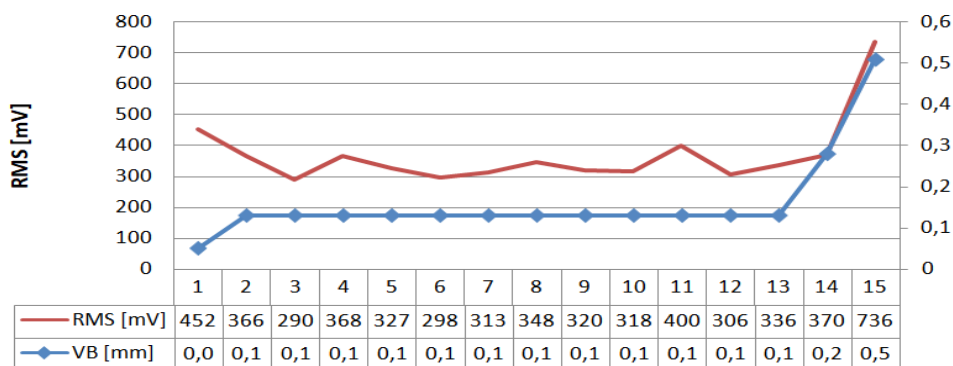
$v_c = 100$ [m/min]

1. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	6,5	6,5	0,05	452
2	6,5	13	0,13	366
3	6,5	19,5	0,13	290
4	6,5	26	0,13	368
5	6,5	32,5	0,13	327
6	6,5	39	0,13	298
7	6,5	45,5	0,13	313
8	6,5	52	0,13	348
9	6	58	0,13	320
10	6,5	64,5	0,13	318
11	6	70,5	0,13	400
12	6	76,5	0,13	306
13	6,5	83	0,13	336
14	6	89	0,28	370
15	6,5	95,5	0,51	736

Tabulka 4: Naměřené hodnoty $v_c=100$; $a_p=0,5$; 1. opakování

**$v_c = 100$ m/min
1. opakování**



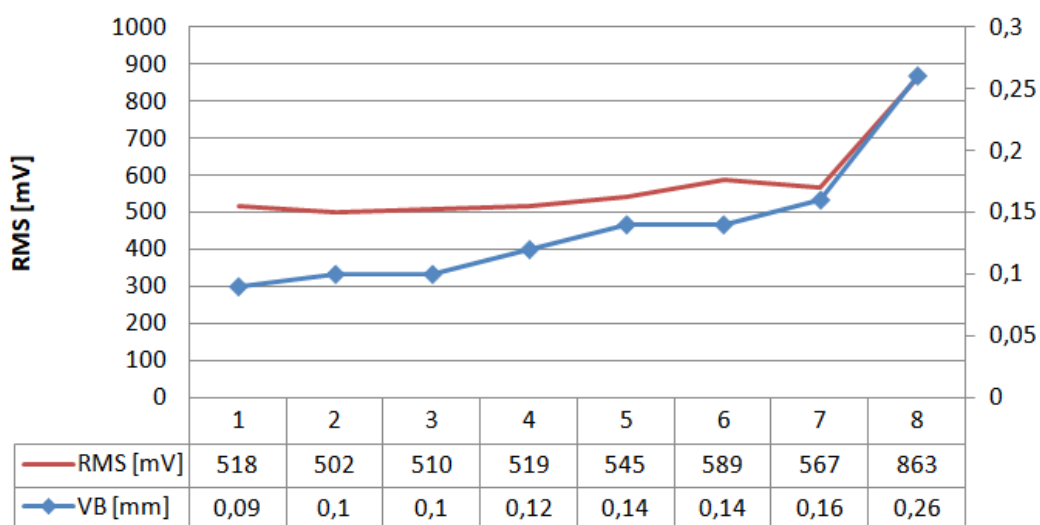
Obr. 4: Graf závislosti $v_c=100$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$v_c = 120$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	3	3	0,09	518
2	3	6	0,1	502
3	2	8	0,1	510
4	5	13	0,12	519
5	5	18	0,14	545
6	2	20	0,14	589
7	5	25	0,16	567
8	5	30	0,26	863

