

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Diplomová práce

Monitorování procesu vrtání

Autor: Bc. Jan Perníkl

Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Praha 2015

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne:

.....

Bc. Jan Perníkl

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za připomínky a věcné rady, které mi poskytl při řešení zadaného problému a zpracování diplomové práce. Dále bych věnoval poděkování celé své rodině a blízkým přátelům za podporu během studia.

Anotace

Cílem této diplomové práce je popsat problematiku monitorování procesu vrtání děr malých průměrů. V teoretické části práce je popsána potřeba nasazení monitorovacích technik v praxi a jejich výhody. Dále práce obsahuje stručný přehled monitorovacích technik a jejich popis. V praktické části práce je navržen experiment, který ověřuje použitelnost zvolené techniky monitorování v konkrétní aplikaci. Práce je zakončena popisem průběhu experimentu, vyhodnocením získaných dat a jejich závěrečnou diskuzí.

Klíčová slova

vrtání, monitorování procesu obrábění, stochastika procesu obrábění, řezná síla, řezné podmínky, opotřebení nástroje

Annotation

This thesis is aimed on the issue of a monitoring of the drilling process of small diameter holes. The preface part of this thesis describes the need for deployment of monitoring techniques in industry and its benefits. Further part contains a brief overview of the monitoring techniques and their description. An experiment which validates the applicability of the chosen monitoring method in a specific case is designed in the practical part of this thesis. The thesis is concluded with a description of workflow during the experiment, the evaluation of the collected data and their final discussion.

Keywords

drilling, machining process monitoring, machining process stochasticity, cutting force, cutting conditions, tool wear

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Problematika vrtání děr malých průměrů	8
3	Monitorování obráběcího procesu	11
4	Přehled způsobů monitorování procesu vrtání.....	13
4.1	Řezné síly a krouticí moment.....	13
4.2	Vibrace, zvuk a ultrazvuk	15
4.3	Příkon pohonů	18
5	Výběr metody monitorování	19
5.1	Zařízení pro měření silového signálu	19
6	Síly při vrtání	23
6.1	Rozklad sil na břitu vrtáku	24
6.2	Empirické výpočty sil a krouticího momentu	24
6.2.1	Posuvová síla	24
6.2.2	Řezná síla.....	25
6.2.3	Krouticí moment	26
7	Experimentální část práce	27
7.1	Materiál obrobků.....	27
7.1.1	Silafont®-30 (SF30)	28
7.1.2	Anticorodal®-70 (AC70).....	28
7.2	Výběr nástroje	28
7.3	Technická příprava experimentu.....	30
7.3.1	Úprava polotovarů	30
7.3.2	Zpracování v CAD/CAM.....	30
7.3.3	Příprava a seřízení nástroje	32
7.3.4	Příprava monitorovací techniky a upnutí obrobku na stroji	34
7.4	Ověření monitorovací techniky.....	37

7.5	Testování řezných podmínek	39
7.5.1	Stroj LM1 – vnější chlazení.....	40
7.5.2	Stroj LM2 – vnitřní chlazení skrz nástroj	41
7.6	Testy opotřebení nástroje	42
7.6.1	Opotřebení nástroje – SF30	44
7.6.2	Opotřebení nástroje – AC70	45
7.6.3	Vzájemné porovnání obou materiálů.....	47
7.7	Monitorování síly F_z při vrtání.....	48
7.7.1	Závislost síly na velikosti posuvu.....	48
7.7.2	Měření sil na konci trvanlivosti nástroje.....	51
8	Závěr	56
	Seznam literatury	58
	Seznam obrázků.....	61
	Seznam tabulek	63

1 Úvod

Současnou situaci ve výrobním průmyslu lze charakterizovat požadavky na zvýšení kvality produktu, snížení velikosti dávek a zaměřením na produkci „just-in-time“. Celosvětové konkurenční prostředí vyžaduje od podniků vyšší produktivitu, spolehlivost a kvalitu produktů. Pod rostoucím tlakem se tak ocitají strojírenské podniky, které musejí k udržení svojí konkurenceschopnosti produkovat výrobky s minimálními výrobními náklady.

