

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality
Studijní specializace: Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků I.

Autor: **Bc. Tomáš MALÝ**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní Akademický
rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš Malý
Osobní číslo:	S20N0007P
Studijní program:	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Studijní obor:	Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Téma práce:	Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II.
Zadávající katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Současný stav měření akustické emise při obrábění
3. Akustická emise při obrábění lineární řeznou hranou
4. Návrh a realizace experimentu obrábění lineární řeznou hranou se zaměřením na akustickou emisi
5. Technicko – ekonomické hodnocení
6. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Povolný**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

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

Rád bych poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a přístup při tvorbě práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalovi Povolnému, který byl konzultantem a velice mi pomohl při řešení problémů a za celkové poradenství během vypracovávání této závěrečné práce. Nesmím opomenout ani pracovníky ZČU, kteří se zúčastňovali experimentů a měli na mé práci kladný přínos.

V neposlední řadě bych rád poděkoval celé mé rodině, přátelům a mé přítelkyni za podporu během celého studia a jejich trpělivost.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Malý	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Rehoř, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Progressivní technologie obrábění žárových nástřiků I.		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	96	TEXTOVÁ ČÁST	71	GRAFICKÁ ČÁST	25
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Tato práce se zabývá prostudováním možností akustické emise a její využití v případě obrábění žárových nástřiků, konkrétně lineární reznou hranou.
KLÍČOVÁ SLOVA	Akustická emise, žárové nástřiky, Stellite-6, lineární rezná hrana

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Malý	Name Tomáš	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technologies and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Progressive technology of thermal spraying machining I.		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of machining	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	96	TEXT PART	71	GRAPHICAL PART	25
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is concerned with the study of the possibilities of acoustic emission and its use in the case of hot spray machining, specifically linear cutting edge machining.
KEY WORDS	Acoustic emission, thermal spraying, Stellite-6, linear cutting edge

Obsah

1	Úvod	13
1.1	Cíle práce	14
2	Žárový nástřík Stellite-6.....	15
2.1	Tloušťka nástříku.....	15
2.2	Vlastnosti povlaku	16
3	Akustická emise	18
3.1	Frekvenční rozhraní	20
3.2	Signál AE.....	20
3.3	Charakter signálu	21
3.4	Snímače.....	22
4	Akustická emise při obrábění lineární řeznou hranou.....	24
5	Návrh a realizace experimentu	26
5.1	Stroj.....	27
5.2	Nástroj.....	28
5.3	Vyměnitelná břitová destička	29
5.4	Polotovar s žárovým nástříkem Stellite-6.....	30
5.5	Zařízení pro měření AE	31
5.5.1	Software pro záznam AE.....	33
5.6	Plán experimentu	34
5.7	Průběh experimentu	36
6	Vyhodnocení experimentu	37
6.1	Materiálový rozbor žárového nástříku.....	37
6.1.1	Chemické složení	37
6.1.2	Mikrotvrdost žárového nástříku	38
6.1.3	Pórovitost žárového nástříku	39
6.2	Měření opotřebení.....	40
6.3	Měření kruhovitosti a válcovitosti	40
6.3.1	Válcovitost neobrobeného polotovaru	41
6.3.2	Válcovitost po hrubování	43
6.3.3	Válcovitost po dokončování.....	44
6.4	Měření drsnosti	44
6.5	Tvar třísky.....	47
6.6	Měření akustické emise	47

7	Diskuse výsledků.....	49
7.1	Vyhodnocení hrubování.....	49
7.1.1	Signál AE	49
7.1.2	Akustická emise a profil povrchu.....	51
7.1.3	Akustická emise a řezné síly	53
7.1.4	Akustická emise a opotřebení	54
7.1.5	Akustická emise a kruhovitost, válcovitost, kuželovitost	55
7.2	Vyhodnocení dokončování	56
7.2.1	Signál AE	56
7.2.2	Akustická emise a profil povrchu.....	57
7.2.3	Akustická emise a řezné síly	60
7.2.4	Akustická emise a opotřebení	63
7.2.5	Akustická emise a kruhovitost, válcovitost, kuželovitost	64
8	Technicko-ekonomické vyhodnocení	66
9	Závěr	69
10	Seznam použité literatury	70
11	Seznam příloh.....	72

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Proces nanášení nástřiku metodou HVOF [6].....	14
Obrázek 2: Příčný řez vzorku povlakem Stellite-6 [7]	15
Obrázek 3: Ukázka elementárního složení povlaku [7].....	16
Obrázek 4: Velikost a tvar práškové směsi [8]	16
Obrázek 5: Schéma vzniku a měření AE [11]	18
Obrázek 6: Mechanismy AE [12]	19
Obrázek 7: Schéma rozdělení AE v závislosti na frekvenci uvolněných vln [13]	20
Obrázek 8: Popis signálu AE [14]	20
Obrázek 9: Zpracování signálu AE pomocí Piezotron 5125C [16]	22
Obrázek 10: Konstrukce piezoelektrického senzoru [14].....	23
Obrázek 11: Piezoelektrický elementy [16].....	23
Obrázek 12: Základní schéma při obrábění lineární řeznou hranou [17]	24
Obrázek 13: Upnutí obrobku	26
Obrázek 14: Soustruh EMCO MAXXTURN 25 [23]	27
Obrázek 15: Nástroj s upnutou břitovou destičkou	28
Obrázek 16: Ukázka rozloženého držáku	28
Obrázek 17: Upnutí nože a nožové hlavy [16]	29
Obrázek 18: Vyměnitelná břitová destička [24]	30
Obrázek 19: Neobrobený vzorek s naneseným nástřikem Stellite-6	30
Obrázek 20: Výkres polotovaru	31
Obrázek 21: Senzor akustické emise [15].....	32
Obrázek 22: Senzor akustické emise 8152C [15].....	32
Obrázek 23: AE – Piezotron coupler	33
Obrázek 24: Nastavení parametrů měření.....	34
Obrázek 25: Grafické rozhraní.....	34
Obrázek 26: Příprava experimentu	36
Obrázek 27: Chemický rozbor nástřiku	38
Obrázek 28: Detailní pohled otisku	39
Obrázek 29: Pórovitost 6,04 % v místě 2	39
Obrázek 30: Destička č.5	40
Obrázek 31: Kruhoměr (vlevo) a detail měření vzorku č.12 (vpravo)	41
Obrázek 32: Kruhovitost řezu 3 vzorek P13	42
Obrázek 33: Válcovitost neobrobeného vzorku P15	43
Obrázek 34: Válcovitost vzorku P13	43

Obrázek 35: Válcovitost vzorku P14 po dokončování	44
Obrázek 36: Schématické znázornění měření drsnosti [17]	45
Obrázek 37: Průběh měření na drsnoměru.....	45
Obrázek 38: Protokol o měření drsnosti vzorku P2	46
Obrázek 39: Tříška.....	47
Obrázek 40: Signál hrubování (vlevo) a dokončování (vpravo) u vzorku P11	48
Obrázek 41: Akustická emise P1 hrubování.....	49
Obrázek 42: Akustická emise P5 hrubování.....	50
Obrázek 43: Akustická emise P1 vjezd do vzorku	51
Obrázek 44: Hrubování vzorek P1	51
Obrázek 45: Akustická emise P13 hrubování.....	52
Obrázek 46: Profil povrchu P13 hrubování	53
Obrázek 47: Řezná síla Fx P2 hrubování.....	53
Obrázek 48: Akustická emise P2 hrubování.....	54
Obrázek 63: Detail břitu destičky 2/6/4 (vlevo) a signál akustické emise (vpravo).....	55
Obrázek 50: Válcovitost vzorku P13 po hrubování.....	55
Obrázek 51: Akustická emise P13	56
Obrázek 52: Akustická emise P7	57
Obrázek 53: Akustická emise P2 v místě 3	58
Obrázek 54: Profil povrchu P2 v místě 3.....	58
Obrázek 55: Akustická emise P4 v místě 2	59
Obrázek 56: Profil povrchu P4 v místě 2.....	59
Obrázek 57: Akustická emise P8 v místě 3	60
Obrázek 58: Profil povrchu P8 v místě 3.....	60
Obrázek 59: Akustická emise P14 dokončování	61
Obrázek 60: Řezná síla Fx P14 dokončování	62
Obrázek 61: Řezná síla Fy P14 dokončování	62
Obrázek 62: Řezná síla Fz P14 dokončování	63
Obrázek 49: Opatření destičky 2/1/2 na čele (vlevo) a hřbetu (vpravo).....	64
Obrázek 64: Válcovitost vzorku P4 po dokončování	64
Obrázek 65: Akustická emise P4 dokončování	65
Obrázek 66: Kalkulační vzorec pro experiment	66

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Chemické složení (hmot. %) Stellite-6 [8]	16
Tabulka 2: Parametry experimentu	26

Tabulka 3: Parametry soustruhu EMCO MAXXTURN 25.....	27
Tabulka 4: Parametry destičky dle označení	29
Tabulka 5: Plán experimentu	35
Tabulka 6: Chemické složení žárového nástřiku	37

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Název	Jednotka
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni	[-]
FST	Fakulta strojní	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
AE	Akustická emise	[-]
VA	Vibrační akcelerometrie	[-]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	[-]
HVOF	Vysokorychlostní nástřik	[-]
VBD	Výměnná břitová destička	[-]
CBN	Kubický nitrid bóru	[-]
PCBN	Polykrystalický kubický nitrid bóru	[-]
HRC	Tvrдость dle Rockwella	[-]
HV _{0,1}	Mikrotvrдость dle Vickerse	[-]
Rt, Wt, Pt	Celková výška profilu	[μm]
Rz, Wz, Pt	Nejvyšší výška profilu	[μm]
Ra, Wa, Pa	Průměrná aritmetická hodnota	[μm]
f	Vzorkovací frekvence	[MHz]
F	Síla	[N]
t	Čas	[s]
τ	Integrační časová konstanta	[ms]
v _c	Řezná rychlost	[m/min]
f _{ot}	Posuv na otáčku	[mm/ot]
a _p	Hloubka řezu	[mm]
λ _s	Úhel sklonu ostří	[°]

1 Úvod

Problematika obrábění žárových nástřiků je poměrně novým tématem, které přináší nové možnosti použití této technologie. Nástřiky je možné aplikovat již při výrobě a dosáhnout tak lepších mechanických vlastností součástí (korozivzdornost, otěruvzdornost a žáruvzdornost). S touto možností aplikace, je potřeba porozumět následnému opracování takto ošetřených částí, která je v našem případě hřídel. Hlavním problémem v případě žárových nástřiků je právě v jejich následném opracování, kdy se nástřik brousí, což je pomalé a drahé. Z tohoto důvodu je snaha nahradit stávající technologii za rychlejší a levnější. Za tímto účelem se začala využívat technologie soustružení s využitím lineární řezné hrany, při které je malá hloubka řezu. Vzhledem k výskytu karbidotvorných látek a částečné pórovitosti naneseného nástřiku lze říct, že se jedná o materiál s nehomogenní strukturou.

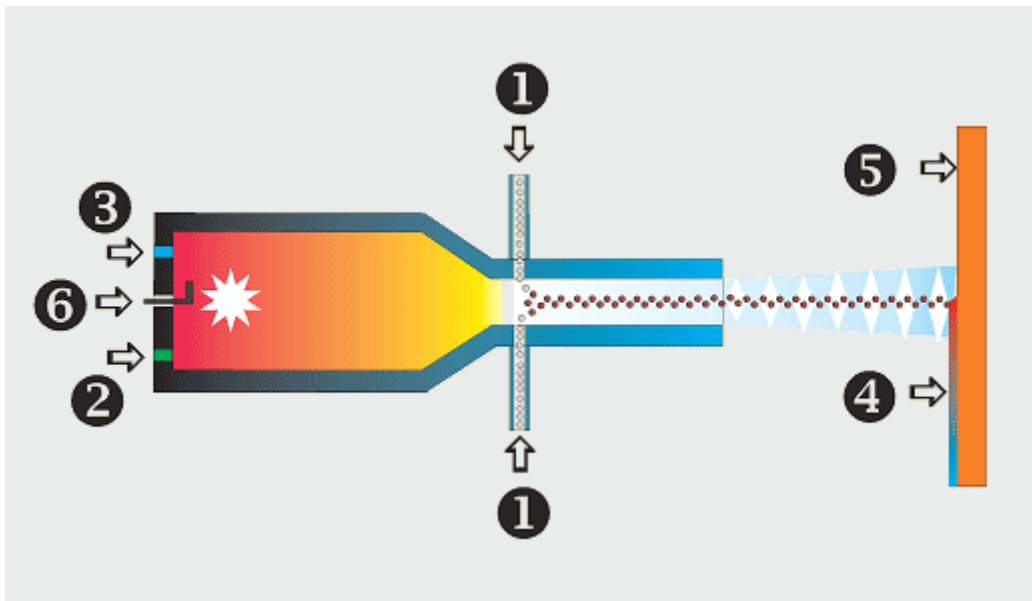
V rámci FST ZČU vzniklo mnoho studií, které již řešili problematiku žárových nástřiků a obrábění lineární řeznou hranou. Konkrétním tématem Stellite-6 se zabývá článek paní Houdkové a kol. [1], který popisuje samotnou mikrostrukturu a vlastnosti nástřiku. Další z výzkumů byl zaměřen na soustružení nástřiku Stellite-6 s cílem dosáhnout optimálních řezných parametrů a následně vyhodnotit drsnost povrchu, zbytkové napětí, řezné síly, velikost zrn a další. Práci pana Valíčka a kol. [2] byly získány experimentální výsledky, na jejichž základě bylo odvozeno několik nových predikčních rovnic a modelů. Navržené modely a postupy, pomáhají získat nové výsledky a poznatky o technologii žárových nástřiků. Dalším shrnutí prací a rešerši bude věnována samostatná kapitola.

Technologie žárového stříkání umožňuje nanášení a vytváření kovových, kovokeramických a keramických povlaků na všechny typy kovových konstrukčních materiálů bez ohledu na stav jejich tepelného zpracování. Pro samotnou aplikaci nástřiku je možné zvolit z mnoha metod, které se běžně používají [3].

Pro naše využití je důležitá metoda vysokorychlostního nástřiku HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), kterou je nanášen Stellite-6. Jedná se o proces nanášení žárového nástřiku na základní materiál, při kterém se práškový materiál rychle zahřívá v horkém plynném prostředí. Současně je pak práškový materiál vysokou rychlostí částic vrhán na připravený povrch substrátu, kde se hromadí a vytváří požadovaný povlak. Vysokorychlostní nástřiky (HVOF) se v průběhu let posledního desetiletí hojně používají především v průmyslových aplikacích jako je letectví a energetika, jelikož tyto povlaky vyjadřují nízkou pórovitost a obsah oxidů, vysokou tvrdost, přílnavost, korozivzdornost, otěruvzdornost a žáruvzdornost povrchu [4].

Slitiny na bázi niklu se hojně používají v řadě aplikací, a to jak pro svou vynikající odolnost proti opotřebení a korozi při vysokých teplotách, tak pro svou relativně nízkou cenu. Mají vysokou pevnost, tvrdost a dobrou odolnost proti korozi díky přísadce chromu. Bór snižuje teplotu tavení a pomáhá při tvorbě tvrdých fází. Křemík se přidává za účelem zvýšení samovytažitelnosti. Uhlík vytváří karbidy s vysokou tvrdostí, které zlepšují odolnost povlaků proti opotřebení [4].

Všech výše popsanych vlastností nástřikané vrstvy se využívá jak v prvovýrobě, tak i při renovaci opotřebovaných součástí (například náprav železničních vagónů). Nástřik je možno aplikovat jak na železný, tak i neželezný základní materiál [5].



Obrázek 1: Proces nanášení nástřiku metodou HVOF [6]

- Popis: 1. Přídavný materiál – prášek
2. Přívod kerosinu
3. Přívod kyslíku
4. Nástřík
5. Podklad
6. Zapalovací svíčka

Hlavní výhodou HVOF ve srovnání s jinými technikami tepelného nástřiku je schopnost urychlit roztavené částice prášku výchozího materiálu relativně velkou rychlostí. Ukázalo se, že proces tepelného nástřiku HVOF je jednou z nejlepších metod pro nanášení konvenčních práškových surovin na bázi Ni a NiCr, protože hypersonická rychlost plamene zkracuje dobu interakce mezi práškem a plamenem. Tyto účinky ve spojení s relativně nízkou teplotou (ve srovnání s technikami založenými na plazmatu) vedou k menšímu rozkladu karbidových částic během nástřiku [4].

1.1 Cíle práce

Obrábění žárových nástřiků lineární řeznou hranou, je možné chápat jako velmi specifický způsob obrábění. Pro porozumění takového procesu je potřebné znát vlastnosti obráběného materiálu, tak i procesy, které při něm vznikají. Jedním z nich je akustická emise, která nám může pomoci s popisem průběhu jednotlivých fází.

Hlavním cílem této práce je lépe pochopit problematiku obrábění lineární řeznou hranou. Za tímto účelem byl navržen experiment, při kterém byl obráběn žárový nástřík Stellite-6 a byla použita akustická emise, která umožňuje zachytit vznikající hluk. Pomocí výstupního signálu akustické emise byla snaha lépe pochopit celý proces a najít určité závislosti např. k profilu povrchu a řezným silám.

2 Žárový nástřík Stellite-6

Téma žárového nástříku Stellite-6 bylo již v rámci FST ZČU řešeno v několika člancích. Jedním z článků je paní Houdkové a kol. [1], který řeší vlastnosti, mikrostrukturu a třecí vlastnosti nástříku. Přesto je krátce tento nástřík popsán, pro lepší pochopení problematiky.

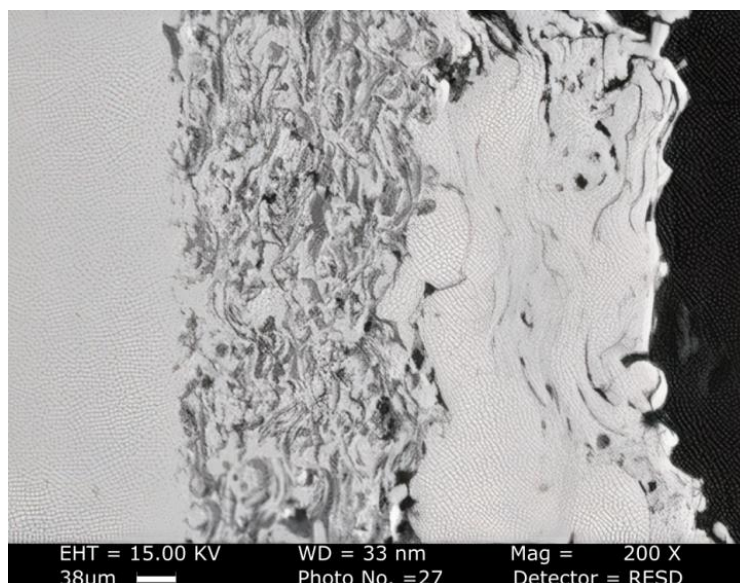
Slitiny na bázi kobaltu se používají pro svou vynikající odolnost proti opotřebení, korozi a oxidaci v širokém rozsahu teplot zejména pro vysoce náročné aplikace. Mezi nimi je v průmyslových aplikacích nejrozšířenější slitina Co-Cr-W, tzv. Stellite [1].

V povrchovém inženýrství se slitiny stellite široce používají k ochraně různých dílů proti opotřebení, zejména proti kavitaci, erozi, korozi a oxidaci. K nanášení stellite vrstvy na povrch lze použít různé technologie nanášení, např. svařování plazmovým obloukem (PTA) nebo wolframovým inertním plynem (TIG), tepelné stříkání nebo laserové plátování. Rozdíly v použitých technologiích nanášení jsou příčinou rozdílů v mikrostruktuře povlaků a následně i v jejich vlastnostech. Navzdory značným rozdílům ve vlastnostech se porovnání povlaků Stellite vyrobených různými technologiemi provádí jen velmi zřídka [1].

Ze skupiny technologií tepelného stříkání se k nanášení povlaků Stellite obvykle používá technologie HVOF. Většinové využití povlaku Stellite nanášených pomocí HVOF je zaměřena na odolnost povlaku proti korozi ve vysoce náročných podmínkách, a to až do teploty 900 °C. Mnoho studií se zabývá o laserové plátování stelliteových nástříků, které jsou intenzivně studovány mnoha výzkumníky s ohledem na parametry laserového zpracování, mikrostrukturu povlaku a odolnost proti opotřebení [1].

2.1 Tloušťka nástříku

V následujících případech se bude jednat o povlak Stellite-6 nanesený na základní materiál 13CrMo4-5, který byl před nanášením otryskán pískem. Tyto data a obrázky byly pořízeny v rámci experimentu pana Sidhy a spol. [7], který byl zpracován do vědeckého článku. V řezu (obr. 2) je vlevo základní materiál, další částí je spojovací nástřík NiCrAlY a vpravo se nachází nástřík Stellite-6. Tloušťka nástříku Stellite-6 byla naměřena přibližně 0,2 mm. Měření proběhlo pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu v příčném řezu, který byl broušen a leštěn [7].



Obrázek 2: Příčný řez vzorku povlakem Stellite-6 [7]

2.2 Vlastnosti povlaku

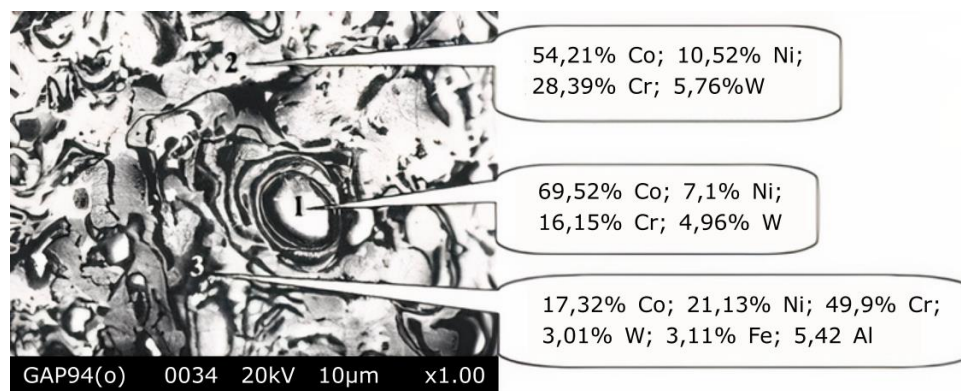
Chemické složení

V tabulce (tab. 1) je zapsáno chemické složení Stellite-6. Složení je pouze teoretického charakteru a od skutečnosti se může lišit. Proto je dobré provést materiálové zkoušky a ověřit s požadovaným složením.

Tabulka 1: Chemické složení (hmot. %) Stellite-6 [8]

Materiál	Co	Cr	Ni	W	Fe	Si	B	Mn	Ostantní
Stellite-6	45-60	27-32	< 3	4-6	< 3	< 1,5	< 1	< 1	< 1

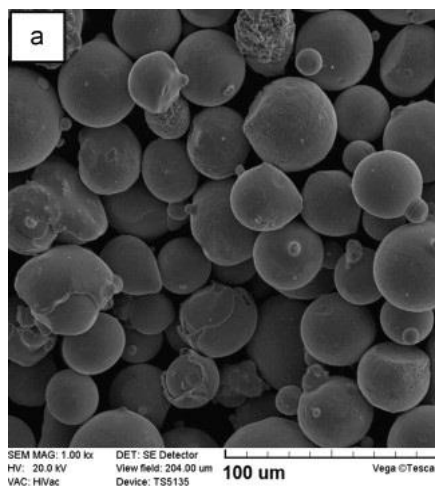
Níže na obrázku (obr. 3) je znázorněno pomocí technologie SEM struktura naneseného povlaku Stellite-6 na základní materiál. Obsah matrice je v tomto případě 54,21 % Co; 10,52 % Ni; 28,39 % Cr a 5,76 % W. V matici jsou černé oblasti, které jsou ochuzené o kobalt a bohaté na chrom. Dále jsou zde také přítomny oblasti bohaté na kobalt a ochuzené o chrom [8].



Obrázek 3: Ukázka elementárního složení povlaku [7]

Prášek

Částice prášku Stellite-6 mají kulovitý tvar o velikosti v rozmezí 25–53 µm. Charakteristický tvar a velikost zrn prášku je znázorněn na obrázku (obr. 4). Tento obrázek se vztahuje k experimentu a materiálovým zkouškám pana Bartkowského. [8]



Obrázek 4: Velikost a tvar práškové směsi [8]

Pórovitost

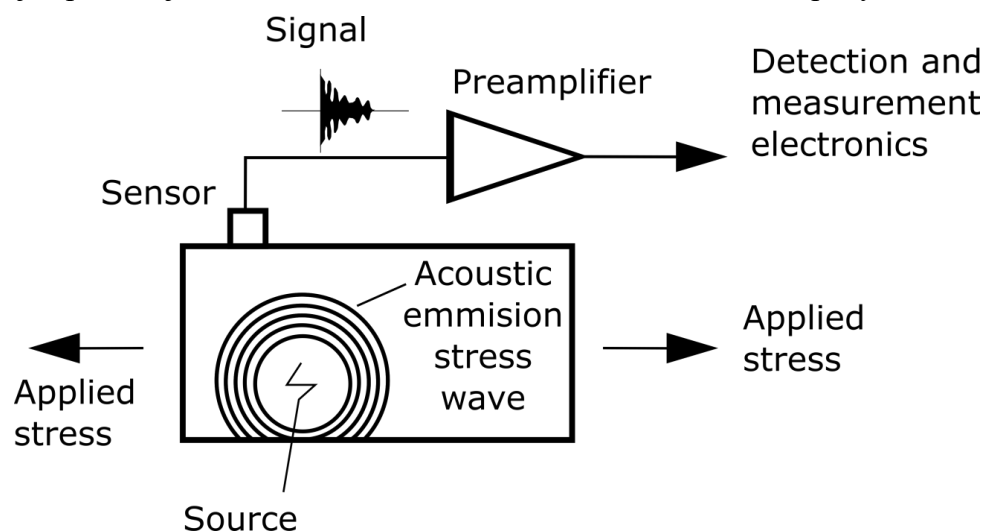
Pórovitost pro stříkané povlaky typu Stellite metodou HVOF se pohybuje v rozmezí 2–3,5 %. Nižší hodnoty pórovitosti lze dosáhnout pomocí přetavení povlaku laserem. Při experimentech touto metodou se docílilo pórovitosti pod 0,5 %. Při použití této metody se mění také homogenita a mikrostruktura nástřiku [8].

Mikrotvrдость

Výsledky zkoušek tvrdosti na povrchu nástřiku se pohybují v rozmezí 650–850 HV. Takto velké rozmezí je způsobeno různými parametry nanesení nástřiku např. tlak a teplota procesního plynu, které přímo ovlivňují velikost mikrotvrdsti [9].

3 Akustická emise

Akustická emise (AE) je definována jako přechodná elastická vlna generovaná rychlým uvolněním energie z lokalizovaného zdroje nebo zdrojů uvnitř materiálu, která je vystavena stavu napětí. Toto uvolnění energie je spojeno s náhlým přerozdělením vnitřních napětí a v důsledku toho se materiálem šíří napěťová vlna (obr. 5). Z výše uvedené definice AE vyplývá, že zdrojem akustické emise jsou procesy, které jsou schopny měnit vnitřní strukturu materiálu, jako je pohyb dislokací, směrová difúze, creep, posuv hranic zrn a dvojčatění, které mají za následek plastickou deformaci, fázové přeměny, koalescenci vakancí a dekohesii inkluzí a lom. Z výše uvedených procesů má při řezání kovů význam pouze plastická deformace a lom. Ze čtyř zmíněných procesů plastické deformace je v krystalických materiálech, které se v praxi hojně používají, obecně dominantním mechanismem dislokační pohyb [10].

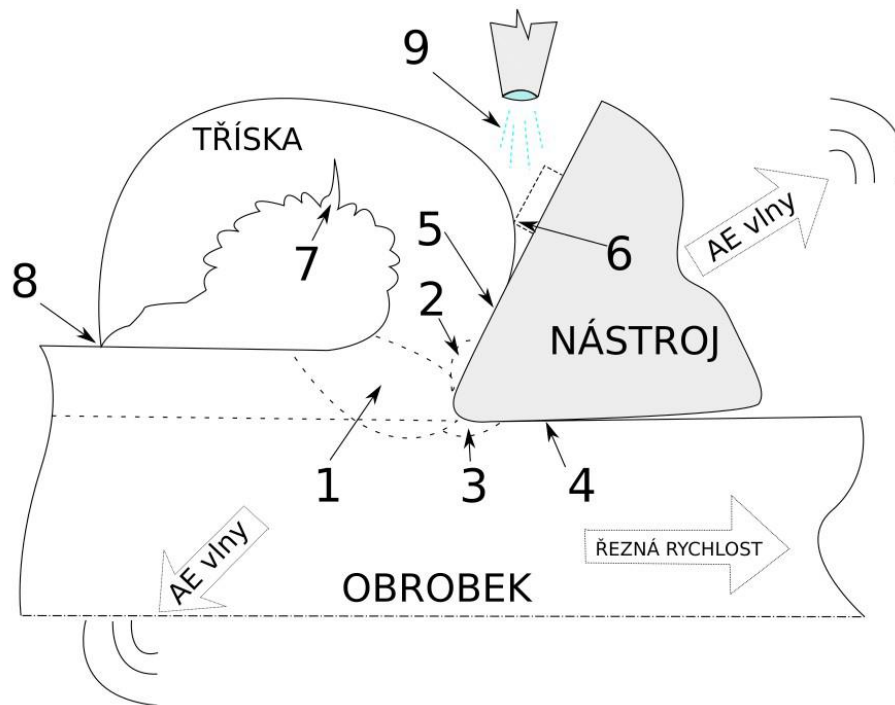


Obrázek 5: Schéma vzniku a měření AE [11]

Mechanismy zdrojů AE při obrábění

Akustické emise nevznikají vratnou, homogenní změnou meziatomových vzdáleností, která představuje pružnou deformaci. Akustické emise vznikají pouze tehdy, když někde v materiálu dojde k nějaké náhlé a trvalé změně. Množství uvolněné energie AE závisí především na velikosti a rychlosti lokálního deformačního procesu. Vznik a pohyb jedné dislokace sice vytváří napěťovou vlnu AE, ale není to dostatečně velký proces, aby mohl být detekován izolovaně. Pokud se však při poddajnosti vzorku v tahu tvoří a pohybují miliony dislokací současně, jednotlivé napěťové vlny se vzájemně překrývají, což dává detekovatelný výsledek. Dále je možné říct, že vyšší je rychlost deformace a čím větší je vzorek, tím větší je tento signál. Tato tzv. kontinuální emise se liší od emise typu burst tím, že jednotlivé události zdroje nejsou rozeznatelné. Kontinuální emise se nejlépe měří pomocí efektivní hodnoty nebo obvodů pro měření rychlosti energie [11].

V rámci obrábění vzniká AE v důsledku základních procesních událostí, jako je stříh v různých zónách, tření třísek, lámání třísek, opotřebení a vylomení břitu (obr. 6). Lze tedy předpokládat silnou závislost AE na procesních podmínkách. Bylo zavedeno mnoho počítačových monitorovacích systémů, které současně dohlížejí na opotřebení rezného nástroje, odlamování břitu a některé nebezpečné procesy tvorby třísek na soustruhu. Vzhledem ke kombinovanému vlivu opotřebení na hřbetě a čele je obtížné určit podmínky opotřebení rezného nástroje pomocí parametrů AE [10].



Obrázek 6: Mechanismy AE [12]

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

Teoretická analýza ortogonálního soustružení ukázala, že energie AE je funkcí rychlosti deformace a řezné rychlosti. Experimentální data ukazují, že úhel sklonu nástroje nemá vliv, zejména při vyšších řezných rychlostech. To by mohlo být způsobeno tím, že při nižších rychlostech začínají převažovat sekundární zdroje AE v důsledku vzniku nahromadění u břitu a skluzu třísek po povrchu nástroje. Na druhou stranu neexistuje žádná spolehlivá metoda pro odhad úhlu stříhu, objemu smykové zóny, a tím i míry deformace. Průměrná intenzita AE se uvádí jako funkce hloubky řezu, rychlosti, úhlu břitu a úhlu náběhu nástroje. Pro hloubku řezu se ukazuje lineární závislost, zatímco u úhlu náběhu nástroje není pozorován žádný jasný trend. Ukazuje se, že v závislosti na vlastnostech materiálu, jako je morfologie vytvořené třísky a tvrdost, se intenzita AE může značně lišit. Mnoho kvantifikovatelných charakteristik AE lze zobrazit následovně [10]:

- Počet násobků amplitudy signálu překračuje nastavenou referenční hranici
- Mikrostrukturální posun, který způsobuje pružné vlny v materiálu pod zatížením nebo napětím

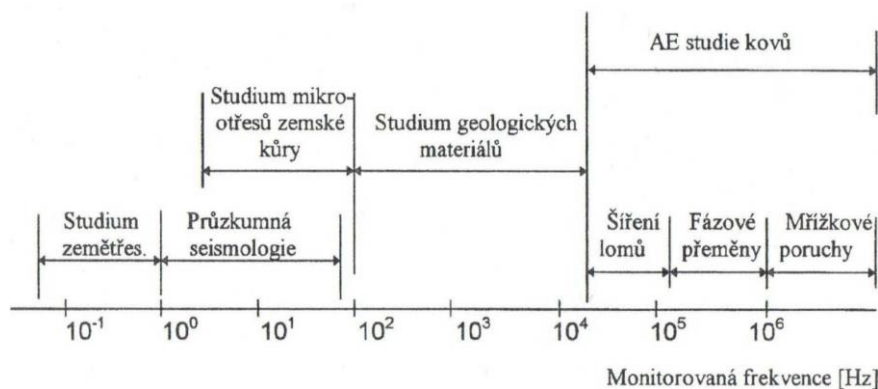
- Doba potřebná k dosažení špičkové amplitudy z hodnoty od prvního překročení nastaveného prahového napětí signálu
- Vrcholová amplituda
- Efektivní hodnota napětí

Tyto parametry AE se používají ke korelaci rezných podmínek a geometrii nástroje při soustružení. Nejlepších výsledků lze dosáhnout z RMS napětí a počtu kmitů.

Faktory, jako je ulomení třísky nebo vylomení břitu nástroje, lze snadno identifikovat podle náhlých výkyvů AE, po nichž následují velké změny intenzity signálu [10].

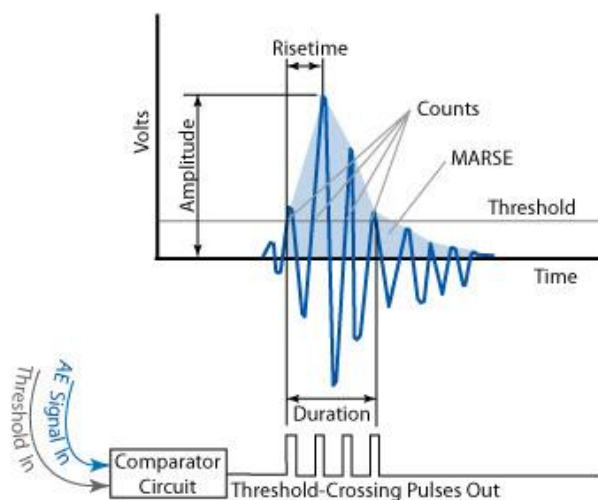
3.1 Frekvenční rozhraní

Vzhledem k rozsahu, kterým AE disponuje, může poskytnout cenné údaje jednak o charakteru sledovaných procesů, a také umožňuje lokalizovat tyto procesy. Definice AE v dané formě zahrnuje možné procesy z nejrůznějších oborů. Na obrázku (obr. 7) je uvedeno schéma použití metod AE v závislosti na frekvenci uvolněných vln. Toto schéma zároveň reprezentuje i historický vývoj využití AE [13].



Obrázek 7: Schéma rozdělení AE v závislosti na frekvenci uvolněných vln [13]

3.2 Signál AE



Obrázek 8: Popis signálu AE [14]

Amplituda – A (amplitude)

Amplituda je největší naměřené napětí ve tvaru vlny a měří se v decibelech (dB). Jedná se o důležitý parametr při kontrole akustické emise, protože určuje detekovatelnost signálu. Signály s amplitudou nižší než operátorem definovaná minimální prahová hodnota, nebudou zaznamenány [14].

Doba náběhu – R (rise time)

Doba náběhu je časový interval mezi prvním překročením limitu a vrcholem signálu. Tento parametr souvisí se šířením vlny mezi zdrojem akustické emise a snímačem. Proto se doba náběhu používá pro kvalifikaci signálů a jako kritériem pro šumový filtr [14].