Tabulka 5: Naměřené hodnoty $v_c=120$; $a_p=0,5$

$v_c = 120$ m/min



Obr. 5: Graf závislosti $v_c=120$; $a_p=0,5$

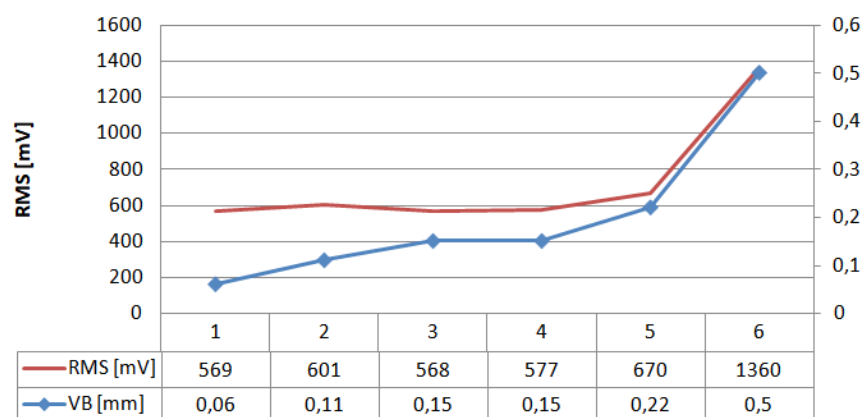
$v_c = 120$ [m/min]

1. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	2	2	0,06	569
2	5	7	0,11	601
3	5	12	0,15	568
4	1,5	13,5	0,15	577
5	5	18,5	0,22	670
6	3,5	22	0,5	1360

Tabulka 6: Naměřené hodnoty $v_c=120$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$V_c = 120$ m/min
1. opakování



Obr. 6: Graf závislosti $v_c=120$; $a_p=0,5$; 1. opakování

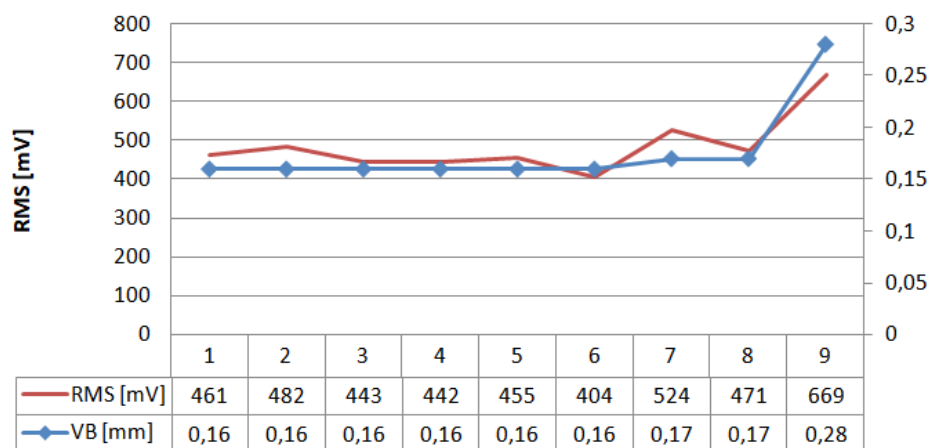
$v_c = 120$ [m/min]

2. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	5	5	0,16	461
2	4	9	0,16	482
3	5	14	0,16	443
4	6	20	0,16	442
5	5,5	25,5	0,16	455
6	5,5	31	0,16	404
7	5,5	36,5	0,17	524
8	5,5	42	0,17	471
9	5,5	47,5	0,28	669

