

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2017

JIŘÍ DOSTÁL



Využití akustické emise při hodnocení procesu obrábění
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. et Ing. Petr Dostál, PhD.

Vypracoval:
Bc. Jiří Dostál

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci na téma **Využití akustické emise při hodnocení procesu obrábění** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně dne:.....

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. et Ing. Petru Dostálovi, Phd. za odborné vedení a cenné rady k mé diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Michalu Černému, CSc. za pomoc při analýze dat. Také děkuji mé rodině, mým přátelům za veškerou podporu po celou dobu mého studia.

ABSTRAKT

Práce se zabývá aplikací systému měření akustické emise na obráběcí proces. V práci je popsána podstata obrábění, je zde uveden vliv řezných podmínek na obráběcí proces a pozornost je věnována také používaným nástrojovým materiálům a tvorbě třísky. Další část se zabývá akustickou emisí, její základní charakteristikou a oblasti jejího využití. V experimentální části se je stanoven cíl měření, podrobně popsána metodika měření a následně vyhodnocena data získána při měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Obrábění, řezný materiál, akustická emise, monitoring obrábění

ABSTRACT

The thesis deals with the application of acoustic emission system to the machining process. The thesis describes the gist of the machining, the influence of the cutting conditions on the machining process, and attention is also focused to the used tooling materials and creation of sliver. Another part deals with acoustic emission, its basic characteristics and areas of its use. In the experimental part, is determine the measurement objective, is described there methodology of the measurement and the data obtained from the measurement is then evaluated.

KEYWORDS

Cutting, cutting material, acoustic emission, monitoring of cutting

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	CÍL PRÁCE	9
3	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU	10
3.1	Obrábění.....	11
3.2	Obráběcí nástroj	14
3.2.1	Geometrie obráběcího nástroje	15
3.3	Řezné podmínky při obrábění	16
3.3.1	Vliv řezné rychlosti.....	18
3.3.2	Vliv rychlosti posuvu	18
3.4	Opotřebení břitu	19
3.4.1	Druhy opotřebení	20
3.5	Nástrojové materiály	21
3.6	Analýza silového zatížení řezného nástroje	23
3.7	Tvorba třísky a obrobitelnost materiálu	24
3.8	Monitorování obráběcího procesu.....	28
4	TEORIE AKUSTICKÉ EMISE	29
4.1	Základní charakteristika AE.....	29
4.2	Spojité AE	31
4.3	Nespojitá AE	32
4.4	Zdroje AE.....	32
4.5	Kaiserův jev	32
4.6	Snímače akustické emise.....	33
4.7	Předzesilovače ke snímačům AE	36
4.8	Vyhodnocování akustické emise.....	37
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
5.1	Cíl měření.....	38
5.2	Metodika měření	38
5.3	Záznamy z akustické emise.....	43
5.4	Analýza záznamů akustické emise	46
6	DISKUZE	47
	ZÁVĚR	49
	POUŽITÁ LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	54
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	56
PŘÍLOHY	58

1 ÚVOD

V dnešní době se většina strojírenských podniků zabývá zvýšením produktivity obráběcích procesů a také snížením nároků na obsluhu. Proto je velice důležité volit vhodný monitorovací systém, kterým se předejde výrobě vadných kusů. Princip monitorování obráběcího procesu je založen na sledování nebo měření vybraných veličin či jejich kombinaci.

Již v počátcích používání obráběcích technologií, byl zvuk jedním z hlavních ukazatelů, zda řezný proces probíhá v pořádku. V budoucnu by bylo možné zvukovou analýzu využít např. při adaptivním řízení stroje. Zvukovou analýzou lze identifikovat nadměrné opotřebení nástroje nebo vibrace, které jsou při obráběcím procesu nežádoucí. Monitorovací technika se neustále miniaturizuje a díky tomu se stále více využívají systémy online monitoringu, díky kterým lze snížit rizika poškození stroje nebo vznik vadných výrobků.

V kontrole a řízení jakosti výroby hraje zcela nezastupitelnou úlohu nedestruktivní kontrola. Zpočátku byly nejvíce využívány čtyři základní metody - prozařování, ultrazvuk, kapilární a magnetické metody. V dnešní době se stále více zavádějí nové metody zkoušení - neutronová radiografie, termografické metody, holografické zobrazovací systémy, metody magnetické rezonance, tomografie aj. Dále jsou zdokonalovány metody a systémy vyhodnocování, zejména s využitím výpočetní techniky. Jednou z velmi rychle se rozvíjejících metod, zařazených do skupiny nedestruktivních zkoušek, je technika snímání tzv. akustické emise (mmspektrum.com).

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce na téma „Využití akustické emise při hodnocení procesu obrábění“ je verifikace akustické emise jako monitorovacího systému při kovoobrábění. Hlavním cílem v této oblasti výzkumu je nalézt vhodný monitorovací systém, který by poskytl komplexní informace o obráběcím procesu, které by umožnily včas reagovat na změnu při obrábění.

Cílem teoretické části je poskytnout teoretický základ v oblasti obrábění a akustické emise.

Cílem experimentální části je aplikovat systém akustické emise na obráběcí proces, za účelem monitoringu tohoto procesu s následným možným využitím z hlediska optimalizace obrábění.

3 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

V současnosti se klade velký důraz na přesnost a produktivnost obráběcích technologií. Podstatná část vývoje v oblasti třískového obrábění se datuje až do období průmyslové revoluce. Během 20. století vstoupily do třískového obrábění prvky řízení a automatizace. Důležitým pokrokem v této oblasti bylo zavedení řídicích systémů na bázi CNC.

V dnešní době se obrábění zaměřuje na využití multifunkčních obráběcích center, díky kterým lze výrobek zhotovit za pomoci co nejméně pracovních operací. Dalším faktorem, který snižuje náklady je automatizace procesů. Ta se v současnosti stále více uplatňuje vlivem obecného nedostatku kvalifikovaných pracovních sil.

Za účelem zvýšení výrobní produktivity se pozornost výrobců strojů soustřeďuje na možnosti propojení technologií. Výsledkem je rozšíření výrobních možností stroje nebo přizpůsobení jeho konstrukce pro jednoduché vestavění do linky s různou konfigurací strojů a systémů automatické výměny nástrojů a obrobků. Díky tomu existuje široká nabídka pětiosých frézovacích center s možností plnohodnotného soustružení i soustružnických center vybavených frézovacími vřeteny. Tato centra jsou prezentována jako univerzální stroje pro výrobu nejširšího spektra výrobků. Další možností zvýšení produktivity je orientace na optimalizaci řezného procesu (mmspektrum.com).

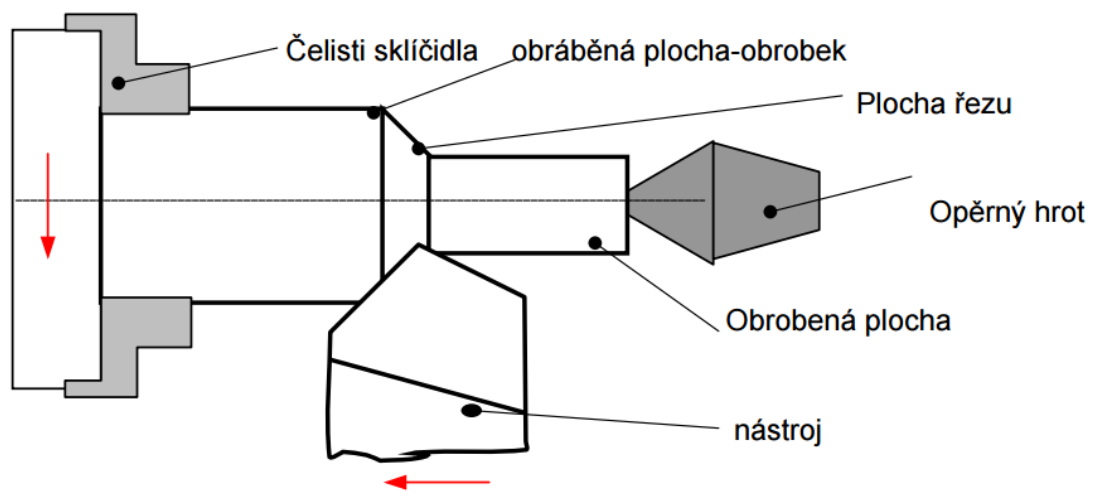
Náklady na výrobní zařízení neustále rostou. Tato zařízení musí pracovat spolehlivě, aby se umožnilo jejich ekonomicky rentabilní využití. Díky vysoké spolehlivosti výrobního zařízení vybaveného vhodným monitorovacím systémem je možné dosáhnout výrazného zvýšení efektivního výrobního času, a to až o 65 % ve srovnání s obráběním bez tohoto systému (mmspektrum.com).

Moderní monitorovací systémy slouží k sledování měřených charakteristik obráběcího procesu, dále tyto data shromažďují a vyhodnocují. Díky tomu lze zpětně řídit obráběcí proces úpravou řezných podmínek např. řeznou rychlostí, posuvem či přísunem chladícího media.

3.1 Obrábění

Obráběním se rozumí technologický proces, kterým se dosahuje daného tvaru obrobku odebráním materiálu za pomoci různých nástrojů a metod.

Obráběním dochází k oddělování částic materiálu obrobku. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem jsou příslušné obrobené plochy (Kocman, 2011).



Obr. č. 1 Obráběcí soustava stroj-nástroj-obrobek (Kocman, 2011)

Obráběcí proces je realizován v obráběcím systému, kterým obecně členit na subsystemy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Soustava obrábění se skládá z obráběcího stroje, řezného nástroje, obrobku, a přípravku (Humár, 2008).

Rozlišujeme třískové a beztřískové metody obrábění. Následující tabulka zobrazuje vybrané typy třískového a beztřískového obrábění.

Tabulka 1 Vybrané typy metod obrábění

Třískové metody	Beztrískové metody
Soustružení	Obrábění ultrazvukem
Frézování	Obrábění vodním paprskem
Vrtání, vyvrtávání	Chemické obrábění
Protahování	Elektrochemické obrábění
Protlačování	Obrábění laserem
Hoblování	Elektrijiskrové obrábění

V současnosti se nejvíce uplatňují CNC (computer numeric control) obráběcí stroje. Za použití PC a příslušných softwarů se opakované činnosti provádí rychle, přesně a spolehlivě. CNC obráběcí centrum je v podstatě jedním strojem, který zahrnuje rozličné technologie výroby (Štulpa, 2006).

Tabulka 2 Obráběcí stroje

Obráběcí centra					
Obráběcí centra pro rotační obrobky			Obráběcí centra pro skříňové obrobky		
broušení rotačních ploch	soustružení	frézování a vrtání	vyvrtávání	broušení rovinných ploch	
Jednoprofesní stroje					
CNC brusky na rotačních ploch	CNC soustruhy	CNC frézky	CNC vrtačky	CNC vyvrtávačky	CNC brusky rovinné

V tabulce je znázorněno rozdělení obráběcích strojů. Dnešní podniky kladou důraz na ekonomiku provozu, již při vývoji se berou v úvahu ekonomické požadavky, které vyvolávají technologické požadavky a vedou ke konstrukci, koncepci stroje s progresivní výrobní technologií (Štulpa, 2006).

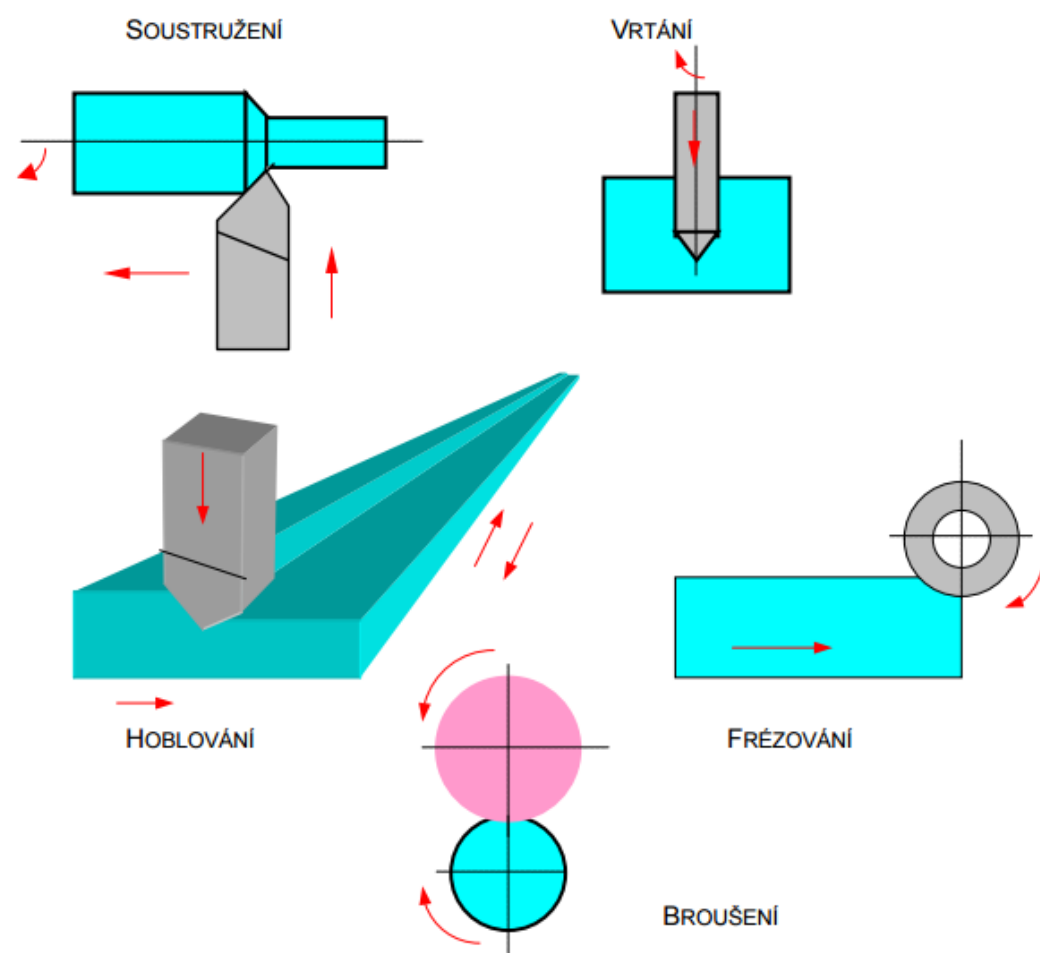
Multifunkční obráběcí centra mají mnoho výhod. Umožňují opracování složitých součástí, to vede k úspoře půdorysných ploch v hale atd. Představují originální řešení nové generace. Jsou určeny pro komplexní obrábění rozměrných, tvarově a technologicky náročných, těžko obrobitelných dílců s vysokou hmotností a z velmi rozdílných materiálů, které vyžadují kombinaci technologických operací z oblasti výkonového frézování a soustružení, případně broušení. Soustružnické a frézovací obráběcí centrum má v základním provedení čtyři řízené osy: osu X (podélný pojezd příčnicku), osu Y (příčný pojezd saní), osu Z (svislý pojezd smykadla) a osu C (rotační osa upínací desky). Otočná frézovací hlava s kývavým pohybem v ose B rozšiřuje počet řízených os na 5 (tajmac-zps.cz).



Obr. č. 2 Multifunkční obráběcí centrum firmy Tajmac MCV 2318 (tajmac-zps.cz)

3.2 Obráběcí nástroj

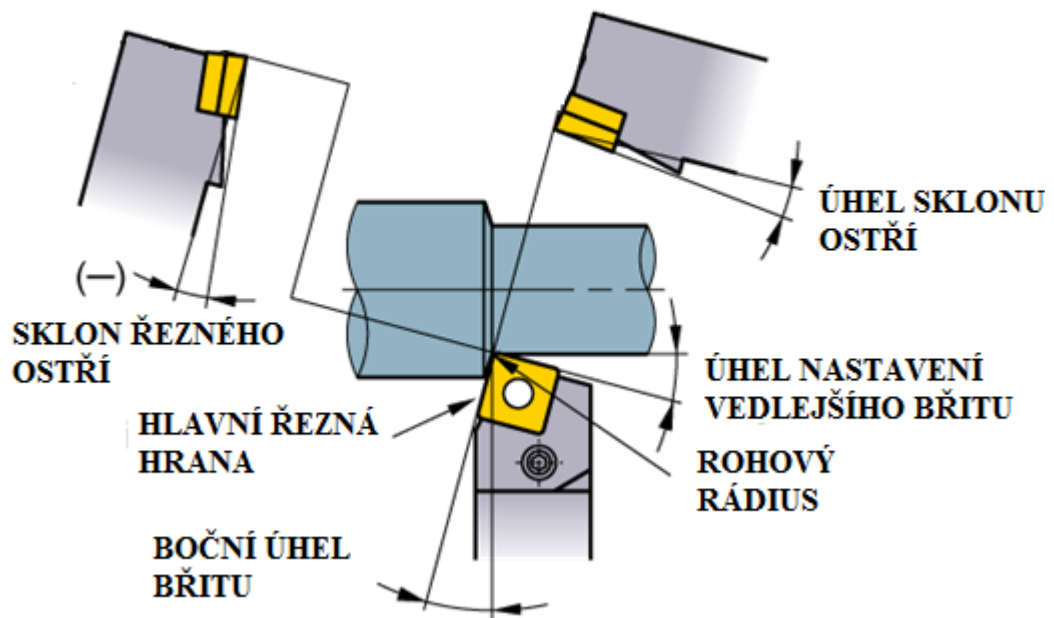
Řezný pohyb vzniká vzájemným působením obrobku a nástroje. Uskutečňuje se určitou rychlostí po určité dráze. Obráběcí nástroje se dodávají v širokém sortimentu tvarů, rozměrů i materiálů. Nejvíce se používají břitové destičky, zejména povlakované, ale i nepovlakované. Podmínkou efektivního použití obráběcího nástroje, tzn. dosažení maximálního řezného výkonu při řešení konkrétních technologických problémů, jsou spolehlivé podklady. Ty umožňují dosažení tohoto cíle za vynaložení minimálních nákladů na obrábění (isstechn.cz).



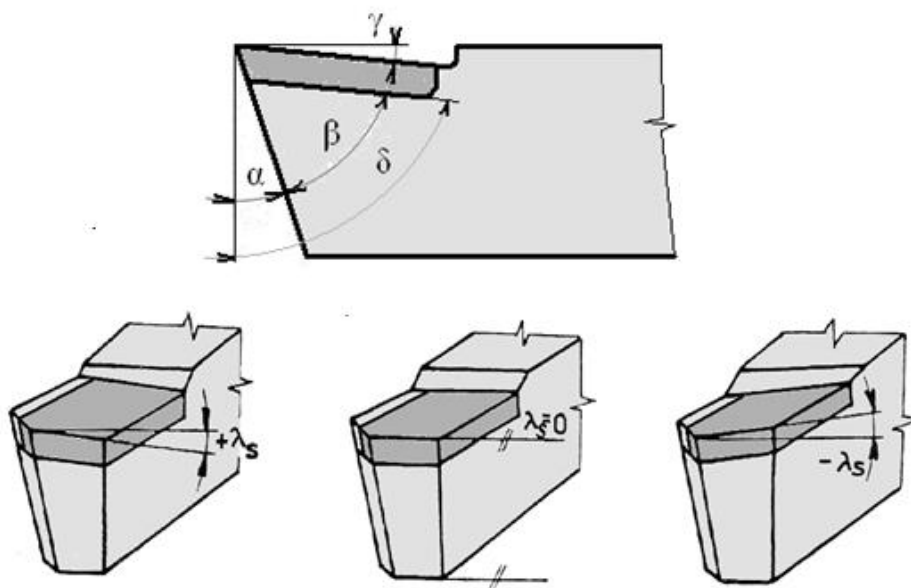
Obr. č. 3 Pohyb nástroje a obrobku u vybraných typů třískového obrábění (coptel.coptkm.cz)

3.2.1 Geometrie obráběcího nástroje

Geometrie břítu se definuje z hlediska geometrického tvaru, jako jsou nástrojové řezné úhly (mitsubishicarbide.com).