Doba trvání – D (duration)

Doba trvání je časový rozdíl mezi prvním a posledním překročením limitu. Doba trvání může být použita k identifikaci různých typů zdrojů a k odfiltrování šumu. Stejně jako počet pulzů (N) závisí tento parametr na velikosti signálu a na akustických vlastnostech materiálu [14].

Marse – E

MARSE, někdy označovaný jako velikost energie, je míra plochy pod obálkou usměrněného lineárního časového signálu napětí ze snímače. Lze si ji představit jako relativní amplitudu signálu a je užitečná, protože lze určit energii emise. MARSE je rovněž citlivý na dobu trvání a amplitudu signálu, ale nepoužívá počty nebo uživatelem definované prahové hodnoty a pracovní frekvence. MARSE se pravidelně používá při měření akustických emisí [14].

Počet kmitů – N (count)

Počet se vztahuje k počtu impulzů, které měřící obvody vyšlou, pokud je amplituda signálu větší než prahová hodnota. V závislosti na velikosti signálu AE a vlastnostech materiálu může jeden impuls vyvolat jeden nebo mnoho dalších. Ačkoliv se jedná o poměrně jednoduše sbíraný parametr, obvykle je třeba jej kombinovat s měřením amplitudy nebo doby trvání, aby bylo možné získat kvalitní informace o tvaru signálu [14].

3.3 Charakter signálu

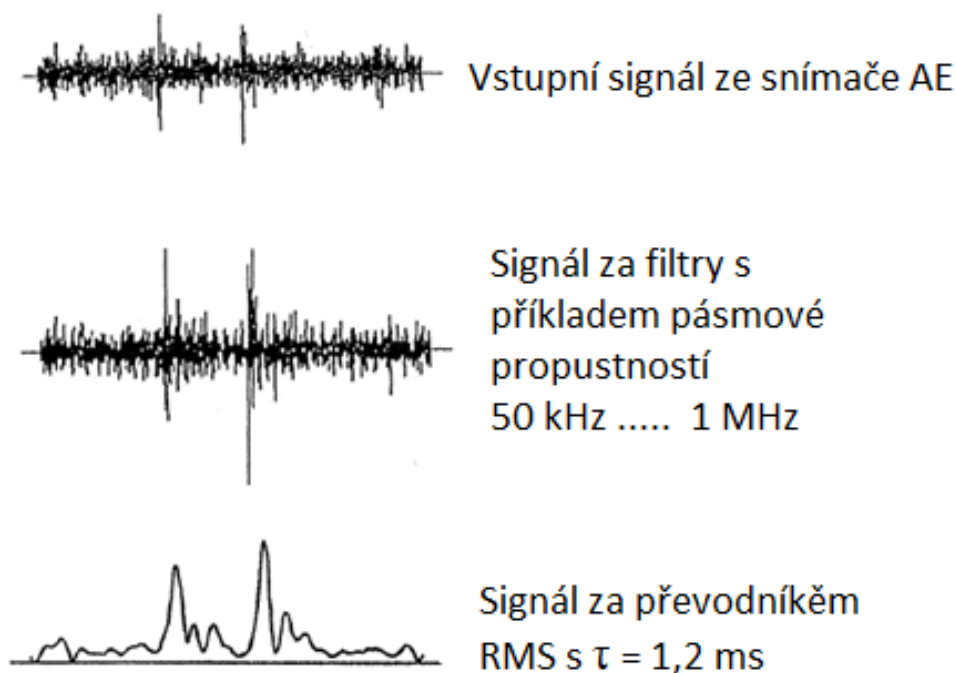
Signál získaný při detekci AE obvykle charakterizujeme počtem napětíových vln o určitém rozsahu amplitudy, uvolněných za jednotku času. Tato veličina definuje rychlost akustické emise. Dle vzhledu signálu AE, získaného během sledovaného procesu vnějšího namáhání [15].

RAW signál

Jedná se o výstupní signál z aparatury akustické emise, který se využívá pro analýzu frekvencí a porovnávání amplitudy. Tento signál obsahuje velké množství dat, které nejsou pro pozorování průběhu obrábění podstatné [16].

RMS signál

V praxi je možné použít RMS signál z anglického Root mean square, který vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu nebo také efektivní hodnotu signálu. Jedná se o přefiltrovaný signál pomocí časové integrační konstanty. Výstupem je tzv. obálka výstupního signálu [16].



Obrázek 9: Zpracování signálu AE pomocí Piezotron 5125C [16]

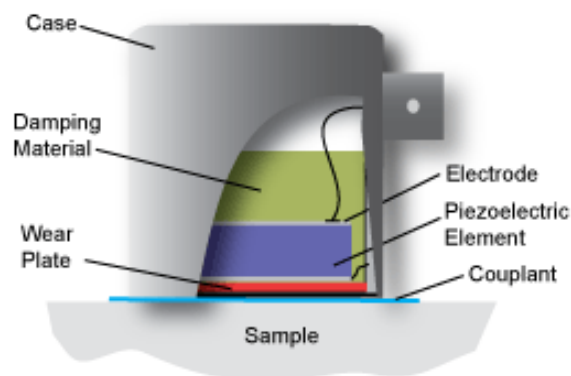
3.4 Snímače

V průběhu plastické deformace, resp. lomu materiálu, jsou emitovány transitzní napěťové vlny s frekvencí řádově 10^6 Hz. Ty se šíří tělesem (např. zkušebním vzorkem, konstrukcí apod.) od místa zdroje na volný povrch, kde jsou snímány kontaktními snímači, které registrují jejich pohyb, jehož amplituda je $10^{-12} - 10^{-5}$ m [13].

Snímače musí tedy snímat velmi malé posuvy. Nejčastěji se proto využívá piezoelektrických převodníků, které převádí mechanické kmity na elektrické. Snímače tohoto typu mají dostatečnou citlivost a frekvenční rozsah řádově do 10^5 Hz, výjimečně do 10^6 Hz. Lze použít i jiných převodníků např. magnetostrikčních, resistivních, kapacitních, popř. indukčních. Avšak pro svou poměrně jednoduchou konstrukci našly piezoelektrické snímače (obr. 10) nejširší a nejčastější uplatnění v technické praxi [13].

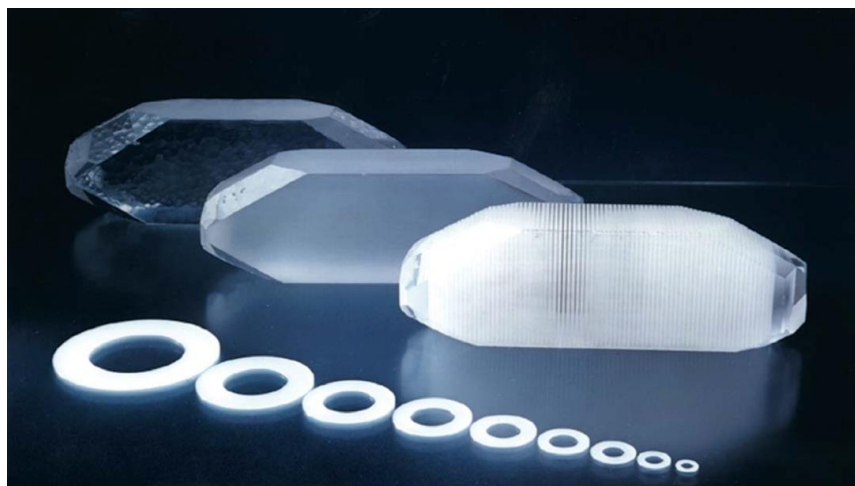
Nejpoužívanějším a zároveň nejvhodnějším piezoelektrickým materiálem pro snímače AE je piezoelektricky citlivý element, který se nejčastěji vyrábí s monokrystalického křemene. Tyto elementy je možné vidět na obrázku (obr. 11), na kterém je vytvořený krystal v celku. Tento krystal se následně rozřezává na jednotlivé kotouče o potřebných rozměrech [13].

Piezoelektrický element ve tvaru kotoučku určuje jak citlivost, tak i frekvenční charakteristiku snímače. Horní hranice snímaných povrchových napěťových vln je dána průměrem elementu. Aby pracoval v širokém pásmu frekvencí je na něm umístěna zátěž. Zátěž se většinou vyrábí z epoxidového lepidla smíchaného s částicemi o vysoké měrné hmotnosti (např. wolframový prášek) přizpůsobených k akustické impedanci elementu, čímž je zaručen vysoký útlum akustických vln a potlačena rezonance [13].



Obrázek 10: Konstrukce piezoelektrického senzoru [14]

- Case – Pouzdro
- Damping material – Tlumící hmota
- Electrode – Elektroda
- Piezoelectric element – Piezoelektrický element
- Wear plate – Kovová membrána
- Couplant – Tekutina pro lepší vedení vln AE



Obrázek 11: Piezoelektrický elementy [16]

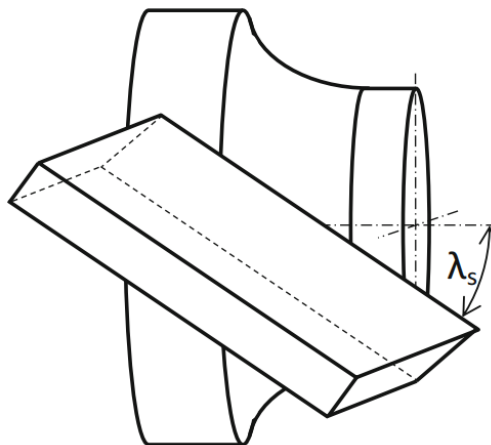
4 Akustická emise při obrábění lineární řeznou hranou

Západočeská univerzita v Plzni se již delší dobu zabývá žárovými nástřiky a jejich obráběním ve spolupráci s více firmami. Za tímto účelem vzniklo mnoho výzkumných studií, odborných článků, bakalářských a diplomových prací.

Problematika lineární řezné hrany je jedním z procesů obrábění kovů, používaných pro jemné soustružení na válcovém obrobku (v našem případě žárový nástřik). Pro tento způsob obrábění se používá v literatuře mnoho názvů, jako jsou například „soustružení nástroje bez špičky“; „volné šikmé obrábění“; „bezšpičkové soustružení“ nebo „šikmé soustružení“.

Při této metodě obrábění se ukázalo, že je možné získat lepší parametry profilu povrchu Ra a Rz a také vyšší řeznou rychlost ve srovnání s těmi, které se dosahují při soustružení standardními nástroji. Výhodou takové techniky je vysoká rozměrová přesnost a kvalita povrchu takto získaných strojních součástí [17], [18].

Z kinematického hlediska jsou specifickými rysy bezšpičkového soustružení velká délka kontaktu břitu s obrobkem a malá hloubka řezu. Poslední jmenovaná okolnost propůjčuje tomuto procesu velmi vysokou vibrační intoleranci, protože i vibrace s malou amplitudou mohou narušovat tloušťku třísky, způsobovat zvlnění obrobku a také autokmitání s vysokou amplitudou a frekvencí. Je zřejmé, že vibrace jsou v systému řezání kovů nepřijatelné, protože narušují kvalitu povrchu finálního výrobku, geometrickou přesnost a zvyšují opotřebení řezného nástroje [19].



Obrázek 12: Základní schéma při obrábění lineární řeznou hranou [17]

Mezi první pokusy obrábění žárových nástřiků na ZČU FST patří experiment v rámci diplomové práce s názvem *Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje* [20]. Praktická část této práce je zaměřena na docílení stejné nebo lepší kvality povrchu žárového nástřiku Stellite-6, který je obráběn definovanou geometrií břitu (hoblování) při porovnání s technologií broušení.

Další fází byla snaha použít získané informace a zkušenosti s obráběním žárových nástřiků na soustružení lineární řeznou hranou. Touto problematikou se zabývá práce *Obrobitelnost žárového nástřiku Fr13Cr a jeho vlastností* [21]. Autorem práce je Marek Chýna. Cílem práce bylo metodou soustružení lineární řeznou hranou vytvořit povrch, který by dosahoval jakosti broušenému povrchu. Za tímto účelem byl sestaven plán řezných podmínek pro obrobení daného povrchu. Poté bylo analyzováno opotřebení řezné hrany nástroje a geometrické odchylky obrobku. Výsledkem experimentu bylo dosažení optimálních řezných podmínek, které měly však jistá úskalí (vytrhané částice nástřiku; kuželovitost povrchu). Bylo

zjištěno, že zásadní vliv na kvalitu obrobeného povrchu má sklon ostří λ_s . Dále byla také dokázána velká úspora času obrábění oproti broušení až 92 %.

První z uvedených prací zabývající se akustickou emisí je diplomová práce Václava Kratochvíla s názvem *Studium akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje* [12]. Podstatou 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. Tento experiment byl realizován na vnějším soustružení oceli ČSN 16 343 pomocí přímého uběracího nože. Podle získaných dat z experimentu, byla dokázána existence vazby mezi akustickou emisí a opotřebením řezného břitu. Dalším z poznatků bylo určení kritického opotřebení nebo vylomení břitu.

První z uvedených článků, který nevznikl na FST ZČU, napsal pan Filippov a kol. Článek s názvem *Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling* [22] se zabývá studií obrábění lineární řeznou hranou a odezvou AE na vibrační zatížení. Jako obráběný materiál byla zvolena ocel C45 kruhového průřezu; tyče byly použity ve dvou rozměrech $\text{Ø}22\pm 0,05 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ a $\text{Ø}22\pm 0,05 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$. Při experimentu byly nastaveny konstantní řezné podmínky $v_c = 100 \text{ m/min}$; $f_{ot} = 0,3 \text{ mm/ot}$; $a_p = 0,07 \text{ mm}$. Důvod použití dvou rozměrů tyčí bylo kvůli dosažení stabilního soustružení (tyč délky 200 mm) nebo soustružení s chvěním (tyč délky 350 mm). Z tohoto experimentu bylo zjištěno, že chvění s vysokou amplitudou zesiluje signál AE a mění i jeho strukturu [22].

V dalším z článků s názvem *Surface integrity generated by oblique machining of steel and iron parts* je popisován experiment zabývající se obráběním lineární řeznou hranou s komplexní analýzou obrobeného povrchu. Tento experiment vznikl v roce 2012 panem Gresikem a Žakem [18]. Pro experiment byl zvolen úhel naklonění nože $\lambda = 55^\circ$ a materiály: ocel C45, kalená ocel 41Cr4 ($60\pm 1 \text{ HRC}$), nerezová ocel X6CrNiTi18-10 a litina s kuličkovým grafitem. Řezné podmínky a VBD byly zvoleny podle daného materiálu. Po obrobení vzorků bylo v metrologické laboratoři naměřeno Rz, Ra, povrchové profily a topografie. Dílčím experimentem bylo obrábění oceli C45 při změně řezných podmínek, nastavení úhlu hřbetu α a čela γ . Na vzorkách byly změřeny mechanické vlastnosti povrchové vrstvy (zpevňující účinek a zbytkové napětí). Závěrem je možnost využití lineární řezné hrany jako alternativa ke konvenčnímu dokončování soustružením nebo broušením. Při soustružení vznikají rozdílné povrchy s různými geometrickými a provozními vlastnostmi v závislosti na použitém materiálu. Posledním poznatkem experimentu je vznik tlakového zbytkového napětí s maximální hodnotou lokalizovanou blízko obrobené plochy [18].

Žádný z těchto článků se nezabýval kombinací obrábění lineární řezné hrany žárových nástřiků a analýzy procesů pomocí akustické emise. Za účelem lepšího pochopení procesu byl navrhnout a realizován následující experiment.

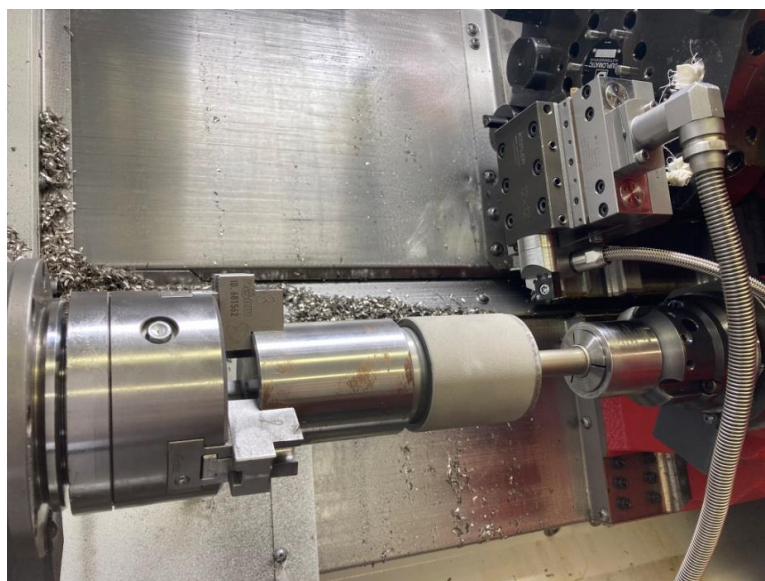
5 Návrh a realizace experimentu

Experiment byl proveden na Stellite-6, jako vnější podélné soustružení lineární řeznou hranou na válcovém vzorku o $\varnothing 61$ mm. Pro tento typ obrábění byl zvolen multifunkční soustruh EMCO MAXXTURN 25. Pro zachycení signálu akustické emise a jeho zpracování byla použita měřicí aparatura od firmy Kistler. Použité stroje a nástroje budou podrobně popsány v následujících kapitolách.

Tabulka 2: Parametry experimentu

Stroj	EMCO MAXXTURN 25
Upnutí	Skličidlo + hrot
Polotovar	$\varnothing 61 \times 75$ mm
Materiál obrobku	ČSN 12050
Materiál nástřiku	Stellite-6
Hloubka řezu a_p	0,15; 0,05 mm
Řezná rychlost v_c	200, 500 m/min
Posuv na otáčku f	0,2; 0,45; 0,7; 0,95; 1,2 mm
Úhel λ_s	50; 55; 60; 65; 70 °
Počet vzorků	14
Počet použitých VBD	8
Počet použitých hran	29

Pro vysokou přesnost upnutí a dostatečnou tuhost byl vzorek upnut do univerzálního tříčelistového sklíčidla (hlavní vřeteno) a na druhé straně podepřen pevným hrotem (protivřeteno). Při tomto experimentu nebyl zapotřebí otočný hrot, jelikož stroj disponuje dvěma naháněnými vřeteny, která byla synchronizována. Pro reprodukovatelnost výsledků byla vždy použita stejná přítlačná síla protivřetene a upínací tlak sklíčidla. Po každém upnutí vzorku byla pomocí úchylkoměru změřena házivost, která byla vždy do 0,01 mm.



Obrázek 13: Upnutí obrobku

5.1 Stroj

Jak bylo zmíněno již v předchozí kapitole, pro tento experiment byl zvolen multifunkční soustruh EMCO MAXXTURN 25. Soustruh je vybaven dvěma naháněnými vřeteny, z nichž levé je hlavní. Parametry stroje jsou v tabulce (tab. 3) a dále samotný vzhled stroje (obr. 14).

Tabulka 3: Parametry soustruhu EMCO MAXXTURN 25

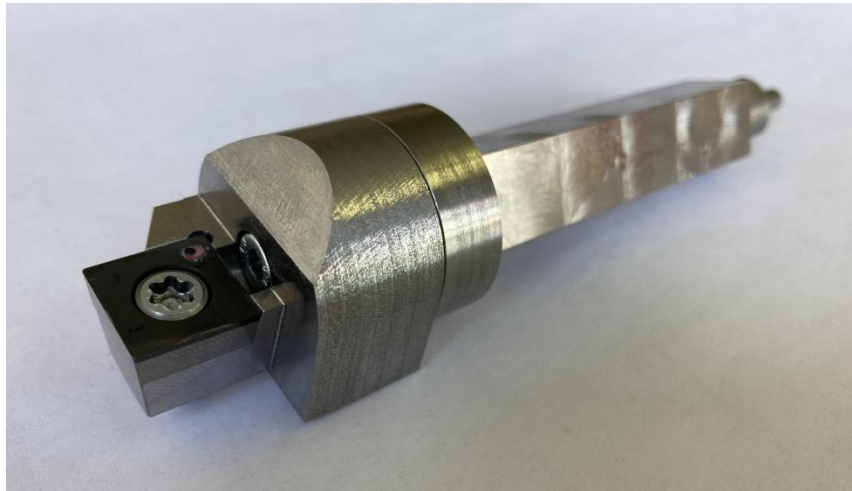
Parametr	Hodnota
Max. otáčky	8000 ot/min
Max. točný průměr	114 mm
Max. pracovní pojezd X	100 mm
Max. pracovní pojezd Y	+20/-15 mm
Max. pracovní pojezd Z	320 mm
Max. výkon pohonu	6,5 kW
Max. točivý moment	30 Nm
Počet nástrojů v revolveru	12
Poháněné nástroje	6



Obrázek 14: Soustruh EMCO MAXXTURN 25 [23]

5.2 Nástroj

Samotný tvar držáku VBD byl navrhnout a vyroben na katedře obrábění FST ZČU. Držák se skládá ze dvou částí, které jsou vyrobeny z nástrojové oceli ČSN 19 313. První část má funkci pro upnutí do revolverové hlavy soustruhu a je v něm vytvořeno šest otvorů, kde jeden slouží jako aretační pro seřízení nástroje a další k nastavení definovaného úhlu λ_s . Druhou částí je samotná hlava, která slouží k upevnění břitové destičky a snímače akustické emise. Na straně, která dosedá na upínací část je vytvořeno také šest otvorů, do kterých pasuje kolík, který zaručí správné nastavení úhlu a poté jsou pomocí šroubu tyto dvě části pevně spojeny viz obrázek (obr. 16).

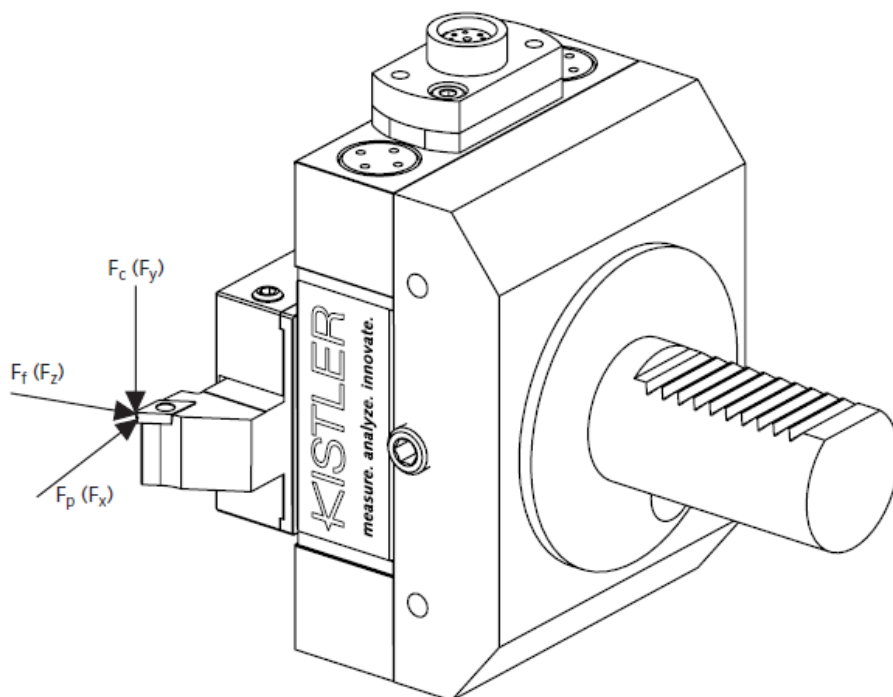


Obrázek 15: Nástroj s upnutou břitovou destičkou



Obrázek 16: Ukázka rozloženého držáku

Při tomto experimentu byla také současně zaznamenávána řezná síla, a proto byl nástroj upnut do dynamometru, který je možné vidět na obrázku (obr. 17).



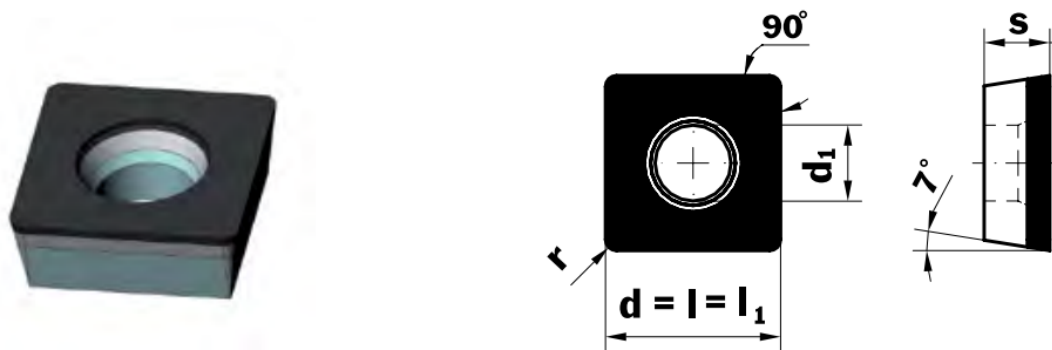
Obrázek 17: Upnutí nože a nožové hlavy [16]

5.3 Vyměnitelná břitová destička

Pro tento experiment byla vybrána břitová destička čtvercového tvaru. Tato destička byla vhodně zvolena vzhledem ke svým vlastnostem a experimentům, které již se stejným typem byly realizovány. Výrobcem této břitové destičky je firma BONAR a.s. Jedná se o vyměnitelnou břitovou destičku s pájeným PCBN. Označení destičky je SCMW 120404 TFF. Materiál břitu je podle označení BBW85 s obsahem 85 % kubického nitridu boru (CNB). Velikost zrna CBN je v rozmezí 1-2 μm , kde základem pojiva je AlWCoB. Výrobce udává, že tato kombinace zaručuje vynikající pevnost, ořezuvzdornost a je také mimořádně odolná proti působení třísek. Provedení použité destičky je tzv. Full face, což znamená, že je pájený břit po celé ploše. Tato břitová destička má vytvořenou fazetku širokou 0,2 mm pod úhlem 20°. V našem případě, kdy odebíráme maximálně třísku o tloušťce 0,15 mm, to znamená, že obrábíme negativním úhlem čela (negativní geometrie) [24].

Tabulka 4: Parametry destičky dle označení

Základní tvar	S	čtverec
Úhel hřbetu	C	7°
Tolerance rozměrů	M	d = $\pm 0,05$ až 0,015 mm s = $\pm 0,13$ mm
Typ	W	Šroub s náběhem
Délka hrany VBD	12	12,7 mm
Tloušťka	04	4,76 mm
Poloměr špičky	04	0,4 mm



Obrázek 18: Vyměnitelná břitová destička [24]

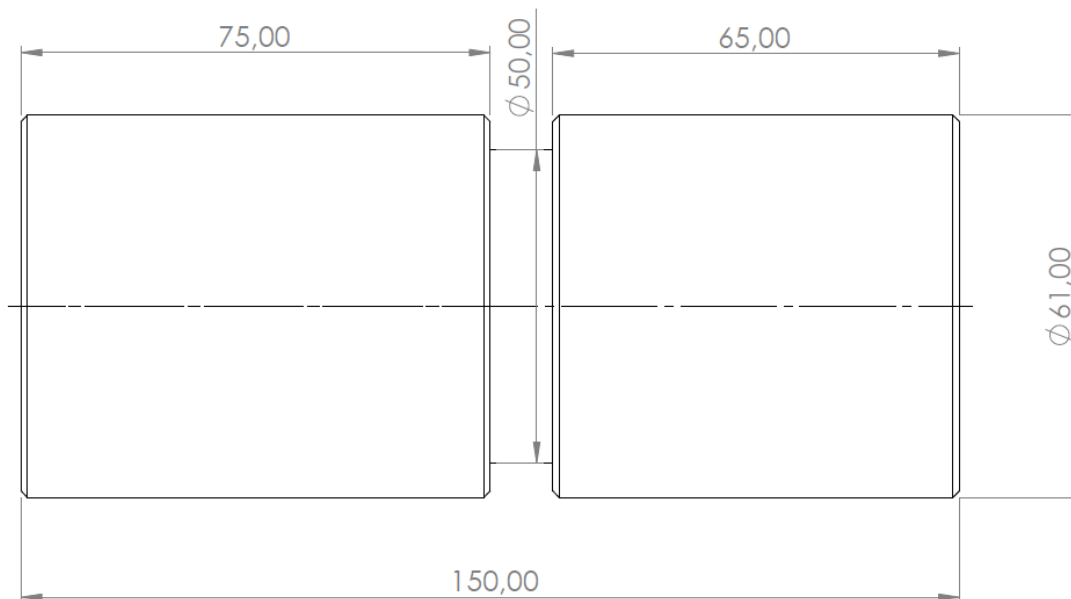
Každá vyměnitelná břitová destička byla před začátkem experimentu očíslována spolu s jednotlivými hranami. Označení destiček sloužilo k následující analýze a přiřazení řezných hran k jednotlivým operacím. Destičky byly označeny pomocí tří čísel, kdy první číslice byla označení krabičky, druhá číslice rozdělovala samotné destičky a poslední číslice označovala řeznou hranu, kdy označení destičky bylo např. 2/4/1.

5.4 Polotovar s žárovým nástřikem Stellite-6

Základní polotovar pro tento experiment byla zvolena hřídel o $\varnothing 60$ mm a délce obráběné plochy 65 mm z ocele ČSN 12 050. Tato hřídel byla patřičně opracována a následně na ní byl nanesen žárový nástřik Stellite-6 metodou HVOF, kterou provedla firma VZÚ v Plzni. Tloušťka nástřiku byla 1 mm na průměru hřídele. Na obrázku níže, je připravený vzorek před testováním. Povrch je rozdělen zápichem pro bezpečný výjezd nástroje a plynulé ukončení řezu. Levá část slouží jako upínací a na pravé je nanesa vrstva Stellite-6.



Obrázek 19: Neobrobený vzorek s naneseným nástřikem Stellite-6



Obrázek 20: Výkres polotovaru

5.5 Zařízení pro měření AE

Pro tento experiment bylo zapotřebí využít měřící sestavy pro zaznamenání akustické emise při obrábění. Tato sestava se skládá ze senzoru akustické emise, AE-Piezotron coupleru a softwaru pro zaznamenání dat. Pro vyhodnocení bylo dostačující pracovat se signálem RMS, a proto byla všechna výstupní data přefiltrována pomocí časové konstanty $\tau = 1,2$ ms. Záznam vzorkovací frekvence byl 10000 Hz.

Senzor

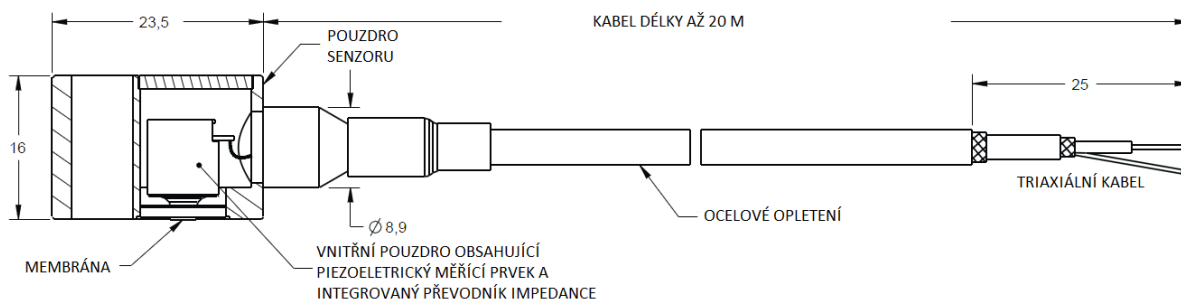
Hlavní součástí byl piezoelektrický senzor od firmy Kistler s označením 8152C1050500. Jedná se o senzor s integrovaným převodníkem impedance pro měření AE nad 50 kHz v ložiskových strojních konstrukcích, vysokotlakých nádobách nebo kompresorech. Vzhledem k jeho malým rozměrům je možné senzor umístit co nejbližší snímanému místu (v našem případě tělo nástroje). Senzor je opatřen otvorem pro šroub M6, který slouží k vlastnímu uchycení ke snímané části. Ochrana proti mechanickému poškození zajistí robustní svařované tělo s krytím IP65 a možností provozu až do 165 °C.

Prvek, který umožňuje snímat AE, je vyroben z piezoelektricky citlivého prvku a je umístěn na tenké ocelové membráně, která zaručuje kontakt se snímanou plochou (její konstrukce ovlivňuje citlivost a frekvenční odezvu senzoru). Tato membrána je vystouplá oproti okolní ploše, což zaručuje vždy stejnou sílu přtlaku membrány a reprodukovatelnou vazbu pro přenos AE. Samotný snímaný prvek senzoru je dobře chráněn před vnějším hlukem. Senzor se vyznačuje velmi vysokou citlivostí pro povrchové a podélné vlny v širokém frekvenčním rozsahu a jsou konstruovány tak, aby odolávaly vlnám s vysokou energií [15].

K tomuto typu senzoru je připojen opletený kabel o délce 5 m, který zaručuje snadné připojení k rozhraní, které zpracovává data.



Obrázek 21: Senzor akustické emise [15]



Obrázek 22: Senzor akustické emise 8152C [15]

AE – Piezotron coupler

Další důležitou součástí měřící sestavy je zařízení s označením Piezotron coupler typ 5125C. Zařízení slouží ke zpracování vysokofrekvenčního výstupního signálu ze senzoru akustické emise. Zesilovač má dva sériově zapojené filtry druhého řádu s horní propustností (highpass) 50 kHz a dolní propustností (lowpass) 500 kHz.

Toto zařízení také obsahuje základní integrační konstantu převodníku RMS, která je 1,2 ms. Integrační časová konstanta τ určuje dobu, po kterou se vytváří střední kvadratická hodnota. Níže je uvedena rovnice pro hodnoty RMS.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_{AE}^2 * dt} \quad (1)$$

Kde: U_{RMS} – napětí po RMS
 U_{AE} – napětí po filtrování
 τ – časová konstanta

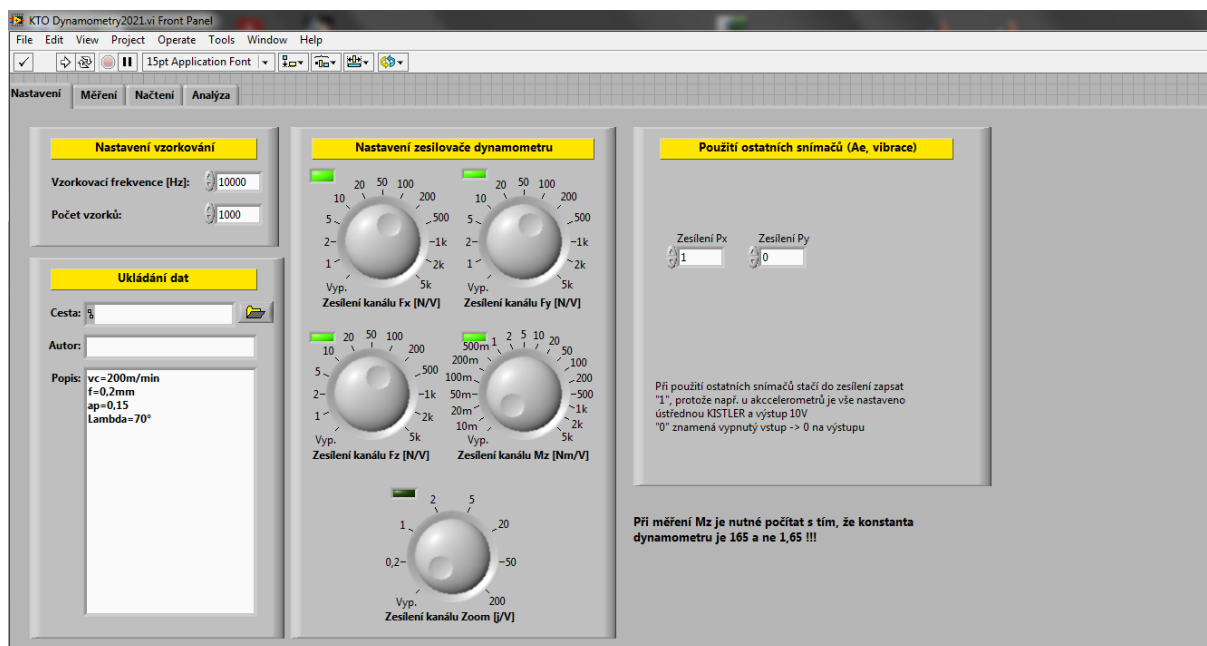


Obrázek 23: AE – Piezotron coupler

5.5.1 Software pro záznam AE

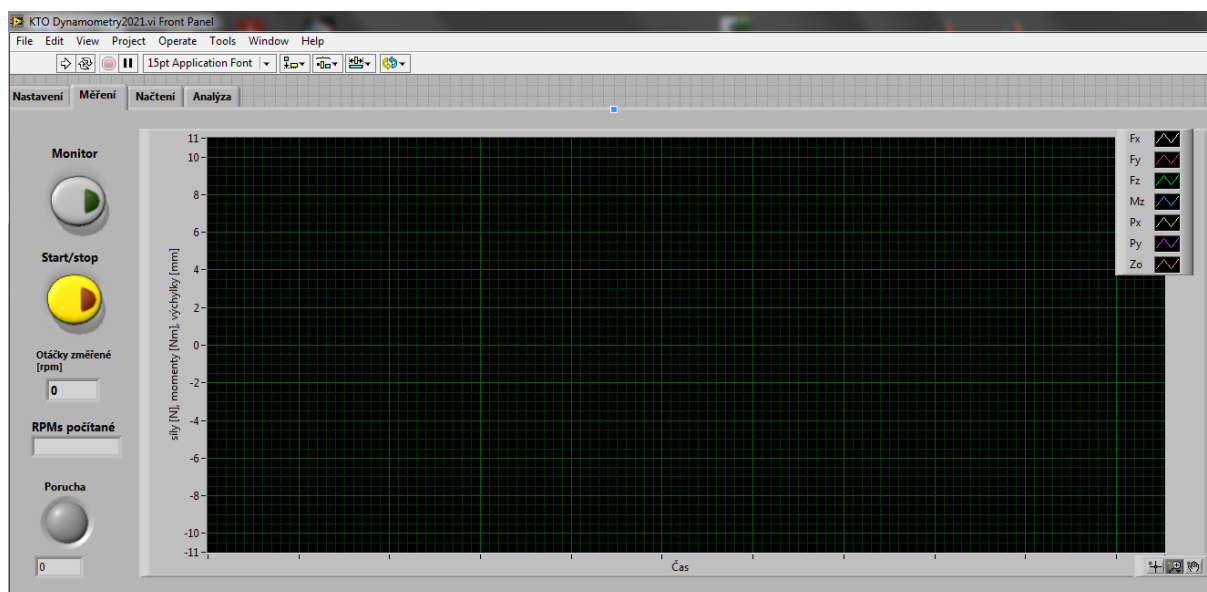
Pro záznam AE byl využit notebook, ve kterém byl pomocí programovacího jazyka LabVIEW sestaven skript (National Instrument), který je schopen kontinuálně vyčítat data z měřicí karty a zapisovat je do souboru. Při měření byla využita měřicí karta NI USB-6341, s maximální samplovací frekvencí až 500 ks/s (v našem případě bylo využito 10 ks/s). Záznam byl zapisován do textového souboru, který lze následně otevřít v Excelu nebo Matlabu. V našem případě je využíván Nasomer85, který byl účelově napsán v Matlabu a díky jemu je možné měřená data vyhodnotit a ukládat do grafů.