Tabulka 7: Naměřené hodnoty $v_c=120$; $a_p=0,5$; 2. opakování

**$v_c = 120$ m/min
2. opakování**



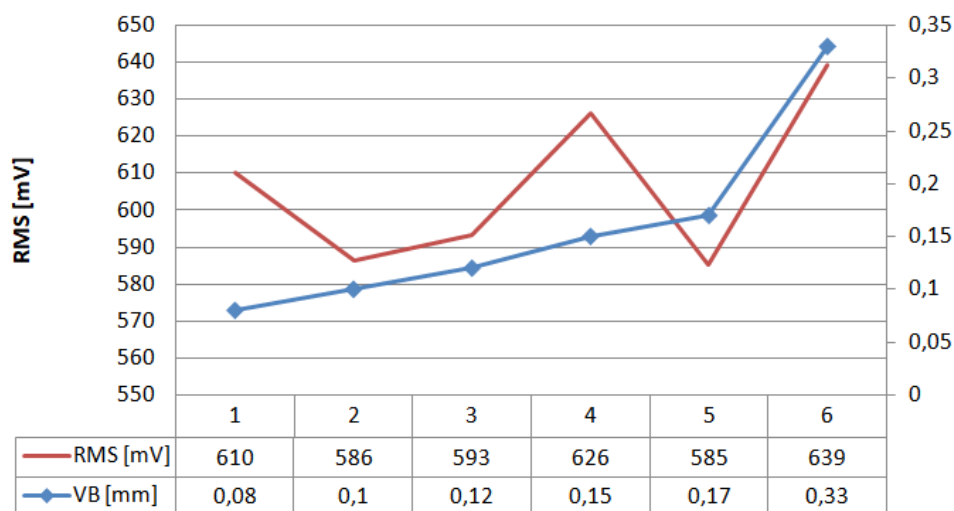
Obr. 7: Graf závislosti $v_c=120$; $a_p=0,5$; 2. opakování

$v_c = 140$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	2,5	2,5	0,08	610
2	5	7,5	0,1	586
3	5	12,5	0,12	593
4	5	17,5	0,15	626
5	5	22,5	0,17	585
6	5	27,5	0,33	639

Tabulka 8: Naměřené hodnoty $v_c=140$; $a_p=0,5$

$v_c = 140$ m/min



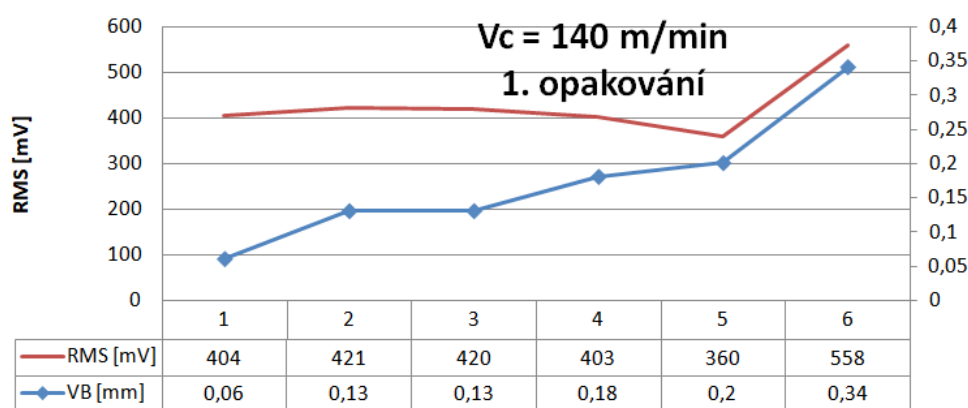
Obr. 8: Graf závislosti $v_c=140$; $a_p=0,5$

$v_c = 140$ [m/min]

1. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	5	5	0,06	404
2	5	10	0,13	421
3	5	15	0,13	420
4	5	20	0,18	403
5	5	25	0,2	360
6	2	27	0,34	558