Obr. č. 4 Řezné úhly nástroje (mitsubishicarbide.com)



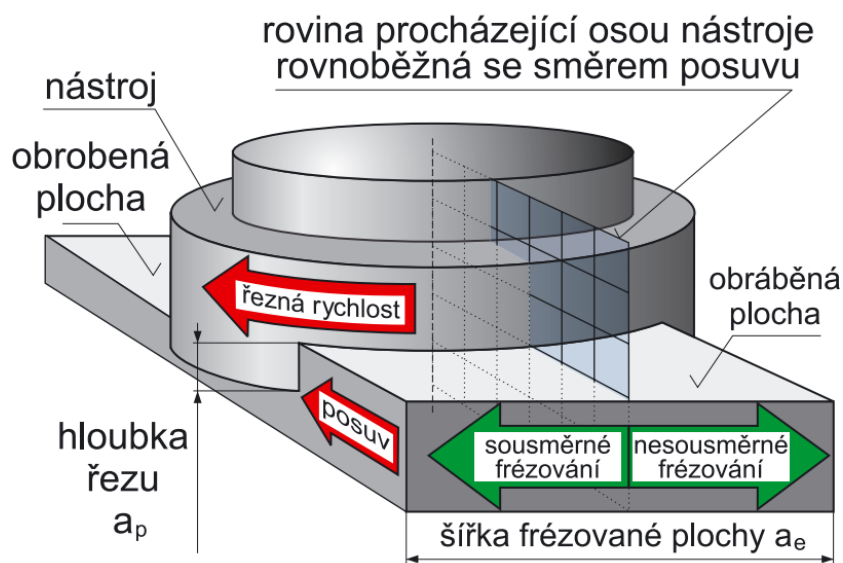
Obr. č. 5 Řezné úhly nástroje (coptel.coptkm.cz)

- **Úhel špičky ϵ_r** - je vymezen hlavním a vedlejším ostřím
- **Úhel nastavení hlavního ostří χ_r** - svírá hlavní ostří s osou obrábění. Má vliv na tvar třísky a její tloušťku
- **Úhel nastavení vedlejšího ostří χ_r'** - je to úhel, který svírá vedlejší ostří se směrem posuvu nástroje, ovlivňuje drsnost obrobené plochy
- **Úhel čela γ_0** - ovlivňuje odchod třísky. Po čelní ploše odchází tříska
- **Úhel hřbetu α_0** - Pohybuje se v rozmezí od $+3^\circ$ do $+12^\circ$, jeho velikostí se ovlivňuje tření, nesmí být však 0°
- **Úhel břitu β_0** - úhel vnikající do obrobku, je omezen rovinou hřbetu a čela. Je základním úhlem všech řezných nástrojů, pohybuje se v rozmezí $40^\circ - 90^\circ$
- **Úhel řezu δ_0 ($\alpha_0 + \beta_0$)** – Jedná se úhel doplňkový, jeho velikost se pohybuje v rozmezí $40^\circ - 105^\circ$
- **Úhel sklonu hlavního ostří λ_s** – ovlivňuje odchod třísky, směrem k obrobku nebo od obrobku (mitsubishicarbide.com, coptel.coptkm.cz).

3.3 Řezné podmínky při obrábění

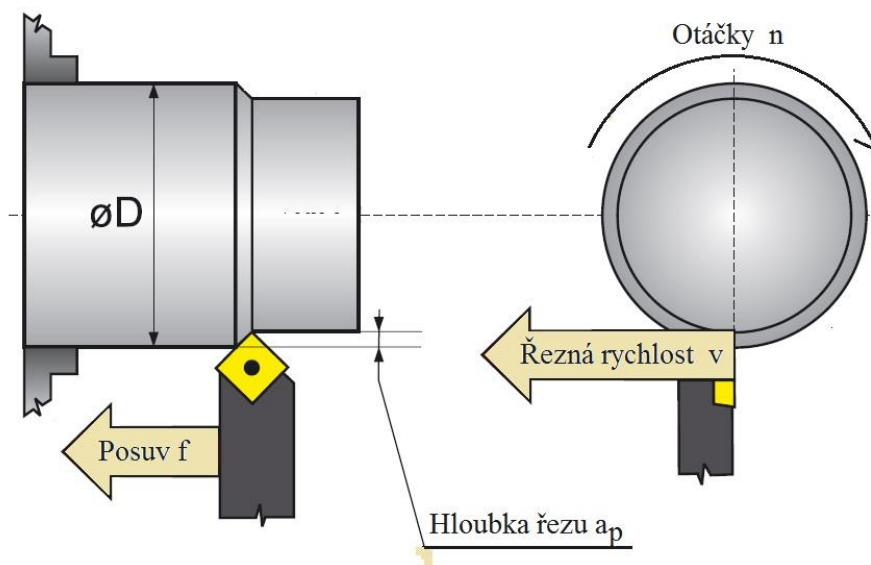
Při použití nástrojů ve strojírenské praxi se setkáme s širokou škálou obráběných materiálů. Obráběcí nástroje pracují za rozmanitých záběrových podmínek, např. jemné obrábění, dokončovací obrábění a těžké hrubování (isstechn.cz).

Základní otázkou je vždy hlavní cíl operace. Cílem může být produktivita, nebo celková kvalita tzn. minimální zmetkovitost. Současné požadavky na obráběcí operace neustále rostou, požaduje se stále vyšší kvalita obrobků (tolerance, kvalita povrchu), zvyšují se nároky na kratší výrobní proces, s tím spojená vyšší produktivita. Dále je větší tlak na výrobní náklady, stále obtížnější aplikace (tvrdší materiály obrobků, tvarově složitější obrobky), menší výrobní dávky a častěji je nutné používat v obráběcích operacích speciální nástroje (delší, menší průměry, stavitelné rozměry nástroje)(mmspektrum.com).



Obr. č. 6 Řezné podmínky u frézování (isstechn.cz)

Základním pravidlem je správné stanovení řezných podmínek, které jsou podstatným faktorem při obrábění. Správný výklad a použití definic zaručuje, že nástroj bude mít při dané operaci správný výkon. V případě nedodržení doporučení může docházet k nadměrnému opotřebení nástroje, jeho krátké životnosti a špatné kvalitě povrchu (Vasilko, 2006).



Obr. č. 7 Řezné podmínky soustružení (octopustools.com)

3.3.1 Vliv řezné rychlosti

Řezná rychlost v (m/min) je spolu s tvrdostí materiálu jedním z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje životnost nástroje a potřebný příkon. Dále ovlivňuje požadovaný příkon P (kW) a kroutící moment M (Nm). Při vysokých řezných rychlostech stoupá teplota v řezu a tím se zrychluje opotřebení břitu. Vysoké řezné rychlosti přispívají k lepšímu utváření třísek během obrábění měkkých materiálů, které tvoří dlouhé třísky, např. nízkouhlíkové oceli.

Příliš vysoká řezná rychlost způsobuje:

- Rychlé opotřebení hřbetu
- Plastické deformace
- Špatnou kvalitu a nevyhovující tolerance

Příliš nízká řezná rychlost způsobuje:

- Vytváření nárůstku na břitu
- Špatné odvádění třísek
- Delší čas v řezu (sandvik.coromant.com)

3.3.2 Vliv rychlosti posuvu

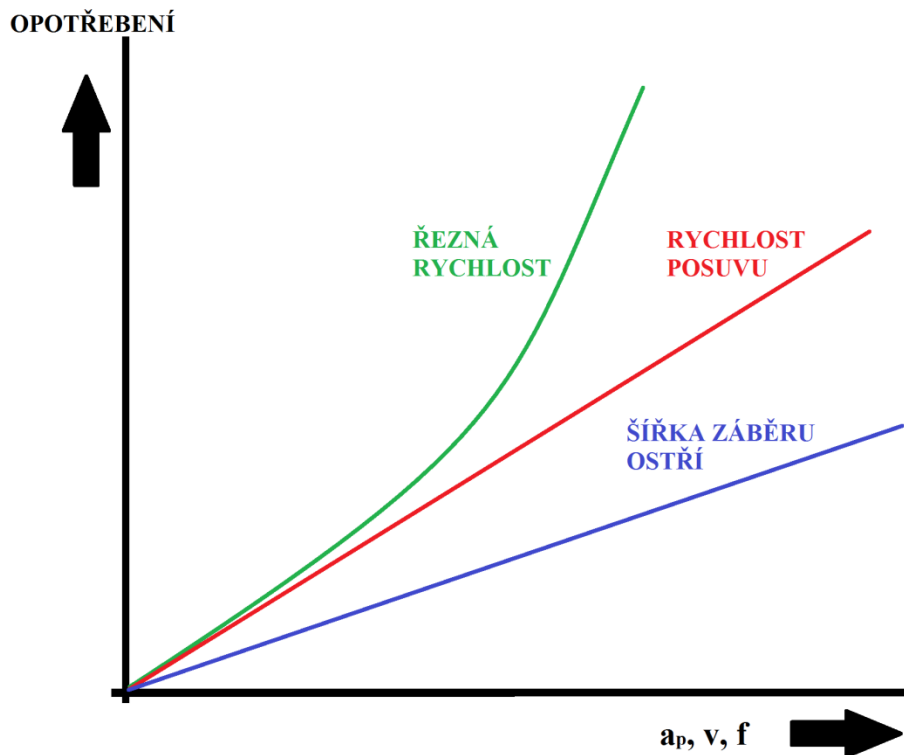
Rychlost posuvu – f (mm/ot), má vliv na utváření třísek, drsnost povrchu a kvalitu obrobené plochy. Také ovlivňuje požadovaný příkon P (kW) a kroutící moment M (Nm). Vysoká rychlost posuvu se promítá do síly posuvu F (N), to je potřeba vzít v úvahu v případě, že podmínky nejsou dostatečně stabilní. Dále přispívá ke vzniku mechanických a tepelných pnutí.

Vysoká rychlost posuvu způsobuje:

- Obtížnější dělení třísek
- Kratší čas v řezu
- Menší opotřebení nástroje
- Snížení kvality obrobené plochy

Nízká rychlost posuvu způsobuje:

- Delší, tenčí třísky
- Zlepšení kvality
- Rychlejší opotřebení nástroje
- Delší čas v řezu (sandvik.coromant.com)



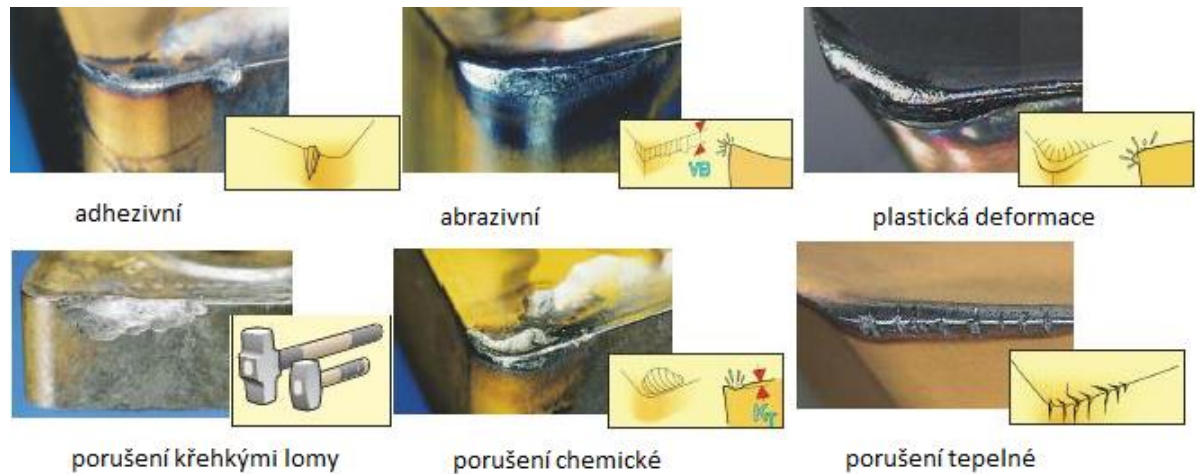
Obr. č. 8 Závislost řezných podmínek na opotřebení břitu (zdroj autor)

Optimalizace procesů při obrábění a volba správných řezných podmínek s kombinací správné volby chlazení je nezbytné pro dlouhodobou trvanlivost nástroje. Při nedodržení správných řezných parametrů dochází ke zkrácené životnosti nástrojů, které se projeví na snížené produktivitě obrábění. (Humár,2008).

3.4 Opotřebení břitu

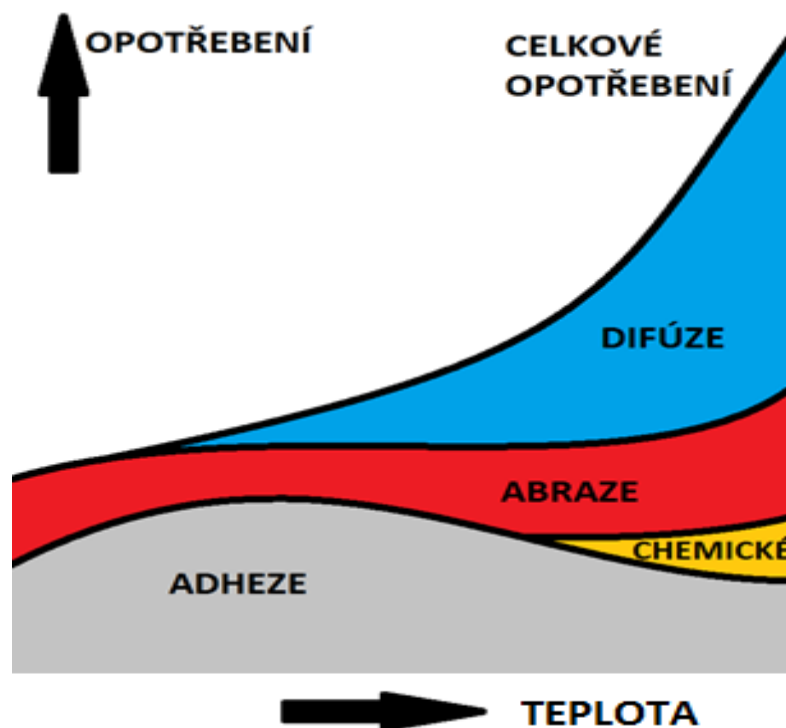
Opotřebení břitu se rozumí otupování břitu, které probíhá při vlastním procesu řezání, v době, kdy nástroj odebírá třísku. Tím dochází ke zhoršování drsnosti hřbetu a čela nástroje a zvětšuje se poloměr ostří (coptel.coptkm.cz).

3.4.1 Druhy opotřebení



Obr. č. 9 Druhy opotřebení břitu (coptel.coptkm.cz, sandvik.coromant.com)

- **abrazivní otěr** - mikročástice materiálu obrobku jsou tvrdší než materiál břitu nástroje, tím dochází k vymílání hřbetních a čelních ploch
- **adhezní otěr** - ve styku vnější plochy a čela nástroje vznikají mikrosvary, další třísky jej však neustále rozrušuje
- **chemické** – ve tvaru žlábků, toto opotřebení vzniká na čelní ploše břitové destičky v důsledku chemické reakce mezi materiálem obrobku a obráběcím nástrojem
- **tepelné poškození** – vzniká při rychlé změně teploty z vysoké na nízkou, tepelné trhliny souvisejí s přerušovanými řezy
- **difúzní otěr** - vlivem difúze dochází k prolínání krystalografických mřížek, tím vzniká defektní vrstva s nižšími mechanickými vlastnostmi, což může způsobovat náchylnost k abrazivnímu otěru
- **porušení křehkými lomy** – dochází při překročení zatížení břitu (velký nebo proměnlivý průřez třísky)
- **porušení plastickou deformací** - obrábíme-li vyšší řeznou rychlostí materiál s malou tepelnou vodivostí. Dochází k přesunu plasticky deformovaných vrstev ve směru třísky (coptel.coptkm.cz, sandvik.coromant.com).



Obr. č. 10 Druhy opotřebení (zdroj autor)

Z tohoto vyplývá, že opotřebení břitu je ovlivňováno především vlastnostmi materiálu obrobku a činné části břitu nástroje, řeznou rychlostí, velikostí posuvu a hloubkou odřezávané vrstvy. Z řezných úhlů úhlem řezu δ a řezným prostředím a jeho působením na velikost součinitele tření a teploty (coptel.coptkm.cz)

3.5 Nástrojové materiály

K základním požadavkům na nástrojové materiály patří jejich tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, houževnatost a pevnost v ohybu. Takovéto vlastnosti by měly řezné materiály splňovat při vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Jedná se především o požadavek na vysokou řezivost a tím spojeného vysokého řezného výkonu (Kocman, 2011).

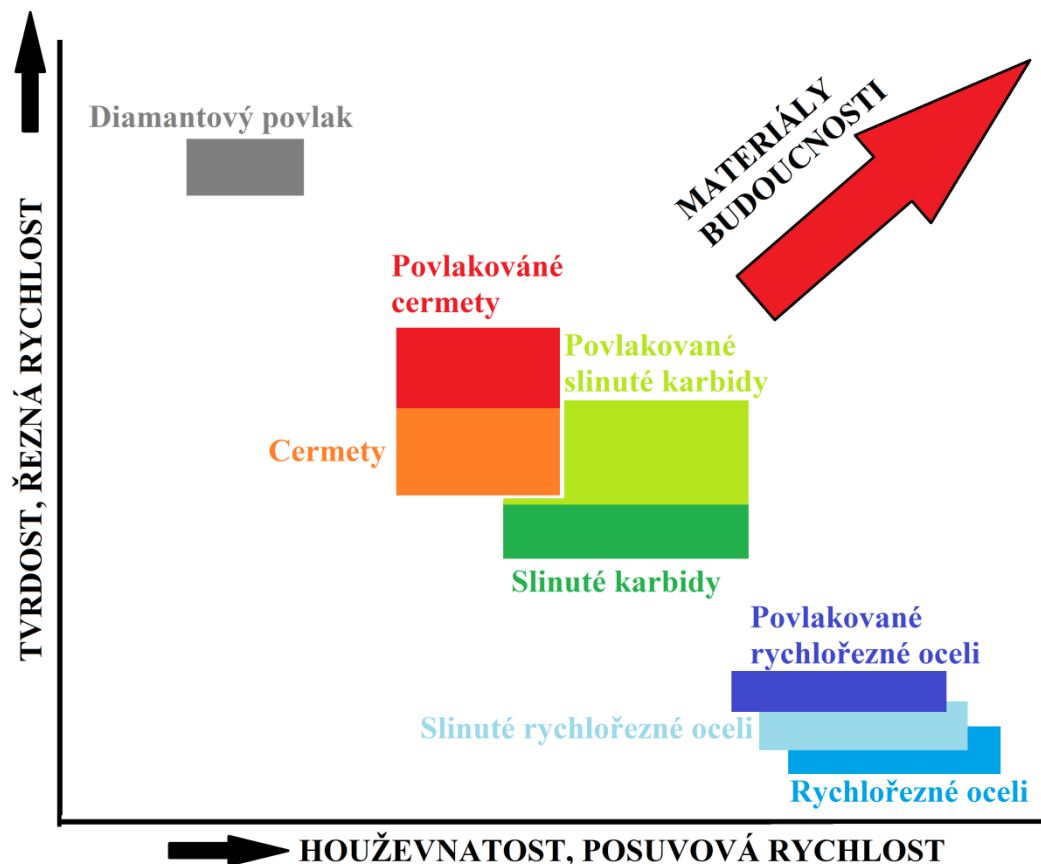
Obecně se užívá těchto nástrojových materiálů:

- Nástrojové oceli
- Rychlořezné oceli
- Slinuté karbidy
- Cermety
- Keramické nástrojové materiály
- Polykrystalický kubický nitrid bóru

- Polykrystalický diamant
- Přírodní diamant

Při aplikaci na CNC obráběcí stroje a centra se v současné době používají nejčastěji nástroje s vyměnitelnými destičkami ze slinutého karbidu, především povlakovaných destiček, v rozsahu cca 80 % a ve zbývajícím rozsahu nástrojů zejména rychlořezné oceli. Použitelnost nástrojů na CNC obráběcích strojích je podmíněna jejich vysokou kvalitou a stabilitou parametrů čehož lze dosáhnout, volbou vhodného druhu materiálu řezné části nástroje a volbou optimálních řezných parametrů. (Humár, 2008).