Před samotným zahájením experimentu bylo nastaveno rozhraní měřicího zařízení např. *Nastavení vzorkování: Vzorkovací frekvence - 10000 Hz a Počet vzorků 1000*. Dále bylo zvoleno v záložce *Nastavení zesilovače dynamometru* zesílení jednotlivých složek na hodnotu 100 N/V. Posledním z nastavení bylo *Použití ostatních snímačů* (v našem případě AE), kde byla nastavena hodnota *Zesílení Px = 1*.



Obrázek 24: Nastavení parametrů měření

V grafickém rozhraní probíhala online vizualizace výchozího signálu ze senzoru a bylo tak možné pozorovat průběh akustické emise v průběhu řezu. Na obrázku (obr. 25) je v levé části ovládací panel, kdy při aktivaci tlačítka *Monitor* byl spuštěn online přenos a prostřednictvím *Start/Stop* probíhal zápis dat do souboru.



Obrázek 25: Grafické rozhraní

5.6 Plán experimentu

Pro sestavení plánu experimentu bylo potřebné znát faktory, které budou ovlivňovat proces obrábění a zvolit jaké budou proměnné. Byly využity výsledky a zkušenosti z dříve provedených testů. V našem případě je možné rozdělit obrábění na hrubování a dokončování.

Tabulka 5: Plán experimentu

Vzorek	Přejezd	λ_s [°]	a_p [mm]	v_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot]
P1	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	55	0,05	500	0,45
P2	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	65	0,05	500	0,45
P3	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	55	0,05	500	0,95
P4	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	65	0,05	500	0,95
P5	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,2
P6	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	1,2
P7	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	50	0,05	500	0,7
P8	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	70	0,05	500	0,7
P9	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,7
P10	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,7
P11	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,7
P12	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,7
P13	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	-	-	-	-
P14	Hrubování	70	0,15	200	0,2
	Dokončení	60	0,05	500	0,7

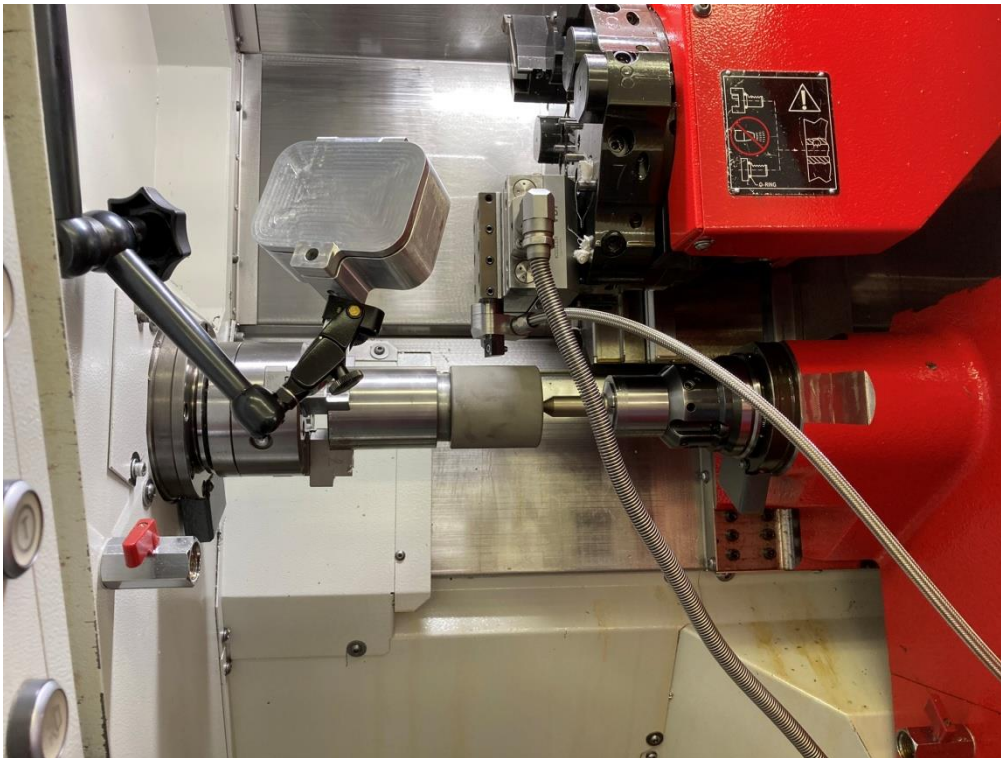
Při hrubovací operaci byly vždy stejné řezné podmínky a úhel λ_s . Následující operací bylo vždy dokončování, při kterém se měnil posuv na otáčku f_{ot} , hloubka řezu a_p , úhel λ_s a řezná rychlost v_c . Mezi každým přejezdem byla otočena VBD a použita nová hrana. Při tomto experimentu byly zároveň zaznamenávány řezné síly a akustická emise.

5.7 Průběh experimentu

Celkem bylo připraveno 15 vzorků, z nichž byl jeden vzorek testovací (pro kontrolu měřícího zařízení), druhý byl pouze hrubován a třetí sloužil jako záložní v případě chyby při experimentu.

Před každým upnutím vzorku do stroje byl změřen ve třech místech průměr polotovaru v místě nástřiku a hodnoty byly zapsány, pro případné vyhodnocení dat. Střední hodnota průměrů u každého vzorku byla použita jako výchozí pro obrábění. Dále se po upnutí vzorku do sklíčidla a přitlačení hrotu definovanou silou změřilo házení na povrchu obrobené části, které bylo u všech vzorků do hodnoty 0,01 mm. Po hrubování a dokončování byla vždy otočena destička na novou nepoužitou hranu a byl opět změřen průměr obrobené plochy ve třech místech.

Několik řezů bylo zaznamenáno pomocí kamery. Kamera byla umístěna v ochranném hliníkovém pouzdře. Nastavené rozlišení záznamu bylo 2.7K (2704x1520) při 100 FPS. Při možném zpomalení záznamu až 8krát, můžeme poté využít záběry pro zpětné zkoumání řezu u jednotlivých vzorků a popsat vznikající jevy v souvislosti s akustickou emisí.



Obrázek 26: Příprava experimentu

6 Vyhodnocení experimentu

6.1 Materiálový rozbor žárového nástřiku

Pro ověření materiálového složení nástřiku a jeho struktury byl odeslán jeden neobrobený vzorek k rozboru. Měření bylo prováděno pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), který dokáže zobrazit vzorek ve velmi vysokém rozlišení a převyšuje tak optické mikroskopy. Toto zařízení se často používá v kombinaci s elektronově disperzním spektrometrem (EDS), který umožňuje určit prvkové složení povrchu vzorku.

6.1.1 Chemické složení

Chemické složení nástřiku vzorku se provádí, aby bylo možné porovnat chemické složení použitého prášku a porovnání s teorií. Dalším účelem je zjistit určitou homogenitu nástřiku v různých místech obrobku a jejich rozmezí. Na obrázku (obr. 27) je možné vidět výstupní škálu jednotlivých prvků, které obsahuje nástřik Stellite-6.

Ve výstupu chemického složení (obr. 27) lze pozorovat jednotlivé obsahy prvku napříč materiálem nástřiku, který je zleva od povrchu vzorku k základnímu materiálu. Podíl jednotlivých prvků se pohybuje kolem předpokládané hodnoty. V některých místech je patrný nárůst obsahu uhlíku nebo železa, což může mít za následek náchylnost ke korozi povrchu.

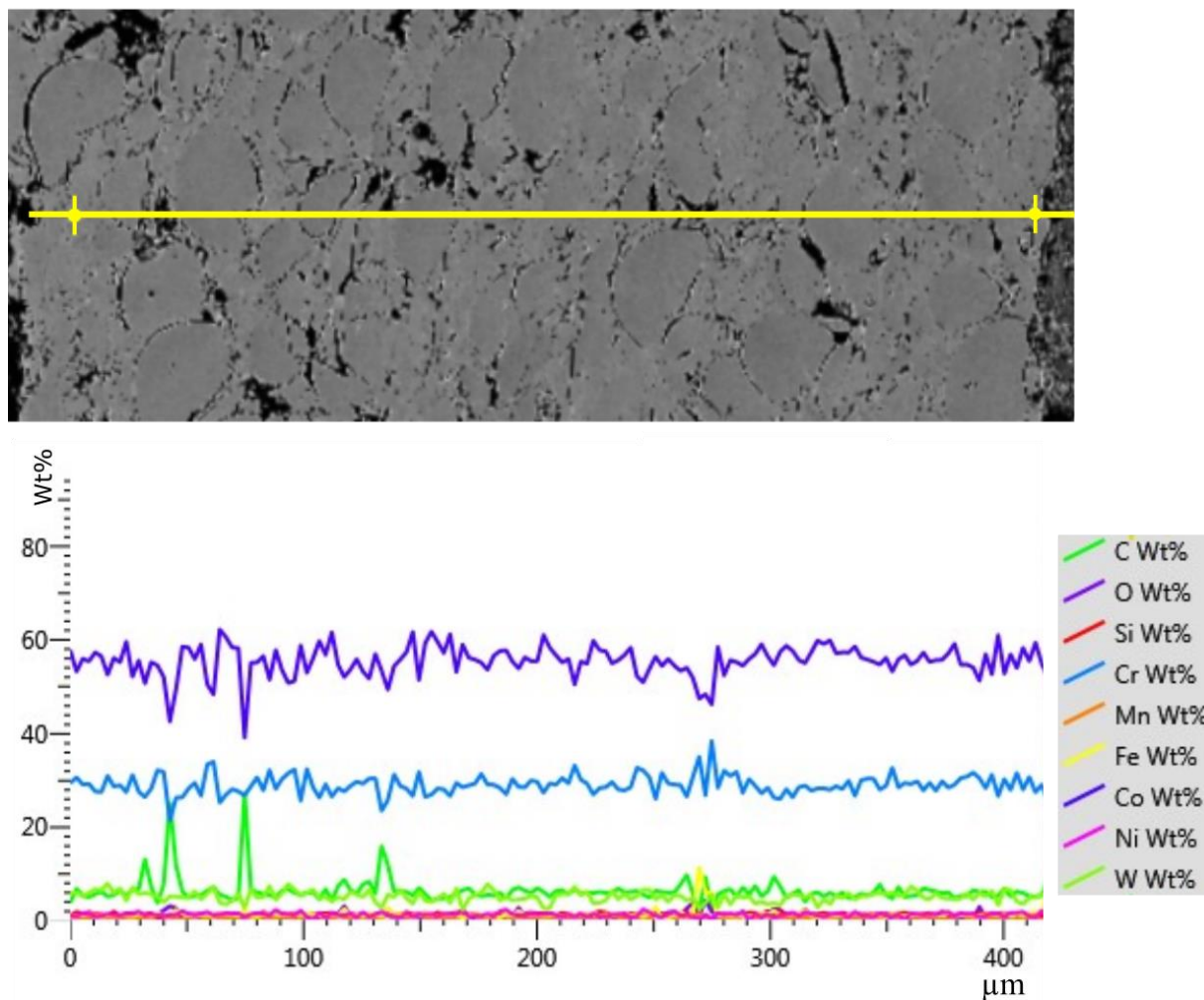
V níže uvedené tabulce (tab. 6) je na prvním řádku uveden přehled prvků, ze kterých je nástřik složen. Na druhém řádku se nachází předpoklad chemického složení žárového nástřiku dle teorie nástřiků. Rozbor tohoto nástřiku byl již v rámci fakulty analyzován, a proto ho můžeme porovnat mezi sebou.

Řádek s označením *Rozbor 1* obsahuje chemické složení, které bylo zjištěno v rámci jedné z diplomových prací [20] zabývajících se touto problematikou. V této práci byl nástřik nanesen na ocelový plech o tloušťce cca 0,5 mm. Obsah jednotlivých prvků odpovídá předpokladu, pouze obsah manganu je nepatrně vyšší. Jelikož se jedná o doprovodný prvek, můžeme tuto odchylku opomenout.

Další z rozborů nástřiku Stellite-6 byl proveden v rámci vědeckého článku [2] zabývajících se jeho obrobiteľností. V tomto případě byl nástřik nanesen na hřídel a jeho tloušťka byla také 0,5 mm. Z výstupního *Rozboru 2* lze vidět, že chemické složení odpovídá teoretickému předpokladu.

Tabulka 6: Chemické složení žárového nástřiku

	Prvek	Co	Cr	W	Fe	Ni	Mn	Si	Mo	Ostatní
Teorie	Wt [%]	45–60	27–32	4–6	max. 3	max. 3	max. 1	max. 1,5	max. 1	max. 1
Rozbor 1	Wt [%]	56,9	30,7	4,8	2,3	2,2	1,3	1	0,7	0,2
Rozbor 2	Wt [%]	59,68	28,34	4,1	0,79	1,66	0,27	1,23	1,69	0,3



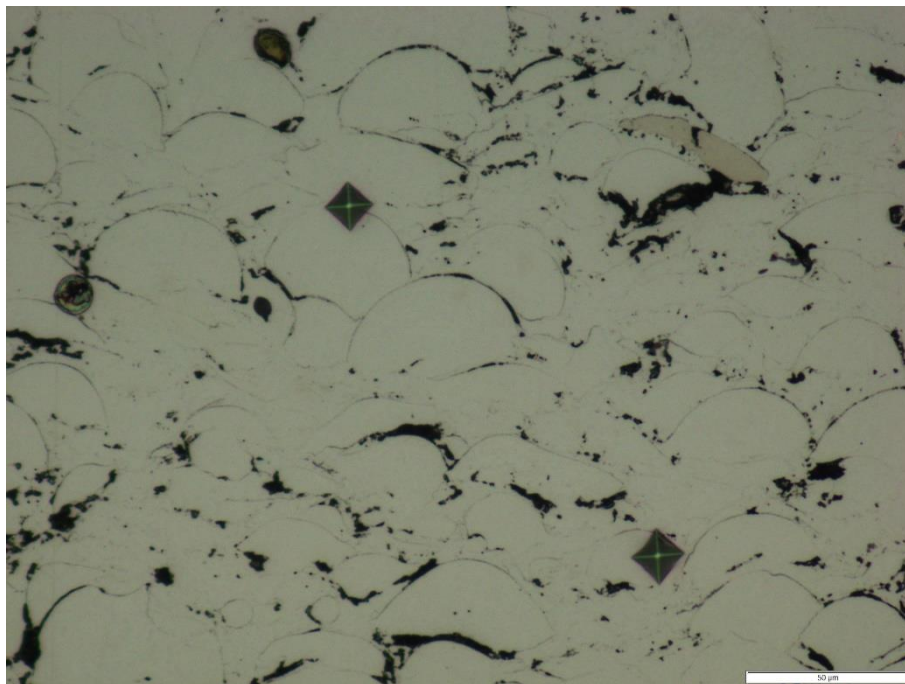
Obrázek 27: Chemický rozbor nástřiku

6.1.2 Mikrotvrдость žárového nástřiku

Při hodnocení tvrdosti materiálu je možné využít normalizovaných zkoušek podle Brinella, Rockwella nebo Vickerse. Rozdíl mezi těmito zkouškami je v tělese, které vniká do zkoušeného materiálu.

V našem případě byla využita zkouška podle Vickerse, která se vyznačuje vtláčováním čtyřbokého diamantového jehlanu, který má vrcholový úhel 136° . Zkoušku je možné využít jak pro měření tvrdosti, tak i mikrotvrdsti. Měření mikrotvrdsti se vyznačuje tím, že jsou hodnoty zatížení vnikajícího tělesa maximálně do 0,2 kg. Pro hodnocení mikrotvrdsti žárového nástřiku bylo zvoleno zatížení 0,1 kg. Označení měření je HV (Hardness Vickers) a v dolním indexu označení se udává použité zatížení v kilogramech. V našem případě má označení podobu $HV_{0,1}$.

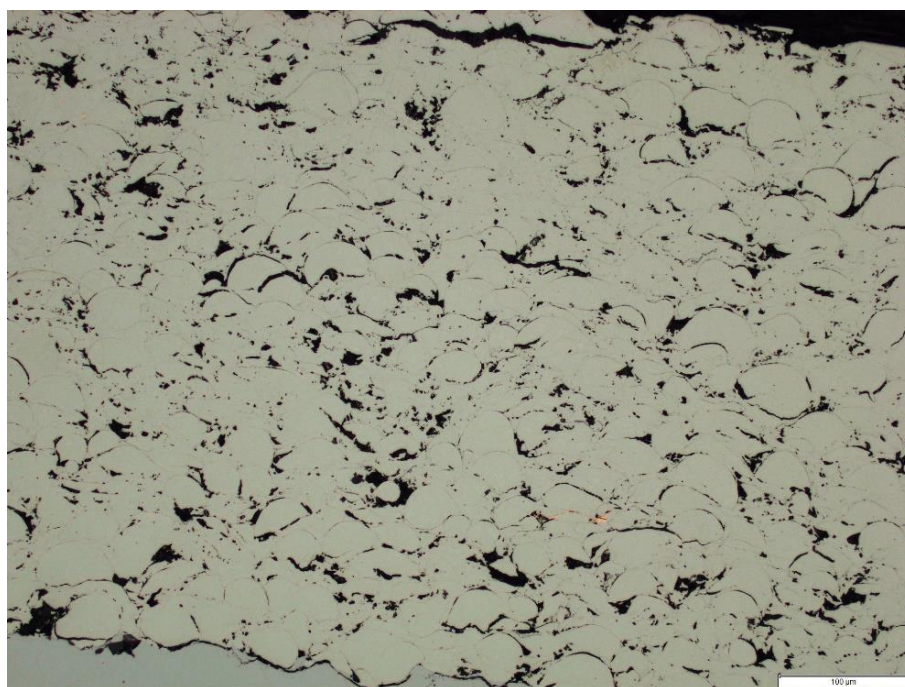
Mikrotvrдость povrchu nástřiku byla měřena v několika místech obrobku v různých vzdálenostech. Naměřené tvrdosti nabývají hodnot od 690 do 788 $HV_{0,1}$. V rámci porovnání s teorií lze vidět, že změřená mikrotvrдость nástřiku je řádově stejná. Na obrázku (obr. 28) je možné vidět detailní zobrazení vtisku po čtyřbokém jehlanu.



Obrázek 28: Detailní pohled otisku

6.1.3 Pórovitost žárového nástřiku

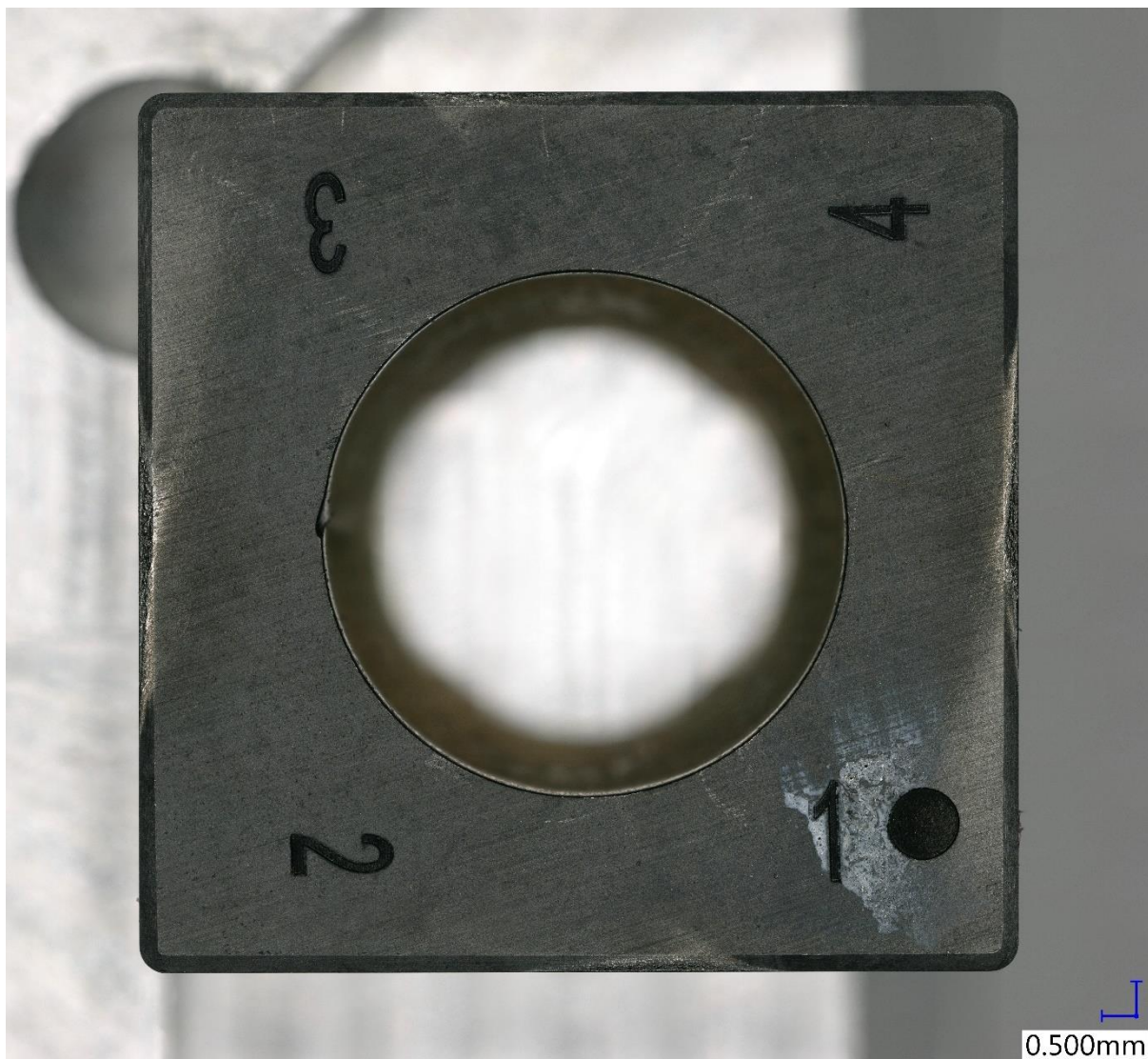
V několika místech vzorku (obr. 29) byla také měřena samotná pórovitost nástřiku. Hodnota pórovitosti se v daných místech pohybovala v rozmezí 5,43 – 6,28 %. Níže se nachází snímek vzorku s pórovitostí 6,04 %, která je určena pomocí tmavých míst. Pórovitost nástřiku se oproti teorii liší a je o téměř 2,8 % vyšší. Jelikož se celkově jedná o malou hodnotu pórovitosti, lze usuzovat, že takováto odchylka nebude mít žádný vliv. V krajním případě by mohlo docházet k menší soudržnosti nástřiku a docházelo by k jeho vytrhávání.



Obrázek 29: Pórovitost 6,04 % v místě 2

6.2 Měření opotřebení

Pro získání stavu VBD po obrábění, které může být využito k analýze charakteru signálu AE, byl využit digitální mikroskop Keyence VHX-6000. Součástí tohoto mikroskopu je LCD monitor, na kterém je online přenos obrazu. Zaostřování objektivu a polohování stolku mikroskopu je možné prostřednictvím ovládacího panelu a joysticku. Mikroskop se nachází ve stejné místnosti, ve které probíhal celý experiment, a tudíž bylo možné ihned měřit opotřebení jednotlivých řezných hran a sledovat možné poškození břitu. Po každém přejezdu byla otočena destička na novou řeznou hranu, aby byl eliminován vliv opotřebení, a proto měření sloužilo především ke kontrole poškození VBD. Pro měření a pořízení snímků VBD bylo použito dvě stě násobné zvětšení.



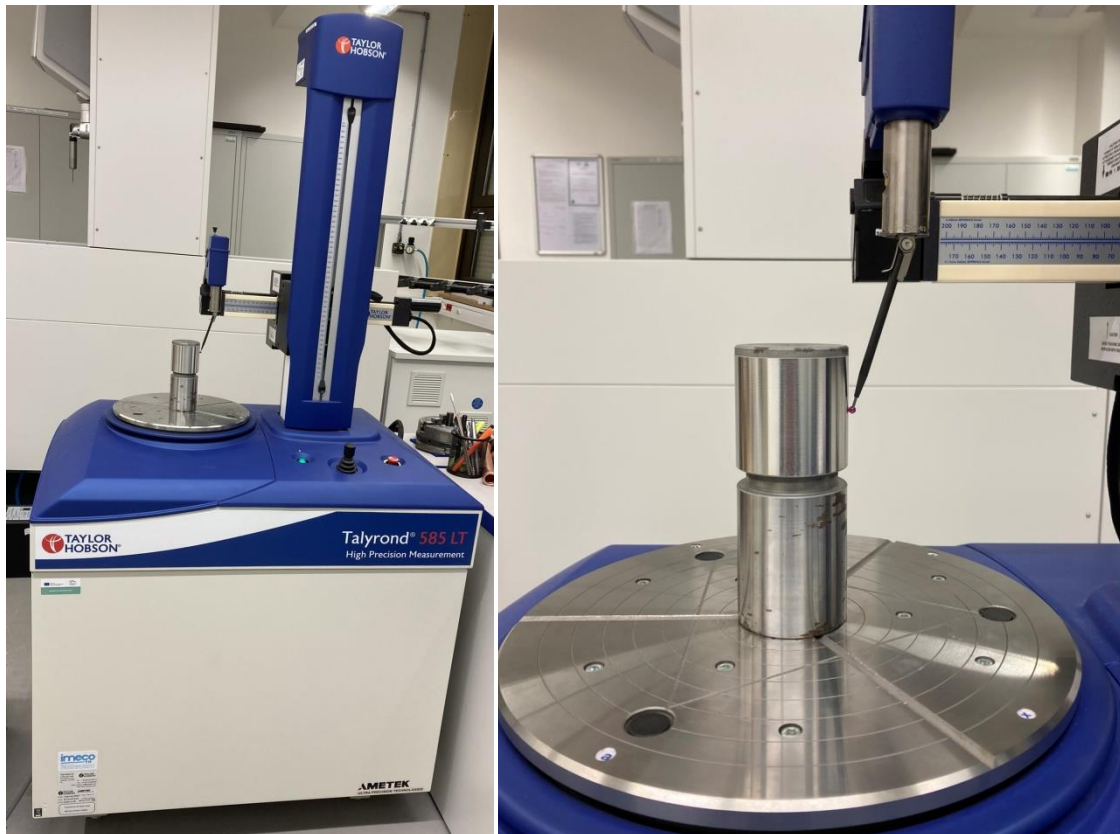
Obrázek 30: Destička č.5

6.3 Měření kruhovitosti a válcovitosti

Za účelem vyhodnocení kruhovitosti a následné válcovitosti bylo využito zařízení Talyrond 585 LT od firmy Taylor Hobson. Toto zařízení se nachází v laboratořích metrologie

na FST ZČU. Kruhoměr disponuje kruhovým otočným stolem, vertikálním ramenem a ramínkem s možností výměnného kontaktu. Kontakt s měřeným vzorkem zajišťuje rubínová kulička v našem případě o \varnothing 4 mm. Tento kontakt je možné libovolně měnit za jiné průměry kuličky nebo diamantový hrot, který umožňuje měření drsnosti válce.

Průběh měření začínal očištěním a ustavením vzorku na rotační základnu kruhoměru. Po ustavení bylo provedeno automatické vyrovnaní zařízení vůči povrchu měřeného vzorku, které je možné vidět na obrázku (obr. 31).

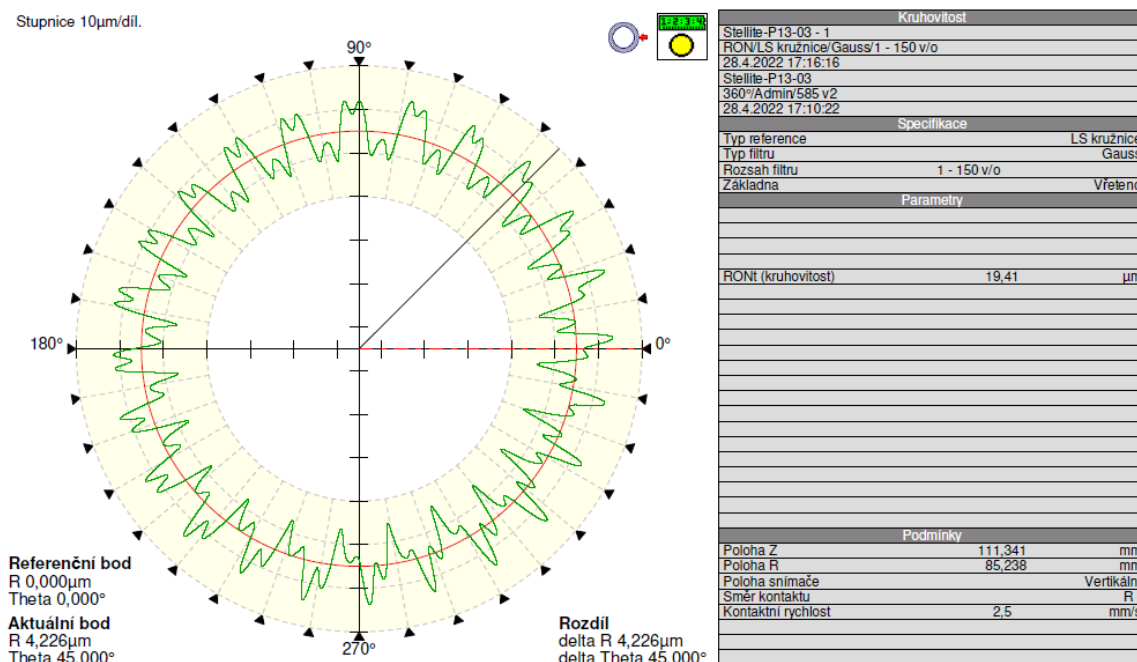


Obrázek 31: Kruhoměr (vlevo) a detail měření vzorku č.12 (vpravo)

Pro objektivnější vyhodnocení povrchu byla u každého vzorku z každé strany vynechána plocha o délce 7,5 mm (jelikož se jedná o vjetí a vyjetí do vzorku). Z tohoto důvodu byla nastavena délka měřené plochy 50 mm, která byla rozdělena do 5 částí po 12,5 mm. Po tomto měření byla provedena analýza jednotlivých úseků na kruhovitost a z těchto kruhovitostí byla následně vytvořena analýza popisující válcovitost. Provedená analýza vždy vyhodnotila válcovitost, celkové házení a úhel kužele viz ukázkový protokol níže. Pro analýzu kruhovitosti a válcovitosti bylo využito Gaussova filtru dle ISO.

6.3.1 Válcovitost neobrobeného polotovaru

Pro možnost vyhodnocení válcovitosti byl ponechán jeden neobrobený vzorek. Měření bylo provedeno dle popisu v kapitole *Měření válcovitosti*, kde byl vzorek rozdělen do pěti částí po 12,5 mm. V těchto úsecích byla měřena kruhovitost. Na obrázku níže se nachází výstup z protokolu kruhovitosti, na kterém jsou uvedena data vzorku P13 v řezu č.3. Tento řez odpovídá polovině polotovaru. Na protokolu je možné vidět, že byl změřen parametr RONt (kruhovitost), která má hodnotu 19,41 μ m a byl použit Gaussův filtr.



Obrázek 32: Kruhovitost řezu 3 vzorek P13

Na obrázku (obr. 32) je uveden výstup z celkové analýzy kruhovitosti vzorku P13. V rámci měření byla oříznuta krajní plocha vzorku (začátek a konec), ale i přesto můžeme pozorovat, že na horní straně grafické vizualizace má obrobek kuželový náběh. Celková válcovitost (CYLt) vzorku je 104,24 μm. Dalším použitelným parametrem je úhel kužele, který je v tomto případě 0,1233 °. Při vyhodnocování kruhovitosti byl také použit Gaussův filtr.

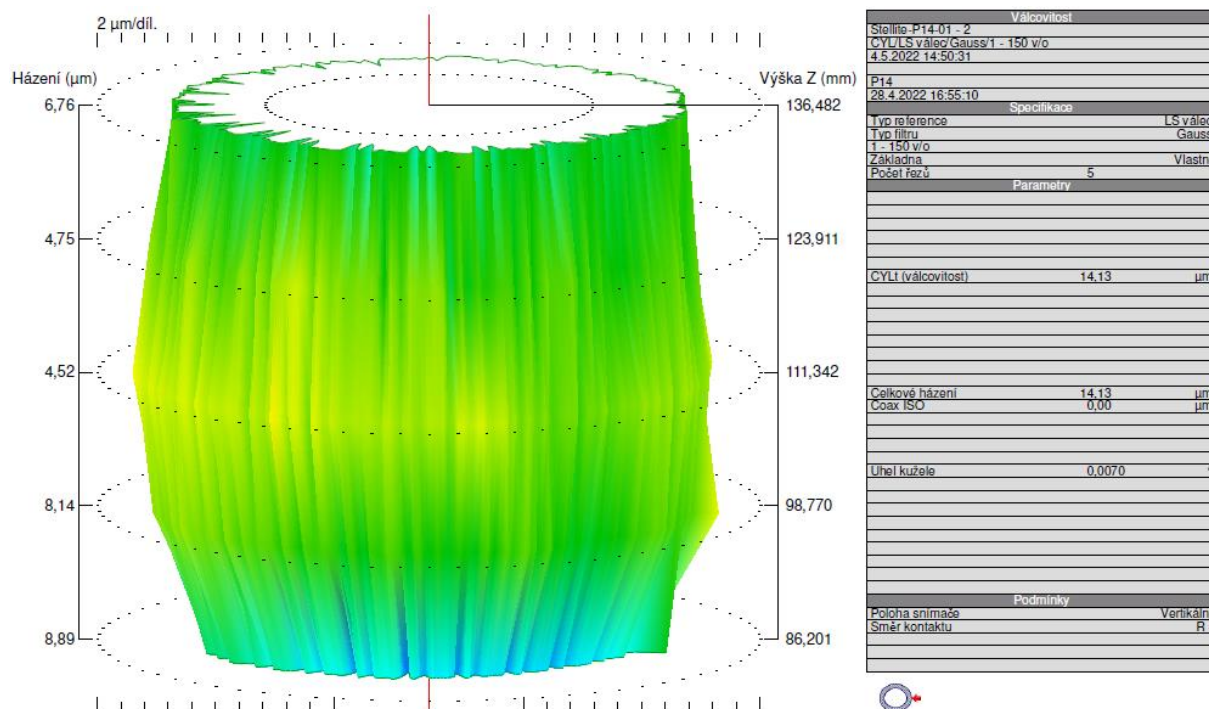
Kuželový náběh odpovídá začátku vzorku, do kterého vjíždí nůž, jelikož byl vzorek na kruhoměru měřen od zápichu k okraji. Jelikož se jedná o neobrobený polotovár, musela tato nepřesnost vzniknout již při nanášení nástřiku ve firmě. Můžeme říci, že tento kužel je po celém obvodu stejný, a proto mohla vzniknout chyba již při nanášení první vrstvy nástřiku, která se dále navyšovala. Další z možností může být zapnutí přísunu prášku na začátku obrobku, kdy dojde k navýšenému dávkování, které se následně ustálí na požadované.