Neustálý rozvoj strojů a obráběcích nástrojů umožňuje zvyšování rezných rychlostí, tvrdé obrábění, vysokorychlostní frézování a další pokročilé výrobní metody. Tyto technologie jsou v současné době trendy ve výrobním průmyslu. Ke zmíněné minimalizaci nákladů na výrobky je nezbytně nutné, aby byly všechny výrobní prostředky využívány za optimálních podmínek. Zatímco pracovními podmínkami jsou myšleny všechny faktory ovlivňující daný obráběcí proces. Jedná se například o materiál nástroje, kvalitu ostření, stav břitu při výměně, rezné podmínky, dobu obrábění daným břitem apod. Pokud proces neprobíhá za těchto optimálních podmínek, musejí nutně vznikat ekonomické obtíže.

Zajištění těchto optimálních podmínek není jednoduchou záležitostí, neboť při hledání optima je nutné pracovat s mnoha proměnnými. Při optimalizaci je v principu nutné provést nejprve výběr nástroje z aktuální nabídky na trhu. Optimální rezné podmínky poté vycházejí právě ze zvoleného nástroje. (1)

Významnou roli v optimalizaci procesu obrábění hraje jeho stochastika, možnost monitorování jeho průběhu, či využití adaptivních řídicích systémů. Právě monitorování procesu obrábění je hlavním tématem této diplomové práce.

Cílem práce je podat přehled o způsobech monitorování procesu vrtání děr malých průměrů, výběr vhodné a přitom dostupné techniky monitorování a popsat její princip. V praktické části je hlavním záměrem návrh experimentu, realizace dané techniky monitorování a experimentální ověření její použitelnosti ve zmíněné aplikaci.

2 Problematika vrtání děr malých průměrů

Na poli obráběcích operací vrtání samo o sobě neumožňuje přímé sledování procesu úběru materiálu. Z tohoto důvodu je možnost jeho zkoumání znesnadněna. Efektivní a spolehlivá výroba děr však s sebou nese výrazné ekonomické důsledky. Jako příklad důležitosti procesu vrtání lze uvést výrobu tepelného výměníku nukleární centrály, kde jeden výměník může obsahovat až 16 000 děr, které jsou navíc vyráběny v poměrně těsných tolerancích. V leteckém průmyslu je produktivní vrtání otvorů nezbytné, neboť jedno křídlo dopravního letadla obsahuje přibližně 45 000 děr. Je tedy zřejmé, že i malá úspora času při výrobě jedné díry přináší velké časové a potažmo i finanční úspory v rámci celého procesu. Dalším důležitým faktorem, které snižuje výrobní náklady, je plné využití trvanlivosti nástroje v rámci jednoho cyklu a jeho případná včasná výměna, aby nedošlo k poškození obrobku. Studie 145 společností zabývajících se obráběním potvrdila, že vrtací proces je jeden z nejdůležitějších z hlediska počtu operací a spotřeby času. Hluboké vrtání s poměrem vrtané hloubky a průměru nástroje (l/d) větším než 12 zaujímá 7% ze všech prováděných operací. Spotřeba času na stroji této technologie však odpovídá celým 28% (Obrázek 2.1). Z výše uvedeného je evidentní ekonomický potenciál, který technologie vrtání skýtá (2).



Obrázek 2.1 – Zastoupení technologií dle počtu prováděných operací (vlevo) a spotřeba strojního času dané technologie (vpravo).