Vývoj nových řezných materiálů s vyšší odolností proti opotřebení při vyšší řezné rychlosti a posuvové rychlosti je nekončící problém. V současné době je málo pravděpodobné, že bude objevena úplně nová tvrdá látka, která by byla využitelná pro řezné nástroje (Humár, 2008).



Obr. č. 11 Vliv vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky (zdroj autor)

Nejpoužívanější řezné materiály zůstanou nejspíše i nadále povlakované slinuté karbidy se snahou především zdokonalit proces slinování a povlakování. U keramických

materiálů není rovněž vývoj ukončen např. u kombinace keramiky a různých výstužných vláken (Kocman, 2011).

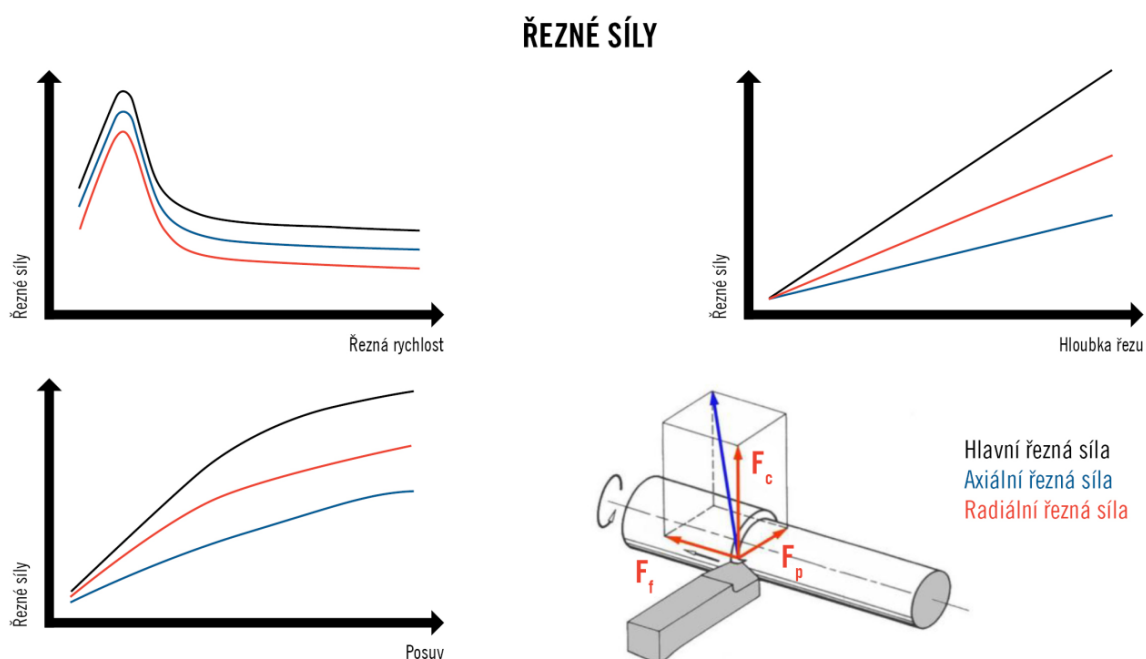
3.6 Analýza silového zatížení řezného nástroje

Během obrábění kovů nástroj deformuje materiál obrobku tak silně, že dochází k jeho oddělování formou třísek. Tento proces vyžaduje značnou energii, přičemž na nástroj působí řada mechanických, tepelných, chemických zatížení. Tato zatížení způsobují poškození nástroje, jeho opotřebení nebo selhání (mmspektrum.com).

Uvedené druhy zatížení nepůsobí nezávisle na sobě, nýbrž ve vzájemné kombinaci, což ovlivňuje jejich celkový účinek. Výsledek obrábění rovněž závisí na výkonu stroje, tuhosti celé soustavy, ale i na dovednosti obsluhy stroje. Vzájemné působení zatížení vytváří různé následky. Tyto následky vedou ke zhoršení stavu nástroje a jeho následnému opotřebení nebo selhání.

Proto je při obrábění kovů cílem najít rovnováhu mezi energií nutnou k odebrání materiálu obrobku a schopností nástroje spolehlivě odolat zatížením, která na něj působí (secotools.com).

Změny hloubky řezu, posuvu a rychlosti mají odlišný účinek z hlediska zatížení působících na nástroj.

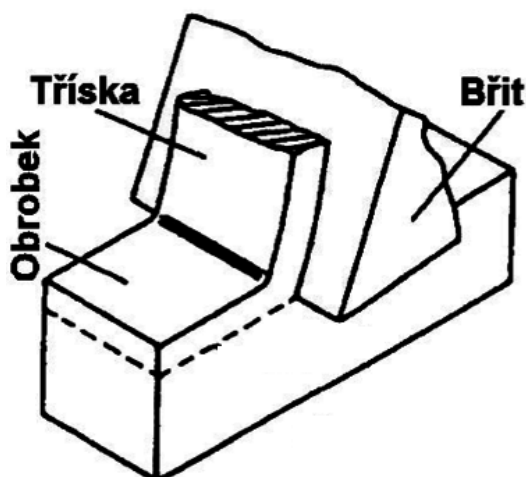


Obr. č. 12 Závislost změny řezných parametrů na řezných silách (secotools.com)

Provozy se v rámci snahy o zvýšení efektivity nebo úspory nákladů snaží zkracovat dobu potřebnou k nastavení nástroje. Promyšlení volby vhodných geometrií nástroje a řezných podmínek před zahájením obrábění, může zkrátit dobu ke zjištění a řešení problémů. Cílem proaktivního plánování je maximalizovat obrobiteľnost při operaci. Obrobiteľnost je definována jako stupeň, do kterého lze operaci obrábění provést v co nevyšší produktivitě s vynaložením co nejnižších nákladů (secotools.com).

3.7 Tvorba třísky a obrobiteľnost materiálu

Tříška se skládá z částech materiálu, uvolňujících se při tvoření třísky obráběním. Proces odebrání třísek probíhá všeobecně v několika etapách. Nejprve se obráběný materiál vlivem tlaku nástroje pěchuje na čelní ploše břitu. Díky řezným silám vznikají v materiálu značná napětí, která překonávají vnitřní síly soudržnosti a odporu materiálu, dokud se před břitkem nevytvoří trhlinka ve směru působení řezné síly. Dalším pohybem nástroje se stlačené částčky třísky na čelní ploše nástroje nadzvednou a sklouznou po čelní ploše břitu. Dále jsou čelem nástroje odtrženy a odvedeny jako tříška (coptel.coptkm.cz).

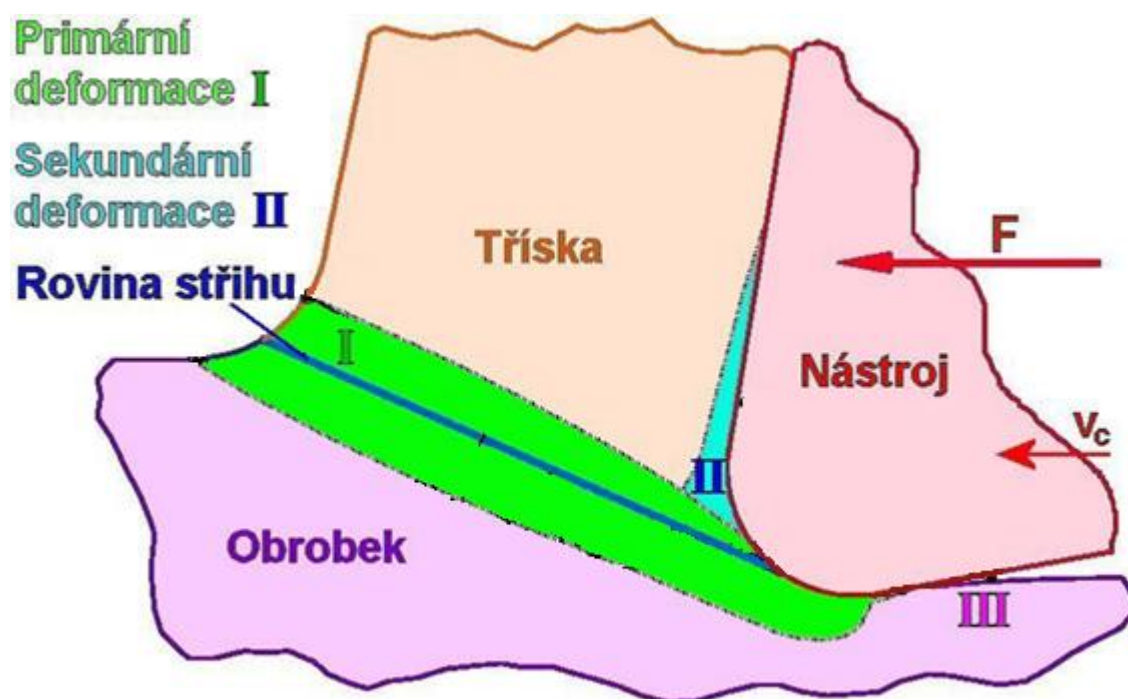


Obr. č. 13 Realizace řezného procesu (Kocman, 2011)

Mechanismus oddělování a vzniku třísky je různý u nekystalických a krystalických látek. Většina technických materiálů používaných ve strojírenství jsou materiály krystalické (Kocman, 2011).

Během řezného procesu dochází v oblastech tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím díky vlivu vnikání nástroje do materiálu obrobku. Břit nástroje je tlačěn do obrobku silou F . Napětí v zóně řezání se rozkládá na napětí v obrobku a v nástroji. Pružné deformace se rozloží do celého objemu obrobku, deformace plastické jsou zahrnuty jen v zóně řezání (Humár, 2008).

Charakter řezání je závislý především na obráběném materiálu, na jeho průběh však působí i další činitele např. druh řezného nástroje a jeho geometrie, řezné podmínky, řezné prostředí atd. Je třeba zdůraznit, že mechanicko-fyzikální vlastnosti materiálu nezůstávají během oddělování třísky konstantní, ale působením vznikajících napětí, deformací a teploty se mění. To samozřejmě ovlivňuje tvoření třísky (Štulpa, 2006).



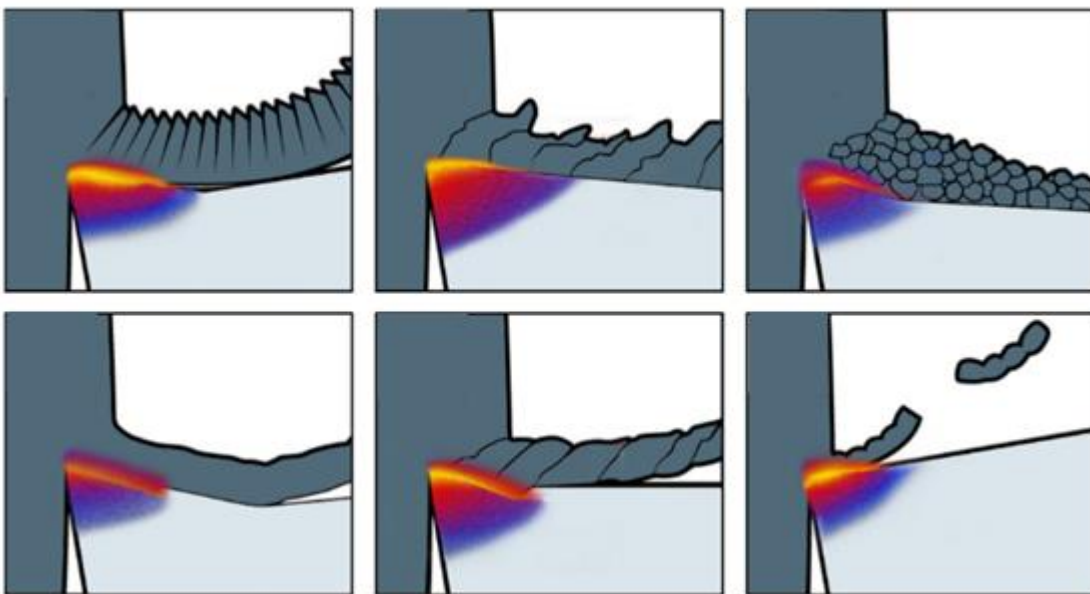
Obr. č. 14 Oblasti plastických deformací v zóně řezání (Humár, 2008)

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- oddělení třísky od obrobku
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory

- tepelné zatížení nástroje
- opotřebení nástroje
- změnu textury materiálu v třísece i v povrchové vrstvě obrobenej plochy
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobenej plochy
- pēchování třísky (Kocman, 2011).

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik především dvou druhů třísek, a to třísky soudržné a elementární. Podle rozložení plastické deformace je soudržná tříska plynulá nebo článkovitá (mmspektrum.com).



Obr. č. 15 Utváření třísky v různých materiálech obrobků (secotools.com)

Problematika v oblasti obrobitelnosti materiálů je z hlediska technologie třískového obrábění jednou z významných vlastností. Tato problematika je jedním z hlavních faktorů pro volbu řezných podmínek (mmspektrum.com).

K objektivnímu posouzení obrobitelnosti se užívá několik metod. Při nich je sledována dosažitelná řezná rychlost pro dané podmínky, řezný odpor vznikající při obrábění, příkon potřebný pro obrábění, teplota břitu, jakost obrobenej plochy a další parametry. Ve strojírenství je obrobitelnost daného materiálu vyjádřena poměrem řezné rychlosti dosažitelné u tohoto materiálu k řezné rychlosti dosažitelné u standardního materiálu, při jinak stejných podmínkách (sandvik.coromant.com).

Pro zhodnocení obrobitelnosti materiálu, tedy jeho schopnosti být obráběn, je obvykle nutné zaměřit se na tři hlavní faktory. Posouzení materiálu z pohledu mechanických vlastností obrobku a z metalurgického hlediska. Posouzení geometrie břitu z makroskopického i mikroskopického pohledu. Posouzení nástrojového materiálu např. povlakovaný slinutý karbid, řezná keramika apod. Výše uvedené rozhodovací postupy mají největší vliv na opracovatelnost materiálu (David A. Stephenson, John S. Agapiou, 2016).

P	<p>uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 nízko a středně legované oceli sk. 13 (13 0., 13 1., legované oceli tříd 14, 15, 16 feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (tř. 17 a lité 4229..) nástrojové oceli uhlíkové (19 1.., 19 2.., 19 3..) legované nástrojové oceli (19 3.. až 19 8..) uhlíková ocelolitina sk. 26 (4226..) nízko a středně legované ocelolitiny sk. 27 (42 27..)</p>
M	<p>austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné</p>
K	<p>šedé litiny nelegované i legované (42 24..) tvárné litiny (42 23..) temperované litiny (42 25..)</p>
N	<p>neželezné kovy, slitiny Al a Cu</p>
S	<p>speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti</p>
H	<p>zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 - 60 tvrzené kokilové litiny</p>

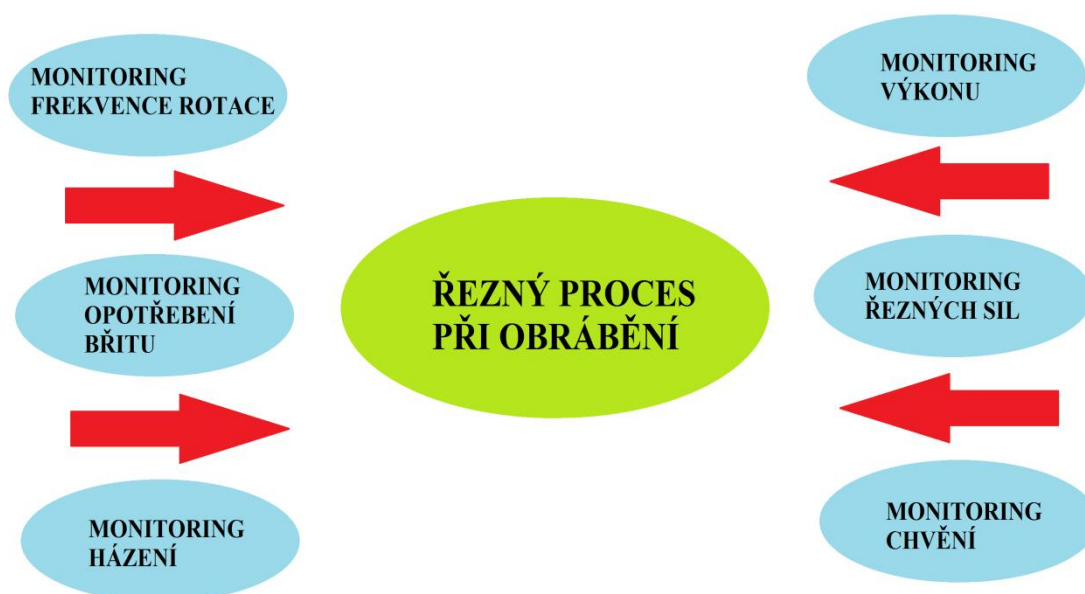
Obr. č. 16 Základní rozdělení obrobitelnosti materiálů dle ISO 513 (isstech.cz)

Mezi další významné činitele patří řezné podmínky, řezné síly, tepelné zpracování materiálu, přítomnost metalurgických vměstků, upnutí nástroje a všeobecné podmínky obrábění. Pojmem “dobrá obrobitelnost” obvykle rozumíme klidný průběh obráběcího procesu, s přiměřenou životností nástroje. Určení obrobitelnosti daného materiálu se ve většině případů provádí praktickými zkouškami, přičemž výsledky jsou udávány ve vztahu k jiné zkoušce pro jiný typ materiálu a to za přibližně stejných podmínek. Při těchto zkouškách je třeba vzít v úvahu také další činitele, jako jsou např. mikrostruktura, typ obráběcího stroje, sklon k ulpívání na břitu, stabilita, hlučnost, životnost nástroje, atd. (David A. Stephenson, John S. Agapiou, 2016).