Tabulka 9: Naměřené hodnoty $v_c=140$; $a_p=0,5$; 1. opakování



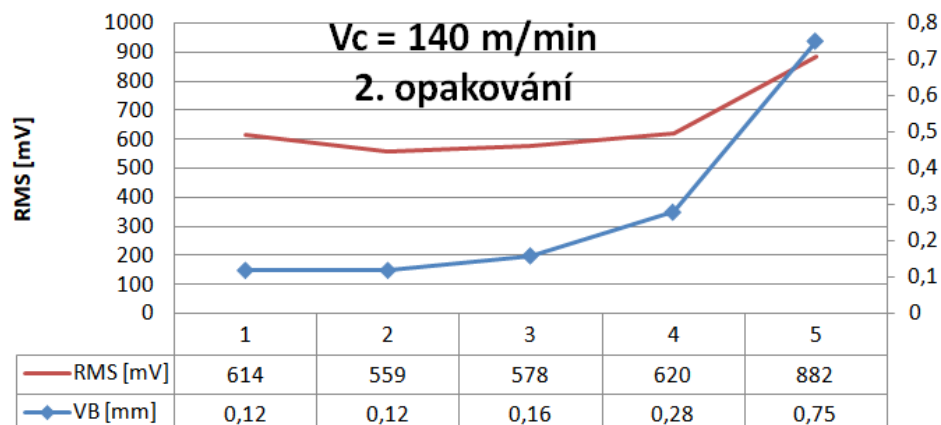
Obr. 9: Graf závislosti $v_c=140$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$v_c = 140$ [m/min]

2. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	2,5	2,5	0,08	610
2	5	7,5	0,1	586
3	5	12,5	0,12	593
4	5	17,5	0,15	626
6	5	27,5	0,33	639

Tabulka 10: Naměřené hodnoty $v_c=140$; $a_p=0,5$; 2. opakování



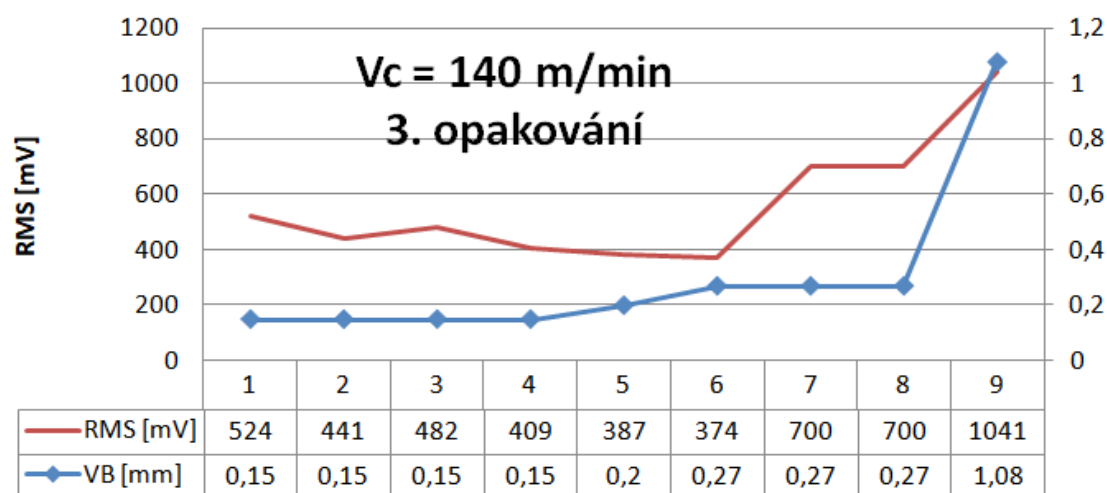
Obr. 10: Graf závislosti $v_c=140$; $a_p=0,5$; 2. opakování

$v_c = 140$ [m/min]

3. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	3	3	0,15	524
2	4	7	0,15	441
3	4	11	0,15	482
4	4,5	15,5	0,15	409
5	4	19,5	0,2	387
6	4,5	24	0,27	374
7	4	28	0,27	700
8	4,5	32,5	0,27	700
9	4	36,5	1,08	1041

Tabulka 11: Naměřené hodnoty $v_c=140$; $a_p=0,5$; 3. opakování



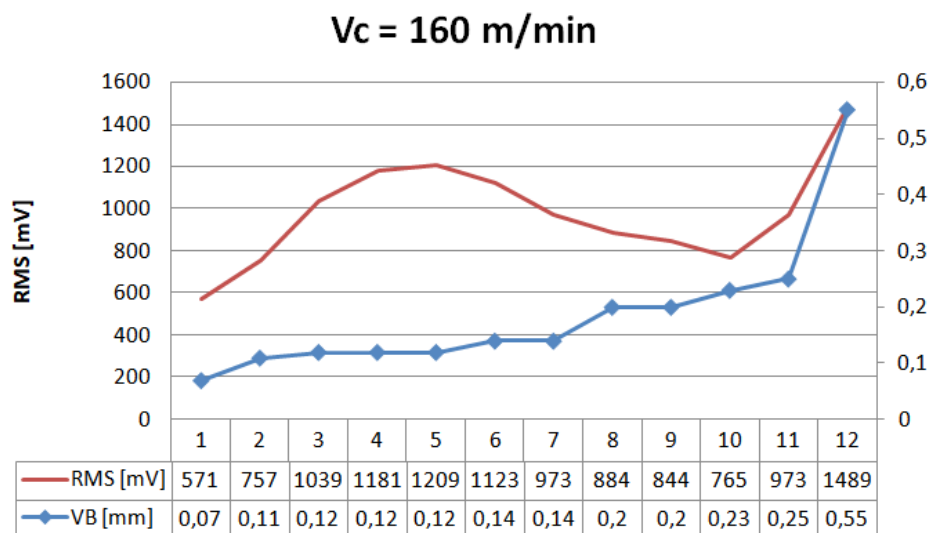
Obr. 11: Graf závislosti $v_c=140$; $a_p=0,5$; 3. opakování

$v_c = 160$ [m/min]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	7,25	7,25	0,07	571
2	7,25	14,5	0,11	757
3	7,25	21,75	0,12	1039
4	7,25	29	0,12	1181
5	7	36	0,12	1209
6	7	43	0,14	1123
7	7	50	0,14	973
8	7	57	0,2	884
9	6,75	63,75	0,2	844
10	6,75	70,5	0,23	765

11	6,75	77,25	0,25	973
12	2,25	79,5	0,55	1489

Tabulka 12: Naměřené hodnoty $v_c=160$; $a_p=0,5$



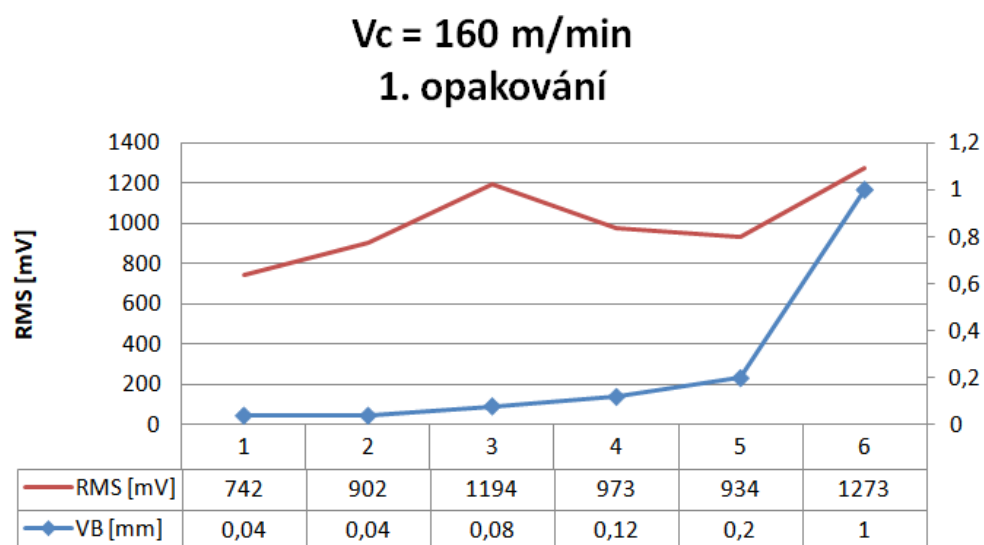
Obr. 12: Graf závislosti $v_c=160$; $a_p=0,5$