Tento fakt může mít za následek navýšení signálu akustické emise, ale i složek řezných sil, které jsou v rámci experimentu nežádoucí. Z tohoto důvodu by bylo vhodné tuto chybu pro další experimenty odstranit.

6.3.3 Válcovitost po dokončování

Pro ukázkou válcovitosti po dokončování byl vybrán vzorek P8. U grafického znázornění válcovitosti tohoto vzorku lze říci, že se jedná o typického představitele po dokončení, jelikož se tento tvar opakoval u více změřených vzorků. Hodnota válcovitosti (CYLt) u tohoto vzorku nabývá hodnoty 26,29 μm a úhel kužele je 0,0249 $^\circ$. Při porovnání hodnot u neobrobeného, hrubovaného a dokončovaného vzorku je možné pozorovat zlepšení geometrie polotovaru, což je žádoucím jevem.

Kruhovitost od neobrobeného vzorku po dokončování 104,14 \rightarrow 30,29 \rightarrow 26,29 μm . Změna úhlu kužele vzorků má podobný trend 0,1233 \rightarrow 0,0153 \rightarrow 0,0070 $^\circ$, z toho vyplývá, že se každým opracováním zpřesňuje geometrie o jeden řád.

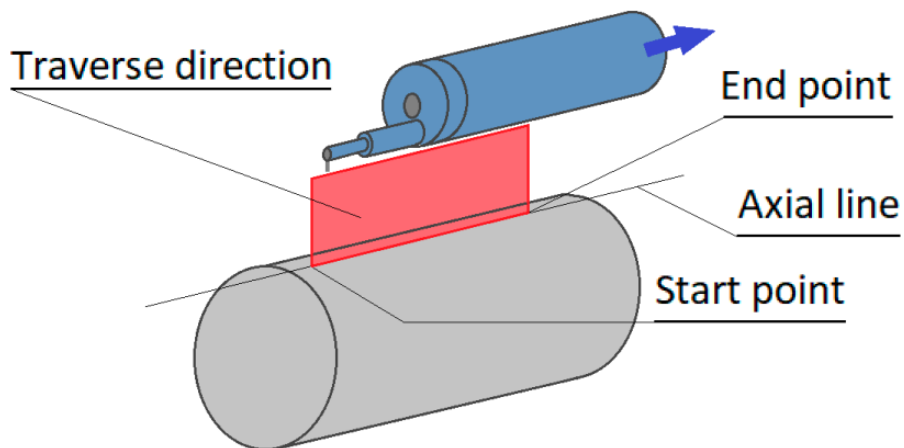


Obrázek 35: Válcovitost vzorku P14 po dokončování

6.4 Měření drsnosti

Pro měření drsnosti povrchu válce bylo využito zařízení Hommel-Etamic T8000, který dokáže měřit drsnost povrchu pomocí diamantového hrotu.

Při měření byly vzorky usazeny do dvou prismatických těles. Měření probíhalo na třech místech, která mezi sebou byla pootočena o 120 $^\circ$. V rámci každého místa byly měřeny tři řezy. Výjimkou je hrubovací kus P13, kde byl změněn filtr a bylo možné změřit pouze 2 řezy. Měřená vzdálenost byla 4,8 mm a rychlost posuvu hrotu $v_t = 0,15$ mm/s.

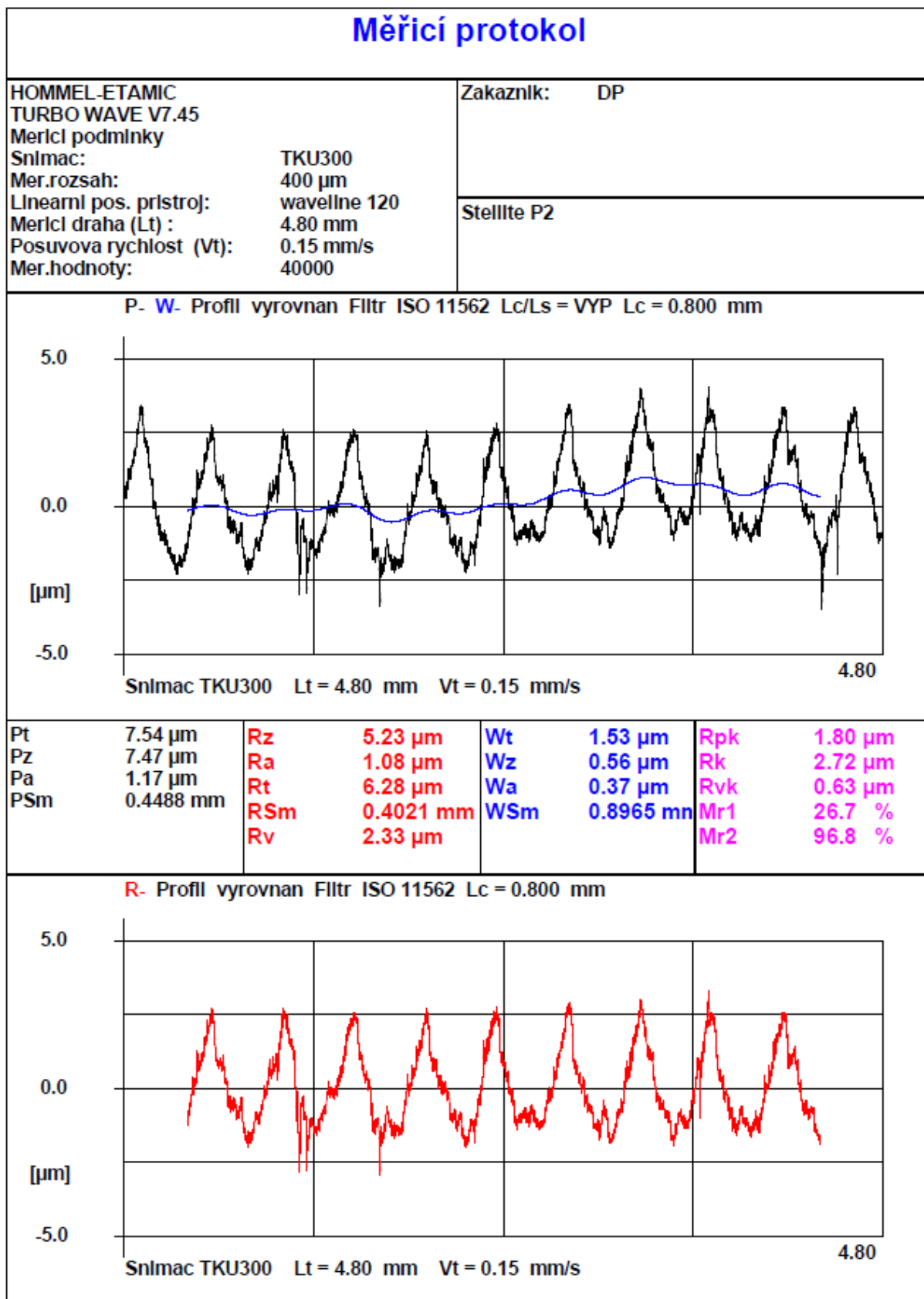


Obrázek 36: Schématické znázornění měření drsnosti [17]



Obrázek 37: Průběh měření na drsnoměru

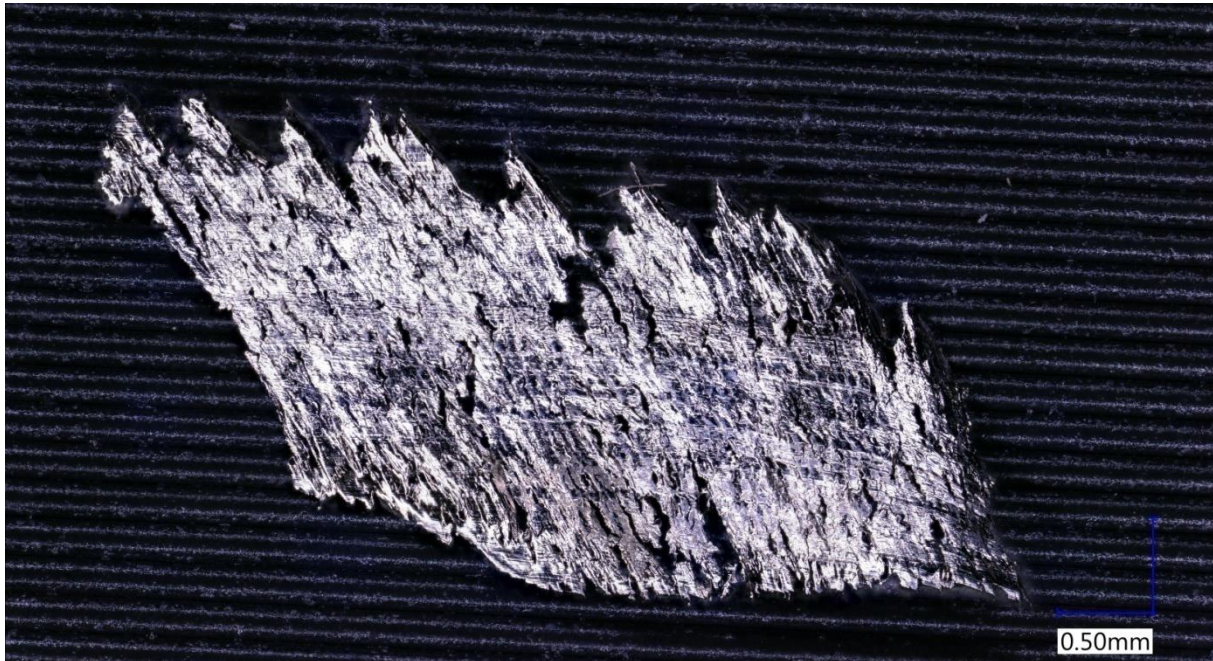
Výstup měření byl ukládán do protokolu (obr. 38), který obsahuje data z měření jako je drsnost povrchu, vlnitost a profil. Zde je uveden pouze jeden vzorový protokol měřeného vzorku P2. Vzhledem k počtu měřených vzorků jsou zbylé protokoly umístěny na konci práce v příloze.



Obrázek 38: Protokol o měření drsnosti vzorku P2

6.5 Tvar třísky

Na obrázku níže je zaznamenána tříška pomocí digitálního mikroskopu, která vznikla při hrubovacím řezu. Je možné vidět, že tříška má vějířovitý tvar, což je typické pro soustružení lineární řeznou hranou. Tato struktura třísky vzniká v důsledku „hrnutí“ odřezávané vrstvy před břit destičky. Břit destičky je v takovém případě pod určitým úhlem k ose obrobku, a proto se prodlužuje délka kontaktu břitu s obrobkem a je velmi malá hloubka řezu, v našem případě konkrétně 0,15 mm při hrubovací operaci a 0,05 mm při dokončování. Tento způsob má za následek, že dříve vytvořený vrchol povrchu, který je tvořen ve spirále, je odříznut okrajem břitové destičky. Toto může být důvodem rozkmitání signálu akustické emise, který je po celou dobu řezu stejný, a proto jej můžeme zanedbat.



Obrázek 39: Tříška

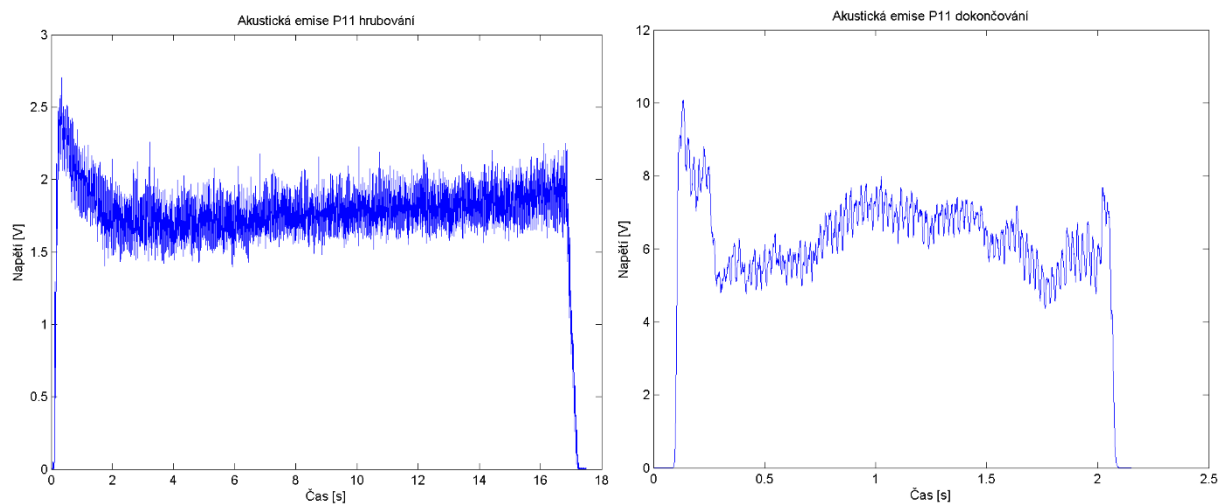
6.6 Měření akustické emise

Vyhodnocení dat bylo zaměřeno na analýzu jednotlivých výstupů experimentu (signálů), ve kterých se nacházely anomálie. U těchto anomálií bylo potřeba odhadnout jejich vznik a možnost reprodukovatelnosti pro následující experimenty. Pro identifikaci anomálií ve výstupních grafech byla změřena válcovitost jednotlivých vzorků, drsnost povrchu a opotřebení břitu. Vzhledem k výstupnímu charakteru signálu budeme používat k vyhodnocení pouze RMS signál, který je dostačující.

Výstupní signál akustické emise je zaznamenán do grafu, kde vodorovná osa reprezentuje Čas a jednotky jsou sekundy [s]. Svislá osa znázorňuje Napětí ve voltech [V], které je výstupním signálem ze senzoru AE.

V průběhu experimentu bylo zaznamenáno velké množství dat, které obsahovalo řezné síly a akustickou emisi. Tato data byla zaznamenána do textových souborů. Pro zpracování takto rozsáhlých dat by bylo potřebné využít statistiky, která by však v našem případě neměla velký přínos, jelikož se snažíme najít podobnosti a závislosti určitých jevů. Z toho důvodu bude většina vyhodnocení probíhat pomocí porovnání a podobnosti výstupů, které lze kvantifikovat.

V této části jsou uvedeny pouze vzorové výstupy akustické emise při hrubování a dokončování. Zbylé výstupy jsou zahrnuty v rámci příloh na konci práce.



Obrázek 40: Signál hrubování (vlevo) a dokončování (vpravo) u vzorku P11

7 Diskuse výsledků

Pro lepší pochopení procesu obrábění lineární řeznou hranou byl porovnáván signál AE vůči jednotlivým měřeným parametrům jako je profil povrchu, řezné síly, opotřebení a válcovitost vzorku. Porovnávání a hledání závislostí bylo provedeno pouze grafickou metodou, jelikož bylo cílem tyto závislosti nalézt nikoliv detailně analyzovat. Číselné vyhodnocení každé části by překračovalo rozsah této práce.

7.1 Vyhodnocení hrubování

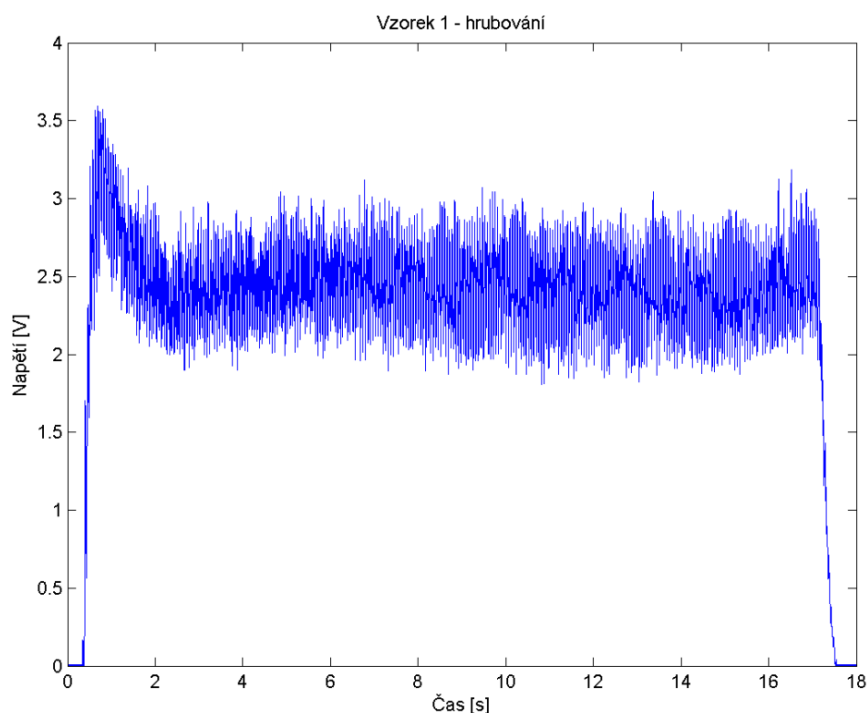
V rámci hrubování není možné u každého vzorku hodnotit výstupní signál akustické emise v rámci např. kruhovitosti a profilu povrchu, jelikož se tyto data vyhodnocovala až po dokončovací operaci. Při experimentu byl jeden vzorek P13 pouze hrubován, a proto je možné provést porovnání s profilem povrchu pouze u tohoto vzorku. Řezné podmínky pro hrubování byly u každého vzorku stejné a to $v_c = 200$ m/min; $f_{ot} = 0,2$ mm/ot; $a_p = 0,15$ mm; $\lambda_s = 70^\circ$.

7.1.1 Signál AE

Při hrubování docházelo k odřezávání povrchové vrstvy nástřiku. Řezné podmínky byly pro všechny zkušební vzorky stejné. Povrch nástřiku lze popsat jako hrubý a zrnitý.

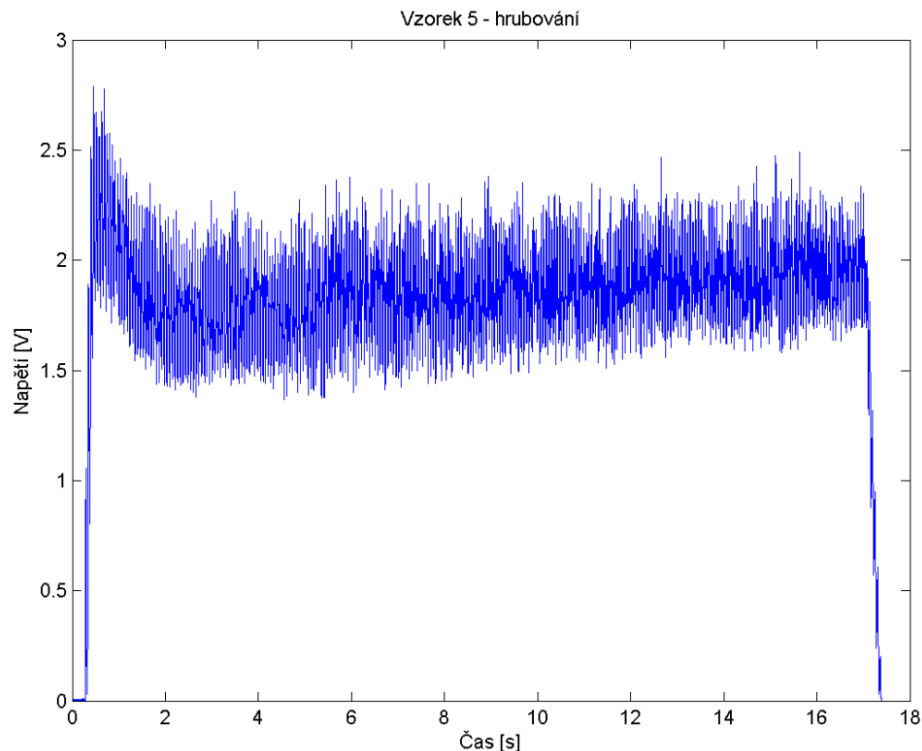
Vzhledem k výstupním grafům akustické emise při hrubování lze říci, že rozkmitání signálu je způsobeno právě strukturou povrchu. Při porovnání výstupu akustické emise při hrubování a dokončování je také možné pozorovat větší rozkmitání u hrubovací operace, což může být způsobeno nižší posuvovou rychlostí nebo řeznou rychlostí.

Na obrázku níže jsou znázorněny záznamy akustické emise u dvou náhodně vybraných vzorků P1 a P5. U těchto dvou vybraných vzorků je možné vidět velkou podobnost průběhu signálu.



Obrázek 41: Akustická emise P1 hrubování

U vzorku P1 se na začátku objevuje nárůst amplitudy signálu, který je způsoben počátkem obrábění (záběrem destičky do vzorku) a převyšuje následující část signálu. Signál v této části dosáhl maximální hodnoty amplitudy přibližně 3,6 V a dále se ustálil okolo hodnoty 2,5 V.



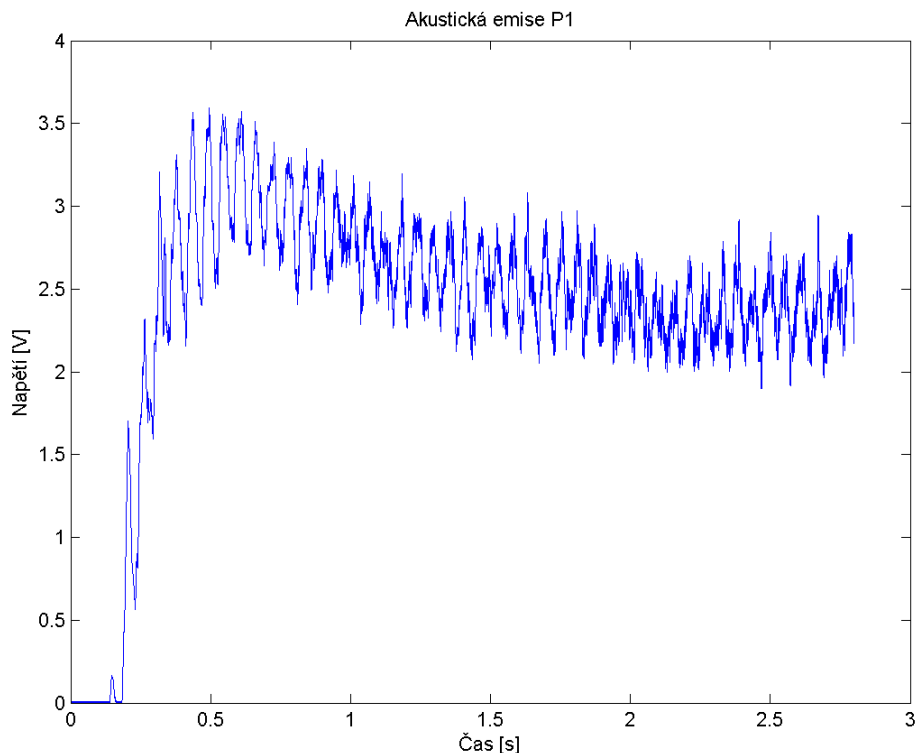
Obrázek 42: Akustická emise P5 hrubování

U vzorku P5 lze říci, že je průběh celého signálu stejný jako u P1. Vzorek P5 však nabývá maximální hodnoty amplitudy hodnotou 2,8 V, která je zaznamenána také při vjetí do vzorku a dále se ustálila kolem hodnoty 2 V.

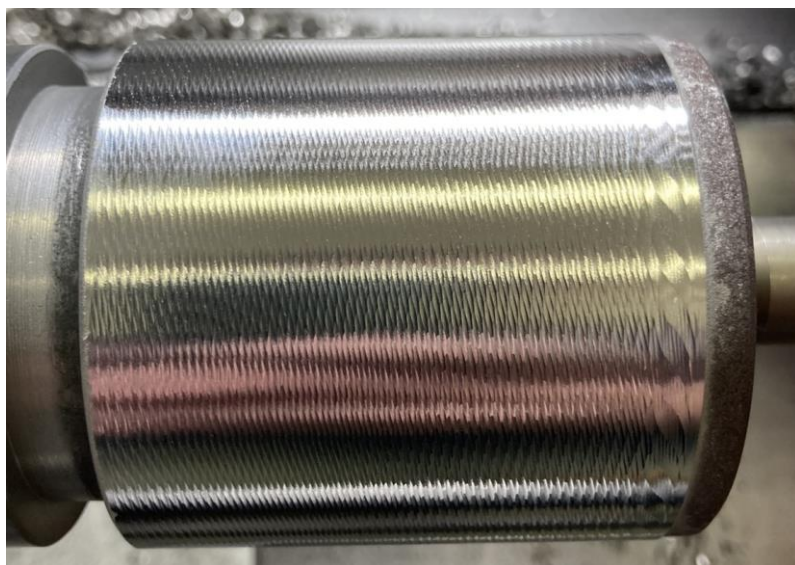
Tento rozdíl maximálních hodnot napětí na začátku signálu a dále ustálených hodnot v průběhu řezu, je možné vysvětlit tím, že každý z obráběných vzorků, který byl hrubován, obráběl nedokonale vytvořený povrch žárového nástřiku a vzorky nebyly vždy stejné.

Při vyhodnocení všech výstupních signálů akustické emise při hrubování dosahovala na začátku záznamu amplituda hodnotu v rozmezí 2,2 – 3,6 V a po ustálení v průběhu obrábění mezi hodnotami 1,6 – 2,5 V.

Na následujícím obrázku je výřez začátku signálu AE u vzorku P1. Ze signálu AE je možné pozorovat jistou změnu v hustotě periody, která se projevuje i opticky na povrchu vzorku, který se nachází pod ním. Při vjezdu břitové destičky do vzorku je povrch vzorku rozechvělý, ale dále se ustaluje a je stejného charakteru. Stejný průběh vykazuje i signál AE.



Obrázek 43: Akustická emise P1 vjezd do vzorku



Obrázek 44: Hrubování vzorek P1

Z optického hlediska se jedná o rozechvělý povrch, který má za následek signál rozechvělého charakteru a vysokou frekvenci.

7.1.2 Akustická emise a profil povrchu

Porovnání výstupního signálu AE a profilu povrchu není v případě hrubování zcela objektivní, jelikož je signál velmi rozkmitaný. Rozkmitání může být způsobeno odebráním větší hloubky řezu než u dokončování. K dalšímu vzniku rozechvělého signálu může docházet vzhledem k menšímu posuvu na otáčku, který byl v případě hrubování $f_{ot} = 0,2$ mm/ot. Pomalý

posuv může do měření signálu akustické emise vnášet další okolní hluk. Z tohoto důvodu není možné při těchto řezných podmínkách sledovat profil povrchu pomocí akustické emise.

Pro možnost porovnání akustické emise a profilu povrchu je nutné převést vzdálenost na jednotku času tak, aby byl výstup shodný.

Otáčky za minutu:

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D} [ot/min] \quad (2)$$

Čas obrábění:

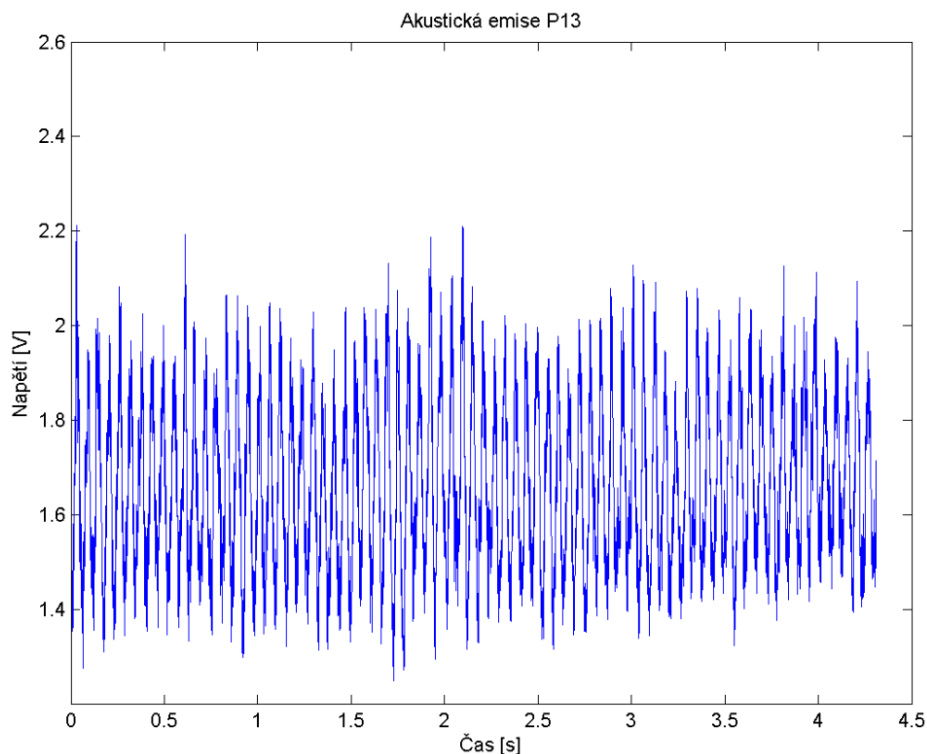
$$t = \frac{l}{f_{ot} * n} * 60 [s] \quad (3)$$

Kde: n – otáčky za minutu [min^{-1}]
 v_c – řezná rychlost [$m.min^{-1}$]
 D – soustružený průměr [mm]
 t – čas obrábění [s]
 f_{ot} – posuv na otáčku [$mm.ot^{-1}$]

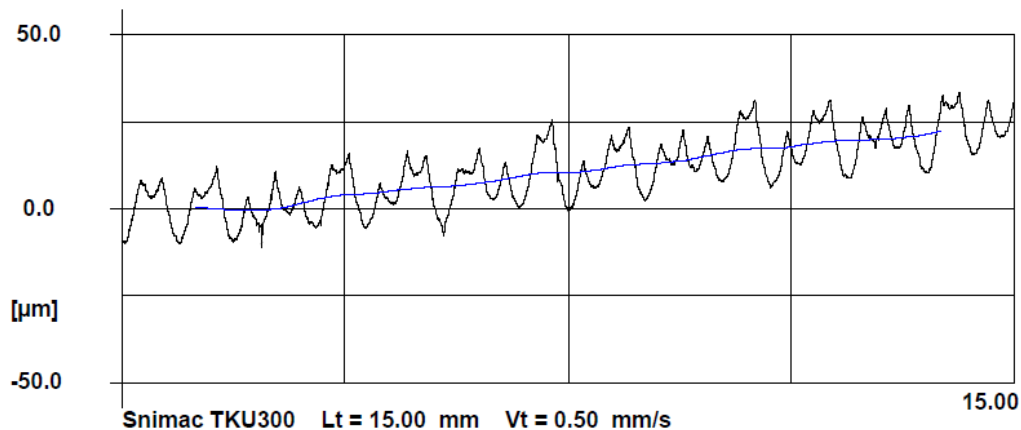
V případě hrubování byly nastaveny řezné podmínky $v_c = 200$ m/mi, $f_{ot} = 0,15$ mm/ot. Pro uvedení výpočtu času obrábění, je u vzorku P13 výpočet uveden níže.

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D} = \frac{200 * 1000}{\pi * 61,1} = 1042 [ot/min]$$

$$t = \frac{4,8}{0,45 * 1042} * 60 = 4,4 [s]$$



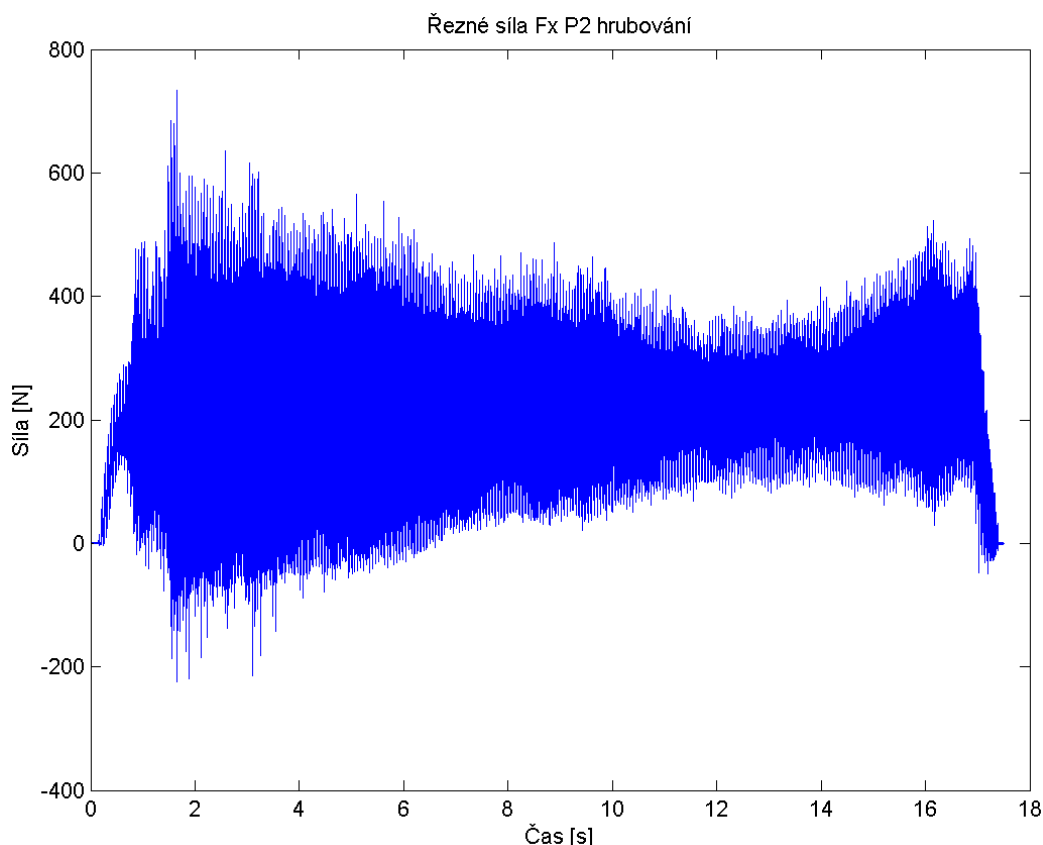
Obrázek 45: Akustická emise P13 hrubování



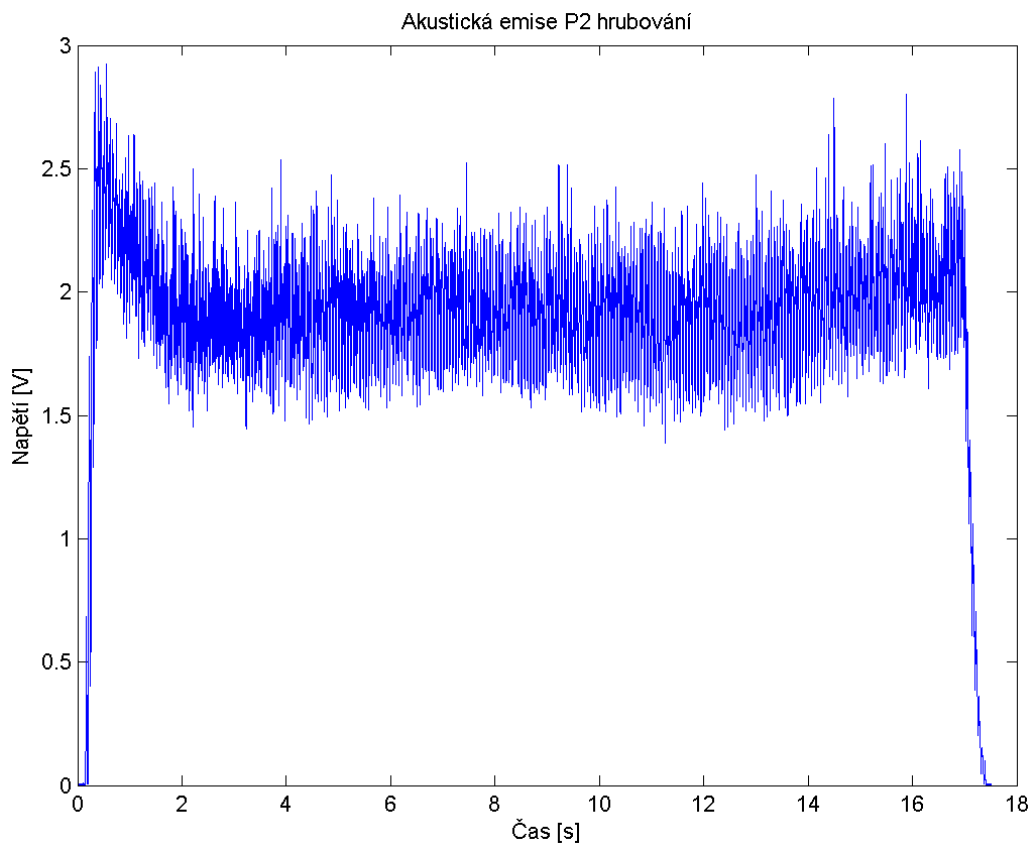
Obrázek 46: Profil povrchu P13 hrubování

7.1.3 Akustická emise a řezné síly

V rámci hledání závislosti akustické emise na řezných silách při hrubování není možné tyto výstupy zcela porovnávat, jelikož průběh řezné síly je velmi rozechvělý. Pro příklad je uveden výstup řezné síly F_x (obr. 47) při soustružení vzorku P2 a signál AE (obr. 48). Charakter řezných sil F_y a F_z je stejný, a proto zde nejsou dále uváděny. Princip měření řezných sil je blíže popsán v kapitole 7.2.3 kde byla dokázána určitá podobnost AE a řezných sil při dokončování.