3.8 Monitorování obráběcího procesu

Stanovením optimálních řezných podmínek lze dosáhnout úspory nákladů na vlastní proces obrábění řádově v desítkách procent. V dnešní době moderních obráběcích strojů a nástrojů s rostoucí řezivostí význam této problematiky neustále roste (mmspektrum.com).

Dnešní monitorovací systémy nesledují měřené charakteristiky obráběcího procesu, ale také jsou schopny data shromažďovat, vyhodnocovat a porovnávat. Díky tomu lze zpětně řídit obráběcí proces za pomoci úpravy řezných podmínek např. řezné rychlosti a rychlosti posuvu (mmspektrum.com).



Obr. č. 17 Princip monitorování řezného procesu (zdroj autor)

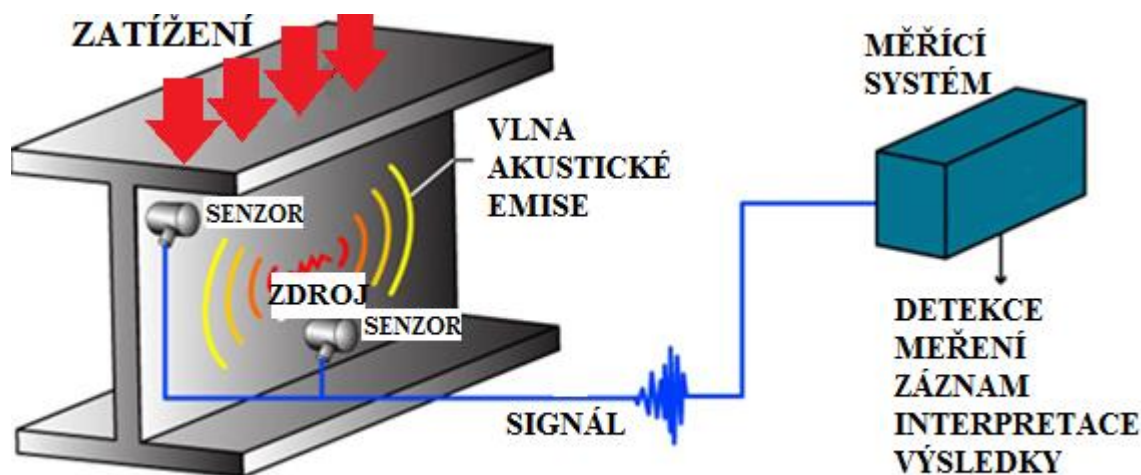
Jako možný monitorovací systém lze uvažovat systém akustické emise. S postupným rozvojem možností výpočetní a snímací techniky se akustická emise stále více využívá při hodnocení nejrůznějších materiálových charakteristik. Využití této metody je vhodné např. v oblasti základního výzkumu mechanických vlastností materiálů a jeví se jako možná metoda identifikace rozvoje plastické deformace. Akustická emise umožňuje sledování defektů s citlivostí téměř nedosažitelnou jinými metodami. Za dolní hranici velikosti detekovatelné poruchy se obvykle považují parametry krystalové mřížky materiálu. Velmi významnou výhodou akustické emise je, že se jedná o metodu integrální, která při využití vhodné rozmístěných snímačů umožňuje provádět najednou inspekci velkých a složitých konstrukcí (mmspektrum.com).

4 TEORIE AKUSTICKÉ EMISE

4.1 Základní charakteristika AE

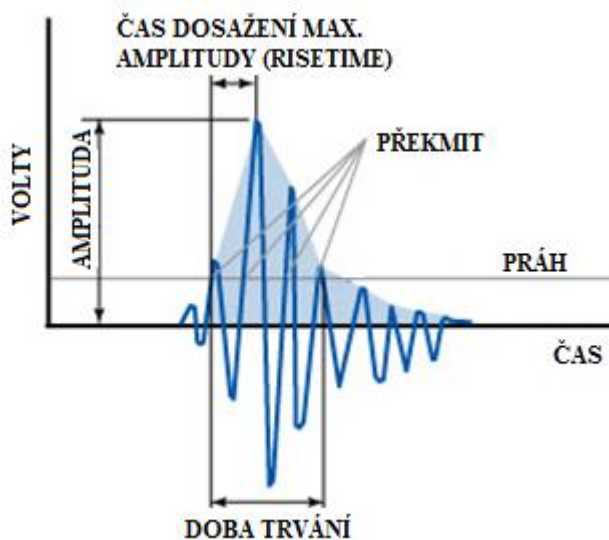
Akustická emise je fyzikální jev, u kterého dochází v určitých místech materiálu k uvolňování akumulované energie ve formě tranzitních napěťových vln důsledkem dynamických procesů, které jsou stimulovány pomocí vnitřních nebo vnějších sil. Vlny se šíří materiálem od místa zdroje směrem na volný povrch. Díky průchodu napěťové vlny se část energie přemění na teplo, část energie se vrátí zpět do materiálu a část vyvolá na povrchu tzv. Rayleighovu vlnu. Vlnění, které je na povrchu je potom vhodné k zachycení ultrazvukovým snímačem a převedení na elektrický signál, který nazýváme emisní. Vzniklá amplituda se pohybuje řádově v mikrometrech (Pazdera, Smutný, Mazal, 2004).

Vlny, které vznikají při akustické emisi, se pohybují v různých frekvencích. Nejnižší (0,1 – 100 Hz) sledujeme např. u zemětřesení, vysoké frekvence (až 10 MHz) lze zaznamenat u mřížkových poruch či šíření lomů v důsledku mechanického porušování (Kreidl, Šmíd, 2006).



Obr. č. 18 Přehled technologie akustické emise (mitrasgroup.com)

Akustická emise je rychlé, krátké uvolnění energie ve formě elastických vln. Křivka akustické emise má několik parametrů, které mohou být použity pro charakterizaci vady zdroje (nde-ed.org).



Obr. č. 19 Amplituda akustické emise (nde-ed.org)

Amplituda se měří ve voltech, nebo decibelech, podle toho, jak je silná. Jeden z nejlepších způsobů měření akustické emise je, že energie se rovná energii pod křivkou, přičemž trvání je podle toho, jak dlouho trvá zdroj události (mistragroup.com).

Doba náběhu je časový interval mezi prvním a posledním přechodem prahu a vrcholu signálu tento parametr se týká šíření vlny mezi zdrojem události akustické emise

a snímačem. Proto se doba náběhu používá pro kvalifikaci signálů a jako kritérium pro hlukový filtr. Trvání je časový rozdíl mezi prvním a posledním prahovým přechodem. Může být použita pro identifikaci různých typů zdrojů a odfiltrování hluku (nde-de.org).

Mezi výhody akustické emise patří:

- Vysoká citlivost
- Včasná detekce vady, trhliny, praskliny atd.
- Monitorování v reálném čase
- Snižování nákladů
- Není potřeba snímání celého konstrukčního povrchu (mistragroup.com).

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

Oblasti použití akustické emise:

- mosty
- tlakové potrubní uzly
- části tlakových potrubí
- tlakové nádoby
- zásobníky (kulové, tlakové)
- ocelové a betonové konstrukce
- ventily
- armatury
- skladovací nádrže (mistrasgroup.com)

4.2 Spojitá AE

Spojité signály akustické emise vyvolávají události, které nejsou časově oddělené. Také může být generován řadou fyzikálních jevů, jako jsou např. kavitace v kapalině, deformace povrchu kovů při tření či únikem kapaliny z potrubí v důsledku trhliny (ndt.cz).

Další oblastí využití je kontinuální monitorování zařízení, u kterých lze předpokládat výskyt různých defektů (např. tlakové systémy, opotřebenosti nástrojů a součástí strojů apod.). V takovýchto případech vychází indikace vzniklé vady z analyzování pro-

vozního šumu a parametrů emisních událostí, které převyšují běžné šumové pozadí (dakel.cz).

4.3 Nespojité AE

Nespojitá akustická emise se vyskytuje s poměrně velkou amplitudou. Vzoroky materiálu s únavovou trhlinou obvykle vykazují nespojitou akustickou emisi v souvislosti s tvorbou plastické zóny v okolí trhliny (Kreidl, Šmíd, 2006).

Energie ve formě elastických napěťových vln se šíří od místa uvolnění na značné vzdálenosti. Takovýto jev je zvláště výrazný v okolí různých nehomogenit, např. svarů nebo defektů, zde úroveň akustické emise obvykle převyšuje obvyklé hodnoty.

Na základě parametrů emisního zdroje je možné v místě zdroje posoudit stav porušení materiálu (dakel.cz).

4.4 Zdroje AE

Nejčastějšími zdroji akustické emise při mechanických zkouškách jsou především vznik trhliny, lom, šíření čela trhliny, plastická deformace. Akustickou emisí je možné zaznamenávat změny materiálů, které jsou způsobené vnitřním nebo vnějším napětím. Takto uvolněná energie je často velmi malá, proto je obtížné ji pomocí akustické emise zachytit. Trhliny vznikají nejčastěji v povrchu náhlých změn průřezu a v částech uvnitř materiálů, ve kterých napětí překračuje mezní hodnotu. Mechanismy trhlin vytváří nový povrch a tím se uvolňuje napěťová energie, jejíž část se přeměňuje v akusticko-emisní vlnu. Ideální emisní zdroj akustické emise vysílá balíky vln, které se nazývají události akustické emise. Tyto události se šíří v homogenním, ideálně elastickém prostředí.

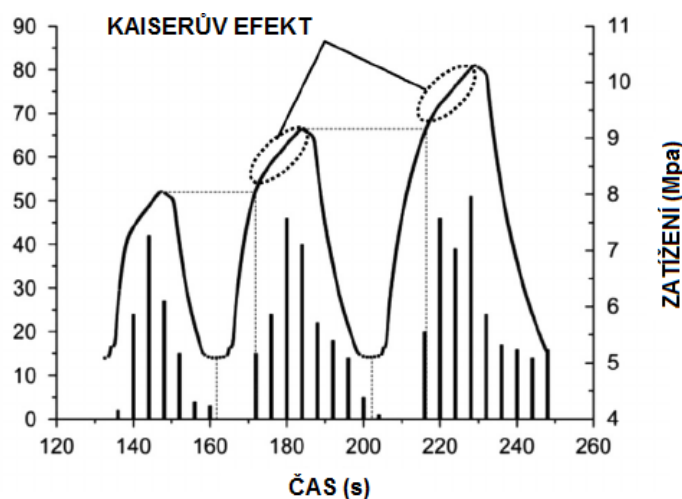
V praxi se takového stavu nedosahuje a při skutečném měření je šíření vlny ovlivněno povrchy a nehomogenitami. Tyto nehomogenity mohou výrazně odrážet a zkreslovat přechody vln nebo vlny.

Tato metoda má široké uplatnění, protože signály akustické emise jsou vytvářeny při deformaci u většiny materiálů. Omezujícím faktorem je citlivost snímače a obsah šumu v signálu (Kreidl, Šmíd, 2006, Pazdera, Smutný, Mazal, 2004).

4.5 Kaiserův jev

Tento jev je charakterizován nevrátností procesů, které jsou zdroji akustické emise. Při namáhání nejdříve nastává elastická deformace, jakmile je však překročena mez

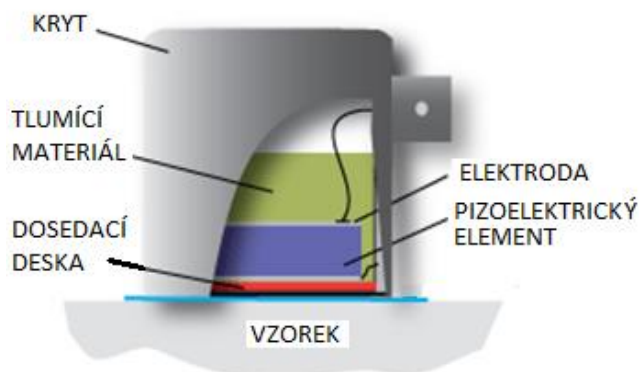
kluzu, dochází k plastické deformaci a tím vznikají i vlny nutné pro zjištění akustické emise. Zatěžujeme-li materiál po jeho předchozím zatížení, pak při následném namáhání detekujeme akustickou emisi teprve při namáhání nad maximální zatížení předchozího zatížení (Kopecký, 2008, adant.cz).



Obr. č. 20 Kaiserův efekt (zdroj autor)

4.6 Snímače akustické emise

Snímač je základním prostředkem pro snímání vln. V případě akustické emise se jedná o snímání šířících se vln a vibrací obvykle ve frekvenci od 20 kHz do 2 MHz. Pro snímání se používají různé druhy snímačů, jejich konstrukce se vždy přizpůsobuje jejich použití (nde-ed.org).

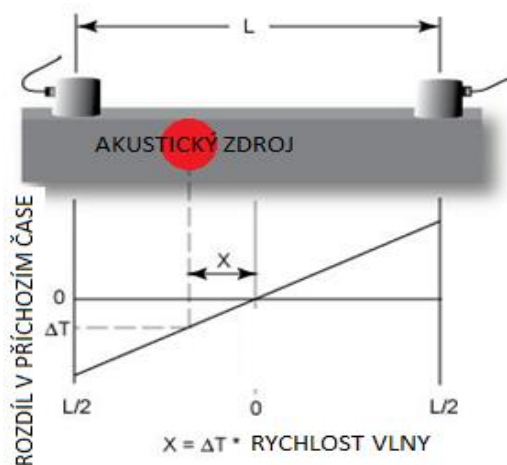


Obr. č. 21 Snímač akustické emise (nde-ed.org)

Při měření akustické emise se používá více snímačů a vícekanálové měřicí systémy. Snímače akustické emise, které jsou rozmístěné na konstrukci, tvoří měřicí síť. Tato síť

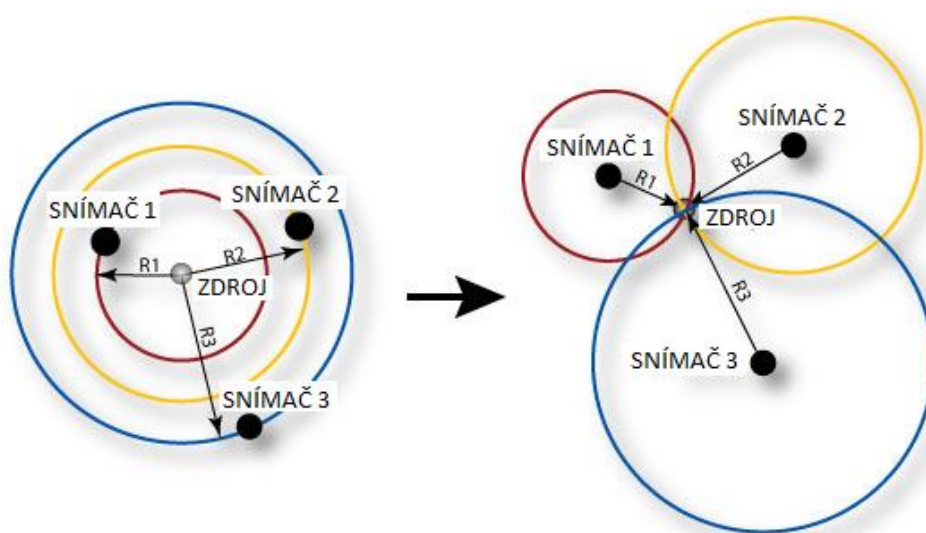
umožňuje lokalizaci místa původu emisní aktivity. Lokalizace je založena na časovém rozdílu příchodu elastických vln emisní události do různých snímačů sítě (adandt.cz)

- Lineární lokalizace, při které se k určení místa vzniku emisní události používá příchodu elastických vln do dvou snímačů. Zdroj leží na spojnici těchto snímačů (nde-ed.org).



Obr. č. 22 Lineární lokalizace (nde-ed.org)

- Plošná lokalizace, která vyžaduje příchod elastických vln minimálně do tří snímačů. Jsou-li známi časové rozdíly příchodu těchto vln do každého snímače a rychlost šíření akustických vln, lze určit místo vzniku emisní události (nde-ed.org).



Obr. č. 23 Plošná lokalizace (nde-ed.org)

Snímače akustické emise lze dělit dle frekvenčního rozsahu měřených signálů:

- nízkofrekvenční snímače 0 Hz ... 1 kHz
- středofrekvenční snímače 1 kHz ... 100 kHz
- snímače akustické emise 100 kHz ... 2 000 kHz

Podle vestavěných elektronických obvodů:

- snímače bez vestavěných elektronických obvodů
- snímače s vestavěným předzesilovačem 35 dB
- snímače s vestavěným předzesilovačem 35 dB a přepínačem pro režim buzení
- snímače kombinované – obsahují snímač s vestavěným předzesilovačem 35 dB a snímač pro měření

Podle dovolených provozních teplot snímačů:

- standardní rozsah teplot
- rozšířený rozsah provozních teplot
- vysokoteplotní snímače

Podle mechanické odolnosti pouzder snímačů a stupně krytí:

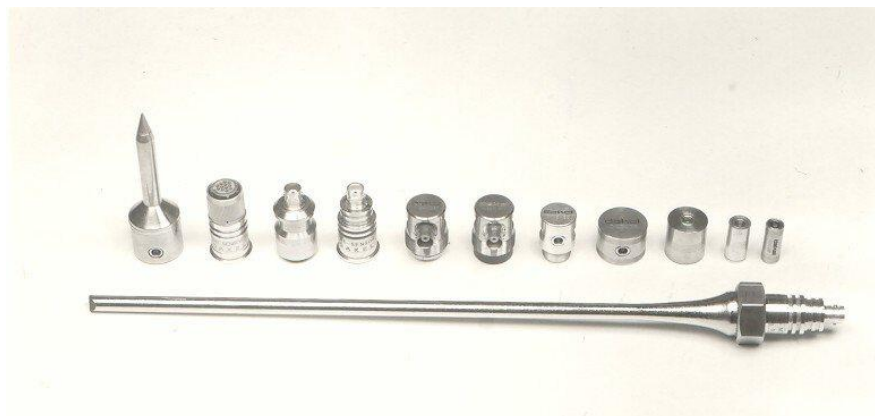
- laboratorní provozní podmínky
- průmyslové provozní podmínky
- hermetické provedení

Podle způsobu spojení k měřenému objektu:

- přímým lepením snímače na plochu
- magnetickým držákem
- šroubovým spojem (vnější, nebo vnitřní závit na snímači)
- pomocí navařeného tyčového vlnovodu
- pásovou sponou (na trubkách)

Podle materiálu stykové plochy snímače:

- ocel niklovaná
- ocel nerezová
- korund (dakel.cz)



Obr. č. 24 Snímač akustické emise (dakel.cz)

V praxi se nejvíce využívají piezoelektrické snímače. Jsou nejrozšířenějšími snímači a pro zachycení vibrací se používají piezoelektrické krystaly. Konstrukce snímačů je opět přizpůsobena jejich použití, tudíž existuje mnoho druhů a typů snímačů. V konstrukci piezoelektrických snímačů je využito piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že uvnitř některých krystalických dielektrik vzniká vlivem mechanických deformací elektrická polarizace, ta způsobuje na povrchu zdánlivé náboje, které mohou v přiložených elektrodách vázat nebo uvolňovat skutečné náboje. Pokud mechanické napětí zmizí, dielektrikum se vrátí do původního stavu (Pazdera, Smutný, Mazal, 2004).