Zvláštní případem výroby otvorů je hluboké vrtání děr malých průměrů nástroji, které jsou navrženy přímo pro tento účel. Obvykle se při vrtání hloubka pohybuje kolem pětinasobku průměru nástroje. Při hlubokém vrtání se poměr l/d zvyšuje na 40 i více. Z průzkumů vyplývá, že spolu s chemicko-tepelným zpracováním a povrchovými

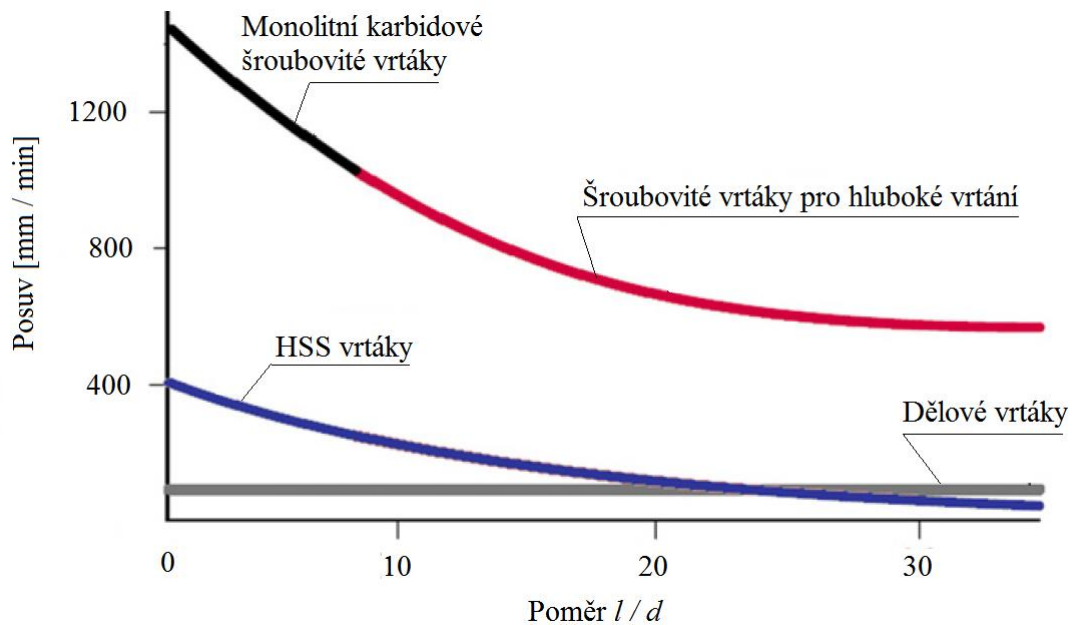
úpravami je výroba děr jedním z hlavních procesů přidávajícím hodnotu vyrobeným součástím.

Prvními nástroji navrženými pro hluboké vrtání byly dnes už dobře známé dělové vrtáky (Obrázek 2.2). V současnosti jsou tyto nástroje široce používány v automobilovém průmyslu při výrobě bloků motorů, prvků převodovek, hřídelů apod. Nicméně hodnoty posuvů použitelných pro tento typ nástrojů jsou obvykle nižší než 900 mm / min pro slitiny hliníku, přibližně 250 mm / min pro litinu a pouhých 180 mm / min pro ocel. Dělový vrták musí být navíc podpořen vysokotlakým chlazením skrze nástroj (10 – 150 barů) a to zejména ze dvou důvodů. Prvním je obtížný přístup chladicí kapaliny do místa řezu a druhým je odvod třísky ven z vrtané díry. (2)



Obrázek 2.2 – Dělové (vlevo) a šroubovitě (vpravo) vrtáky. (3)