Obrázek 47: Řezná síla F_x P2 hrubování



Obrázek 48: Akustická emise P2 hrubování

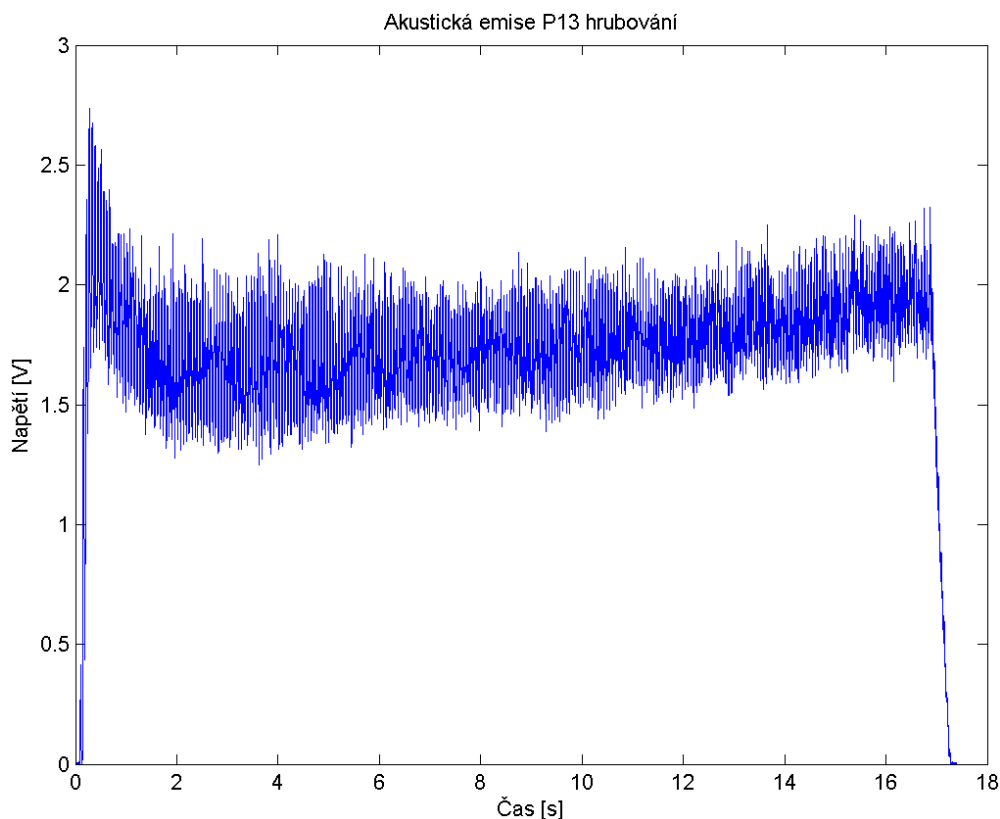
7.1.4 Akustická emise a opotřebení

Z dostupných materiálů a experimentů, které bylo možné dohledat, je známo sledování opotřebení břitové destičky. V těchto případech bylo, však provede více přejezdů a docházelo k opotřebení břitové destičky a hodnocení trvanlivosti. V našem případě nelze hovořit o opotřebení břitu jako takovém, jelikož byla destička v řezu po krátký časový interval (jeden přejezd) a poté byla pootočená na novou hranu.

Následně po ukončení experimentu byly všechny použité destičky naskenovány pomocí digitálního mikroskopu Keyence. U destičky s označením 2/6/4 bylo zjištěno vylomení ostří na hřbetu. Tato destička byla využita při hrubovací operaci u vzorku č. 12, detail břitu je možné vidět na obrázku (obr. 63 vlevo).

Při samotné analýze výstupního signálu akustické emise, která je na obrázku (obr. 63 vpravo) nebylo, však nalezeno konkrétní místo, ve kterém mohlo dojít k vyštípnutí. K poškození břitu mohlo dojít při vjezdu do materiálu, a proto v signálu není vidět žádná odchylka, jelikož došlo k poškození při vjezdu, kde se vždy objevuje nárůst signálu. Další z možností je, že k porušení došlo v průběhu obrábění. Poněvadž se jedná o hrubovací operaci, kdy je odebrána větší tloušťka materiálu, je možné, že se takového porušení v signálu neprojeví, a proto není jednoznačné, jestli je možné takovýto stav analyzovat z hlediska akustické emise.

Po zjištění poškození břitu nástroje byla také zkontrolována data řezných sil, jestli se poškození neprojevílo v jedné ze složek. Bohužel se nepodařilo určit místo poškození ani v rámci řezných sil.



Obrázek 51: Akustická emise P13

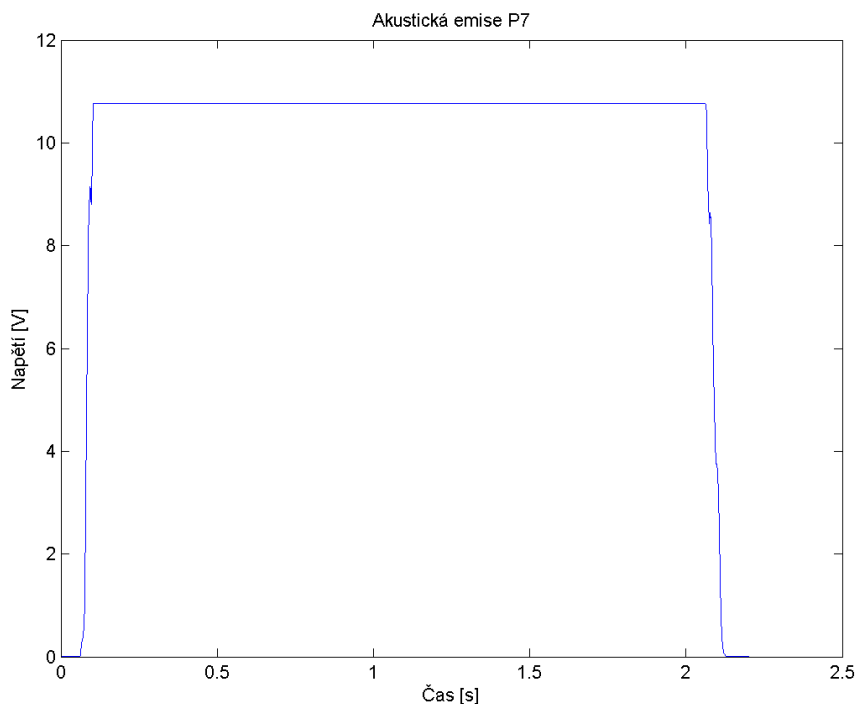
7.2 Vyhodnocení dokončování

7.2.1 Signál AE

Měření akustické emise při dokončování probíhalo stejným způsobem jako u hrubovací operace. U každého vzorku byly však voleny jiné řezné podmínky a úhel λ_s . V rámci řezných podmínek měla pravděpodobně největší vliv na výstupní signál AE posuvová rychlost f_{ot} a méně úhel λ_s .

V případě některých dokončovaných vzorků se nám povedlo zaznamenat jenom část signál nebo vůbec žádný, jelikož byl přesažen maximální výstup AE, který je vyneseno na svislé ose pomocí *Napětí* a má hodnotu 10,7 V. Přesažení této hodnoty bylo pozorováno u celé operace v případě vzorků P3, P6, P7, P9 a P10. Tato situace mohla nastat vzhledem k vyšší posuvové rychlosti, která byla $f_{ot} = 0,95$ u vzorku P3 a dále $f_{ot} = 1,2$ u vzorku P6.

Další nenaměřené průběhy AE byly pozorovány u vzorků P7, P9 a P10 kdy byla posuvová rychlost $f_{ot} = 0,7$ mm/ot. Rozdílným parametrem byl pouze úhel λ_s , který u P9 a P10 byl 60° a v případě vzorku P7 byl 50° . Bohužel tento fakt vyvrací měření u vzorku P11, kdy byly stejné podmínky jako u P9 a P10, ale průběh signálu byl v pořádku zaznamenán. Vzhledem k nemožnosti určit jaký faktor zapříčinil navýšení výstupního signálu a znemožnil zaznamenání AE, byly tyto vzorky vyřazeny z další analýzy. Na obrázku níže je jako příklad nezaznamenaného signálu vzorek P7.



Obrázek 52: Akustická emise P7

7.2.2 Akustická emise a profil povrchu

V této kapitole bude popisována a hodnocena závislost profilu povrchu a výstupního signálu akustické emise u vybraných vzorků P2, P4 a P8 při dokončovací operaci. Vzorky byly vybrány náhodně a pro zajištění reprodukovatelnosti a správnosti hodnocení byly vybrány tři, aby se redukovala míra nahodilosti výsledků. Rozdílnými parametry u těchto vzorků byla hodnota posuvu na otáčku f_{ot} a úhel λ_s . Vyhodnocení bylo provedeno graficky. Pro možnost porovnání byla měřená délka profilu 4,8 mm převedena, dle řezných podmínek daného vzorku na jednotku času.

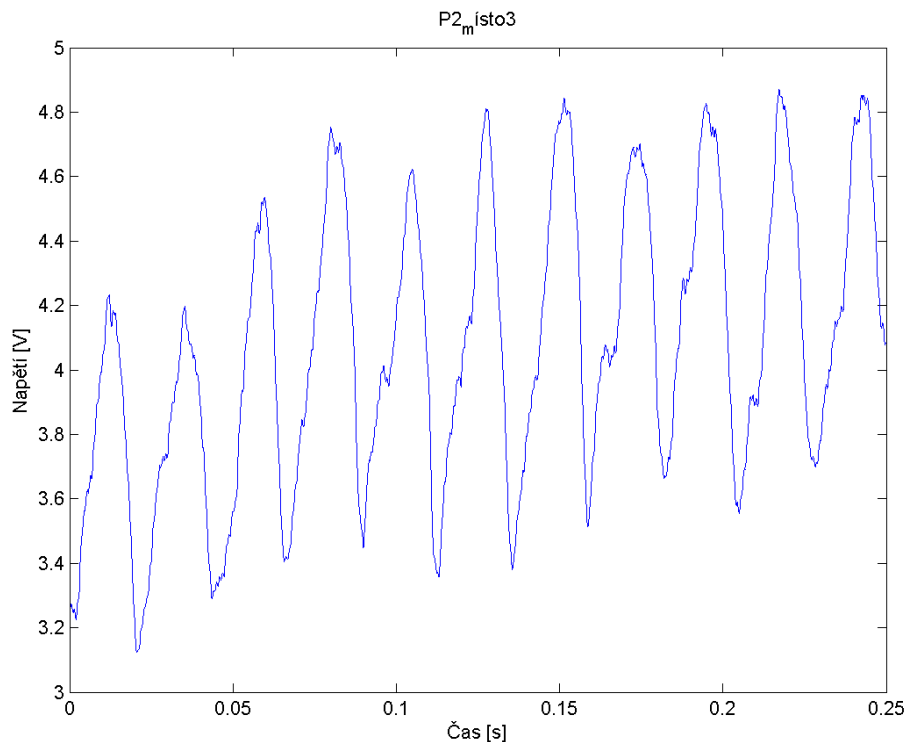
Graf vykreslující profil měřeného povrchu reprezentuje na vodorovné ose délku měřeného úseku v milimetrech [mm] a na ose svislé znázorňuje výšku profilu v mikrometrech [μm]. Dále se v grafu nachází modrá křivka, která je křivkou vlnitosti.

Při pohledu na výstupní graf profilu povrchu, lze říci, že se jedná o typickou stopu po soustružnickém noži, která je tvořena ve spirále. Stejný tvar můžeme vidět i u výstupního signálu akustické emise, který odpovídá profilu povrchu. Pro hodnotu popisující rozdíl nejvyššího místa (vrcholu) a nejnižšího místa (údolí) v rámci profilu, můžeme využít hodnotu P_t , která je zaznamenána v protokolu měření.

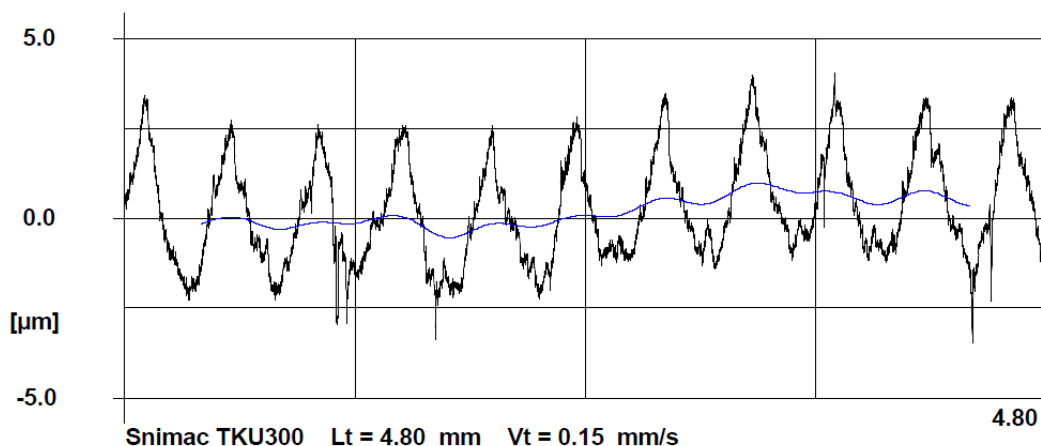
Vzorek P2

Při dokončovací operaci vzorku P2 byly nastaveny následující řezné podmínky, které vycházejí z tabulky (tab. 5) posuv na otáčku $f_{ot} = 0,45 \text{ mm/ot}$ a úhel $\lambda_s = 65^\circ$.

Ve výstupním signálu akustické emise vzorku P2 se nachází jedenáct kmitů, které jsou shodné s počtem vrcholů, které se nacházející v profilu povrchu. Amplituda akustické emise je v tomto výřezu přibližně 1,7 V. Tuto hodnotu je možno přiřadit k hodnotě profilu $P_t = 7,54 \mu\text{m}$.



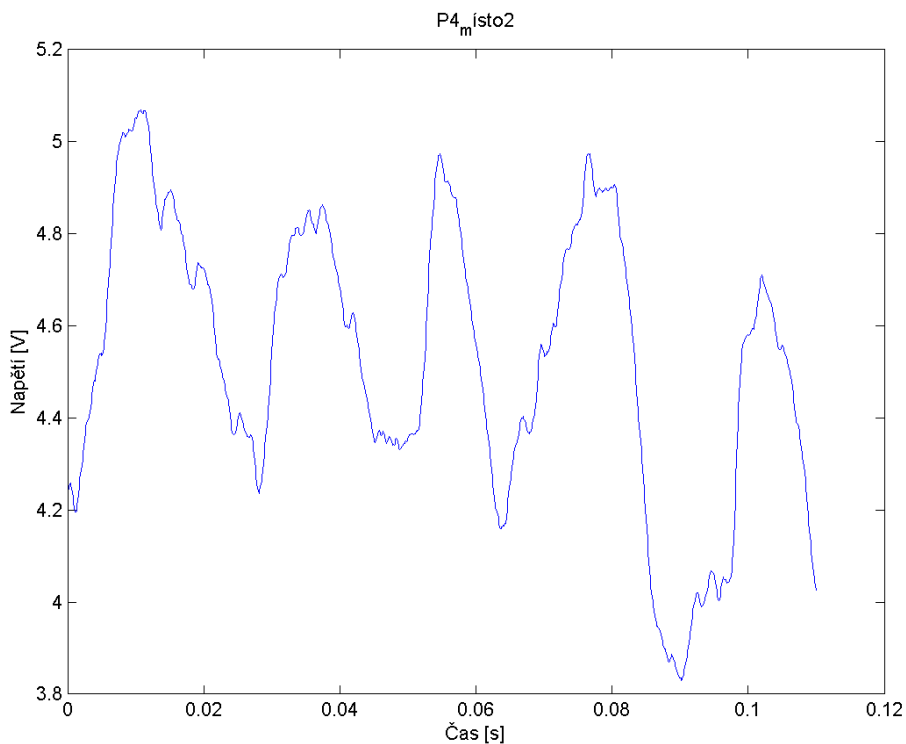
Obrázek 53: Akustická emise P2 v místě 3



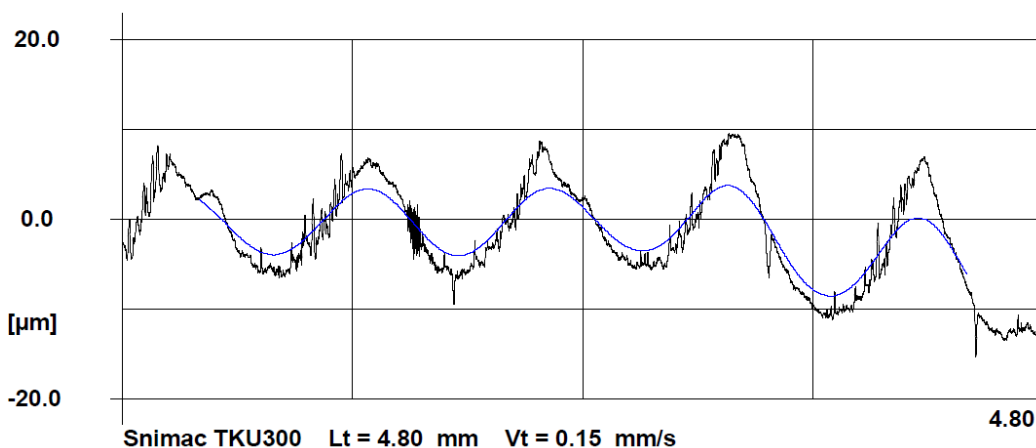
Obrázek 54: Profil povrchu P2 v místě 3

Vzorek P4

Při obrábění vzorku P4 odpovídá měřená vzdálenost povrchu 4,8 mm podle řezných podmínek ($f_{ot} = 0,95 \text{ mm/ot}$ a $\lambda_s = 65^\circ$) hodnotě času 0,12 sekundy. V tomto úseku se vyskytuje pět kmitů akustické emise, které odpovídají stejnému počtu v profilu povrchu. Ze záznamu akustické emise vzorku P4 je možné odečíst amplitudu o velikosti 1,25 V a velikost amplitudy profilu $P_t = 24 \mu\text{m}$.



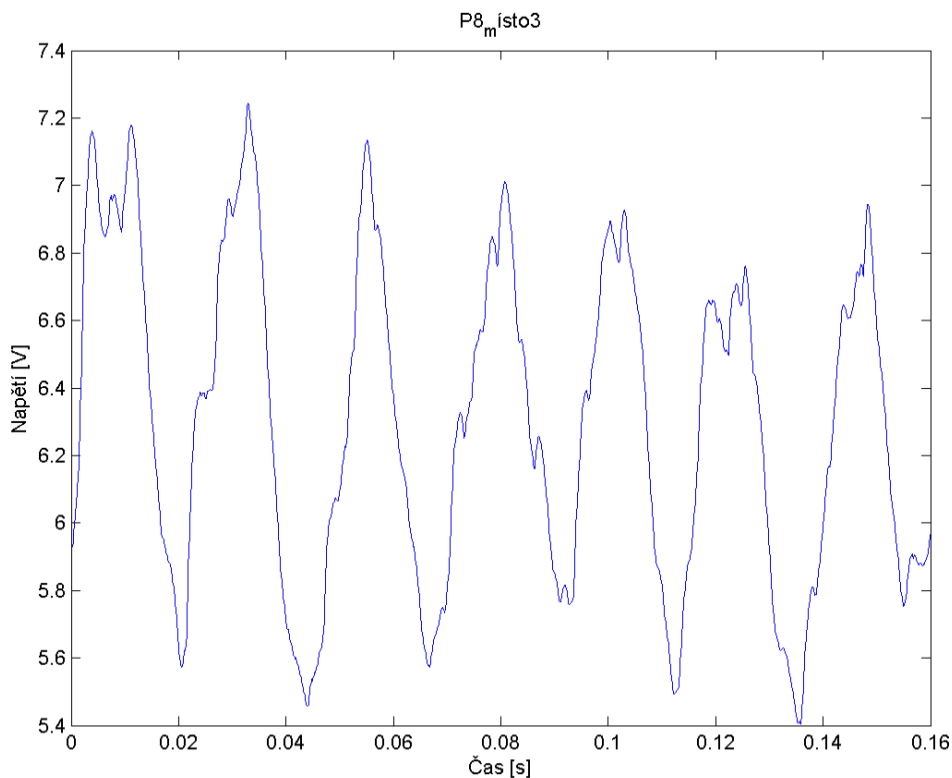
Obrázek 55: Akustická emise P4 v místě 2



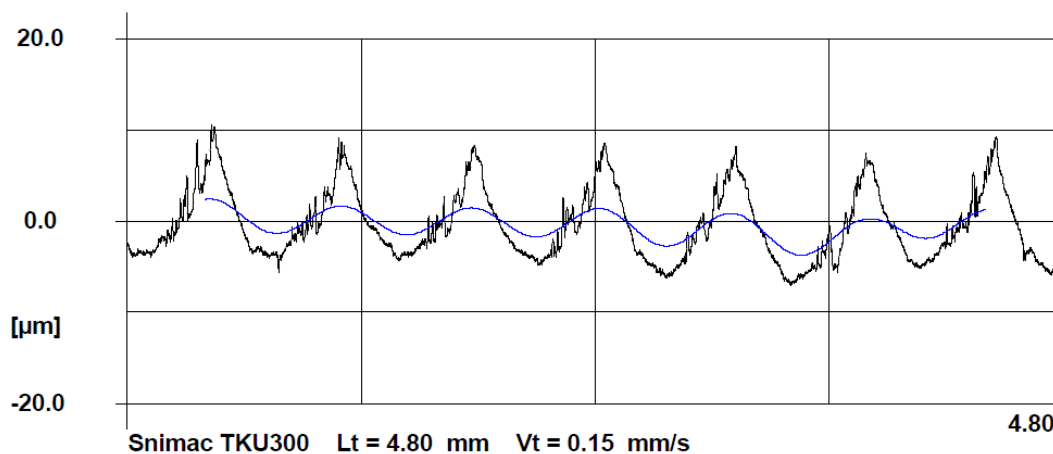
Obrázek 56: Profil povrchu P4 v místě 2

Vzorek P8

Posledním z vybraných vzorků je P8, kdy byl posuv na otáčku $f_{ot} = 0,7$ mm/ot a úhel $\lambda_s = 70^\circ$. Při odečítání amplitudy akustické emise $1,84$ V Pt = $17,73\mu\text{m}$.



Obrázek 57: Akustická emise P8 v místě 3



Obrázek 58: Profil povrchu P8 v místě 3

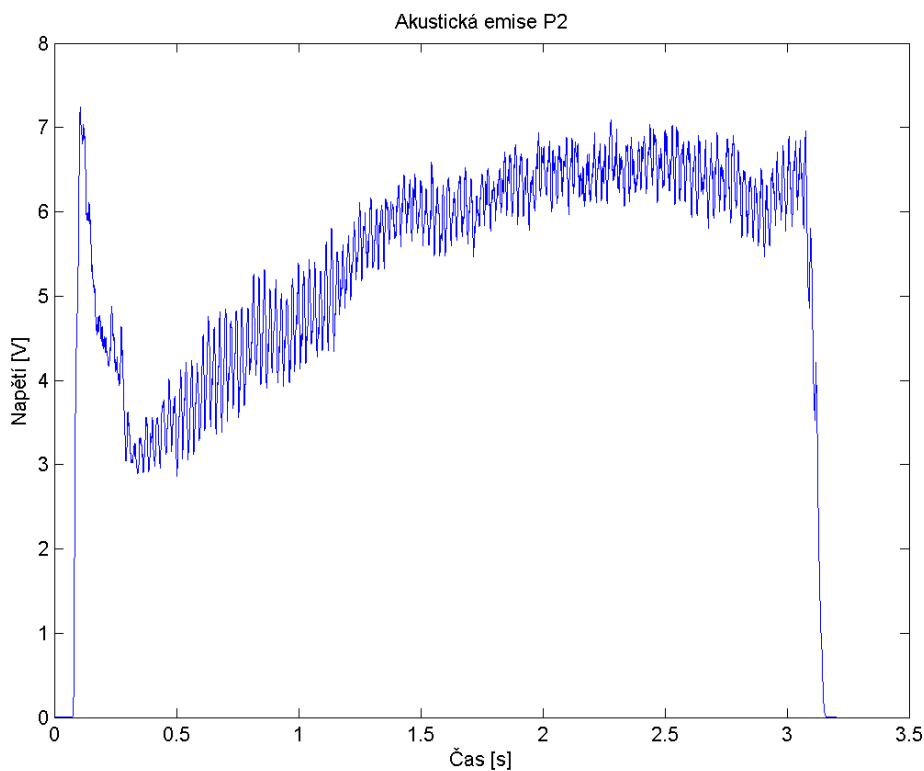
7.2.3 Akustická emise a řezné síly

V rámci zpracování získaných dat při experimentu byla zjištěna určitá podobnost výstupních dat akustické emise a řezných sil při dokončování. Pro vyhodnocení a možnost porovnání jednotlivých výstupů byl využit záznam RMS signálu AE a nefiltrovaného signálu řezných sil. Jak bylo zmíněno již v předchozích kapitolách, tyto signály byly zaznamenávány souběžně, a proto bude v následujících grafech vodorovná osa představující čas v sekundách stejná pro řezné síly i akustickou emisi.

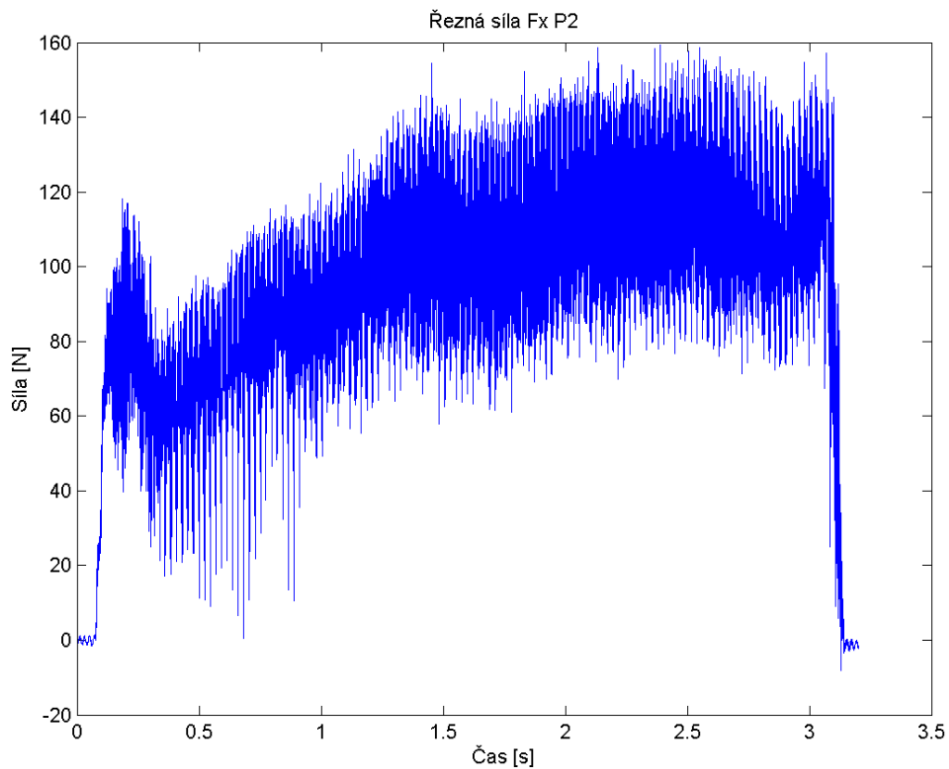
Měření řezných sil bylo provedeno přímou metodou pomocí dynamometru. Pro tento účel byl použit dynamometru firmy KISTLER s označením 9119AA2. Tento dynamometr pracuje

na principu piezoelektrického jevu a jeho upínací základna má velikost 55 x 80 mm. Funguje na vzniku elektrického náboje, který je vytvořen pomocí mechanického zatížení broušených krystalů, které jsou v jádru zařízení. Vzhledem k přítomnosti deformací se také deformuje mřížka krystalu, která následně díky záporným a kladným částicím vyvodí samotný náboj. Velikost tohoto náboje je poté závislá na deformaci krystalu, které způsobuje vnější zatížení dynamometru. Výstupní signál, který vychází je následně zpracován měřicí sestavou, která výsledný signál zapíše do souboru. Tento signál je možné vykreslit do grafu kde svislá osa znázorňuje *Sílu* v newtonech [N] a na vodorovné ose je vyneseno *Čas* v sekundách [s]. Maximální zatížení tohoto dynamometru je stanoveno jeho konstrukcí na 4000 N.

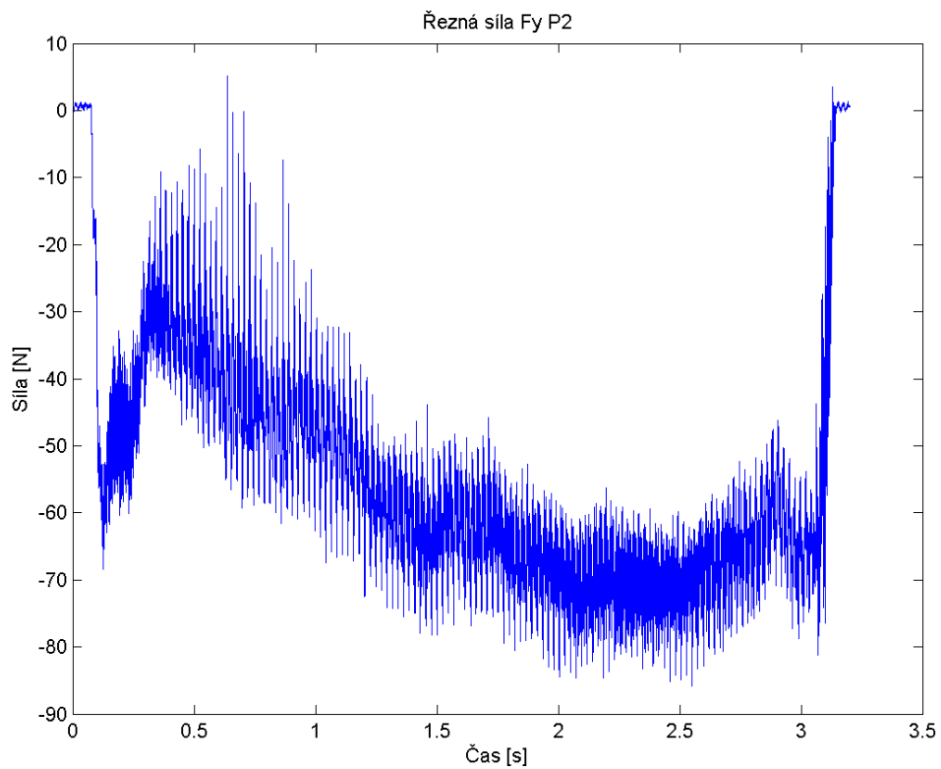
Řezné síly byly zaznamenávány podle jednotlivých složek do souboru. Jednotlivé řezné složky jsou následující: F_f – posuvová složka řezné síly (axiální); F_p – pasivní složka řezné síly (radiální); F_c – hlavní složka řezné síly. Tyto jednotlivé složky odpovídají osám dynamometru, který má vlastní souřadný systém, který je znázorněn v podkapitole *Nástroj*. Z toho vyplývá, že $F_f = F_z$; $F_p = F_x$ a $F_c = F_y$. Dále budeme využívat označení řezných sil dle os dynamometru, z důvodu zjednodušení zpracování dat.



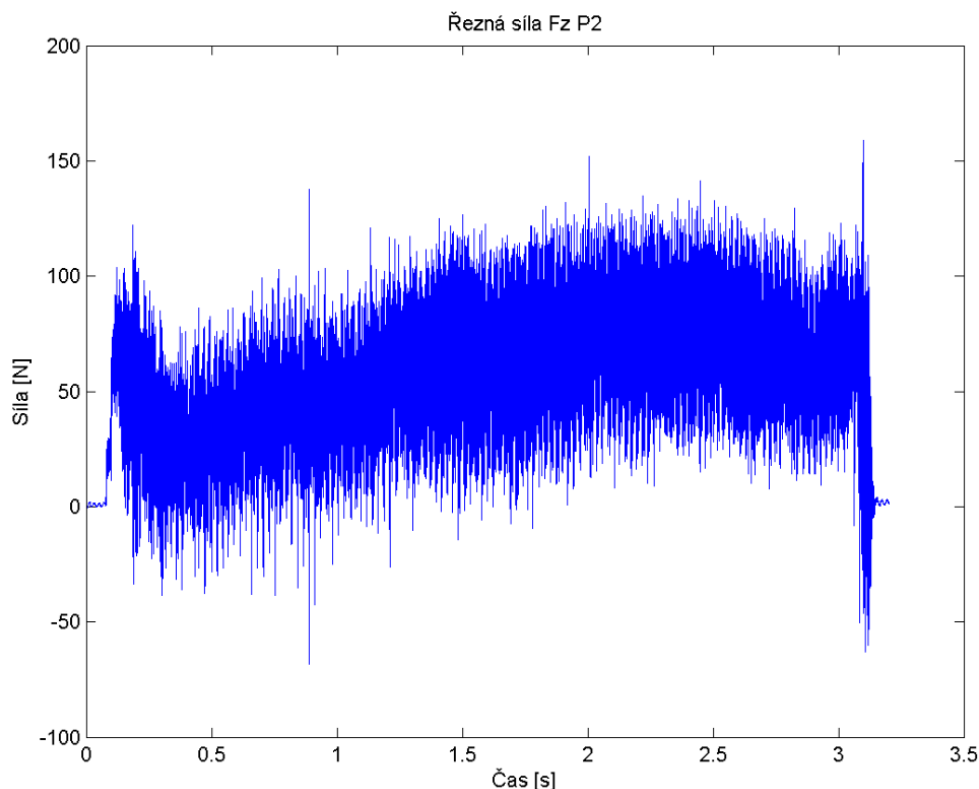
Obrázek 59: Akustická emise P14 dokončování



Obrázek 60: Řezná síla Fx P14 dokončování



Obrázek 61: Řezná síla Fy P14 dokončování

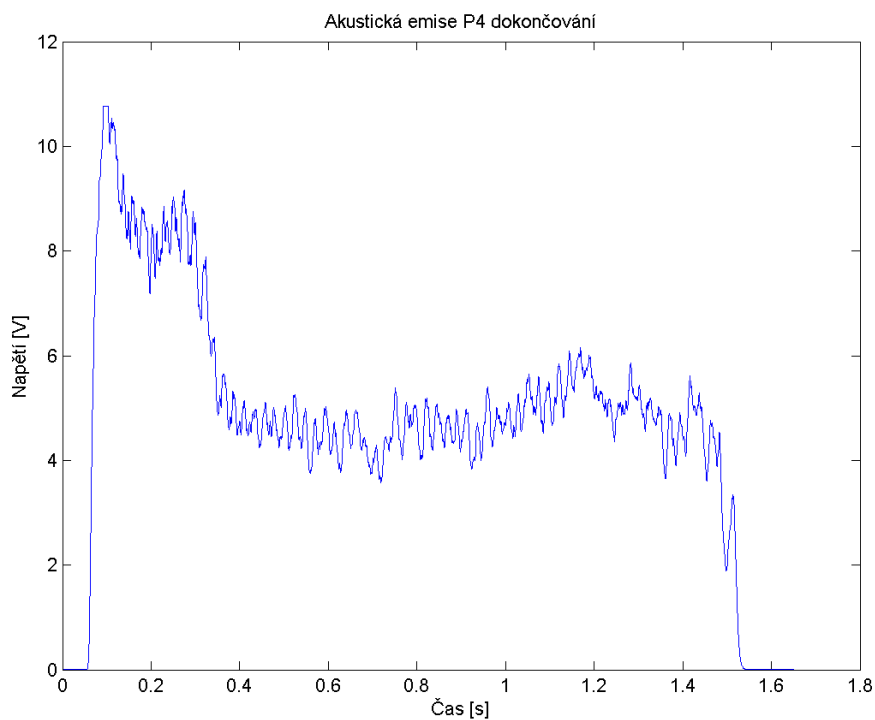


Obrázek 62: Řezná síla Fz P14 dokončování

Při porovnání uvedených grafů řezných sil vůči akustické emisi si lze všimnout závislosti průběhu jednotlivých signálů. Největší shodu výstupu je možné pozorovat v rámci AE a řezných složek F_x a F_y , kdy se jedná téměř o stejný průběh signálu. V případě síly F_y jsou hodnoty řezné síly záporné, ale po převrácení signálu podle vodorovné osy do kladné poloviny se signály shodují. Nejmenší podobnost výstupů je v případě AE a řezné složky F_z , kdy se průběh zcela neshoduje. Při porovnání dalších vzorků byla sledována stejná závislost. Z tohoto lze říci, že je signál AE závislý na řezných silách. Zbylé průběhy AE a řezných sil jsou umístěny na konci práce v příloze.