4.7 Předzesilovače ke snímačům AE

Během aplikaci akustické emise v průmyslových podmínkách je nutné vzít v úvahu akustický šum/hluk. Tento hluk je přítomný na nižších frekvencích (pod 30 – 50 kHz), proto je nutné zajistit jeho odfiltrování. To lze uskutečnit dvěma způsoby. V signálové cestě při měření výběrem senzoru, filtrem na předzesilovači a na měřicí jednotce akustické emise nebo digitálním zpracováním naměřených dat. Zesílení předzesilovačů zpravidla bývá 20 až 40 dB, výjimečně může být i 60 dB (boteg.cz)



Obr. č. 25 Vnější konstrukce předzesilovače (dakel.cz)

Akustická emise je velmi všestranná a neinvazivní metoda, při které lze získat informace o materiálu nebo konstrukci.

4.8 Vyhodnocování akustické emise

Úspěchem vyhodnocování akustické emise je odhalit původce těchto emisí během měření. Základní princip je vyhodnocování akustických zdrojů při zatěžování měřených objektů na nebo nad nominální hodnotu zátěže. Měřicí systém vyhodnocuje odezvu měřené struktury na vnější zátěž.

Výsledný elektrický signál je digitalizován a následně zpracován, přičemž existují různé úrovně vyhodnocování signálu.

Informativní úroveň, kdy nás zajímá pouze přítomnost, nebo aktivita akustické emise nebo amplituda. Tato úroveň vyhodnocení v řadě případů dostačuje.

Standardní úroveň, která spočívá v zjišťování základních parametrů elektrického signálu akustické emise. Dalším popisem standardní úrovně je vyhodnocování v časové reprezentaci.

Pokročilá úroveň, která představuje vyhodnocení zcela digitalizovaného signálu akustické emise (Kopec, 2008).

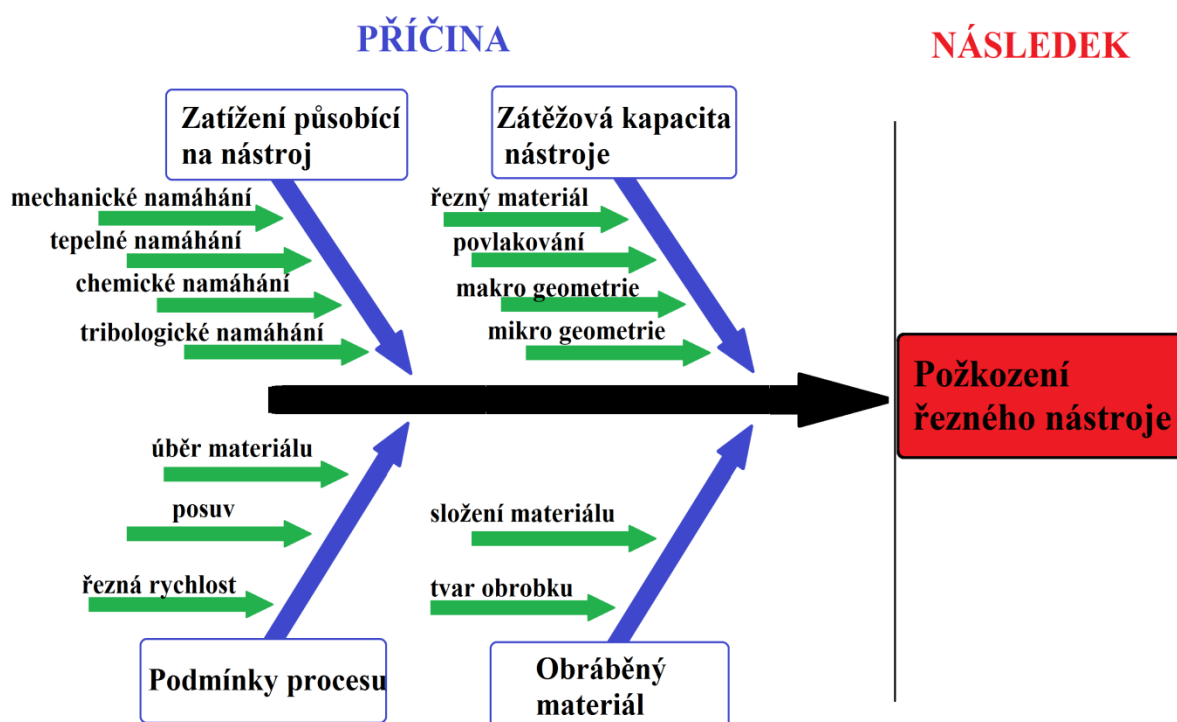
Mezi základní parametry při vyhodnocování akustického signálu patří:

- RMS – efektivní hodnota, charakterizuje energii či výkon signálu, je měřena v mV
- frekvenční spektrum signálu – vypočtená z digitalizovaného signálu emise
- počet překmitů přes nastavenou prahovou úroveň, vyjadřuje množství překmitů (countů) signálu přes dané prahové úrovně za daný čas (Kopec, 2008).

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Cíl měření

Cílem měření je implementace akustické emise jako monitorovacího systému při obrábění. Jako obráběcí proces bylo zvoleno nesousledné frézování. Proces obrábění je velice složitý, především proto, že je ovlivňován mnoha faktory. Proto je důležitá správná identifikace jednotlivých faktorů a určení jejich vlivu na obráběcí proces.



Obr. č. 26 Ishikawa diagram- složitost procesu obrábění (zdroj autor)

5.2 Metodika měření

Měření bylo uskutečněno v areálu Mendelovy univerzity v Brně, v laboratořích Ústavu techniky a automobilové dopravy. Měření probíhalo na nástrojářské konzolové frézce TOS FNK 25. Byly frézovány 2 druhy materiálů, houževnatější ocel třídy 11 a tvrdší ocel třídy 12. Pro každý materiál byly použity tři různé řezné podmínky, přičemž se měnila rychlost posuvu. U jednotlivých rychlostí posuvu byly zaznamenány tři výsledky měření.

Otáčky frézy byly při každém měření 56 ot/min a velikost třísky byla 1 mm. Rychlosti posuvu byly použity 28 mm/min, 40 mm/min a 80 mm/min.



Obr. č. 27 Konzolová frézka TOS FNK 25

Jako obráběcí nástroj byla použita fréza s šesti vyměnitelnými břitovými destičkami od firmy Pramet. Destičky byly ze slinutých karbidů, povlakovaných PVD metodou na bázi TiN.



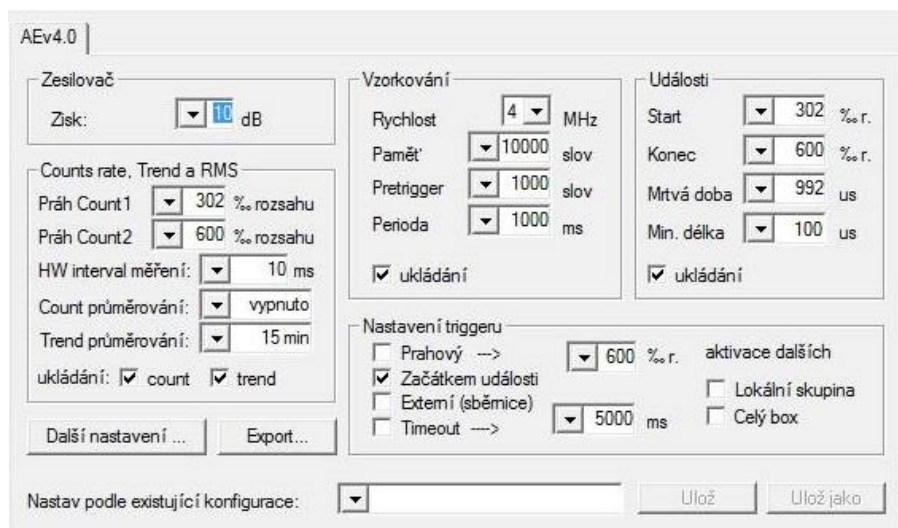
Obr. č. 28 Použitý obráběcí nástroj (fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami)

Pro detekci akustické emise byl použit měřicí systém od firmy Dakel-XEDO. Systém XEDO je moderní a výkonné modulární zařízení pro měření a vyhodnocení parametrů akustické emise. Měřicí jednotky systému jsou vsazeny do rámu, kde jsou spolu s komunikačními jednotkami připojeny na společnou sběrnici. Zpracování signálu vzorkovaného 2-8 MHz s 12bitovým rozlišením probíhá plně digitálně. Zesílení je programově nastavitelné v rozsahu 0-80 dB. Vyhodnocovány jsou veličiny count 1 a 2, RMS a parametry emisních událostí (čas příchodu, maximum, délka, count 1 a 2 a celá událost).



Obr. č. 29 Použitý měřicí systém pro detekci akustické emise

Konfigurace systému pro měření byla následující. Zesilovač nastaven na hodnotu 10 dB, nastavené hladiny (count 1) na 302 %, (count 2) 600 % rozsahu, vzorkování 4 MHz a perioda 1000 ms.



Obr. č. 30 Konfigurace měřicí aparatury

Při měření byl použit jeden snímač IDK-7, využitelný pro měření metodou akustické emise.

Tabulka 3 Parametry snímače

PZT materiál	Dakel Class 200
Velikost PZT elementu	4 x 3 mm
Kapacita	60 pF
Výstup	kabel s konektorem
Pouzdro	nerezová ocel
Dotyková plocha	Korund, 6 mm



Obr. č. 31 Pizoelektrický snímač

Snímač byl umístěn na spodní stranu obráběného materiálu a připevněn za pomoci vteřinového lepidla Loctide.



Obr. č. 32 Umístění snímače na obráběný materiál, použité lepidlo

Vzorky pro obrábění byly použity stejného tvaru a velikosti. První materiál byl z oceli 11 375, jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel vhodnou pro svařování.

Tabulka 4 Přehled vlastností ocel 11 375

Chemické složení ocel 11 375					
C max.	Mn max.	P max.	S max.	N max.	
0,19	0,23	1,50	0,045	0,014	
Mechanické vlastnosti					
Pevnost v tahu R_m	min. 370 MPa	Tvrđost	150 HB	Mez kluzu R_e	min. 250 MPa

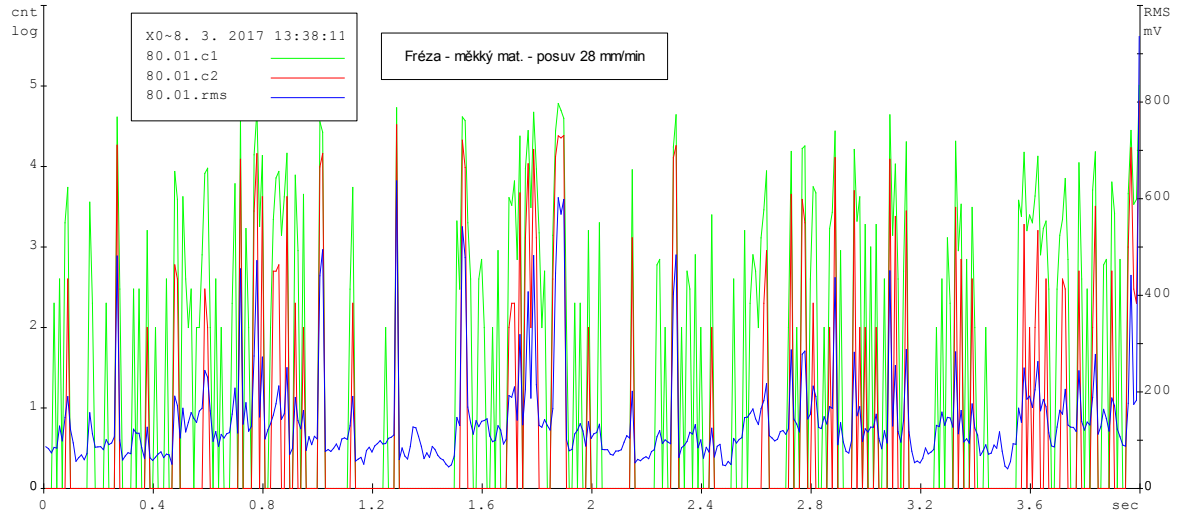
Dalším použitým materiálem byla ocel 12 050, jedná se o uhlíkovou ocel vhodnou např. k povrchovému kalení.

Tabulka 5 Přehled vlastností ocel 12 050

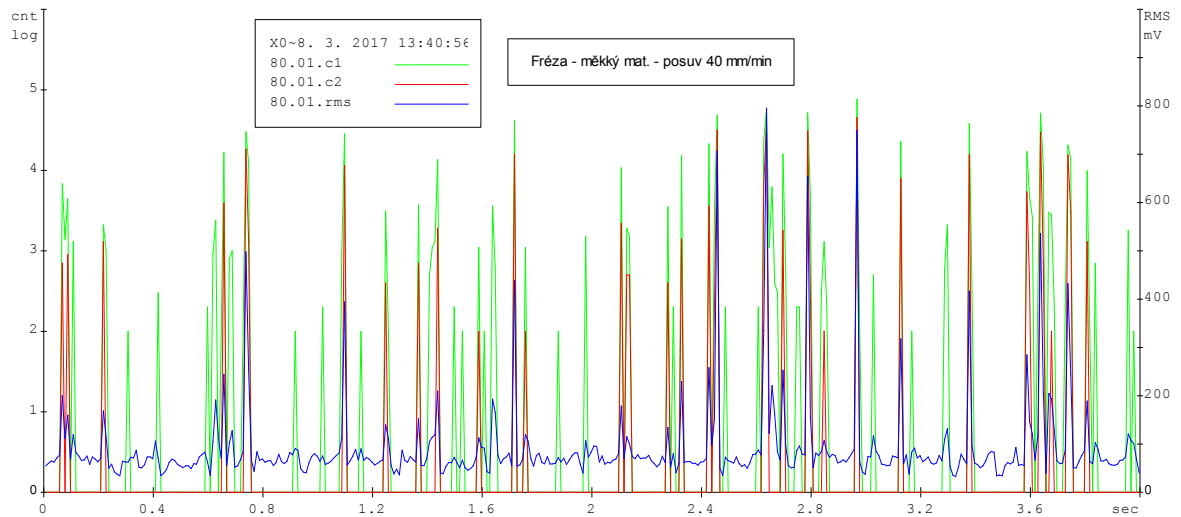
Chemické složení ocel 12 050					
C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cr max.
0,51	0,69	0,25	0,023	0,017	0,15
Mechanické vlastnosti					
Pevnost v tahu R_m	min. 370 MPa	Tvrđost	225 HB	Mez kluzu R_e	min. 250 MPa

5.3 Záznamy z akustické emise

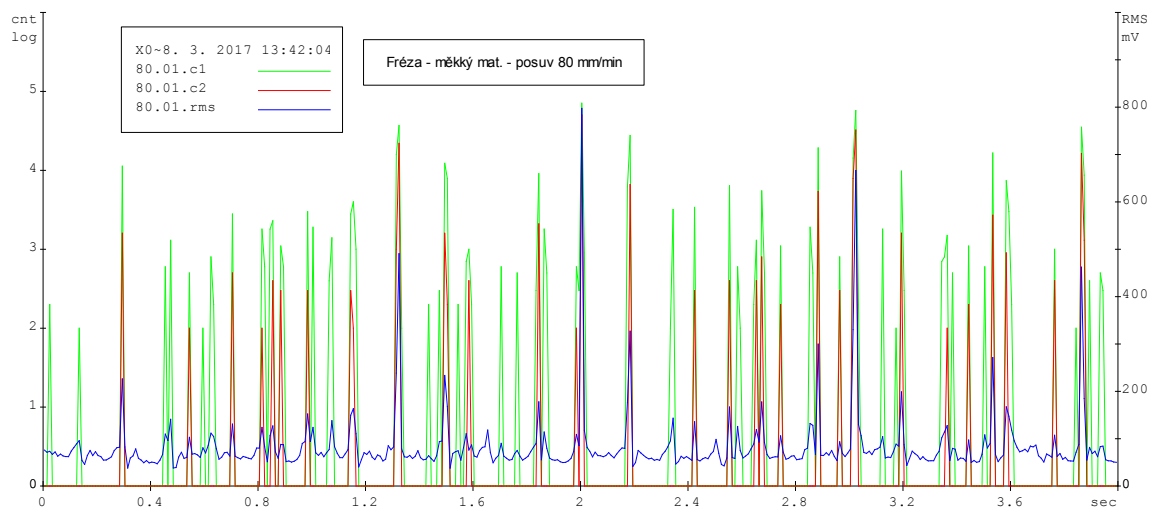
Následující grafy jsou typickými představiteli jednotlivých měření. Jednotlivé grafy jsou ve 4 vteřinových záznamech, z hlediska vhodné charakteristiky procesu obrábění.