$v_c = 160$ [m/min]

1. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	4	4	0,04	742
2	13	17	0,04	902
3	13	30	0,08	1194
4	12,5	42,5	0,12	973
5	12,5	55	0,20	934
6	7,5	62,5	1	1273

Tabulka 13: Naměřené hodnoty $v_c=160$; $a_p=0,5$; 1. opakování



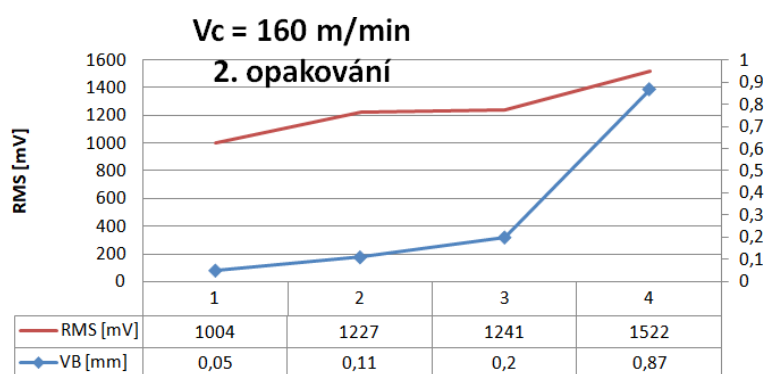
Obr. 13: Graf závislosti $v_c=160$; $a_p=0,5$; 1. opakování

$v_c = 160$ [m/min]

2. opakování

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	10	10	0,05	1004
2	11,75	21,75	0,11	1227
3	11,5	33,25	0,2	1241
4	7	40,25	0,87	1522

Tabulka 14: Naměřené hodnoty $v_c=160$; $a_p=0,5$; 2. opakování



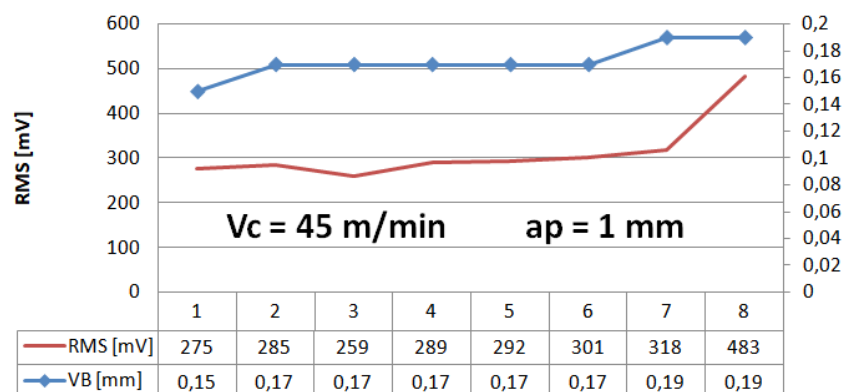
Obr. 14: Graf závislosti $v_c=160$; $a_p=0,5$; 2. opakování

$v_c = 45$ [m/min]