7.2.4 Akustická emise a opotřebení

Sledování opotřebení pomocí akustické emise při dokončování nebylo vzhledem k charakteru experimentu možné pozorovat, jelikož byla při každém řezu břitová destička otočena na novou řeznou hranu. Použití nové řezné hrany bylo z důvodu zamezení vlivu opotřebení na výstup AE, a proto bylo spíše kontrolováno poškození ostří, ke kterému při dokončování nedošlo.



Obrázek 65: Akustická emise P4 dokončování

8 Technicko-ekonomické vyhodnocení

V rámci ekonomického hodnocení byly vyčísleny celkové náklady experimentu. Celkové náklady mohou sloužit jako základ pro plánování dalšího experimentu, který bude podobného charakteru a je potom možné dopředu počítat s potřebnými náklady.

Teorie využita pro výpočet

Pro vyhodnocení kalkulace bylo využito principu kalkulačního vzorce, který je potřeba sestavit podle konkrétního případu (experimentu). V našem případě se kalkulační vzorec skládá ze tří částí (obr. 66).

$$\begin{aligned} & \text{přímý materiál} \\ & + \text{náklady na nástroje} \\ & + \text{zpracovací náklady} \\ \hline & = \text{vlastní náklady výroby} \end{aligned}$$

Obrázek 66: Kalkulační vzorec pro experiment

První z uvedených parametrů je přímý materiál P_{Ma}, který se skládá z nákladů na materiál. Mezi náklady na materiál zahrnujeme cenu polotovaru a nástřiku. Další z částí jsou náklady na nástroje NN. Do této části jsou zahrnuty náklady na výrobu nástroje, upínacího trnu a jejich konstrukci. V neposlední řadě sem patří cena VBD. Poslední částí jsou zpracovací náklady ZN, které zahrnují sumu nákladů na pracoviště, tedy za stroj (strojí náklady) a za pracovníka (přímé mzdy). Sjednocení těchto položek bylo z důvodu nacenění některých složek, které nebylo možné rozdělit. V případě soustružení se jedná o hodinovou sazbu stroje, do které je zahrnut i plat obsluhy. Dalším bylo měření AE, drsnosti a geometrických přesností, které je opět udáváno hodinovou sazbou za využití stroje i s obsluhy. V rámci vyhodnocení nebyly započítávány režijní náklady. Jelikož experiment probíhal na ŽČU byly také opomenuty náklady na energie, údržbu, vytápění, pronájem prostor atd. Ve využitém kalkulačním vzorci není počítáno s režijní přírázkou, poněvadž je celý experiment brán jako kalkulační jednice.

P_{Ma} – Náklady na materiál:

Polotovar:

Cena za 1 m tyče: 1500 Kč/m

Celková délka: 1 m

Cena za 1 m tyče:

$$1500 * 1 = 1500 \text{ Kč}$$

Cena za hod. přípravy: 800 Kč

Příprava polotovaru: 2,5 hod.

Cena za přípravu:

$$800 * 2,5 = 2000 \text{ Kč}$$

Celkové náklady za polotovar:

$$1500 + 2000 = 3500 \text{ Kč}$$

Nástřík:

Povrch polotovaru:

$$V = 2 * \pi * r * l = 2 * \pi * 3,05 * 6,5 = 125 \text{ cm}^2$$

r = poloměr obrobku v cm

l = délka obrobku v cm

Cena nástřiku za cm²: 19,30 Kč

Počet vzorků: 14 ks

Celková cena za nástřík:

$$125 * 19,30 * 14 = 33775 \text{ Kč}$$

$$\sum PMa = 3500 + 33775 = 37275 \text{ Kč}$$

NN – Náklady na nástroje

Doba výroby nástroje: 3 h

Doba výroby trnu: 1,5 h

Cena za hod. výroby: 1600 Kč

Cena za výrobu nástroje a trnu:

$$(3 + 1,5) * 1600 = 13200 \text{ Kč}$$

Doba tvorby konstrukce: 6 h

Cena za hodinu tvorby konstrukce: 1000 Kč

Cena za konstrukci:

$$6 * 1000 = 6000 \text{ Kč}$$

Cena destičky 2560 Kč/ks

Cena 8 destiček: 20480 Kč

NN – Celkové náklady na nástroje:

$$\sum CNn = 13200 + 6000 + 20480 = 39680 \text{ Kč}$$

ZNs – suma nákladů na pracoviště (přímé mzdy a strojní náklady)

soustruh + akustická emise + drsnoměr a kruhoměr

Zpracovací náklady na soustruh:

Hodinová sazba pracovišti: 1400 Kč/h

Počet hodin na stroji: 13,5 h

Celkové náklady na soustruh:

$$1400 * 13,5 = 18900 \text{ Kč}$$

Zpracovací náklady na akustickou emisi:

Hodinová sazba pracoviště: 500 Kč/h

Počet hodin na pracovišti: 13,5 h

Celkové náklady na dynamometru:

$$500 * 13,5 = 6750 \text{ Kč}$$

Zpracovací náklady na drsnoměr a kruhoměr:

Hodinová sazba pracoviště: 850 Kč/h

Počet hodin na pracovišti: 11 h

Celkové náklady na drsnoměr a kruhoměr:

$$850 * 11 = 9350 \text{ Kč}$$

ZNs – zpracovací náklady na stroje:

$$\sum ZNs = 18900 + 6750 + 9350 = 35000 \text{ Kč}$$

VNV – Vlastní náklady výroby

$$VNV = \sum PMA + \sum NN + \sum ZNs = 37275 + 39680 + 35000 = 111950 \text{ Kč}$$

Vlastní náklady na experiment byly v případě experimentu, který proběhl v rámci této závěrečné práce vyčísleny na 111 950 Kč.

Z technického hlediska vyhodnocení je možné se zaměřit na snahu nahrazení stávající technologie opracování žárových nástřiků za produktivnější a levnější. Snahou je především docílit podobné nebo stejné kvality povrchu. V našem případě se jedná o nahrazení broušení hřidelů za soustružení lineární řeznou hranou. Z dostupné literatury je možné odkázat na diplomovou práci Jana Kašpara [25], který se ve svém závěru práce, zabývá právě porovnáním soustružení a broušení žárového nástřiku. Z uvedených výpočtů je možné říct, že se v případě času jedná o úsporu 62 % a při pohledu na finanční náklady je úspora dokonce 74 %. Podobnou úsporu času a financí je možné předpokládat i u našeho experimentu, jelikož se jedná o podobný obrobek a technologii soustružení.

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo čtenářům přiblížit problematiku žárových nástřiků s konkrétním zaměřením na Stellite-6 a snahu tyto nástřiky obrábět lineární řeznou hranou. Za tímto účelem byla vybrána akustická emise, pomocí které je možné sledovat proces obrábění lineární řeznou hranou.

V rámci teoretické části jsou shrnuty poznatky jednotlivých témat, na které byla tato část členěna. Každá tato pasáž je plynule provázána s následující, aby byla zachována návaznost celé problematiky jako celku.

Mezi teoretickou a praktickou částí bylo věnováno několik stránek rešerši daných problematik. Při shromažďování informací týkající se žárových nástřiků a jejich obrábění bylo nejčastěji čerpáno z vědeckých článků a kvalifikačních prací, které vznikly ve spolupráci s univerzitou. Dostupnost informací, které se zaměřují na akustickou emisi, konkrétně při obrábění, bylo však o poznání méně. Tyto informace byly čerpány ze zahraničních článků, které vznikly v rámci experimentů a byly popisovány ve vědeckých člancích.

Praktická část je nejvíce zaměřena na prozkoumání závislosti akustické emise s dostupnými parametry obrábění nebo samotného obrobku. Všechna data byla pořízena v rámci experimentu, kdy se soustružil obrobek pomocí lineární řezné hrany, na kterém byl nanesen žárový nástřik Stellite-6. Popis měření a zápisu dat je popsán v jednotlivých kapitolách. Vzhledem k načerpaným informacím z rešeršní části bylo cílem tyto poznatky obohatit o nové.

Po provedení samotného experimentu následuje pasáž týkající se vyhodnocení. Jako první byla u obrobených vzorků změřena kruhovitost. Dále byla změřena drsnost a profil povrchu. Tyto výsledky byly následně zpracovány v souvislosti s akustickou emisí a jejich celý přehled je možné vidět v příloze. Jako poslední byla provedena materiálová analýza, kdy bylo měřeno chemické složení nástřiku, mikrotvrdost a pórovitost. Materiálová analýza a mikrotvrdost vyšla podle teoretického předpokladu, avšak v případě pórovitosti nástřiku byla hodnota téměř o 2,8 % vyšší, což by v našem případě mohlo způsobovat částečné vytrhávání povrchu.

V rámci vyhodnocení byla nalezena závislost akustické emise na profilu povrchu, kterou se podařilo úspěšně ověřit u několika různých vzorků s odlišnou posuvovou rychlostí. Výstupní signál AE odpovídá profilu povrchu, a to v počtu kmitů.

Při tomto experimentu byly zároveň měřeny řezné síly, což bylo využito pro jejich porovnání s akustickou emisí. Řezné síly byly zaznamenávány dle jednotlivých složek os, které bylo možno následně graficky vyhodnotit a porovnat. Z výsledků byla zjištěna závislost výstupního signálu akustické emise na řezných silách. Tato závislost byla pozorovatelná zejména u složek řezných sil F_c a F_p .

Dále byla snaha najít závislost geometrické přesnosti vzorku na signálu AE. V rámci tohoto experimentu byla měřena válcovitost a kuželovitost, ale nebyla nalezena žádná závislost ani podobnost. Před závěrem práce bylo provedeno ekonomické vyhodnocení, ve kterém byly vyčísleny náklady na experiment a technické hodnocení bylo vypracováno formou rešerše.

Na závěr je možné říci, že experiment a jeho vyhodnocení v rámci akustické emise bylo přínosné a úspěšně splněné. Získané poznatky bude možné využít při plánování dalších experimentů podobného typu a lepšímu pochopení celého procesu obrábění lineární řeznou hranou. Pro detailnější pochopení a ověření závislosti AE na řezných silách by mohlo vzniknout téma kvalifikační práce, které by tuto problematiku ověřilo např. při podélném soustružení a využití klasické břitové destičky.

10 Seznam použité literatury

- [1] **HOUDKOVÁ - ŠIMŮNKOVÁ, Š., a další.** Mikrostruktura a kluzné vlastnosti HVOF stříkaného, laserem přetaveného a laserem navařeného povlaku Stellite 6. *Surface and Coatings Technology*. [Online] Vol. 318; Page: 129-141, 2017. [Citace: 10. 12 2021.] <http://hdl.handle.net/11025/29208>. ISSN 0257-8972.
- [2] **VALÍČEK, J., a další.** Prediction of Cutting Parameters of HVOF-Sprayed Stellite 6. *Applied Sciences*. [Online] roč. 10, č.7, 2020. <http://hdl.handle.net/11025/39569>. ISSN 2076-3417.
- [3] **PLASMAMETAL.** Použité technologie. [Online] 2022. [Citace: 5. 3 2022.] <https://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>.
- [4] **BUYTOZ, S., a další.** Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi–SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel. *Arab J Sci Eng*. [Online] Vol. 38, Page: 1481–1491, 2013. [Citace: 12. 1 2022.] <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0536-y>.
- [5] **VALÍČEK, J., a další.** Milling of Complex Surfaces of EN 10060 Steel after HVOF Sprayed NiCrBSi Coatings. *Coatings 10*, no. 8. [Online] Vol. 10, no 8p. 744, 2020. [Citace: 13. 2 2022.] <https://doi.org/10.3390/coatings10080744>.
- [6] **KAŠKA, V.** Vysokorychlostní nástřík HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). *Servis Armatur*. [Online] 2020. [Citace: 5. 1 2022.] <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=high-velocity-spray>.
- [7] **SIDHU, B.S., PURI, D. a PRAKASH, S.** Mechanical and metallurgical properties of plasma sprayed and laser remelted Ni–20Cr and Stellite-6 coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. [Online] Vol. 159; Page: 347-355, 2005. [Citace: 17. 1 2022.] <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.05.023>. ISSN 0924-0136.
- [8] **BARTKOWSKI, D., a další.** Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding. *Optics & Laser Technology*. [Online] Vol. 68, Page: 191-201, 2015. [Citace: 21. 1 2022.] <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.005>. ISSN: 0030-3992.
- [9] **MAGARÓ, P., a další.** Effect of process parameters on the properties of Stellite-6 coatings deposited by Cold Gas Dynamic Spray. *Surface and Coatings Technology*. [Online] Vol. 377, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124934>. ISSN 0257-8972.
- [10] **RAVINDRA, H. V., Srinivasa, Y. G. a Krishnamurthy, R.** Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear*. [Online] Vol. 212, no. 1p, Page: 78-84, 1997. [Citace: 2. 9 2022.] [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00137-3).
- [11] **POLLOCK, A.** Acoustic Emission Inspection. *ASM Handbook Committee, Nondestructive Evaluation and Quality Control*. [Online] Vol. 17, Page: 360-469, 1989. ISBN 0-87170-007-7.
- [12] **KRATOCHVÍL, V.** Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje. [Online] Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [13] **ŽIŽKA, J.** *Použití akustické emise ke sledování opotřebení řezného nástroje*. Liberec, 1998. ISBN: 8070836881.
- [14] **Acoustic emission testing.** *NDE, Nondestructive Evaluation Techniques : Acoustic Emission Testing*. [Online]. <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/AcousticEmission/>

- [15] **KISTLER**. Acoustic Emission Sensor. *Data sheets to the types 8762A, 8763B, 8766A50 and 8766A250/500*. [Online] 2014-2020. [Citace: 2. 4 2022.] <https://www.kistler.com/files/document/003-120e.pdf>.
- [16] **Kistler**. Cutting Force Measurement. [Online] www.kistler.com.
- [17] **MONKA, P, a další**. Design and experimental study of turning tools with linear cutting. *Int J Adv Manuf Technol*. [Online] Vol 85, Page: 2335-2343, 2016. [Citace: 24. 1 2022.] <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8065-3>.
- [18] **GRZESIK, W. a ŽAK, K.** Surface integrity generated by oblique machining of steel and iron parts. *Journal of Materials Processing Technology*. [Online] Vol 212, Page: 2586-2596, 2012. [Citace: 3. 3 2022.] <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.019>. ISSN 0924-0136.
- [19] **FILIPPOV, A.V.** Cut-layer cross section in oblique turning. *Allerton Press*. [Online] Vol. 34, Page: 718-721, 2014. [Citace: 12. 3 2022.] <https://doi.org/10.3103/S1068798X14110070>. ISSN 1068798X.
- [20] **Zatloukal, T.** Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje. [Online] Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni 2018.
- [21] **CHÝNA, M.** Obrobitelnost žárového nástřiku Fe13Cr a jeho vlastnosti. [Online] Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [22] **FILIPPOV, A.V., a další**. Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. [Online] Vol. 247; Page: 224-234, 2017. [Citace: 28. 1 2022.] <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030>. ISSN 0924-0136.
- [23] Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni. Učebna předmětu KTO/PEMO. [Online] https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/UF106.html.
- [24] **BONAR, a.s.** Vyměnitelné břitové destičky s pájeným PCBN. [Online] 2019. www.bonar-as.cz.
- [25] **KAŠPAR, Jan**. Optimalizace technologických faktorů obrábění těžkoobrobitelných nástřiků experimentálními postupy zaměřenými na splnění funkčních vlastnosti. [Online]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [26] **DUDZIK, K. a LABUDA, W.** The Possibility of Applying Acoustic Emission and Dynamometric Methods for Monitoring the Turning Process. *Materials*. 2020. [Online] no. 13: 2926, 2020. [Citace: 6. 3 2022.] <https://doi.org/10.3390/ma13132926>.
- [27] **ZATLOUKAL, T., a další**. Optimalizace procesu žárových nástřiků v závislosti na drsnosti povrchu. *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*. [Online] pp. 1026-1033, 2019. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.143. ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679.

11 Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 – Signál akustické emise

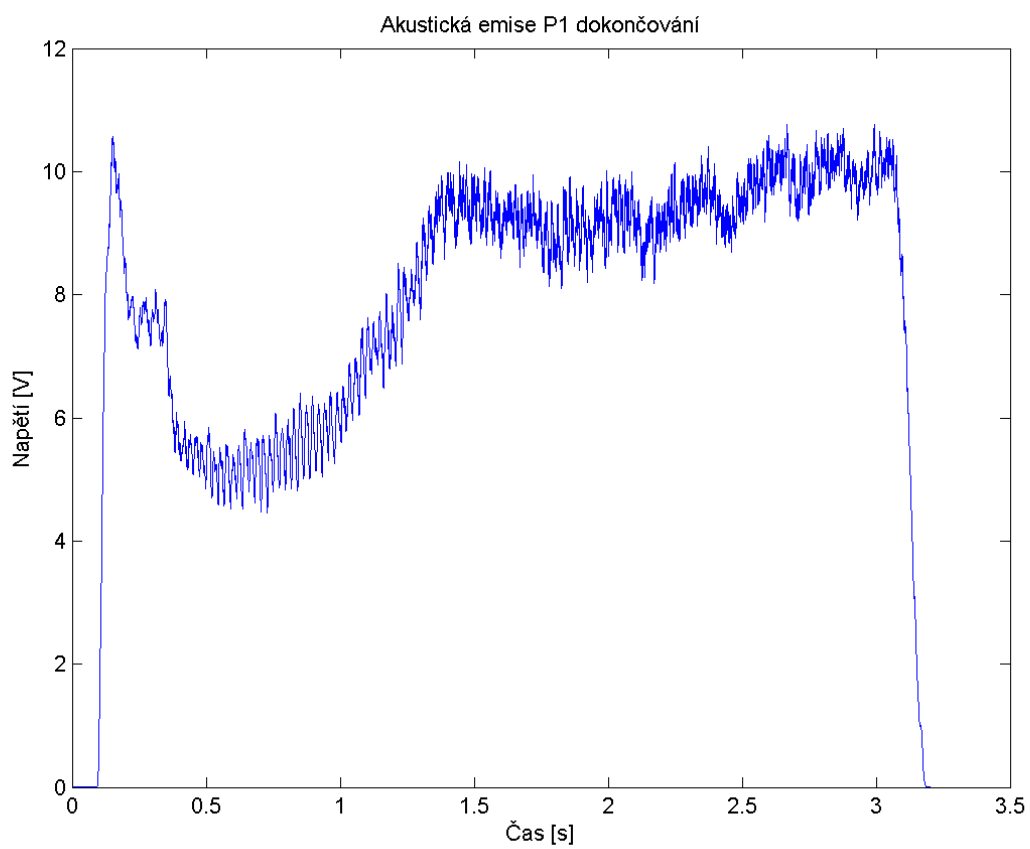
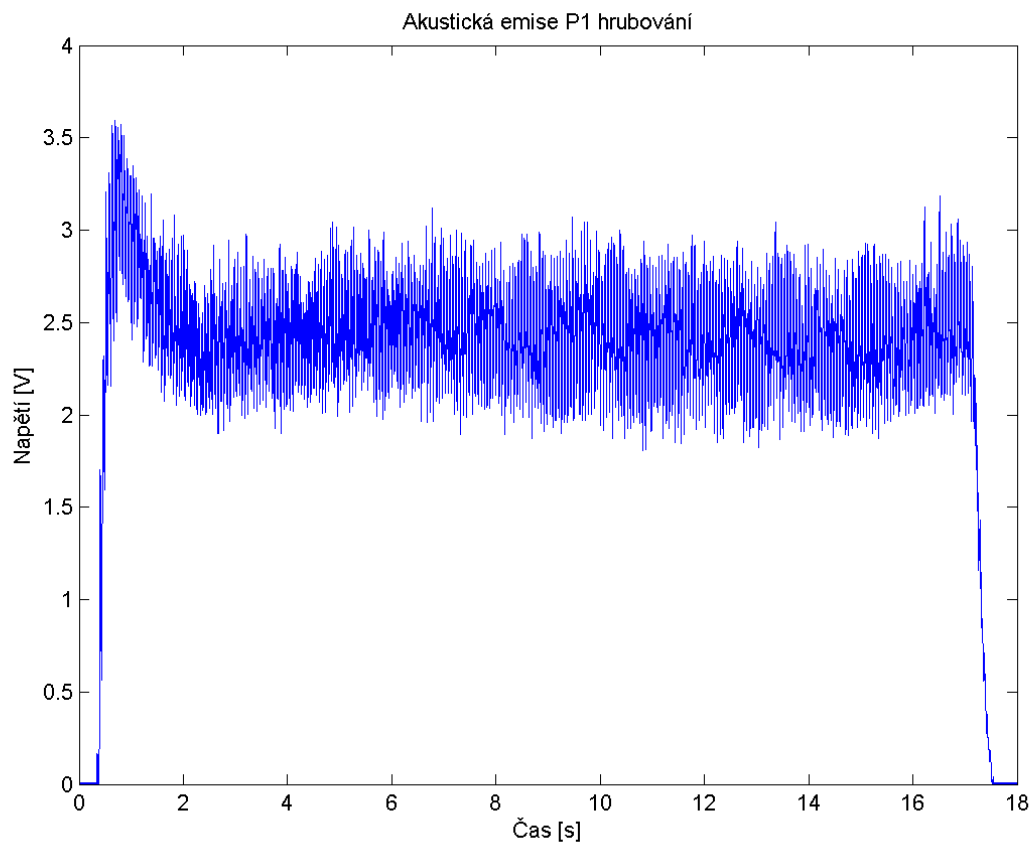
PŘÍLOHA 2 – Vybrané řezné síly

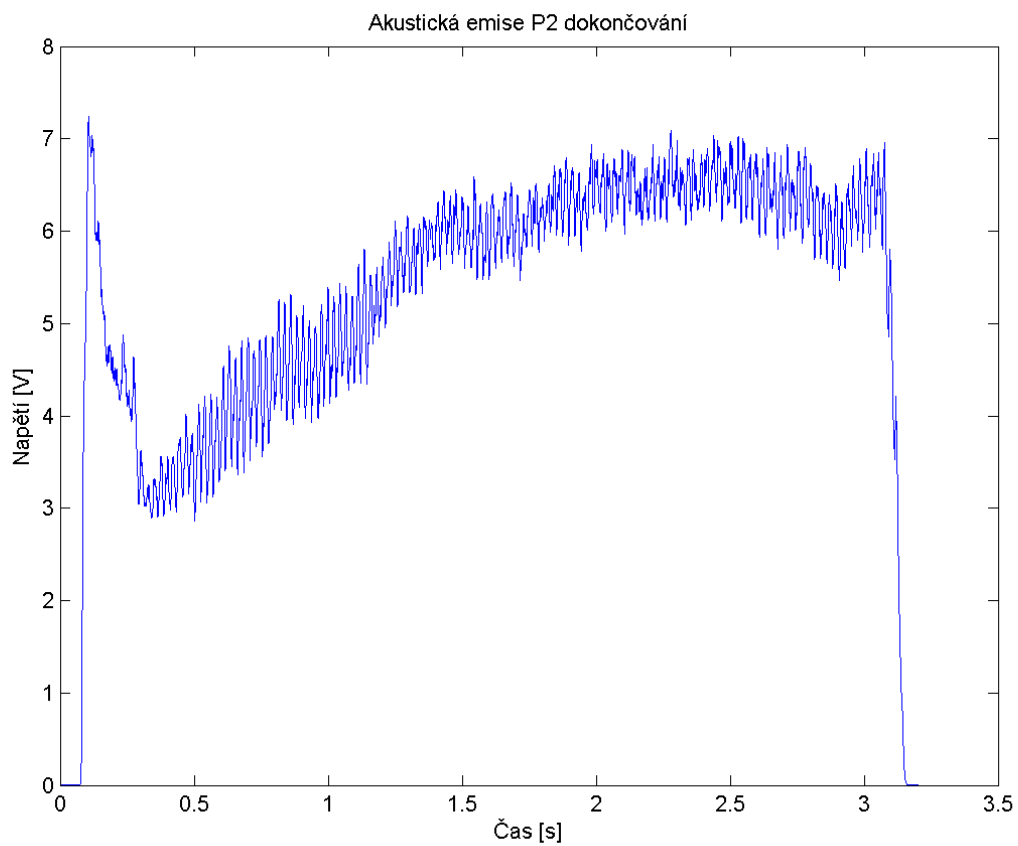
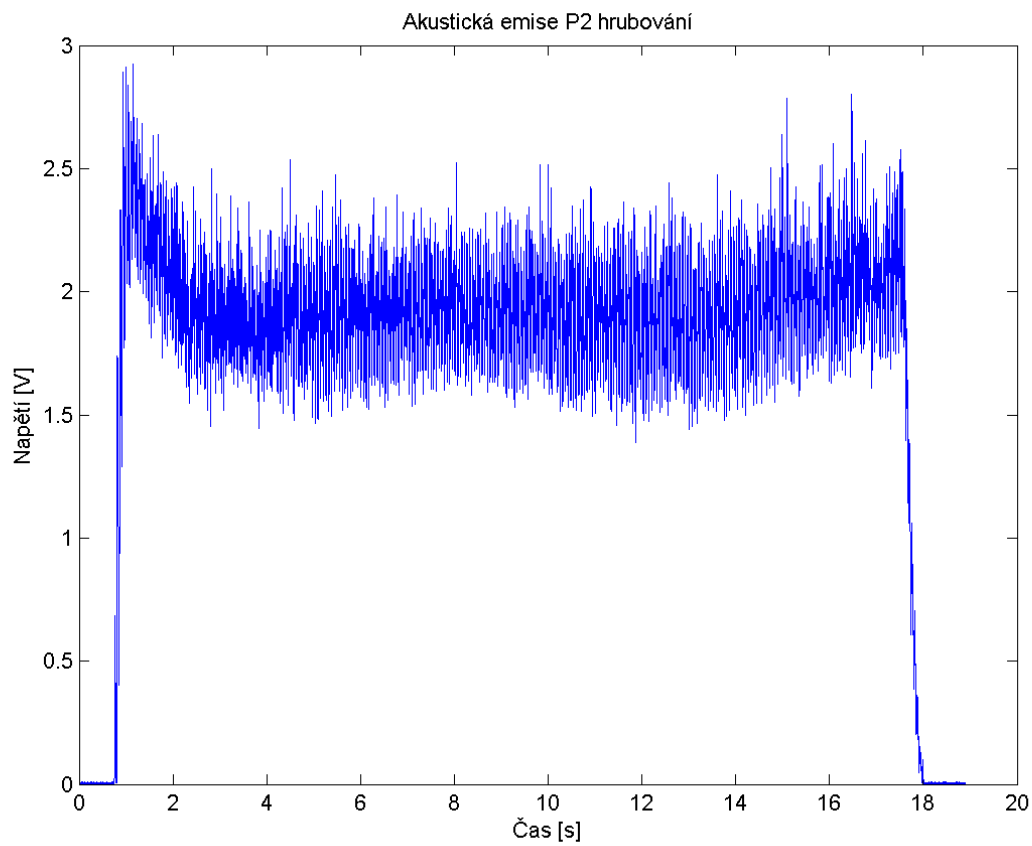
PŘÍLOHA 3 – Vybrané protokoly válcovitosti

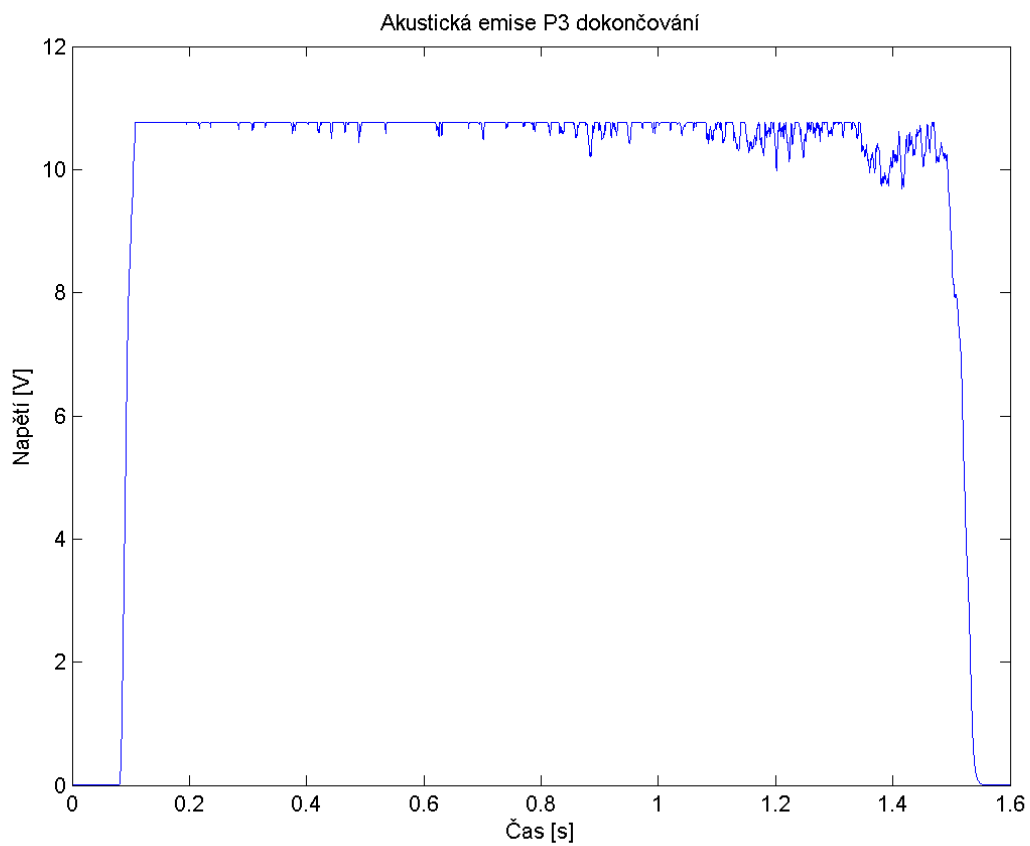
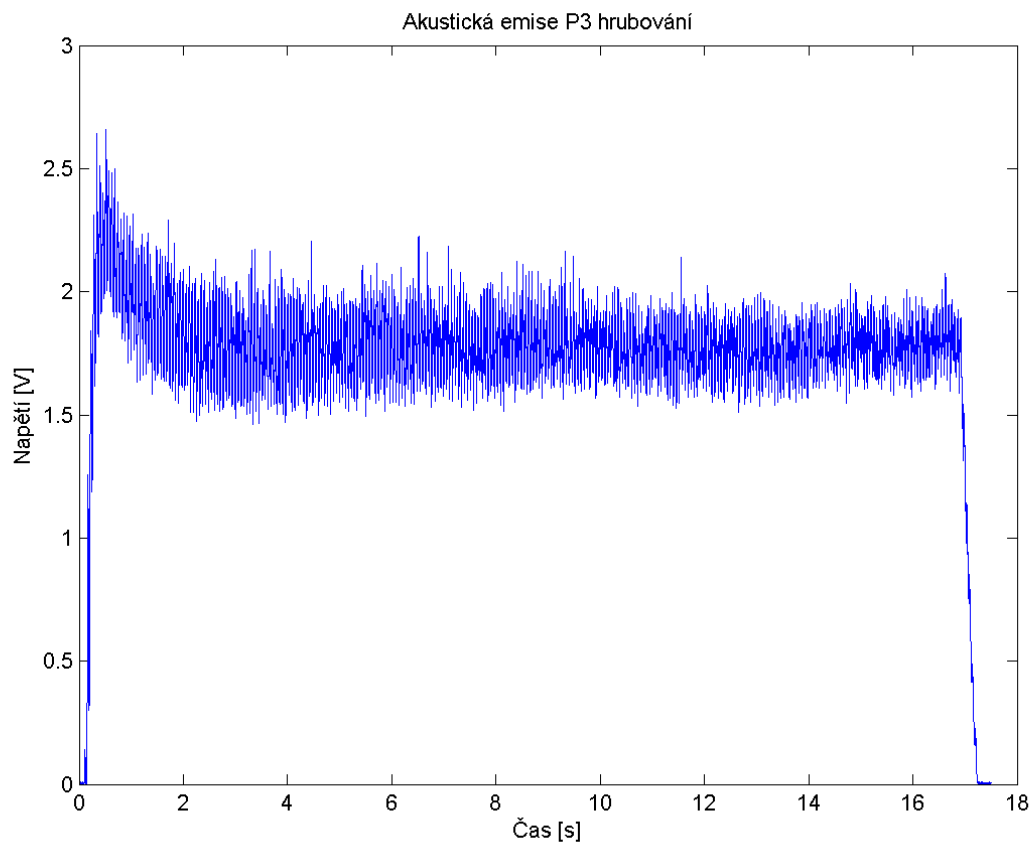
PŘÍLOHA 4 – Vybrané protokoly drsnosti povrchu