Obr. č. 33 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 28 mm/min

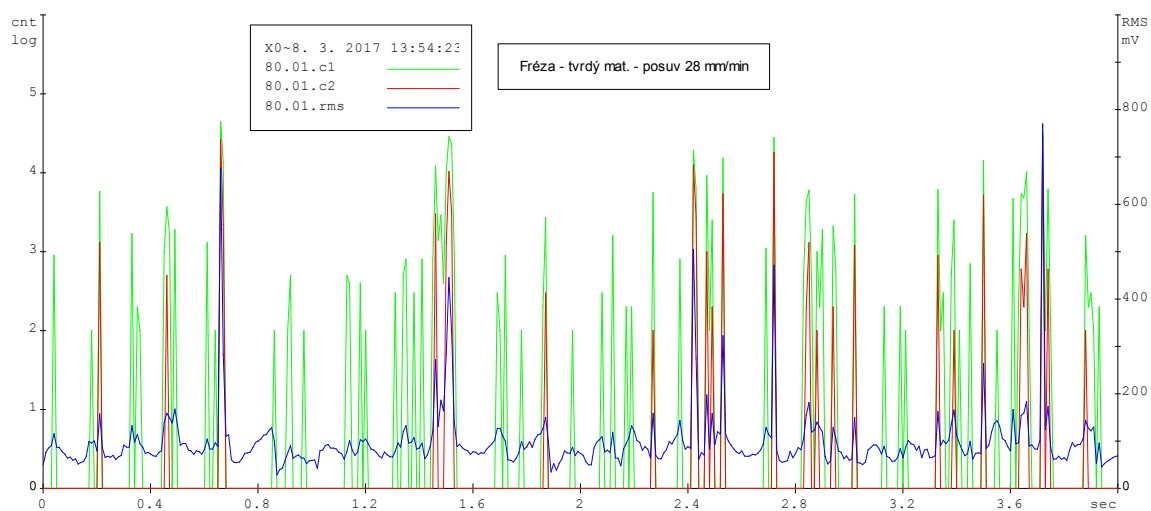


Obr. č. 34 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 40 mm/min

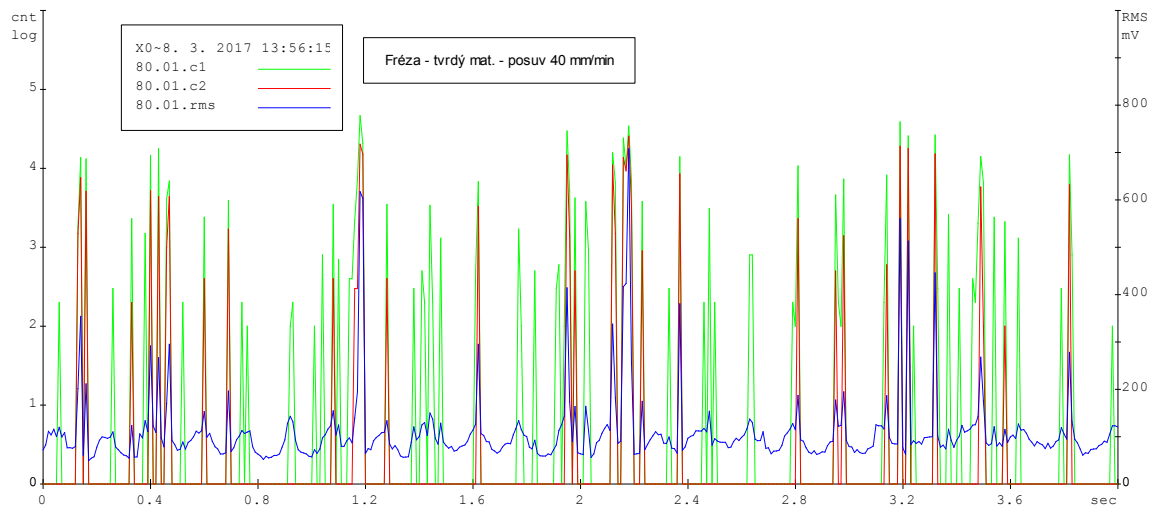


Obr. č. 35 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 80 mm/min

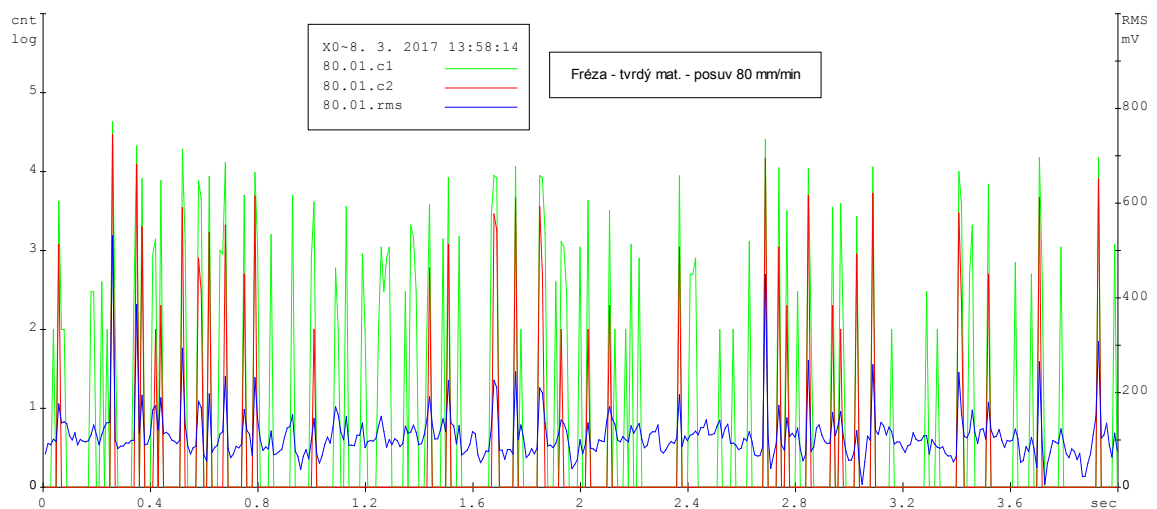
Z uvedených záznamů akustické emise pro ocel 11 375 je zřejmé, že při zvyšování řezné rychlosti dochází ke snižování překmitů přes nastavené hladiny, dále se snižuje průměrná hodnota RMS.



Obr. č. 36 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 28 mm/min



Obr. č. 37 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 40 mm/min



Obr. č. 38 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 80 mm/min

Ze záznamů pro ocel 12 050 je patrný opačný průběh nežli u oceli 11 375. Při zvyšování posuvové rychlosti se zvyšuje počet překmitů přes nastavené hladiny, dále se zvyšuje průměrná hodnota RMS.

5.4 Analýza záznamů akustické emise

Z uvedených grafů je zřejmé, že se zvyšováním řezné rychlosti se zvyšuje počet překmitů u tvrdé oceli (12 050), dále také RMS (modrá křivka) a pravidelnost jednotlivých akustických signálů. Avšak u houževnatějšího materiálu (ocel 11 375) se počet překmitů snižuje se zvyšující se řeznou rychlostí. Jednotlivé překmity přes nastavené hladiny jsou poměrně přesné, z čehož lze usuzovat, že se jedná o záběry jednotlivých zubů, především u tvrdšího materiálu (ocel 12 050).

U houževnatého materiálu (ocel 11 375), lze pozorovat větší pronikání frézy do materiálu podle jednotlivých překmitů, sumárně je počet překmitů přes nastavené hladiny (count 1, count 2) vyšší. Při porovnání obou materiálů je vidět, že průměrná RMS (celková energie) je vyšší u houževnatého materiálu. Z tohoto vyplývá, že akustickou emisí lze zobrazit houževnatost obráběcího procesu. Co se týká posuvu, tak u tvrdého materiálu se projeví obráběcí proces větší pravidelností, jednotlivé RMS jsou pravidelnější, toto svědčí o kontinuitě procesu. U houževnatého materiálu, lze jen obtížně identifikovat jednotlivé záběry zubu, zatímco u tvrdého materiálu (12 050) lze identifikovat jednotlivé záběry zubů obráběcího nástroje, podle celkové energie signálu RMS.

Akustická emise ukazuje závislost při zvyšování rychlosti posuvu. Dále lze předpokládat, že jednotlivé akustické události charakterizují vykrojení materiálu jednotlivými zuby frézy.

Ve všech záznamech se projevují náhlé excesy RMS, momentálně však není znám důvod proč se tak děje, bylo by zapotřebí udělat daleko více měření za účelem vytvoření statistiky. Lze předpokládat, že by zde šlo uplatnit statistiku akustické emise, což je však záležitost rozsáhlejšího výzkumu.

Akustická emise je uplatnitelná jako monitorovací proces, nelze z ní, však přímo vyhodnotit podmínky obrábění tzn. řezná rychlost, úběr apod. Lze z ní částečně hodnotit tvrdost materiálu, která se projeví četnějšími překmity u měkkého materiálu a nesourodostí záznamu hodnoty RMS. U tvrdého materiálu se jedná o jinou třísku, která se postupně ukrajuje jednotlivými zuby, kdežto u houževnatého materiálu toto nelze tak znatelně pozorovat. Tvrdost, popřípadě houževnatost obráběného materiálu je jedním z činitelů, který ovlivňuje obráběcí proces a ten je akustickou emisí zaznamatelný.

6 DISKUZE

Cílem práce bylo využít akustickou emisi při hodnocení procesu obrábění. Zvolenou metodou obrábění bylo nesousledné frézování. V oblasti monitoringu obrábění, je nutné provádět neustálý výzkum, za účelem získání vhodného monitorovacího systému pro obráběcí proces. Takovýto monitorovací systém by umožnil včas reagovat na jakoukoliv změnu při obráběcím procesu.

Například v práci (Novotný, 2013), která se zabývá vizualizací změny geometrie obráběcího nástroje pomocí akustické emise, je uvedeno, že při opotřebení břitu nástroje se zvyšuje počet impulzů akustické emise. Z toho vyplývá, že lze sledovat opotřebení břitu. V této práci je monitorováno soustružení, u soustružení je oproti frézování zásadní rozdíl v umístění snímače akustické emise. Zatímco u soustružení je snímač přímo na soustružnickém noži, nůž zde slouží jako vlnovod, u frézování je nutné umístit snímač na obráběný materiál. V současnosti se nejvíce uplatňují multifunkční stroje, jako jsou různá obráběcí centra. Tyto stroje jsou schopny obrobit výrobek za použití kombinace několika metod obrábění a to pouze na jedno upnutí polotovaru. Z hlediska využitelnosti v reálném provozu se zdá být výhodnější integrovat snímače akustické emise přímo do upínacího mechanismu obráběcího stroje, takto by upínací mechanismus přímo snímal akustickou emisi z obráběného materiálu.

Z analýzy dat získaných akustickou emisí v této diplomové práci lze předpokládat, že akustické události v signálu reprezentují záběry jednotlivých zubů frézy, především hodnota RMS. Takto by bylo možné kontinuálně snímat stav obráběcího nástroje. Pro srovnání, (Uekita Masahiro, Takaya Yasuhiro, 2017) ve své publikaci zabývající se monitorováním stavu obráběcího nástroje při frézování velkých dílců s následným řízením včetně obráběcího stroje uvádí, že využitím akustické emise lze zjišťovat opotřebení nástroje. Dále je zde uvedeno, že signály z akustické emise poskytují komplexní informace o stavu nástroje, např. opotřebení hřbetu, šíření trhliny a adhezivní opotřebení. Také zde uvádí, že akustickou emisí lze zjišťovat anomální události týkající se kvality povrchu. Tyto výsledky byly získány v reálném provozu při výrobě rotorů. Autoři zde uvádí, že navrhovaný monitorovací systém TCM (tool condition monitoring) vykazuje vynikající schopnost zabránit výrobě tolerančně nevyhovujícího povrchu. Výsledky této diplomové práce tyto tvrzení potvrzují. Je nutné si však uvědomit, že měření v této diplomové práci bylo provedeno jako základní výzkum v této oblasti. Jako obráběcí ná-

stroj byla použita fréza s šesti vyměnitelnými břitovými destičkami, povlakovanými na bázi TiN. Tento nástroj je určen pro frézování vyššími řeznými rychlostmi s větším úběrem materiálu. Pro kontinuální snímání opotřebení břitů řezného nástroje by bylo nutné provést rozsáhlejšího výzkumu nejlépe v reálném provozu, kde by bylo zapotřebí získat stovky až tisíce měření. Následnou správnou konfigurací systému akustické emise a vyhodnocením sledované veličiny by bylo možné, adaptivně upravit řezné podmínky obráběcího procesu, tak jak uvádí ve své práci autoři Uekita Masahiro a Takaya Yasuhiro.

Při měření v této diplomové práci byl snímač akustické emise umístěn přímo na materiál. Materiál zde tak slouží jako vlnovod pro akustický signál, z čehož vyplývá, že složení obráběného materiálu může ovlivňovat charakteristiku signálu. Proto byly zvoleny dva materiály odlišných vlastností, houževnatější, běžná konstrukční ocel 11 375 a tvrdší ocel 12 050 s vyšším obsahem uhlíku. Z analýzy naměřených dat je patrné, že akustická emise je vhodnější pro monitorování u obrábění tvrdších materiálů. Při frézování oceli 12 050 dochází k tvorbě jiné třísky a akustický signál lépe charakterizuje proces obrábění. U houževnatější oceli 11 375 se při tvorbě třísky materiál více maže, lze předpokládat, že signál akustické emise je tímto velice ovlivněn. Tento závěr je ve shodě s výsledky publikace (Joaquín Barreiro, Fernández-Abia, Ana Isabel Sabel, Octavio Pereira, 2017). Jejich práce se zabývá návrhem TCM systému při frézování velmi silných a velkých ocelových plechů. Uvádí zde, že akustický signál při frézování lépe charakterizuje obráběcí proces u tvrdých materiálů. Proto při návrhu monitorovacího systému využívají snímání akustické emise spolu s kombinací snímání vibračních signálů. Popisují zde, že touto kombinací je dosaženo větší spolehlivosti určení opotřebení nástroje.

Tento diplomový projekt je jedním z prvotních výzkumů v této oblasti. Zjištěním tohoto diplomového projektu je, že systém měření akustické emise lze uplatnit při monitorování obráběcího procesu. Je nutné si však uvědomit, že problematika v této oblasti je velice rozsáhlá. Takovýto monitorovací systém by bylo možné integrovat při do obráběcího centra, kde by obsluze poskytl komplexní informace o obrábění. Takto by bylo možné včas reagovat na jakoukoliv změnu obráběcího procesu např. výměnou obráběcího nástroje či změnou řezných podmínek.

ZÁVĚR

S neustále rostoucími nároky na efektivitu, rychlost a kvalitu v oblasti kovoobrábění dochází nejen k pokroku obráběcích technologií, ale i ke zdokonalování či implementaci nových monitorovacích systémů. Cílem všech podniků je vyrábět v co nejvyšší kvalitě a kvantitě a při tom zkracovat výrobní časy a snižovat náklady na výrobu. Proto je nutné neustále provádět výzkum v mnoha oblastech. V současnosti se se výzkum zaměřuje zejména na vývoj nových řezných materiálů vytvářených moderními povlakovacími metodami, čímž je dosaženo vyššího úběru materiálu a trvanlivosti nástroje. Vývoj v této oblasti přináší zvyšování řezné rychlosti, tudíž i zkracování výrobního času. Momentálně také dochází stále více k automatizaci výrobního procesu, kdy kombinace multifunkčních obráběcích center spolu s robotickými rameny přináší ekonomické úspory.

Pro správné řízení procesu obrábění je nutné volit vhodný monitorovací systém, který umožňuje adaptivně optimalizovat řezný proces. Adaptivní optimalizace se dnes uplatňuje především u CNC strojů. Základní charakteristikou adaptivní optimalizace při procesu obrábění je okamžité stanovení optimálních řezných podmínek, které vycházejí z informací o aktuálním stavu obráběcího procesu. Snímače určitých charakteristik procesu získávají řídicí (regulační veličiny) jako jsou např. řezná síla, kroutcí moment na vřetenu, drsnost obrobené plochy, nárůst opotřebení v čase, teploty řezání apod.

Diplomová práce poskytuje ucelený přehled základní teorie v oblasti obrábění a akustické emise, dále se zabývá využitím akustické emise jako možným monitorovacím systémem při obrábění. V experimentální části je jako obráběcí metoda zvoleno nesouledné frézování. Proces obrábění neustále ovlivňuje řada poruchových veličin, například tvar obrobku, obrobitelnost materiálu, hloubka řezu, řezivost nástroje apod. Z analýzy naměřených dat vyplývá, že systém akustické emise se jeví jako vhodný monitorovací systém při obrábění, avšak akustický signál je velice závislý na obráběném materiálu. Lze předpokládat, že v záznamech emise, akustické události reprezentují záběry jednotlivých zubů frézy. Snímač akustické emise tak poskytuje vstupy odpovídající realitě obrábění. Z toho lze usoudit, že lze tento sledovací systém uplatnit při kontinuálním monitoringu, především pro sériovou výrobu, kde se vyrobí tisíce rozměrově stejných obrobků. Takto by bylo možné včas a správně reagovat na změny při obráběcím

procesu a tím zabránit výrobě nevyhovujícího obrobku z hlediska rozměrových či povrchových tolerancí.

POUŽITÁ LITERATURA

Acoustic-emission [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.boteg.cz>

ACOUSTIC EMISSION TECHNOLOGY [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.mistrasgroup.com> [online]. [cit. 2017-02-12].

Akustická emise [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz>

Akustická emise [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.adandt.cz>

Algoritmizace optimalizačních úloh pro obrábění [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>

BARREIRO, J., FERNANDÉZ-ABIA, A.I., GONZÁLEZ-LAGUNA a A., PEREIRA, O. TCM system in contour milling of very thick-very large steel plates based on vibration and AE signals. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, 157 s [cit. 2017-04-16]. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://www.scopus.com>

Další krok: propojení technologie obrábění kovů s ekonomikou výroby [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>

Diagnostika metodou akustické emise [online]. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>

FUNCTION OF TOOL FEATURES FOR TURNING [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.mitsubishicarbide.com>

HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Introduction to Acoustic Emission Testing [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.nde-ed.org>

JOHN S. AGAPIOU a DAVID A. STEPHENSON. *Metal Cutting Theory and Practice, Third Edition*. 2016. CRC Press, 2016. ISBN 1466587547.

KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.

KREIDL, M., ŠMÍD, R., *Technická diagnostika*. Praha: Nakladatelství BEN, 2006. ISBN: 80-7300-158-6

KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. 1. vydání. Akademické nakladatelství CERM Brno, 2008. 580 stran. ISBN 978-80-7204-591-4.

Mechanická zatížení a řezné geometrie při soustružnických operacích [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.secotools.com>

NOVOTNÝ, Jiří. *Vizualizace vlivu změny geometrie obráběcího nástroje* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-04-16]. Bakalářská práce. Mendelova univerzita. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Černý, Csc.

Opatřebení břitů [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com>

PAZDERA, L., SMUTNÝ, J., MAZAL, P., *Využití metody akustické emise při sledování vlastností zatěžovaných materiálů a konstrukcí*. Brno: VUT FSI 2004. ISBN 80-214-2802-3.

Princip akustické emise [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz>

Průručka obrábění [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz>

Průručka pro technology: Frézování [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com>

ŠTULPA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 126 s. ISBN 807300207

TAJMAC-ZPS [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.tajmac-zps.cz>

Teorie soustružení [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.coptel.coptkm.cz>

UEKITA, M. a TAKAYA, Y. Tool condition monitoring for form milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 75 s [cit. 2017-04-16]. ISSN 02683768. Dostupné z: <https://www.scopus.com>

VASILKO, Karol. *Top trendy v obrábění: [průručka]*. Žilina: Media/St, 2006, 214 s. ISBN 8096895427.