$a_p = 1$ [mm]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	1	1	0,15	275
2	1	2	0,17	285
3	2	4	0,17	259
4	2	6	0,17	289
5	3	9	0,17	292
6	3	12	0,17	301
7	3	15	0,19	318
8	3	18	0,19	483

Tabulka 15: Naměřené hodnoty $v_c=45$; $a_p=1$



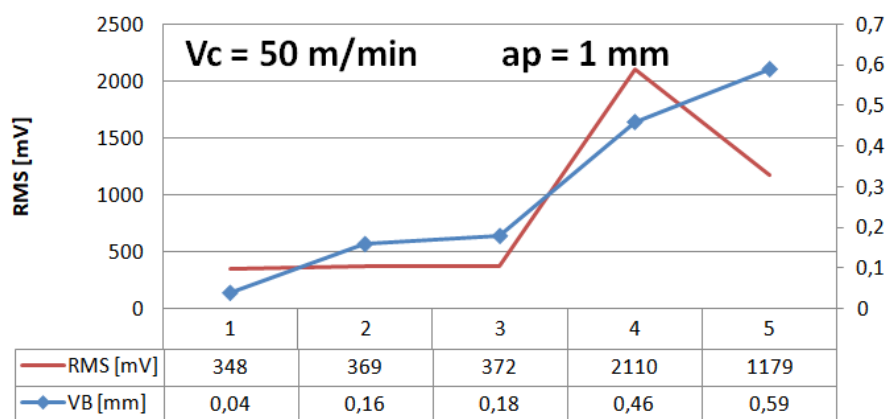
Obr. 15: Graf závislosti $v_c=45$; $a_p=1$

$v_c = 50$ [m/min]

$a_p = 1$ [mm]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	1	1	0,04	348
2	1	2	0,16	369
3	1	3	0,18	372
4	1	4	0,46	2110
5	0,5	4,5	0,59	1179
Použití řezní kapaliny (není součástí grafu na Obr. 16)				
1	1	1	0,15	1230

Tabulka 16: Naměřené hodnoty $v_c=50$; $a_p=1$

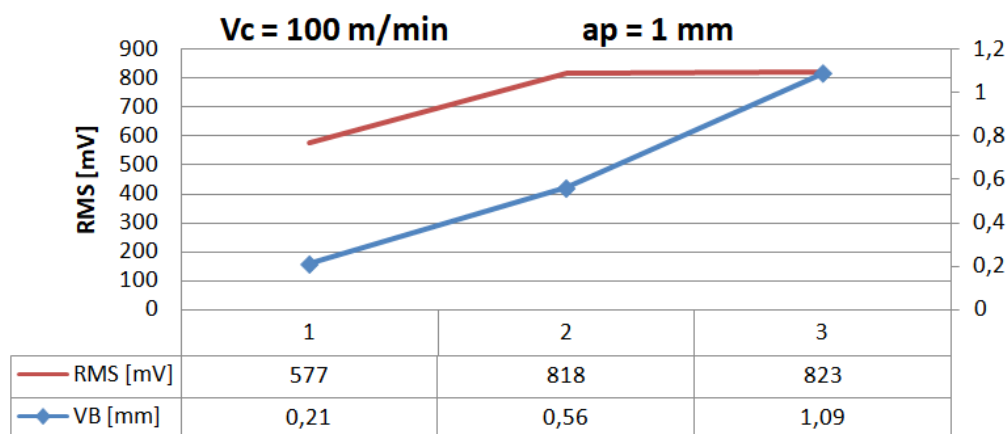


Obr. 16: Graf závislosti $v_c=50$; $a_p=1$

$v_c = 100$ [m/min]

$a_p = 1$ [mm]

Řez č.	Čas řezu [min]	Čas celk. [min]	VB [mm]	Mean RMS [mV]
1	1	1	0,21	577
2	1	2	0,56	818
3	0,5	2,5	1,09	823



Obr. 17: Graf závislosti $v_c=100$; $a_p=1$