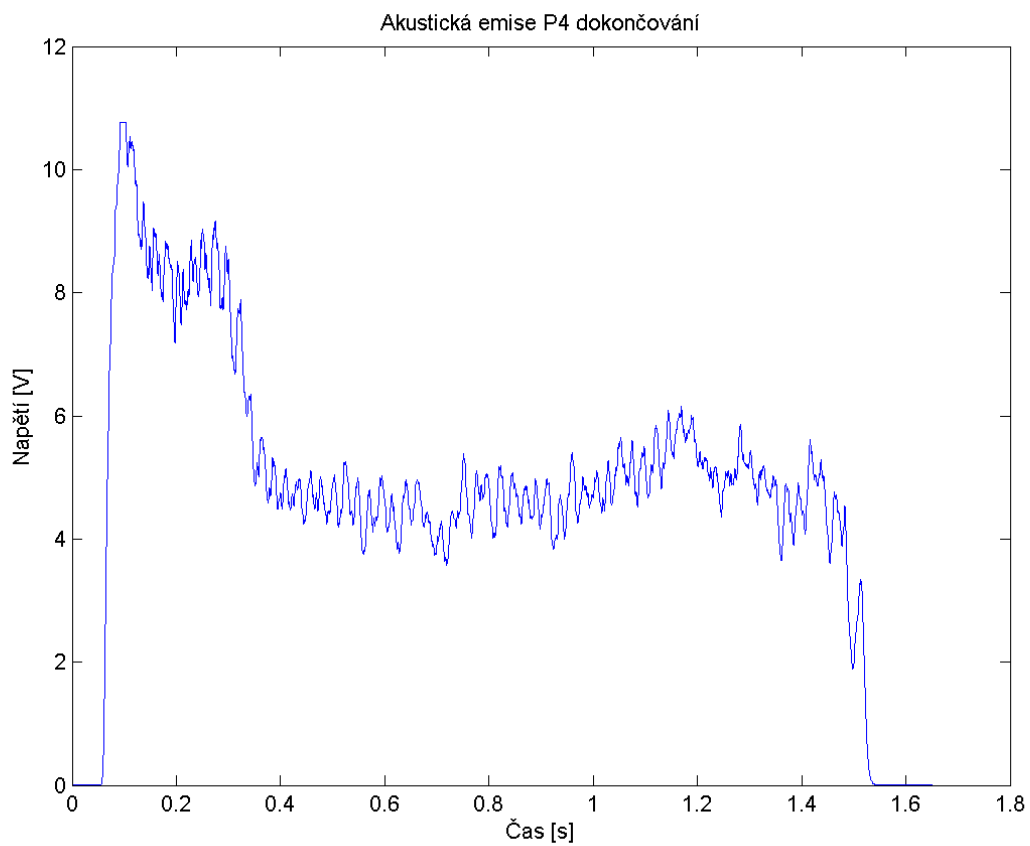
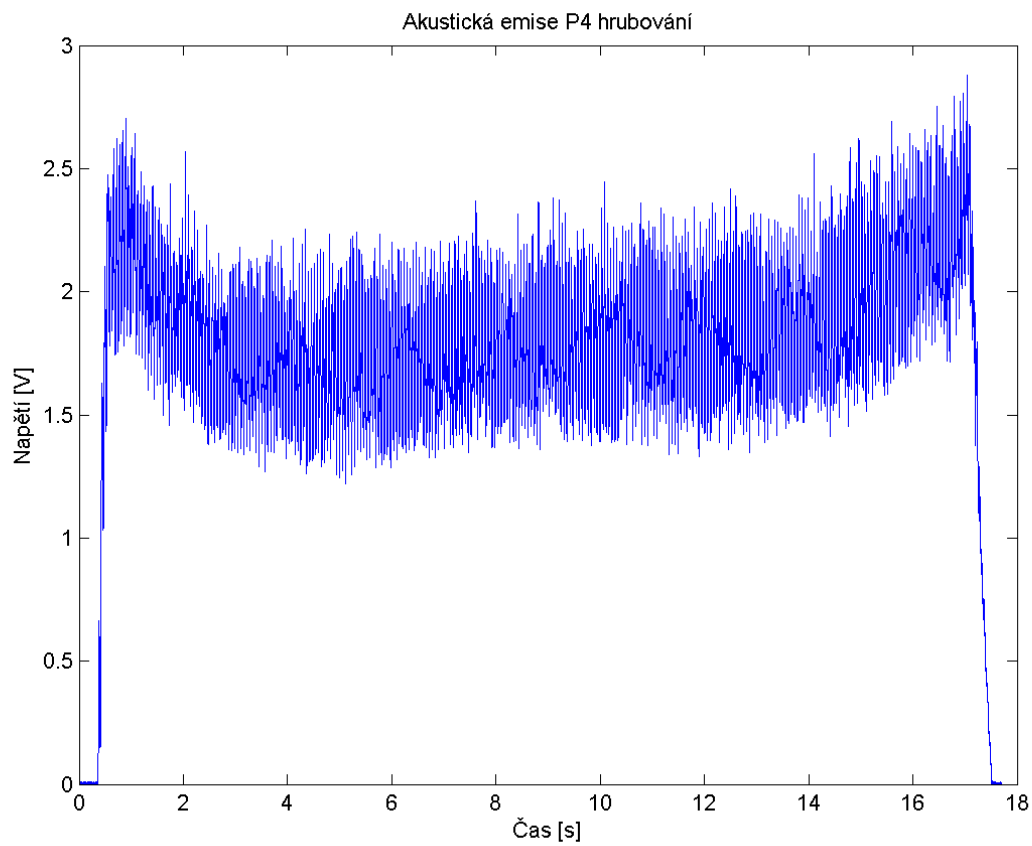
PŘÍLOHA č. 1

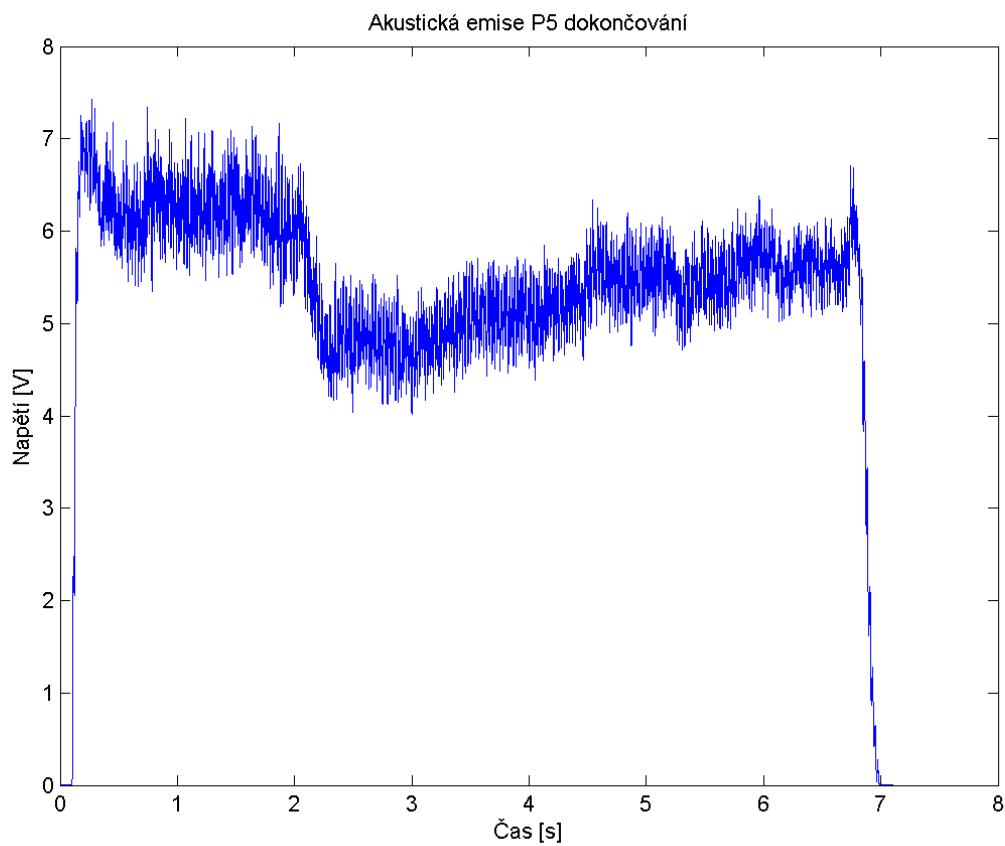
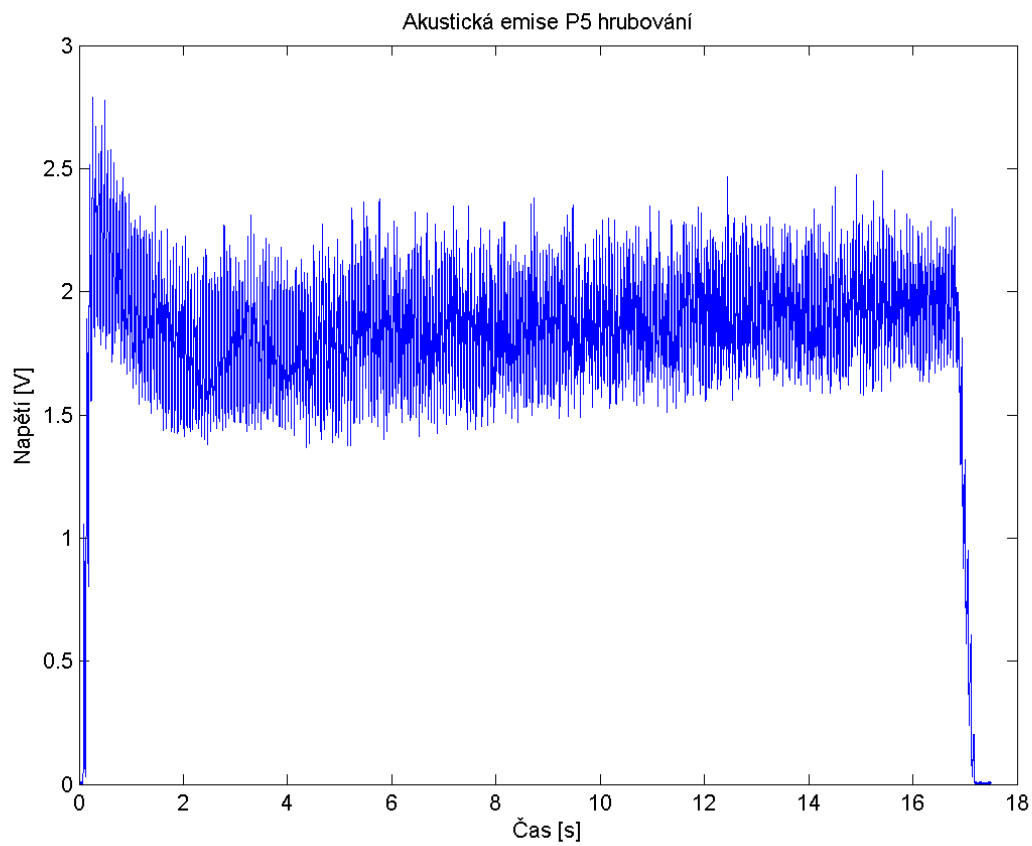
Výstupní signálu akustické emise

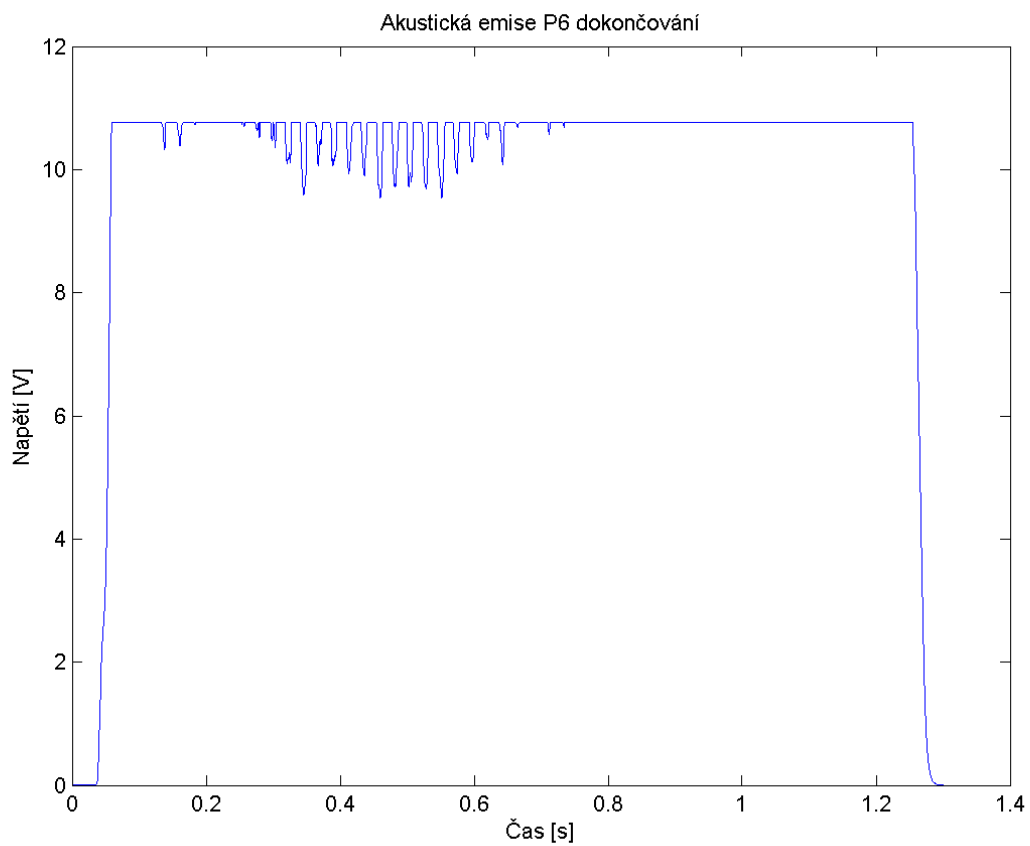
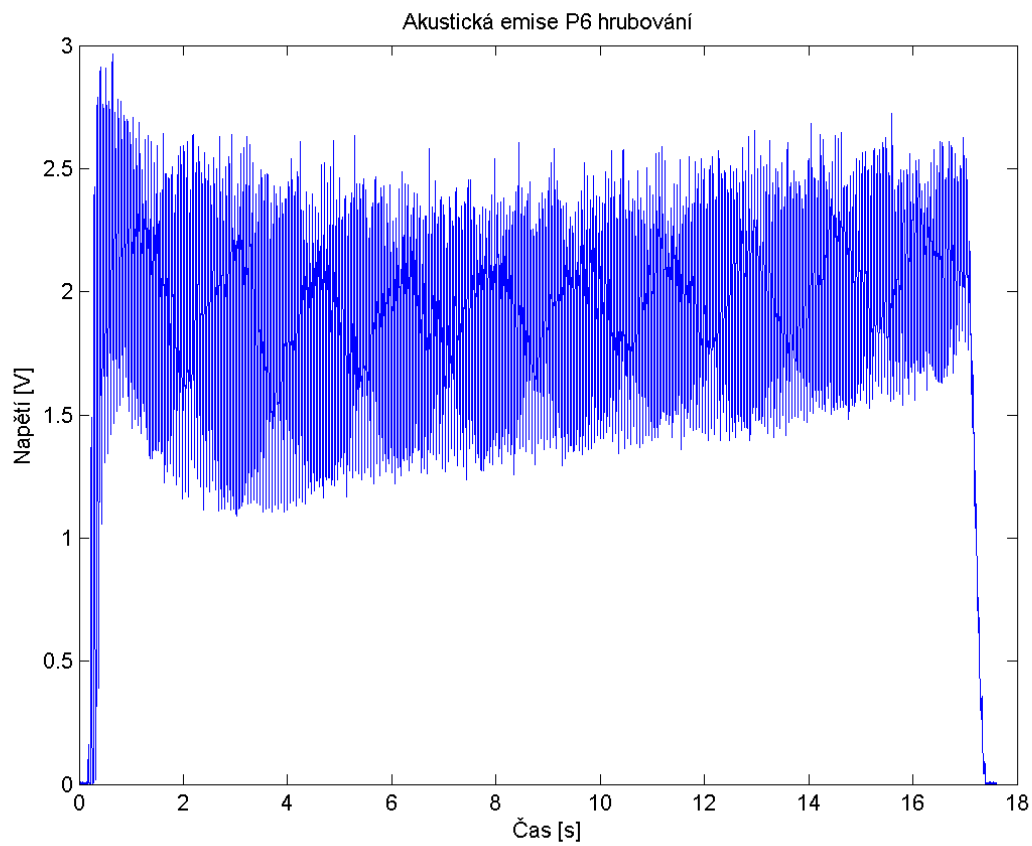


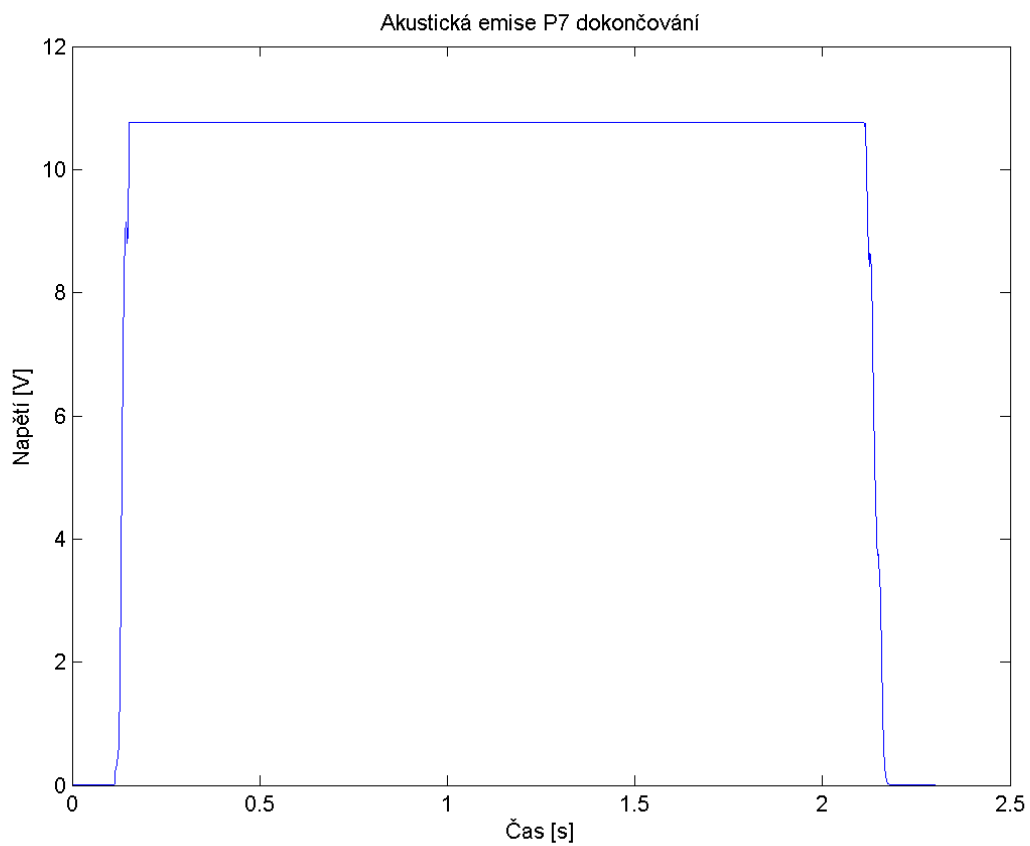
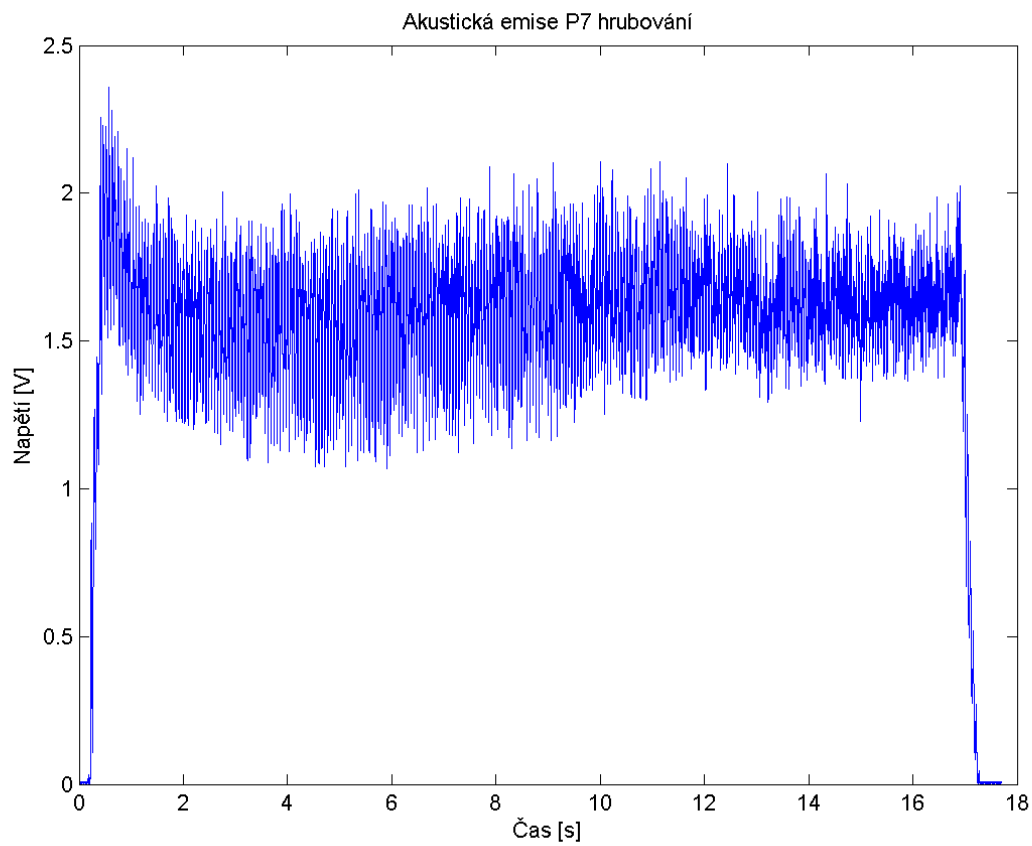


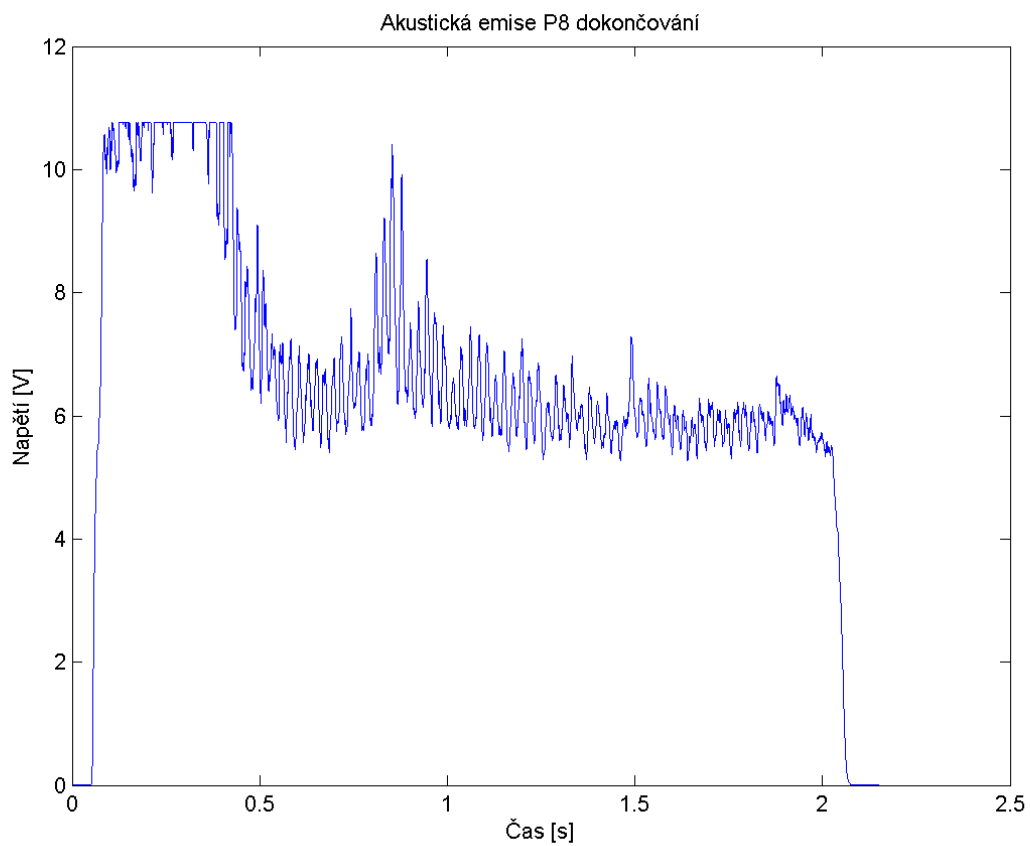
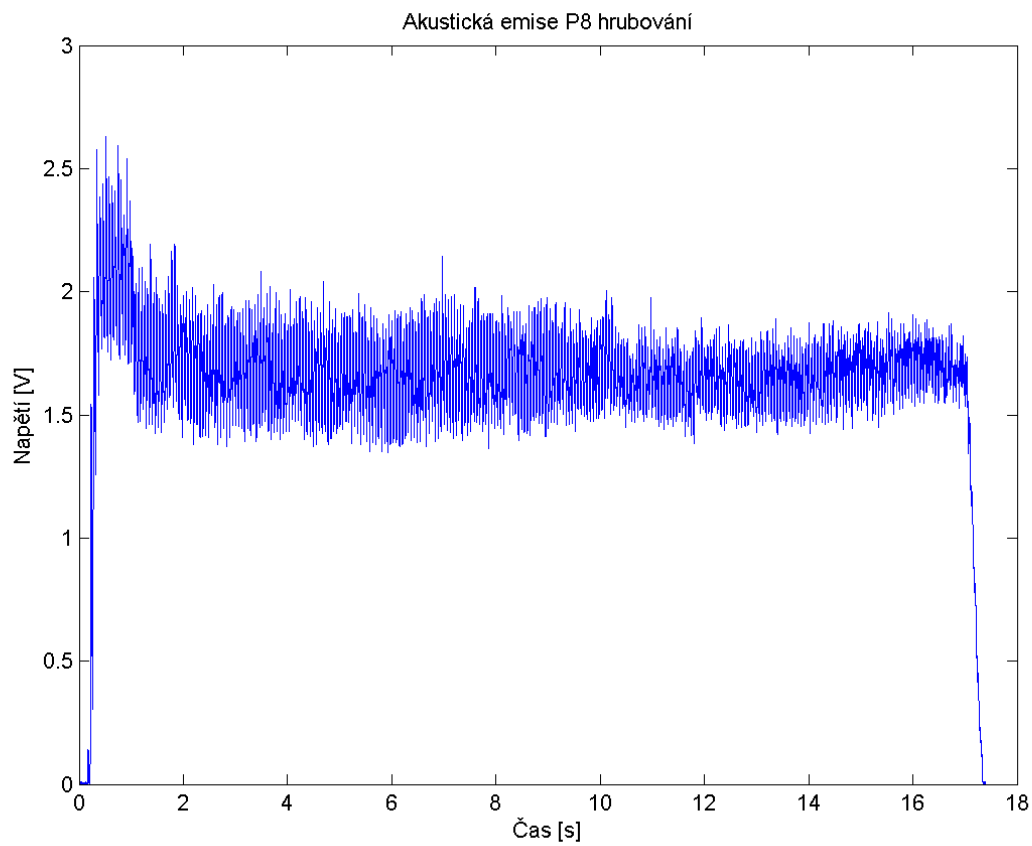


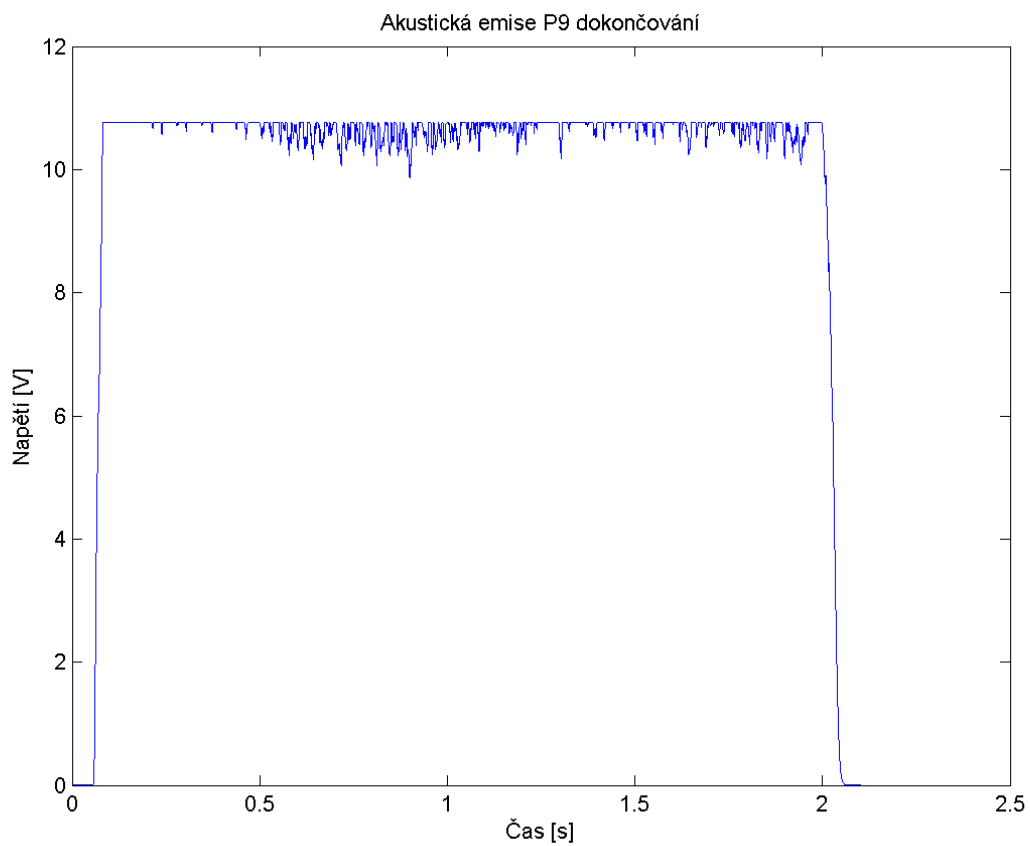
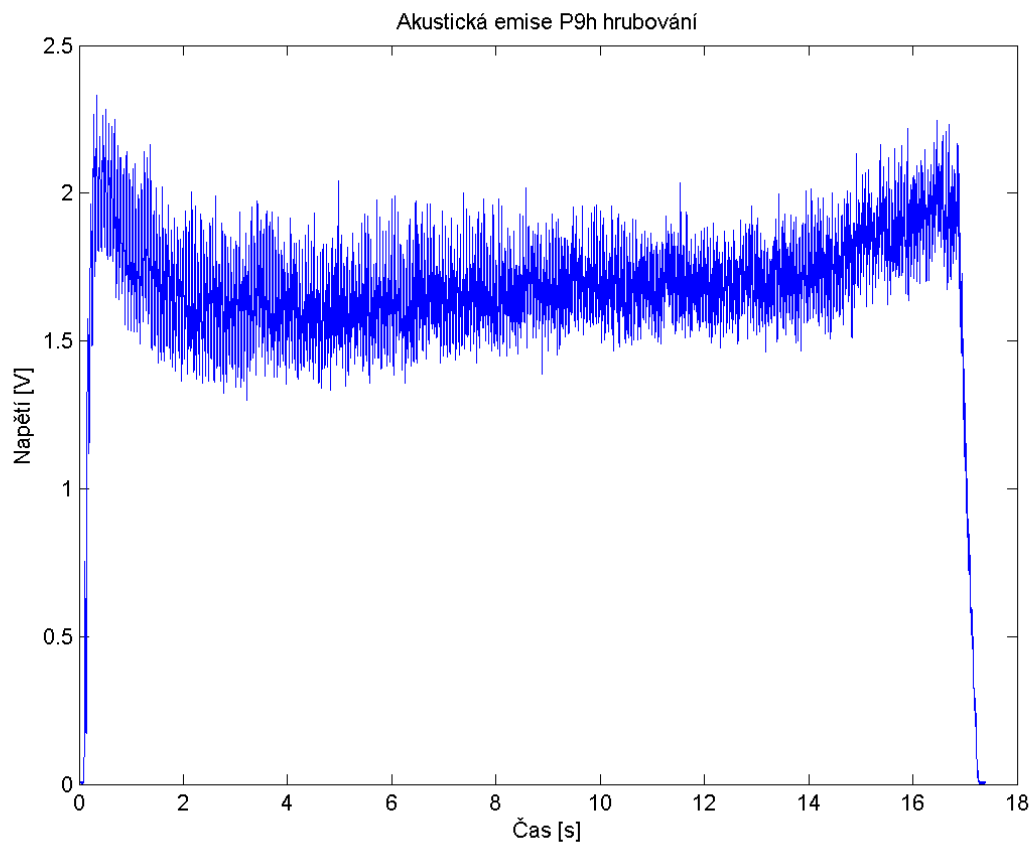


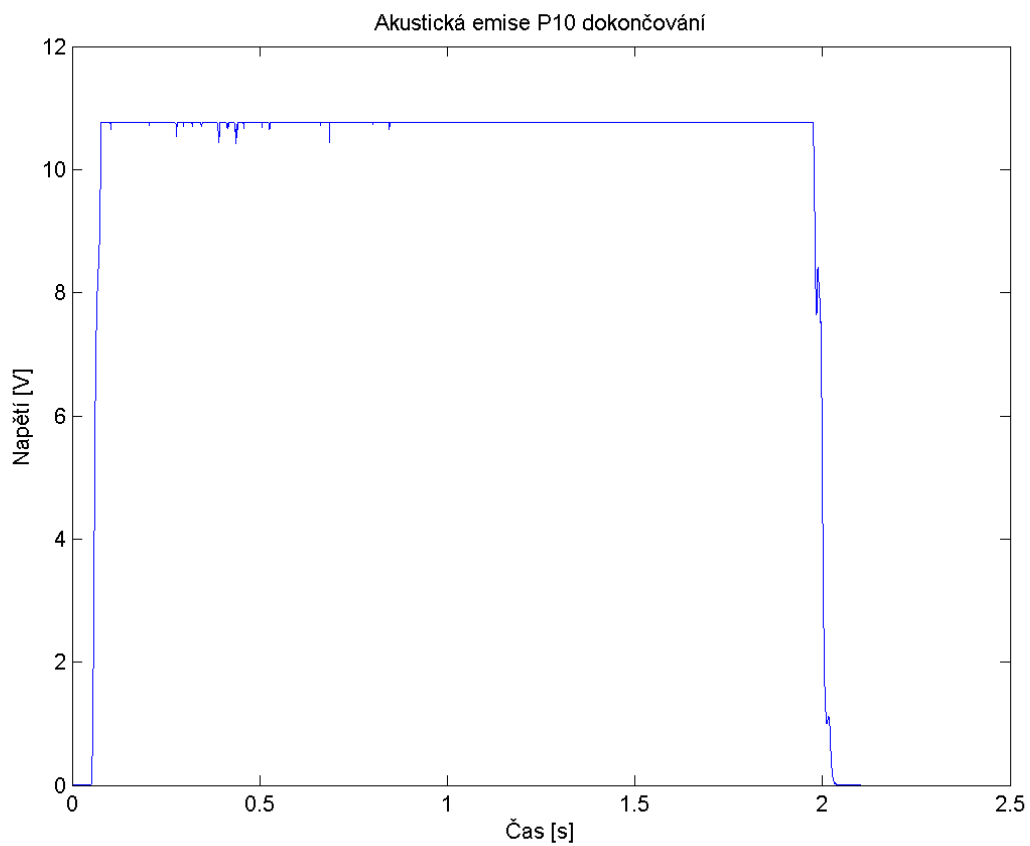
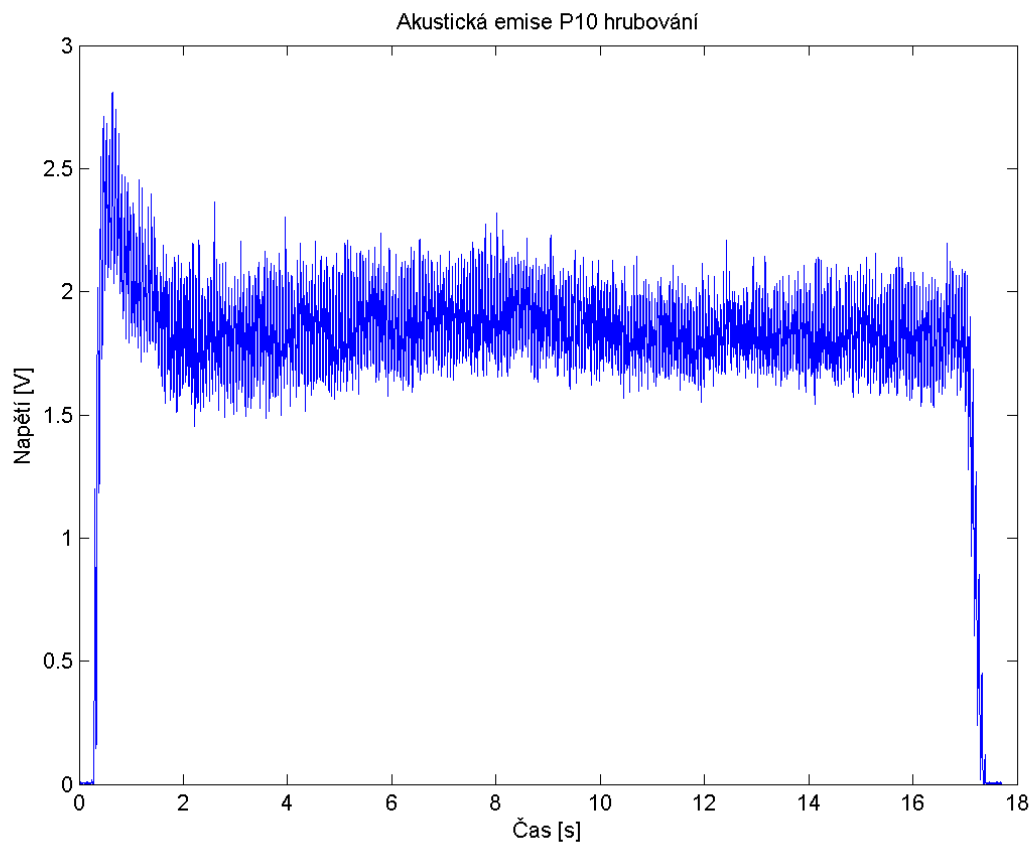