V posledních letech byly vyvíjeny nové technologie využívající nástroje z rychlořezných ocelí (HSS – High Speed Steel) nebo slinutých karbidů s vnitřními otvory pro užití chlazení skrz nástroj. Mezi nejvýznamnější patří šroubovitě vrtáky (Obrázek 2.2). V současné době jsou v nabídce pro hluboké vrtání nástroje poměrně malých průměrů (až 3mm). Jedna z největších výhod těchto nástrojů je zvýšení produktivity přibližně 4 krát oproti dělovým vrtákům. Charakteristické je malé zmenšení průměru nástroje za jeho špičkou. To umožňuje bezpečný odvod třísky a snižuje tření mezi nástrojem a obrobeným povrchem. Dále jsou šroubovitě vrtáky opatřeny kluznou hranou tzv. fazetkou, která zlepšuje vedení nástroje v otvoru a zvyšuje tuhost nástroje. Tento typ nástrojů se běžně vyrábí se dvěma vnitřními kanálky pro přívod chladicí kapaliny skrz nástroj. Je nutné také zmínit doporučení použití tzv. pilotních děr pro zamezení vyosení vrtáku při nájezdu do záběru a zvýšení životnosti nástroje, především v případě vysokého poměru l / d . Porovnání používaných hodnot minutových posuvů v závislosti na vrtané hloubce a průměru nástroje l / d jednotlivých technologií ukazuje Obrázek 2.3. (2)

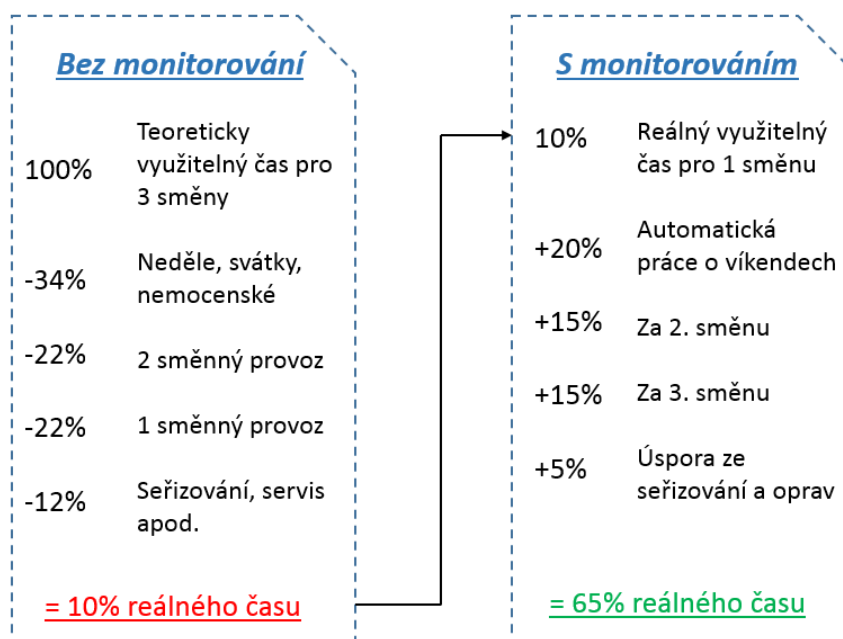


Obrázek 2.3 – Porovnání minutových posuvů v závislosti na poměru l/d . (2)

Z hlediska monitorování je vrtání děr malých průměrů obtížnou disciplínou. Je to především z toho důvodu, že se zmenšující se velikostí nástroje se zvyšují nároky na citlivost monitorovací techniky. Názorným příkladem je monitorování sil při vrtání. Pokud je vrtán velký průměr síly působící na nástroje a obrobek jsou velké a dobře měřitelné. Stejně tak změna působící síly při opotřebení nástroje je lépe zachytitelná u nástrojů větších průměrů. Tyto jednoduché fakty je nutné při volbě monitorovací techniky řádně zvážit.

3 Monitorování obráběcího procesu

Monitorování procesu obrábění se dostává do popředí s využíváním nákladných výrobních zařízení. Pro nasazení takové techniky je zásadní spolehlivost provozu, aby bylo zajištěno její ekonomické využití. Bylo prokázáno, že nasazením monitorovacích technik lze ušetřit až 55% efektivně využitelného operačního času stroje, oproti procesům bez monitorování.