Vzorce [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.octopustools.com>

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky

Obr. č. 1	Obráběcí soustava stroj-nástroj-obrobek (Kocman, 2011)	11
Obr. č. 2	Multifunkční obráběcí centrum firmy Tajmac MCV 2318 (tajmac-zps.cz)	13
Obr. č. 3	Pohyb nástroje a obrobku u vybraných typů třískového obrábění.....	14
Obr. č. 4	Řezné úhly nástroje (mitsubishicarbide.com).....	15
Obr. č. 5	Řezné úhly nástroje (coptel.coptkm.cz).....	15
Obr. č. 6	Řezné podmínky u frézování (isstech.cz)	17
Obr. č. 7	Řezné podmínky soustružení (octopustools.com)	17
Obr. č. 8	Závislost řezných podmínek na opotřebením bříty (zdroj autor).....	19
Obr. č. 9	Druhy opotřebením bříty (coptel.coptkm.cz, sandvik.coromant.com)	20
Obr. č. 10	Druhy opotřebením (zdroj autor)	21
Obr. č. 11	Vliv vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky (zdroj autor) ..	22
Obr. č. 12	Závislost změny řezných parametrů na řezných silách (secotools.com)	23
Obr. č. 13	Realizace řezného procesu (Kocman, 2011).....	24
Obr. č. 14	Oblasti plastických deformací v zóně řezání (Humár, 2008)	25
Obr. č. 15	Utváření třísky v různých materiálech obrobků (secotools.com)	26
Obr. č. 16	Základní rozdělení obrobitelnosti materiálů dle ISO 513 (isstech.cz).....	27
Obr. č. 17	Princip monitorování řezného procesu (zdroj autor)	28
Obr. č. 18	Přehled technologie akustické emise (mitrasgroup.com)	30
Obr. č. 19	Amplituda akustické emise (nde-ed.org)	30
Obr. č. 20	Kaiserův efekt (zdroj autor).....	33
Obr. č. 21	Snímač akustické emise (nde-ed.org)	33
Obr. č. 22	Lineární lokalizace (nde-ed.org).....	34
Obr. č. 23	Plošná lokalizace (nde-ed.org).....	34
Obr. č. 24	Snímač akustické emise (dakel.cz)	36
Obr. č. 25	Vnější konstrukce předzesilovače (dakel.cz).....	36
Obr. č. 26	Ishikawa diagram- složitost procesu obrábění (zdroj autor).....	38
Obr. č. 27	Konzolová frézka TOS FNK 25	39
Obr. č. 28	Použitý obráběcí nástroj (fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami)	39
Obr. č. 29	Použitý měřicí systém pro detekci akustické emise.....	40
Obr. č. 30	Konfigurace měřicí aparatury	40

Obr. č. 31 Pizoelektrický snímač	41
Obr. č. 32 Umístění snímače na obráběný materiál, použité lepidlo	41
Obr. č. 33 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 28 mm/min.....	43
Obr. č. 34 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 40 mm/min.....	43
Obr. č. 35 záznam akustické emise ocel 11 375 - posuv 80 mm/min.....	44
Obr. č. 36 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 28 mm/min.....	44
Obr. č. 37 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 40 mm/min.....	45
Obr. č. 38 záznam akustické emise ocel 12 050 - posuv 80 mm/min.....	45

Tabulky

Tabulka 1 Vybrané typy metod obrábění	12
Tabulka 2 Obráběcí stroje.....	12
Tabulka 3 Parametry snímače.....	41
Tabulka 4 Přehled vlastností ocel 11 375	42
Tabulka 5 Přehled vlastností ocel 12 050	42

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

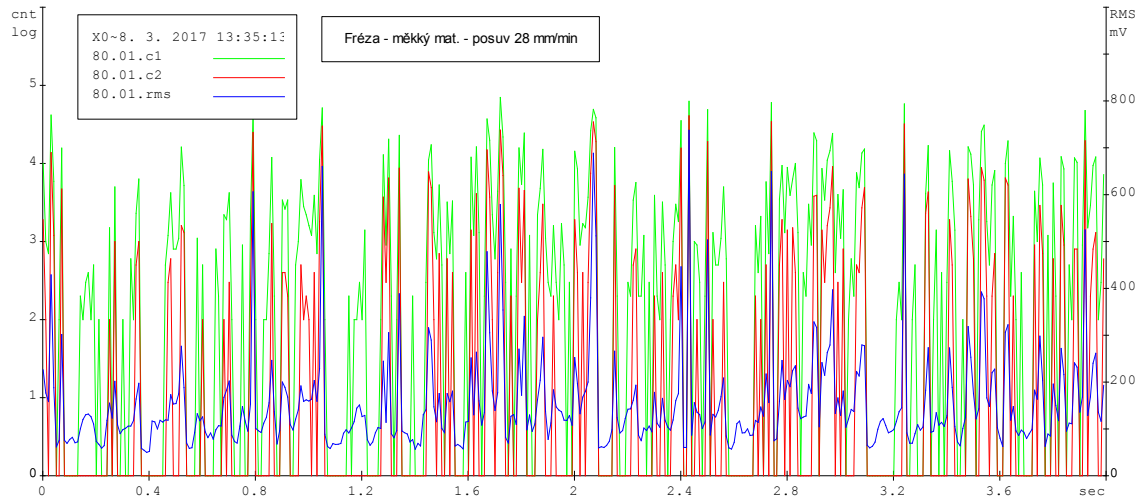
CNC	Computer numeric control – počítačově řízený
NC	Numeric control - číslicově řízený
ε_r	Úhel špičky
χ_r	Úhel nastavení hlavního ostří
χ_r'	Úhel nastavení vedlejšího ostří
γ_o	Úhel čela
α_o	Úhel hřbetu
β_o	Úhel břitu
δ_o	Úhel řezu
λ_s	Úhel sklonu hlavního ostří
v	Řezná rychlost
P	příkon
M	kroutící moment
f	rychlost posuvu

F	síla
RMS	energie akustického signálu
PVD	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
TCM	Tool condition monitoring – monitoring opotřebení nástroje

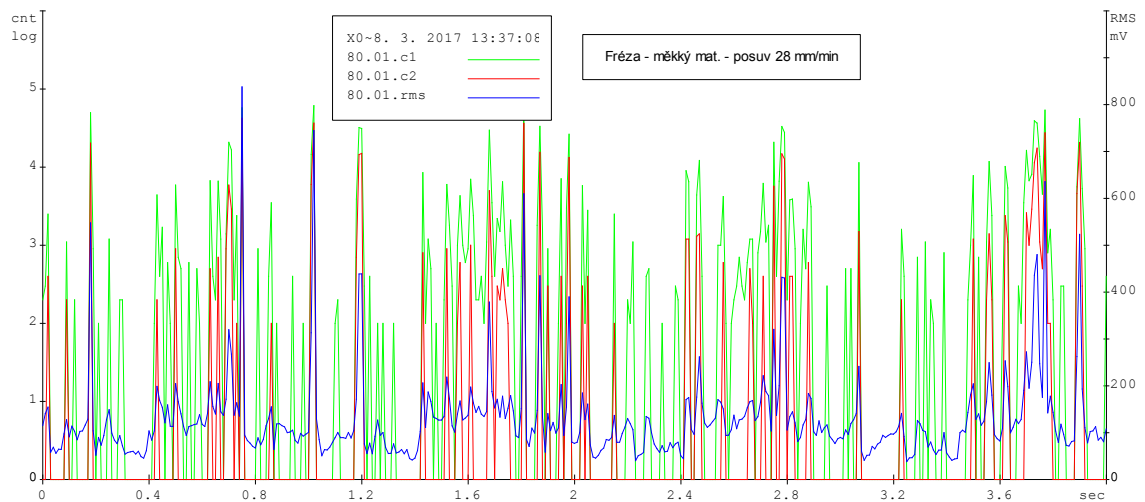
PŘÍLOHY

Naměřená data z akustické emise.