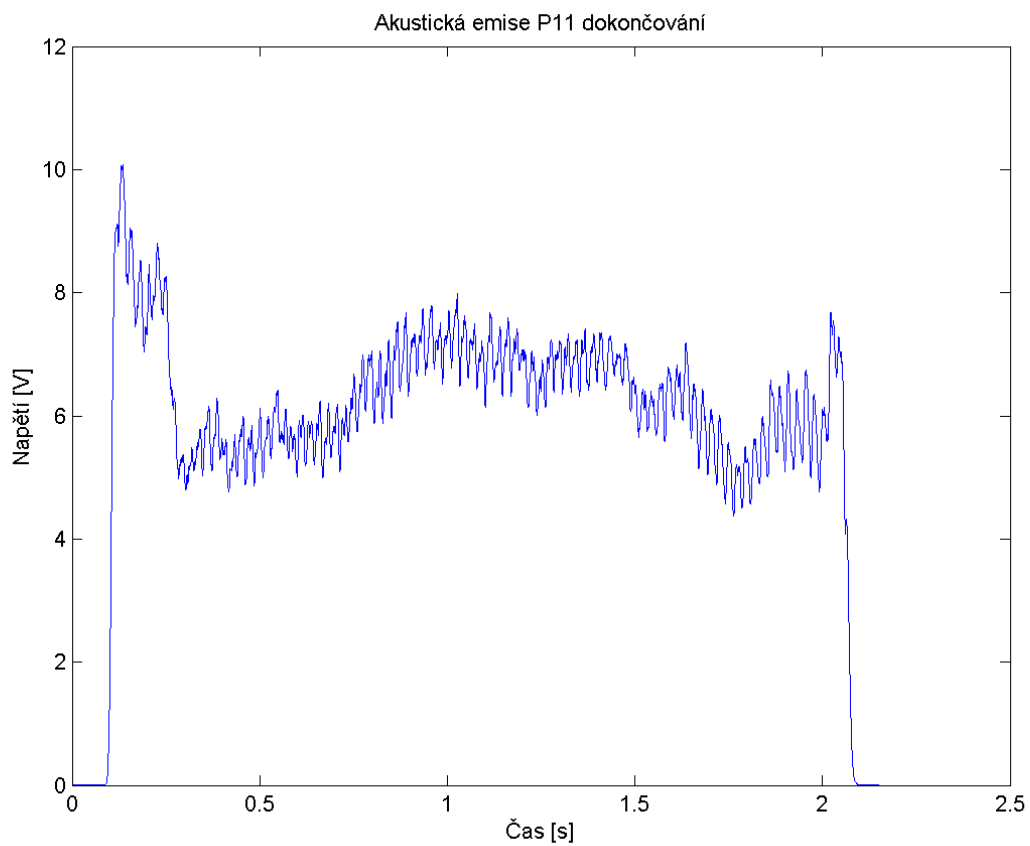
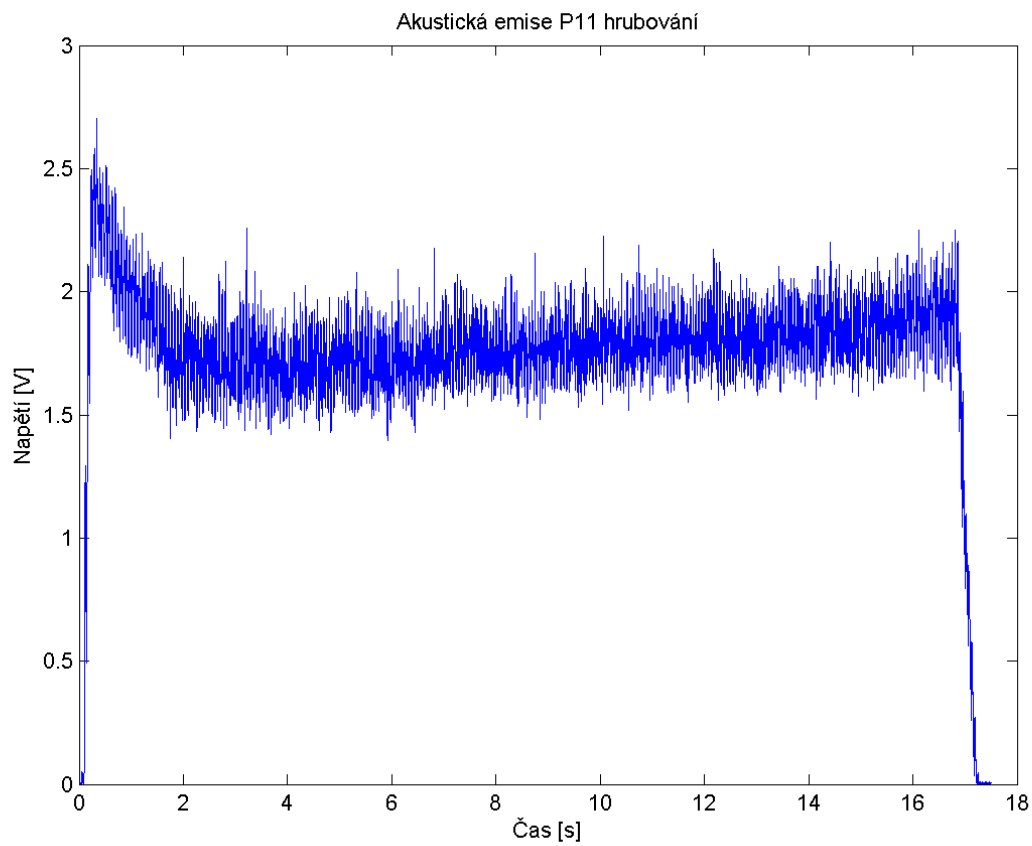


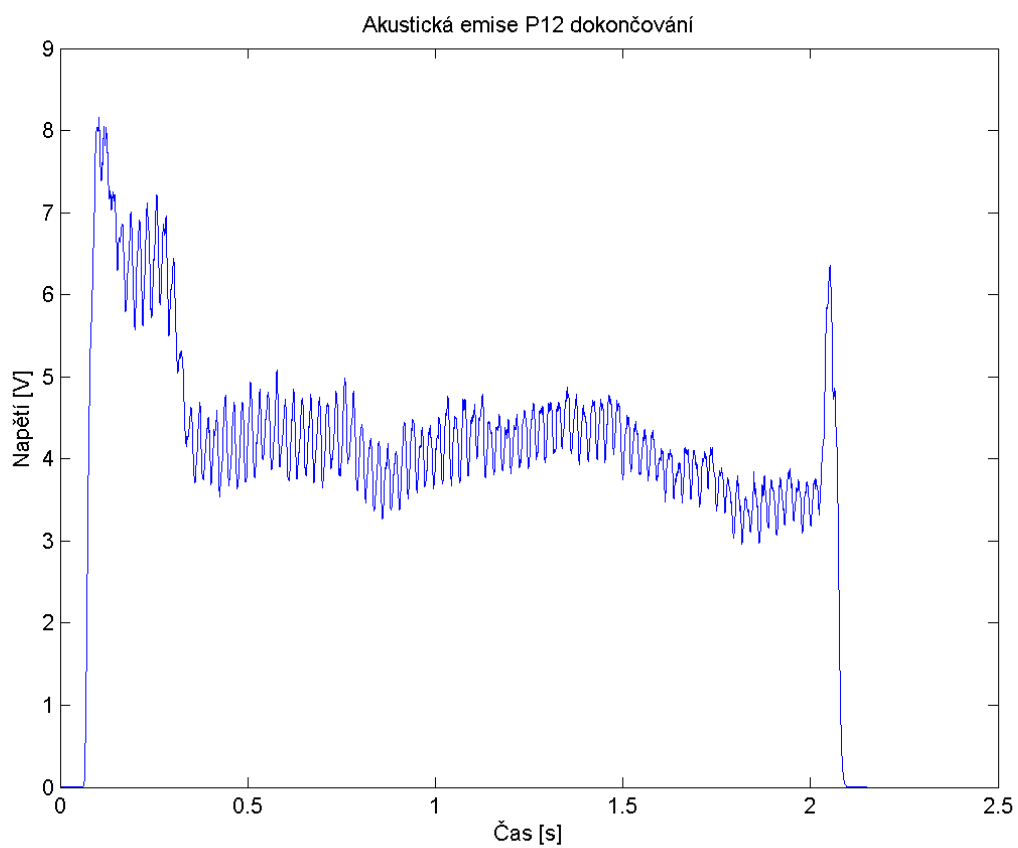
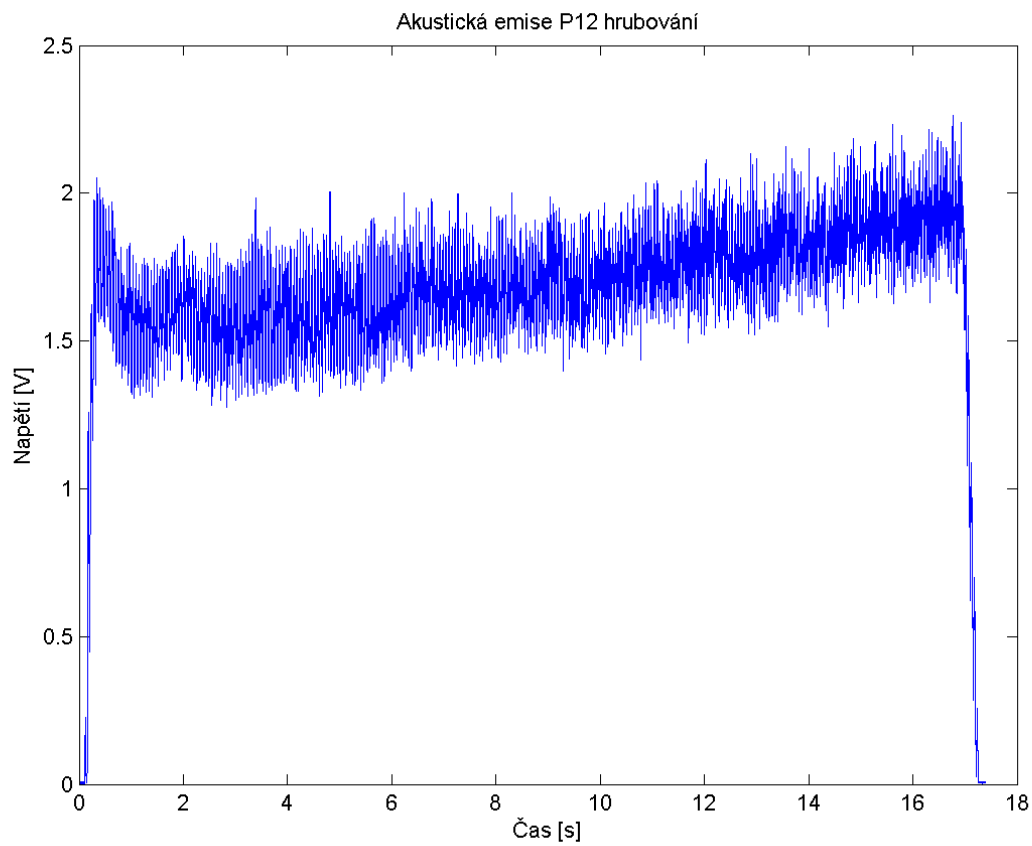


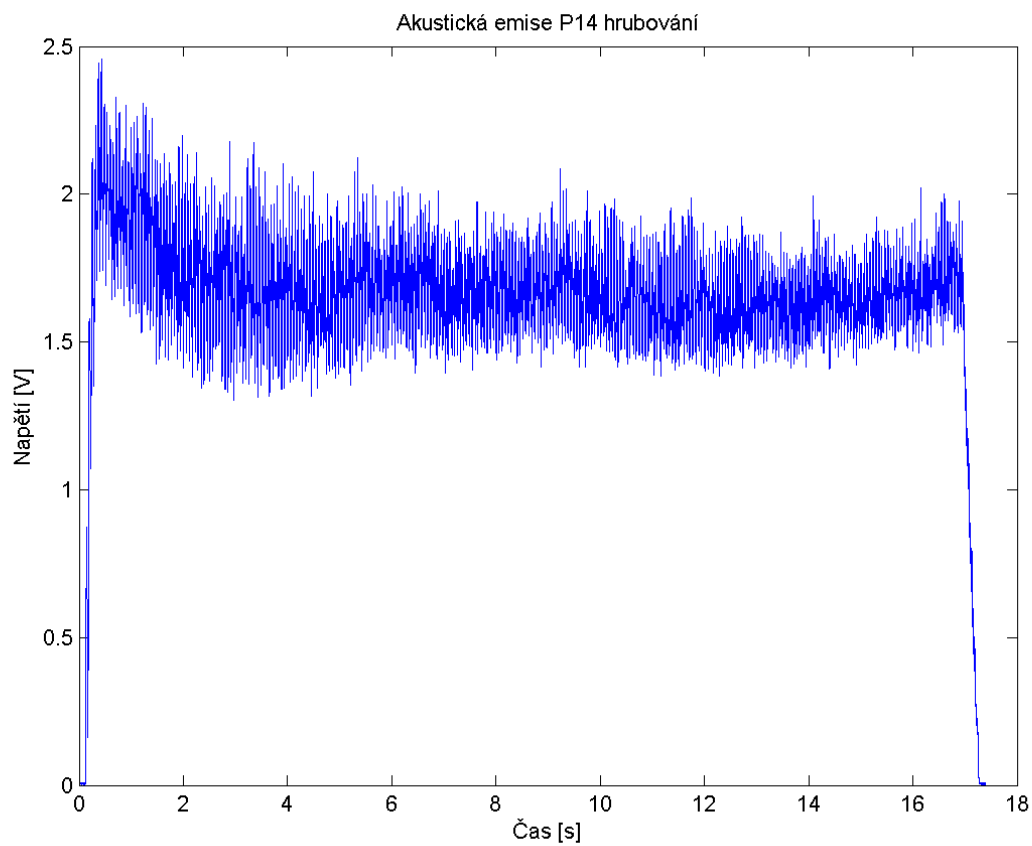
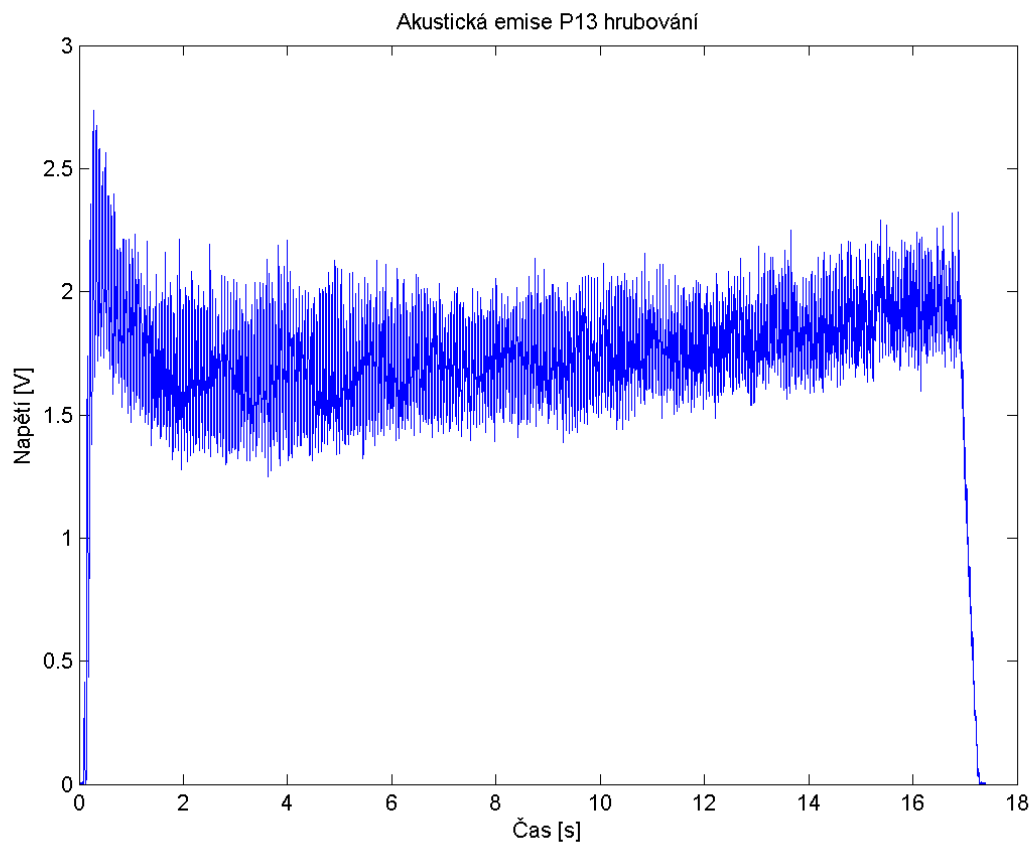


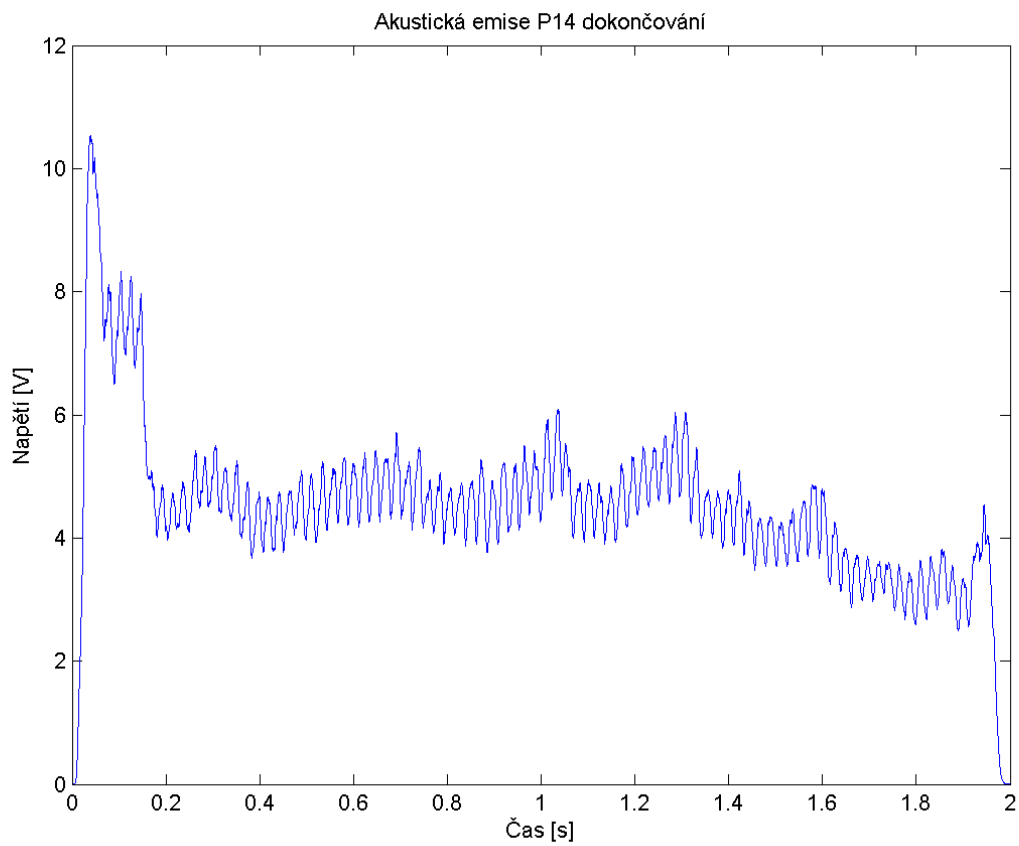






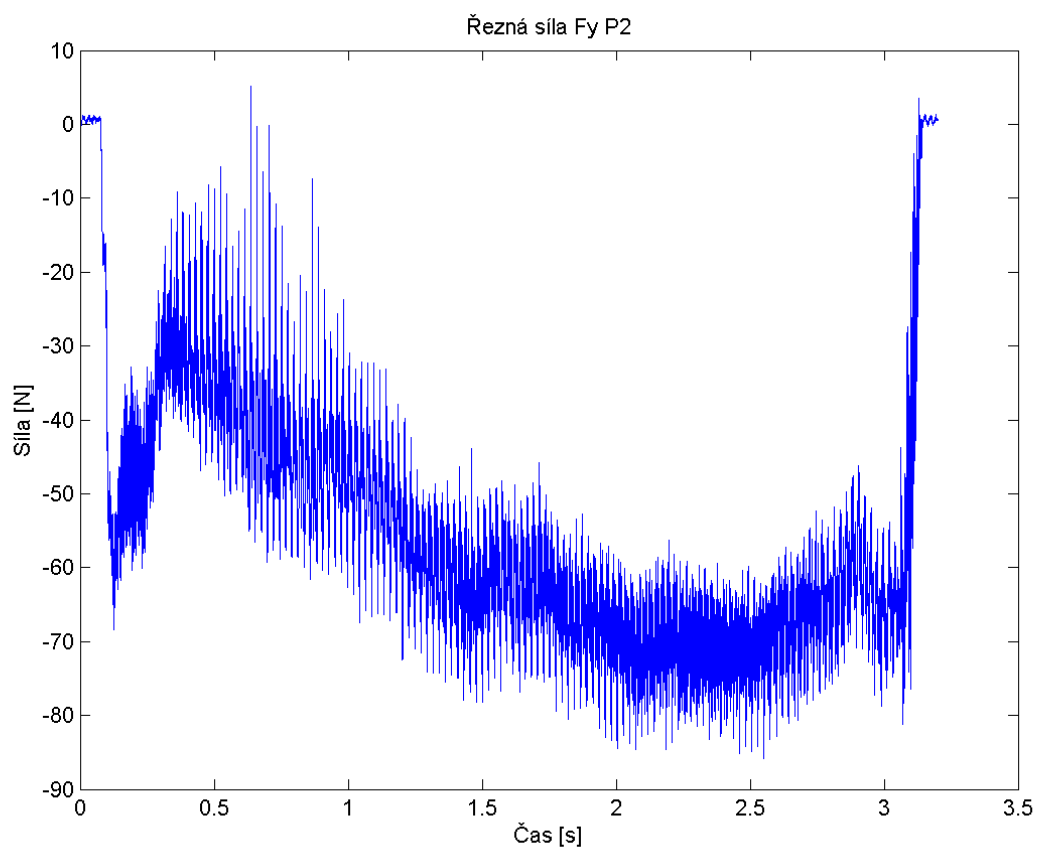
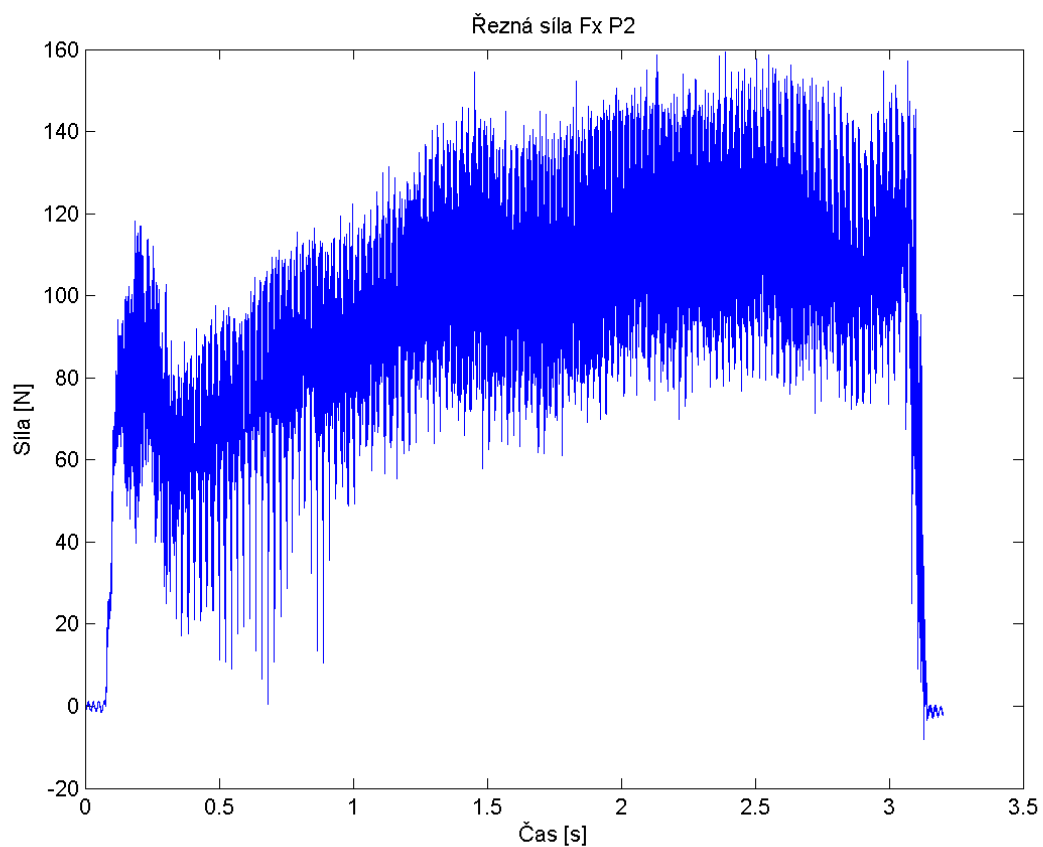


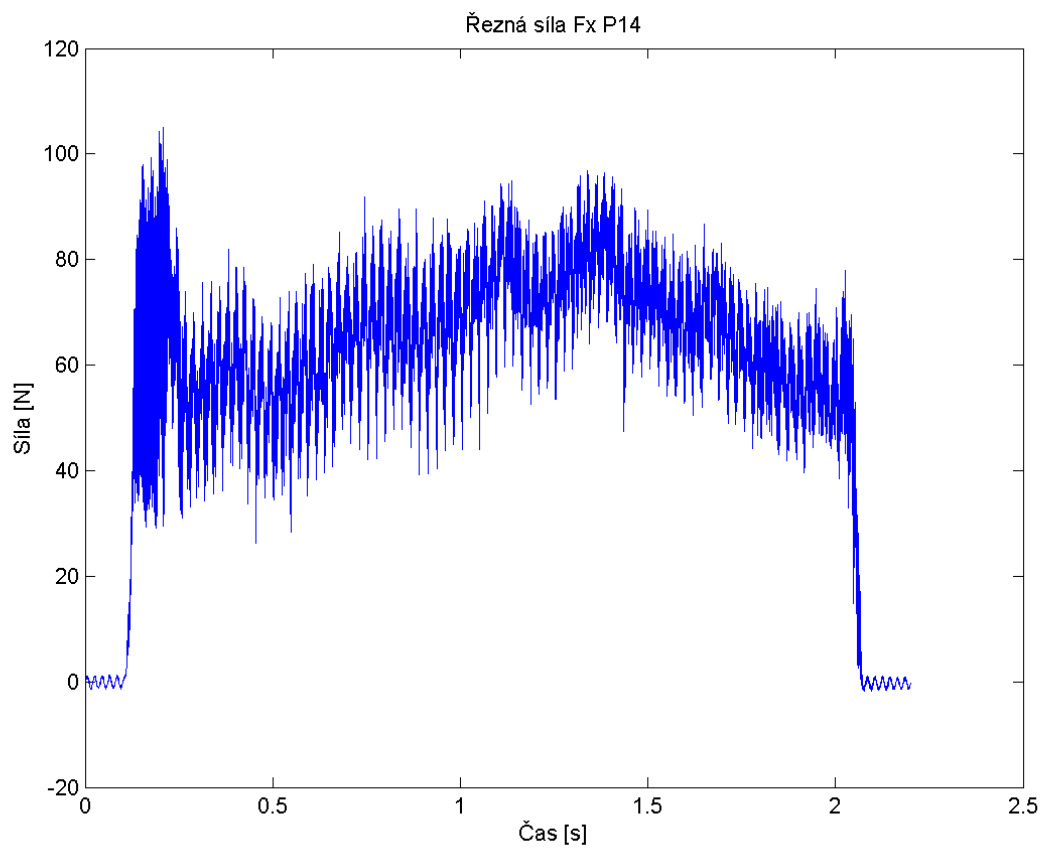
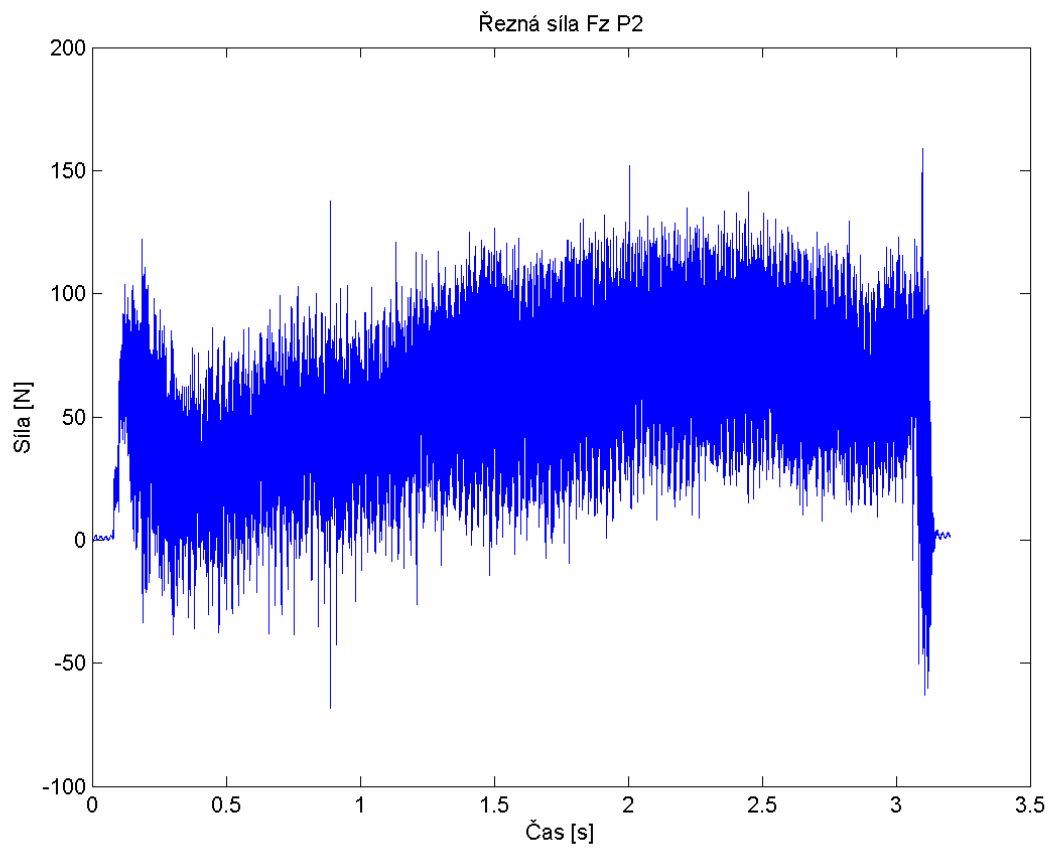


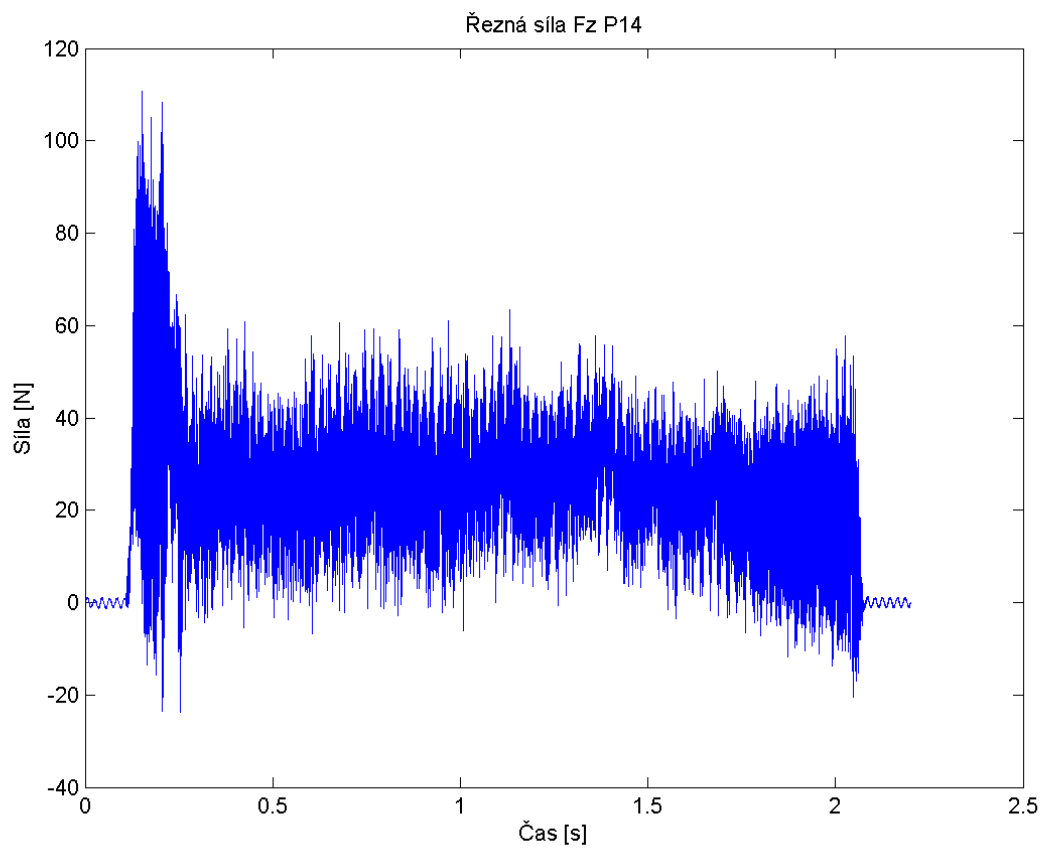
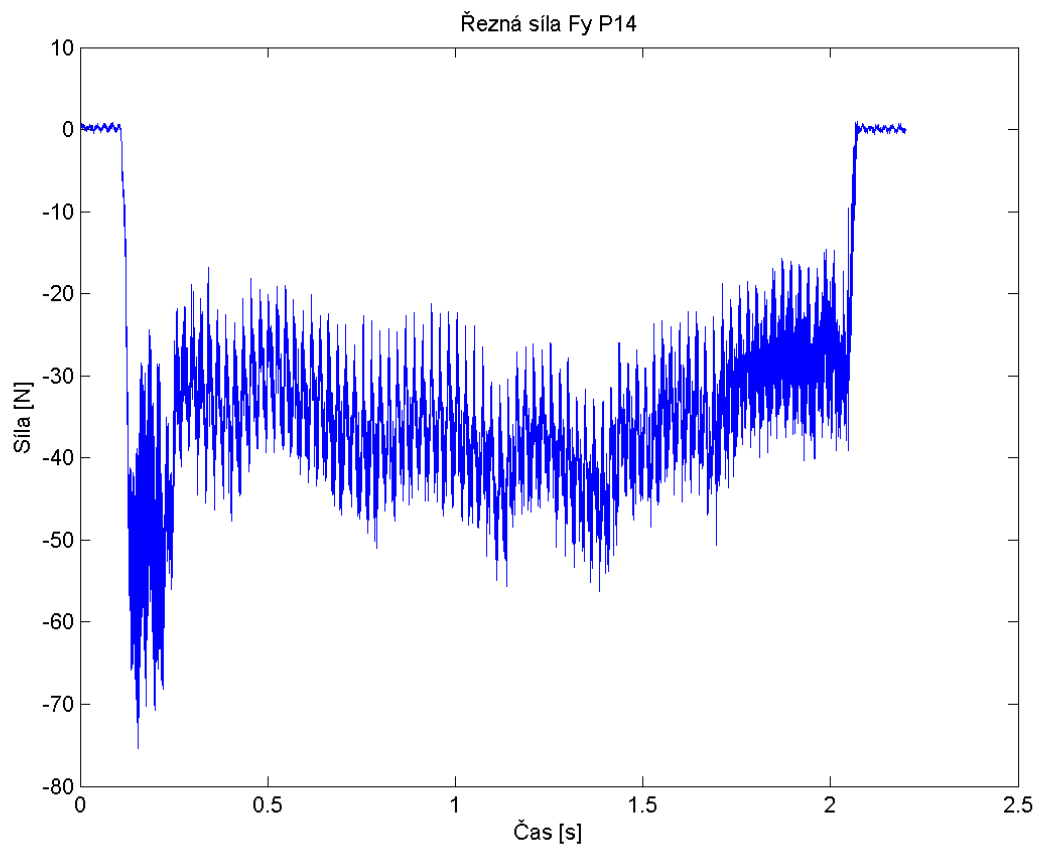


PŘÍLOHA č. 2

Vybrané řezné síly







PŘÍLOHA č. 3

Vybrané protokoly válcovitosti

PŘÍLOHA č. 4

Vybrané protokoly drsnosti povrchu