Obrázek 3.1 – Využitelný operační čas stroje. (1)

Zásadní úsporou jsou potřebné časy pro seřizování strojů a jejich údržbu. Zde je možné dle (1) využitím monitorovacích systémů ušetřit až 5% z celkového času na 1 směnu, pro tři směny tedy 15% a z celkového využitelného času celých 45%.

Další úspory, až 20% z celkového teoretického operačního času stroje, je dosaženo možností práce stroje bez přítomnosti obsluhy. Předpokladem pro toto je programové řízení stroje, dostatečně veliké zásobníky nástrojů s možností náhrady opotřebovaných nástrojů a jejich automatické výměny, možnost automatické manipulace s materiálem (polotovary a obrobky). (1)

Monitorování se provádí vhodnými senzory, jejichž výstup je dále zpracován pomocí vhodné logiky. Monitorované subjekty lze rozdělit do dvou základních skupin, které určují, zda je pro daný subjekt kritická rychlost odezvy monitorovacího systému.

U operací časově kritických je nutné zajistit zpětnou vazbu monitorovacího systému v řádu milisekund, zatímco operace časově nekritické jsou v některých případech snímány jen několikrát za minutu. Tabulka 3.1 uvádí možné subjekty monitorování vztahované ke stroji, nástroji, obrobku a řeznému prostředí.

Tabulka 3.1 – Subjekty monitorování. (1)

	Čas je kritický	Čas není kritický
Stroj	NC řízení Kolize	Přesnost Tepelná dilatace
Nástroj	Destrukce břitu Nájezd do mat.	Přítomnost Seřízení Opotřebení
Obrobek	Rozměr obrobku Drsnost obr. plochy	Rozměr polotovaru Obr. materiál
Řezný proces	Chvění Silové jevy Utváření třísky	Řezné prostředí

Nejdůležitější oblastí je monitorování nástroje, resp. jeho opotřebení a případná destrukce (lom). Ukazuje se, že právě konec trvanlivosti nástroje a jeho lom jsou společně zásadními vlivy pro výpadky v procesu obrábění. Společně představují často podíl více než 40% z celkového ztrátového času, který je mimo problémy s nástrojem dále způsoben nepřesností obrábění, nevyhovující drsností obrobene plochy, prostoji, údržbou, bezpečnostními požadavky apod. Monitorování stavu nástroje je významné pro ekonomické využití skutečné trvanlivosti nástrojů a zabránění haváriím způsobených lomem nástroje (4). Lze monitorovat i vylamování částí břitu a předejít tak jemu znehodnocení. Krom toho systém upozorní i na nevhodně zvolený nástroj pro danou aplikaci. (1)

4 Přehled způsobů monitorování procesu vrtání

V předchozí kapitole byly diskutovány ekonomické dopady vrtání na proces obrábění a z toho vyvozena potřeba monitorování stavu nástroje pro zajištění spolehlivosti a hospodárnosti procesu. Bohužel dosud neexistuje spolehlivá metoda předpovědi destrukce vrtáku, neboť tento jev je velice stochastický. Dokonce i při použití vrtáků ze stejné série dochází k prasknutí nástroje nahodile. (5)

Hlavním důvodem stochastické podstaty zlomení vrtáku při obrábění jsou nehomogenity obsažené v obráběném materiálu a v materiálu nástroje. Dalším důvodem je asymetrie břitu vrtáku způsobená nepřesným broušením. (6) (7)

Kaldor a Lenz (8) dokázali, že nedokonalost geometrie břitu vrtáku může ovlivnit jeho trvanlivost v rozmezí 30 – 90%.

Z uvedených důvodů je takřka nezbytné on-line monitorovacího systému pro vrtání. Z provedených výzkumů lze použitelné on-line monitorovací systémy rozdělit do několika skupin dle parametrů, které jsou během procesu snímány a analyzovány.