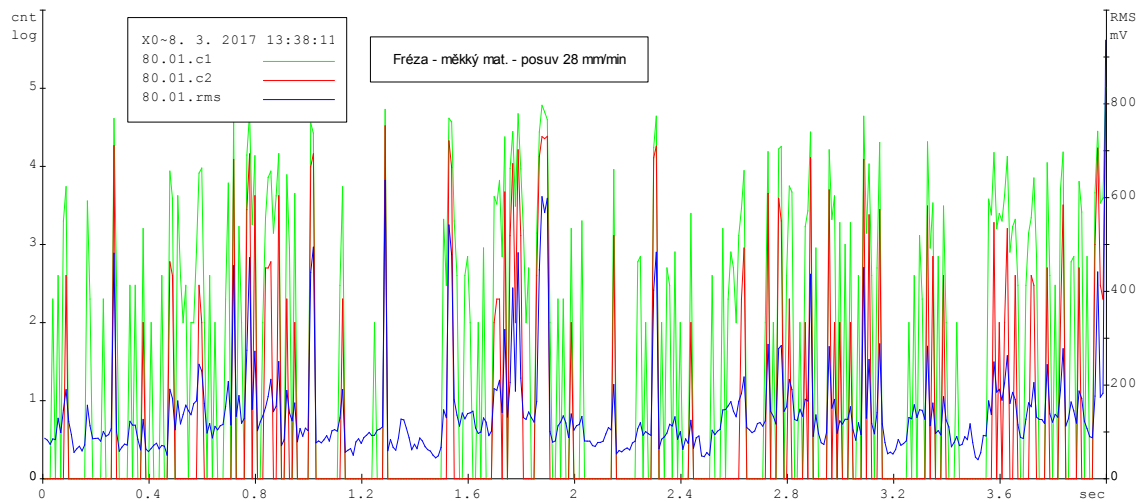
1. graf – 11 375- posuv 28 mm/min



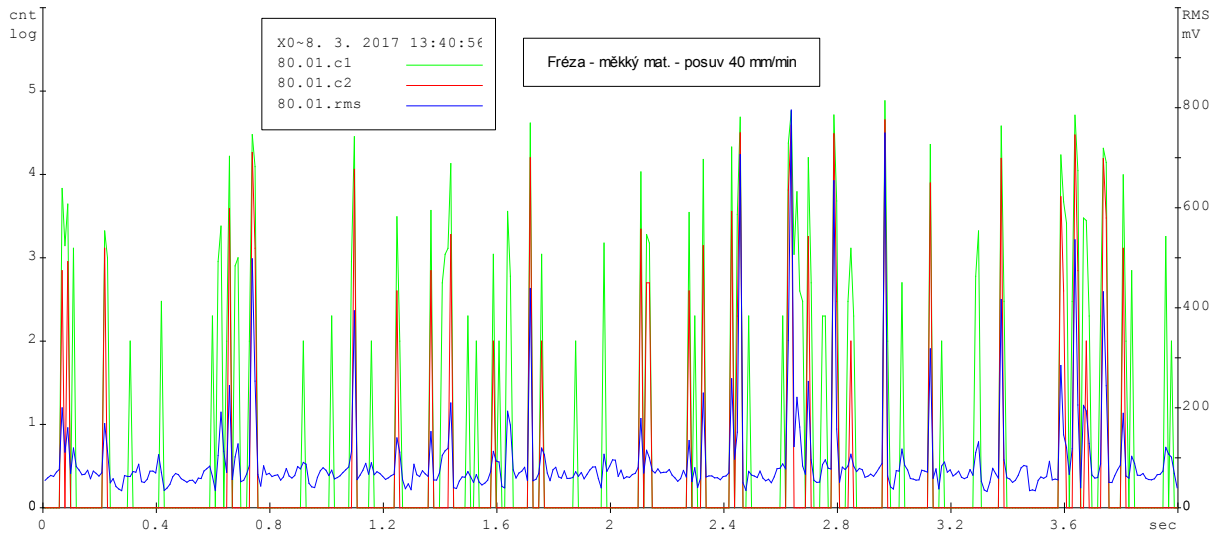
2. graf - 11 375 - posuv 28 mm/min



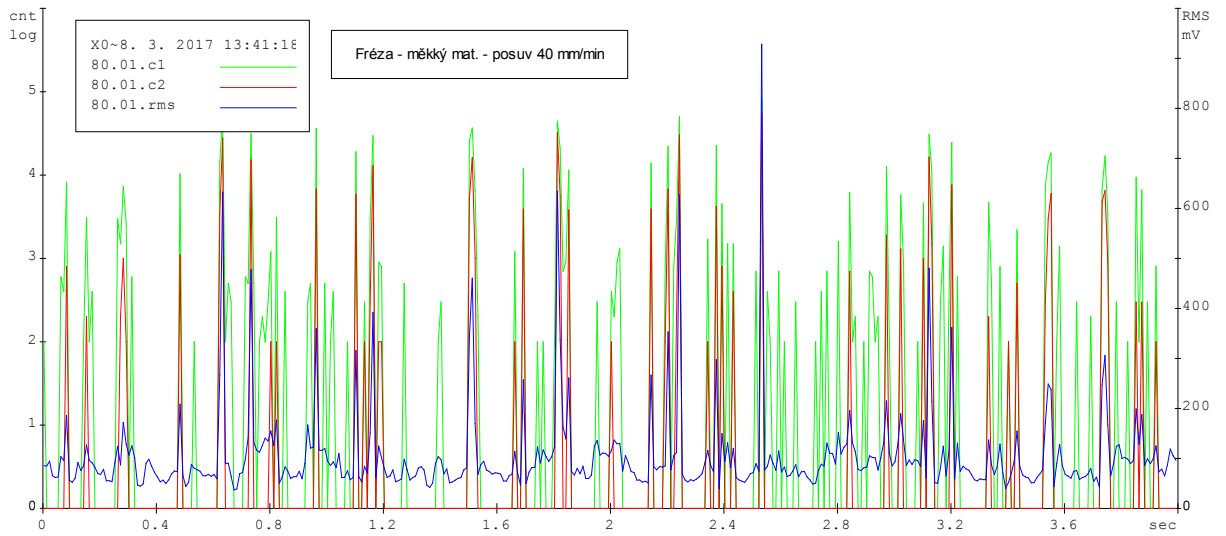
3. graf - 11 375 - posuv 28 mm/min



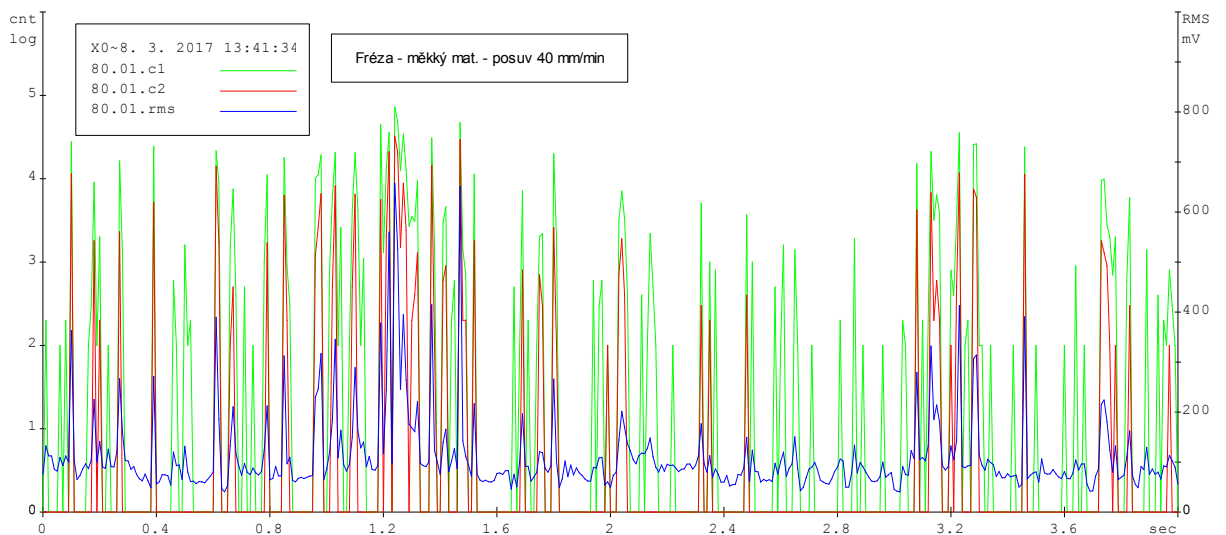
1. graf - 11 375 - posuv 40 mm/min



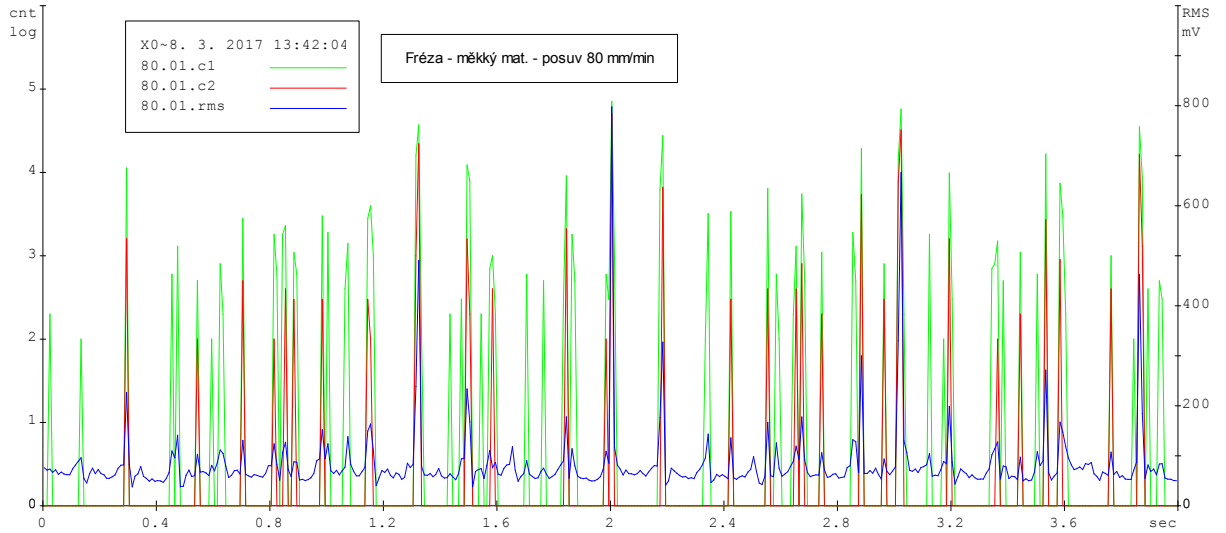
2. graf - 11 375 - posuv 40 mm/min



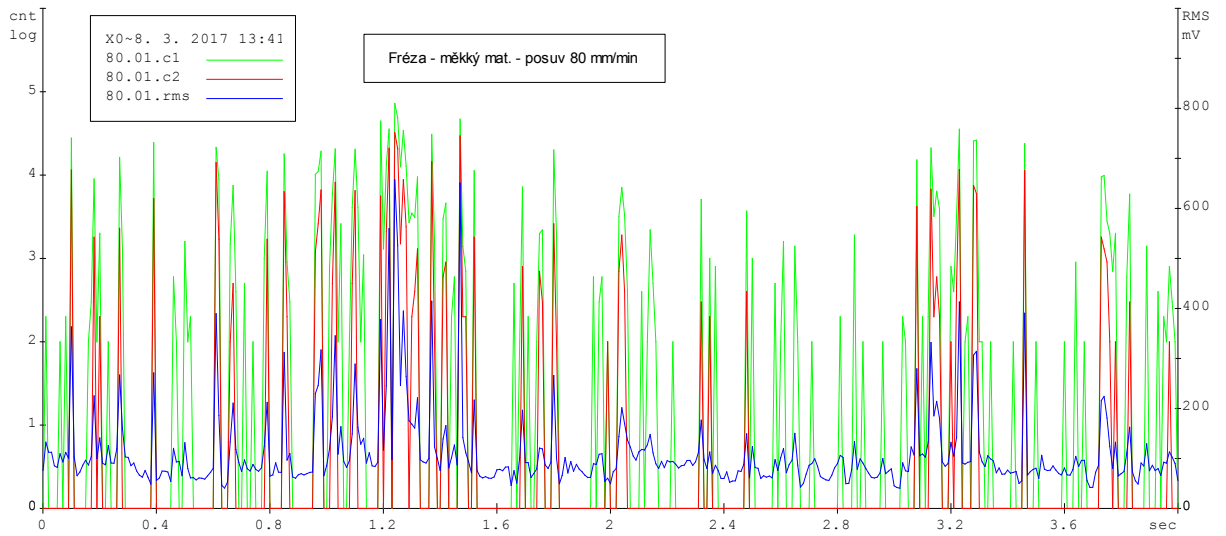
3. graf - 11 375 - posuv 40 mm/min



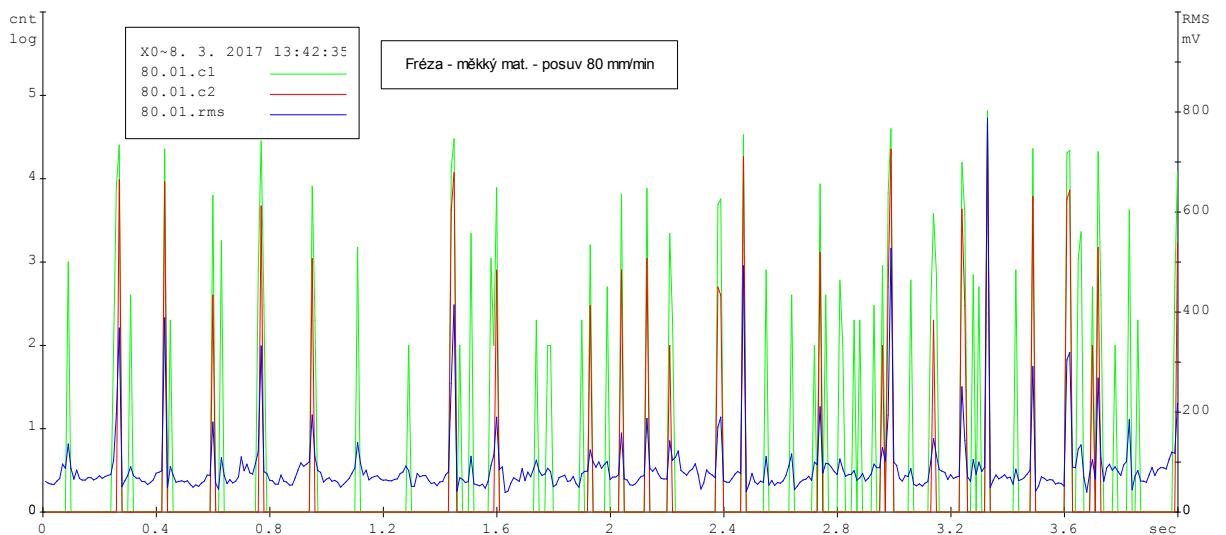
1. graf - 11 375 - posuv 80 mm/min



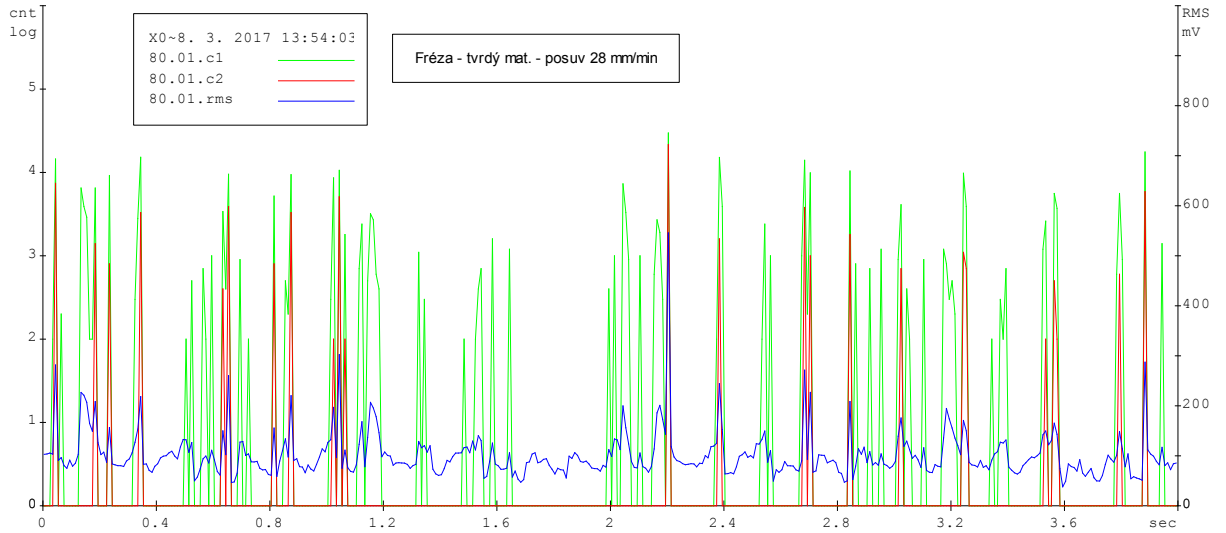
2. graf - 11 375 - posuv 80 mm/min



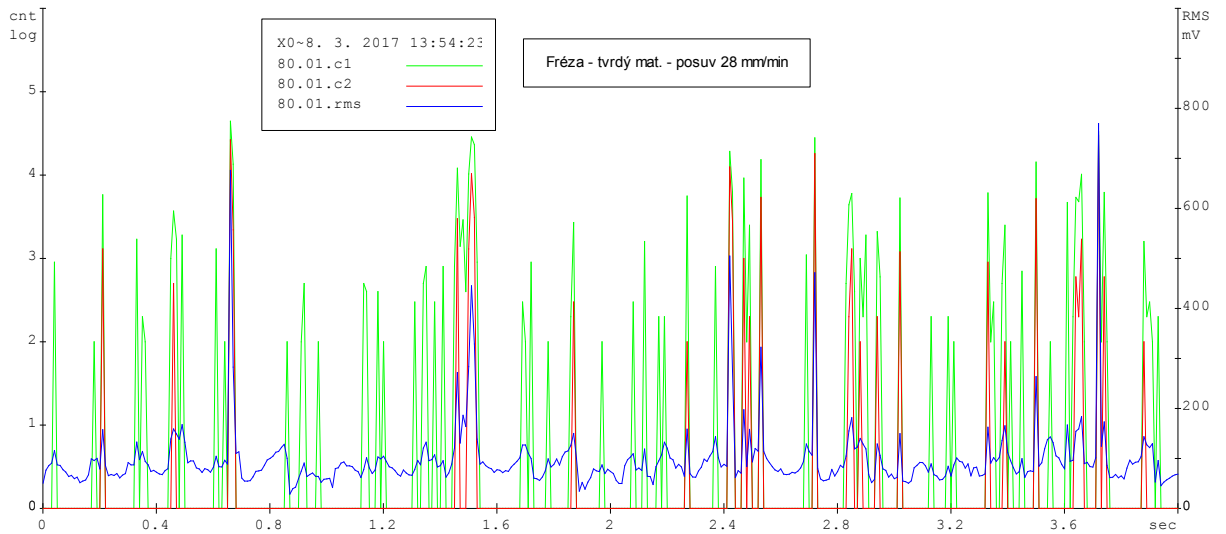
3. graf - 11 375 - posuv 80 mm/min



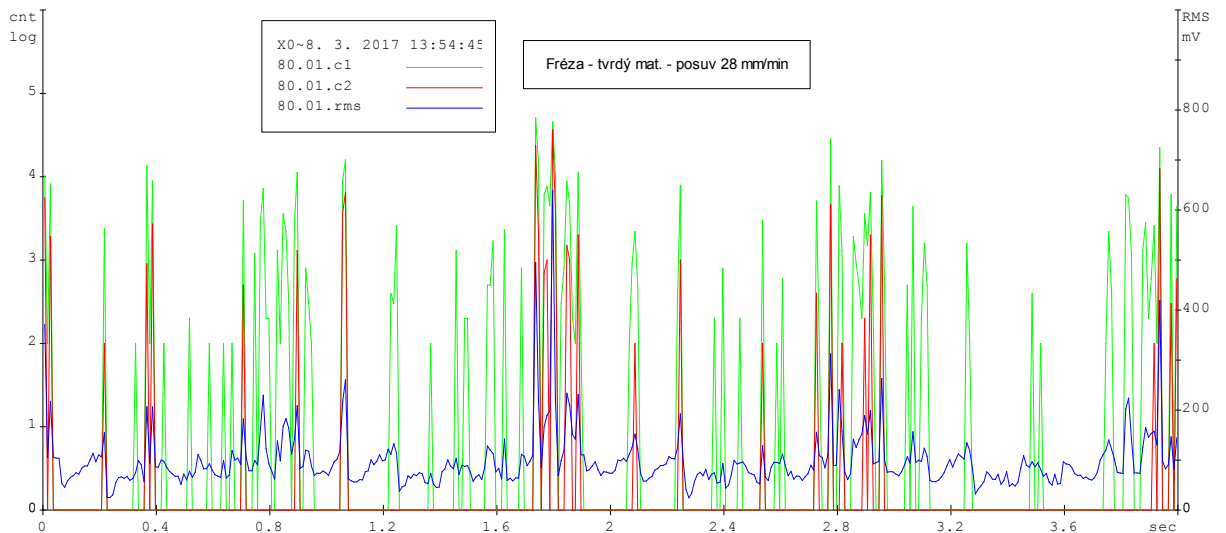
1. graf – 12 050 - posuv 28 mm/min



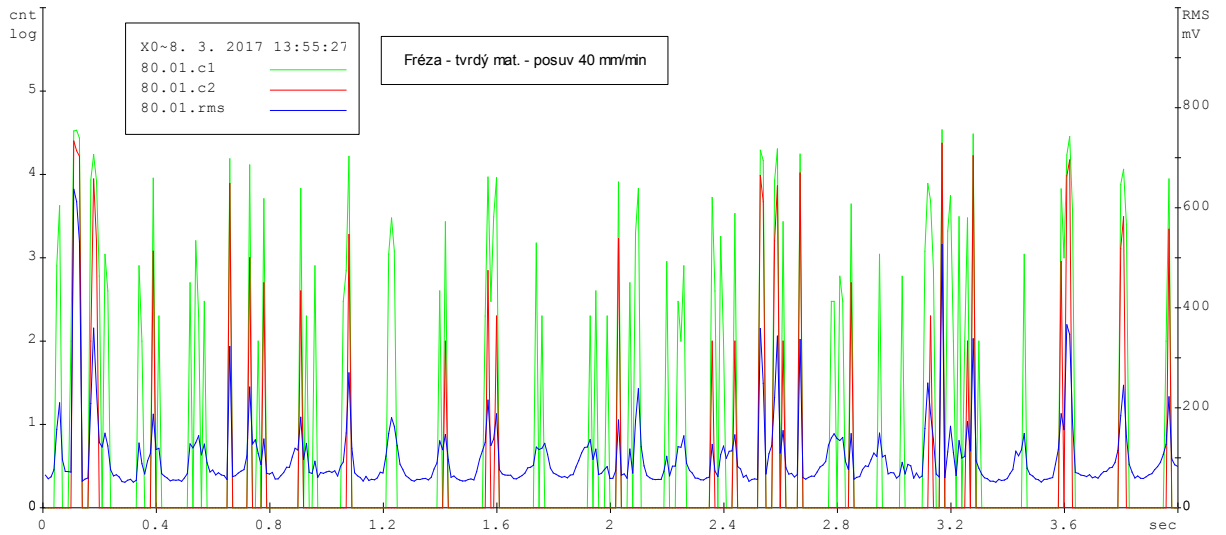
2. graf - 12 050 - posuv 28 mm/min



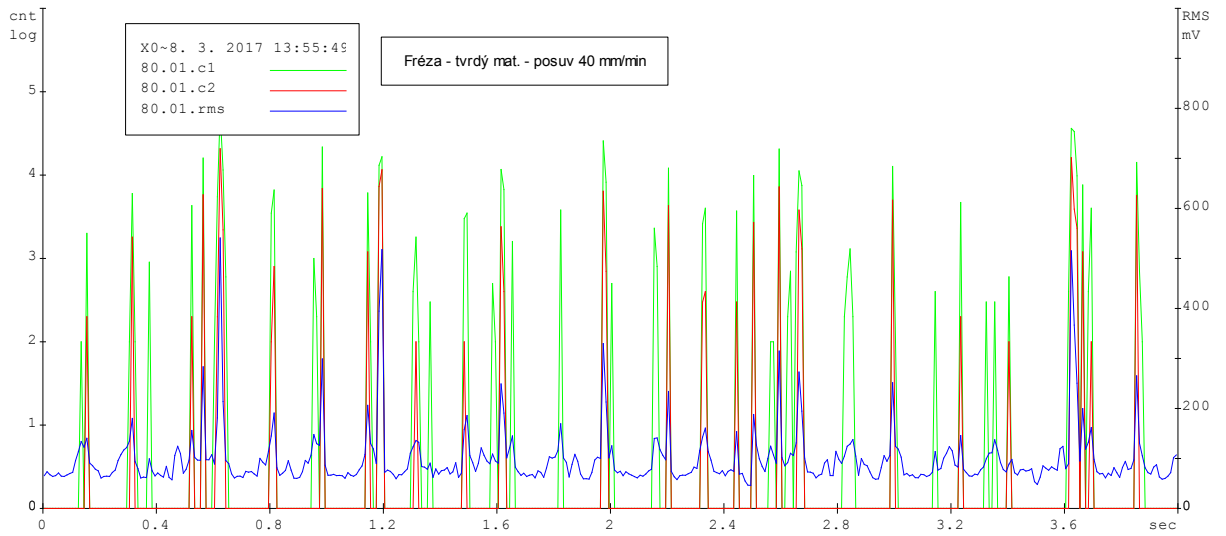
3. graf - 12 050 - posuv 28 mm/min



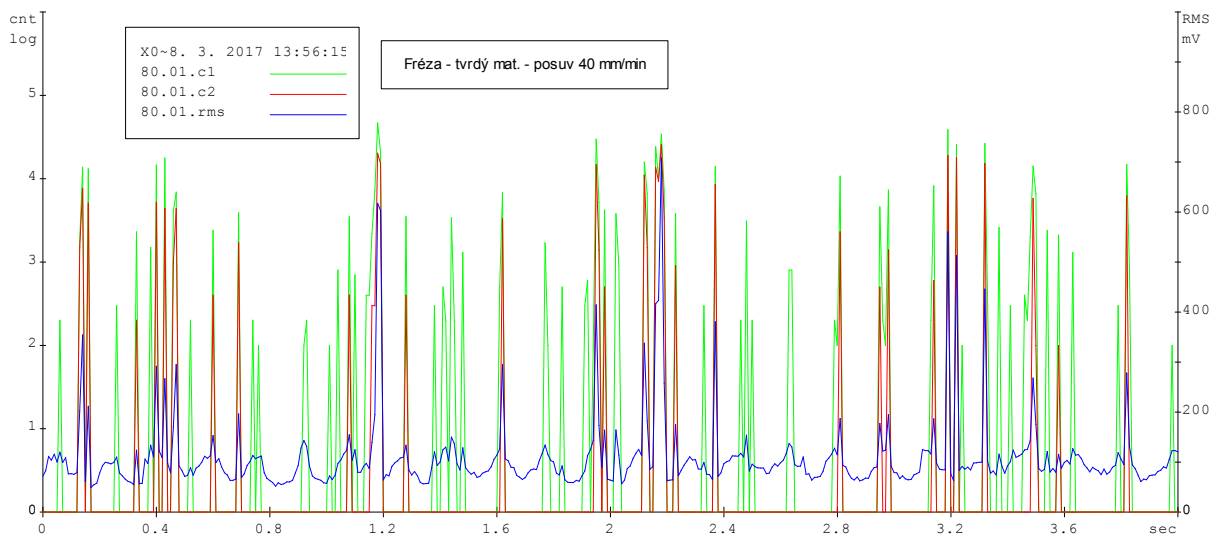
1. graf - 12 050 - posuv 40 mm/min



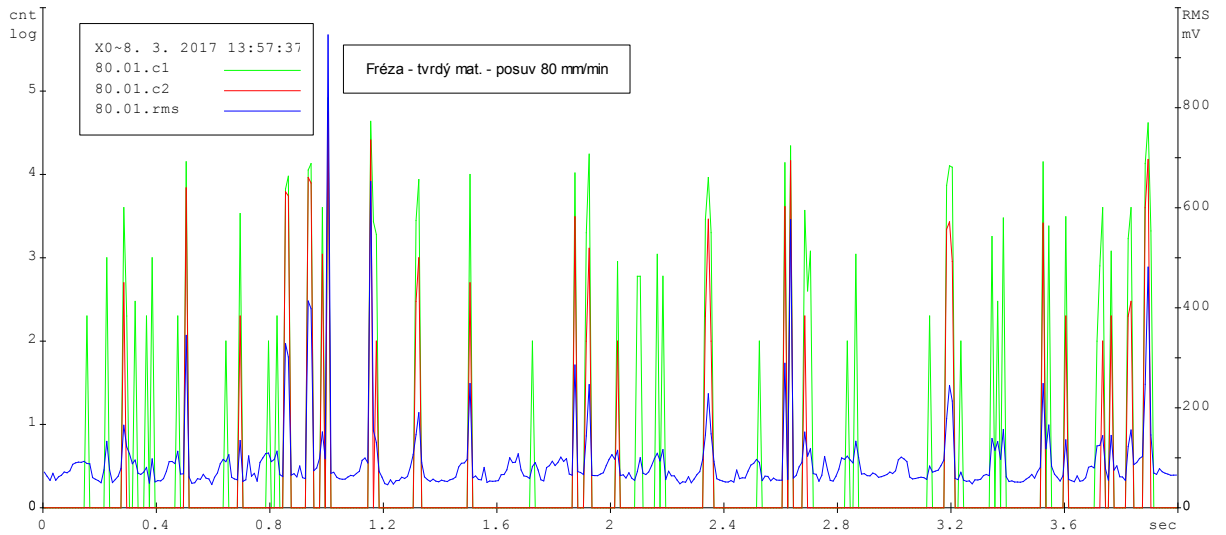
2. graf - 12 050 - posuv 40 mm/min



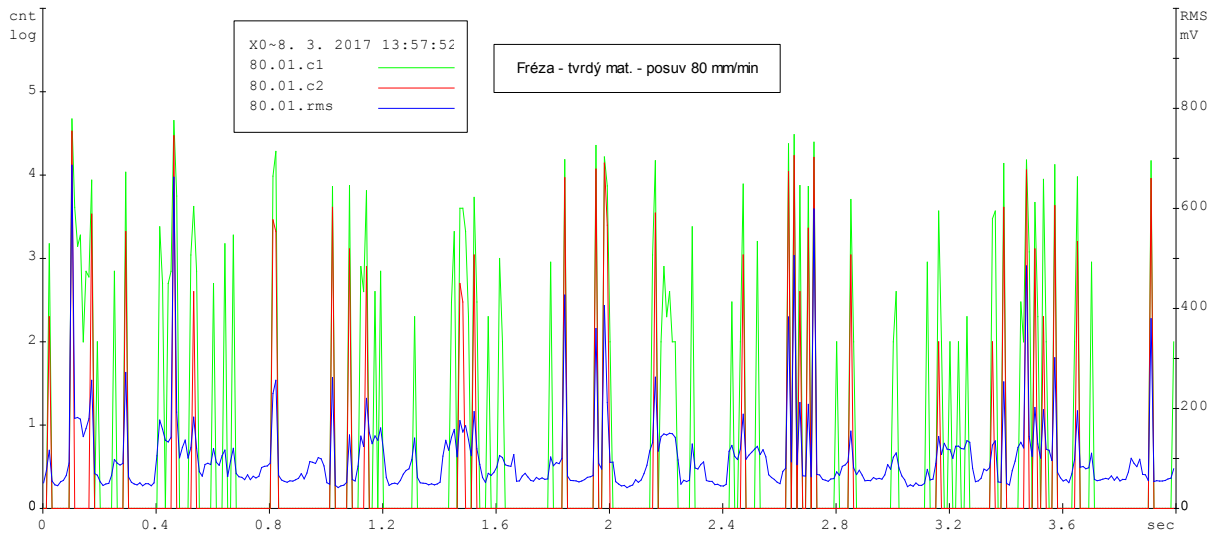
3. graf - 12 050 - posuv 40 mm/min



1. graf - 12 050 - posuv 80 mm/min



2. graf - 12 050 - posuv 80 mm/min



3. graf - 12 050 - posuv 80 mm/min