- řezná síla a krouticí moment
- vibrace, zvuk a ultrazvuk
- příkon na pohonech stroje

4.1 Řezné síly a krouticí moment

Během procesu obrábění je logické monitorovat velikosti sil, které podávají relevantní informaci o stavu nástroje v řezu. Tato metoda vychází mimo jiné z poznatku, že při konstantních řezných podmínkách se zvětšujícím se opotřebením nástroje rostou i řezné síly (9). Což je důsledkem zvýšeného tření mezi materiálem obrobku a nástrojem. Při vrtání je možné monitorovat signál krouticího momentu, posuvovou sílu (v ose Z) a vychylující síly (síly působící na obrobek v osách X a Y). Všechny tyto signály byly měřeny a vyhodnocovány v mnoha odborných pramenech, například v (9) (5).

Vrtání, zahlubování, vystružování a závitování svou podstatou vychází z toho samého obráběcího procesu. Nástroje jsou většinou vícebřité. Předmětem analýzy jsou u vrtání následující síly:

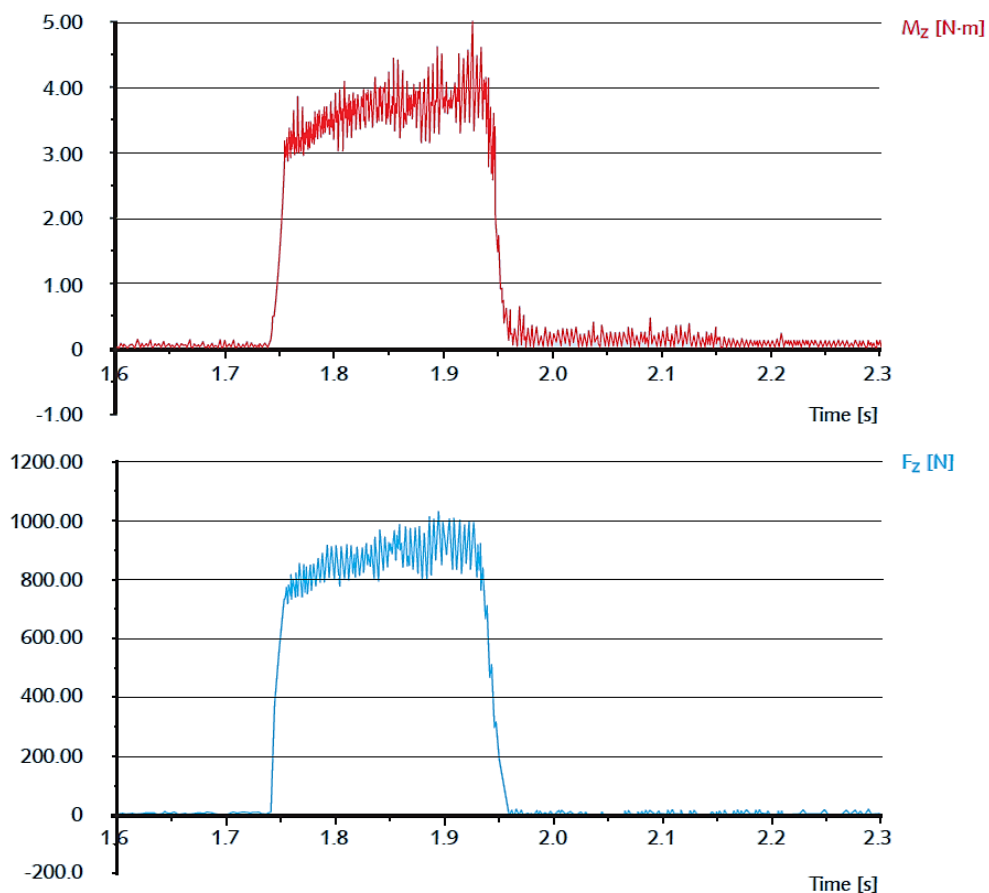
- krouticí moment od vrtání M_z

- síla od posuvu F_z
- vychylující síly F_x, F_y

Vychylující síly F_x, F_y jsou kolmé k ose vrtání a poskytují další informace o procesu vrtání. Vzhledem k požadavkům na měření sil při vrtání se užívají v principu dvě techniky:

1. Obrobek je upnut na **stacionárním** (deskovém) **dynamometru**. Je žádoucí, aby byl pro obrábění řádně vystředěn vzhledem k horní desce dynamometru. Upnutí musí být dostatečně tuhé.
2. Nástroj (vrták) je vložen do upínací sestavy obsahující **rotační dynamometr** nebo **tenzometry**. Tyto rotační systémy jsou výhodné, neboť dokáží přesně měřit nezávisle na velikosti obrobku a nejsou kladeny zvýšené nároky na jeho upnutí.

Záznam měření jednou z uvedených technik vypadá následovně:

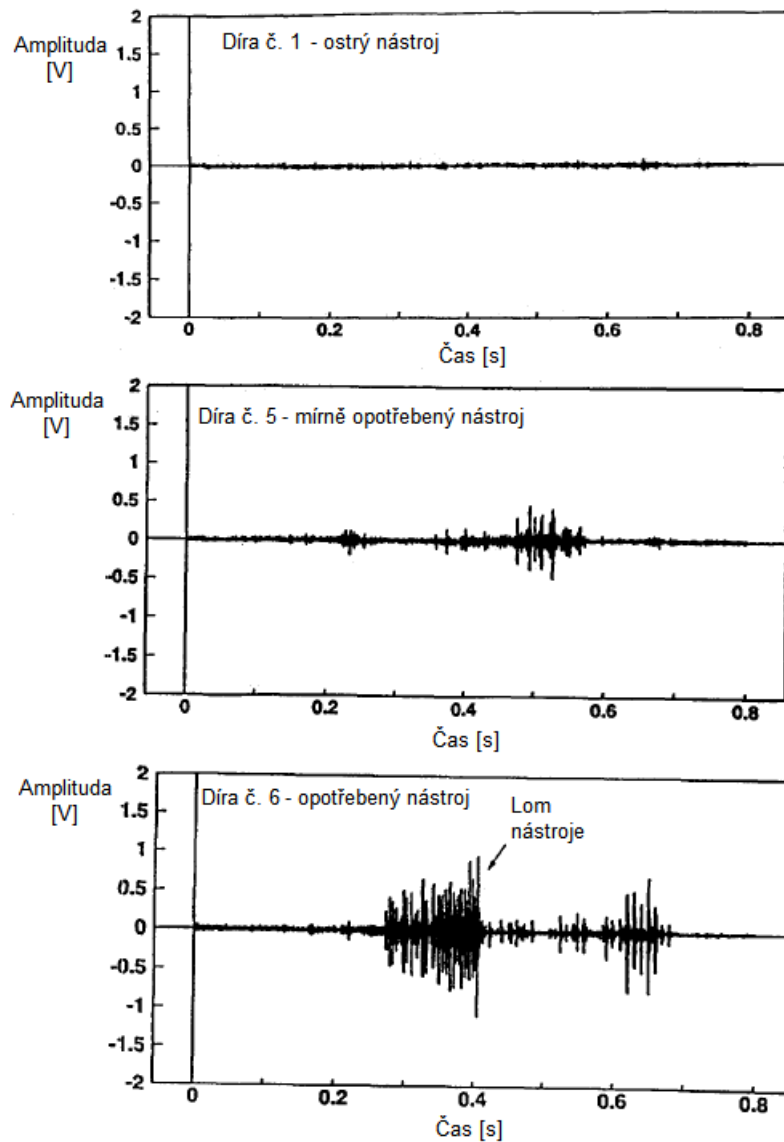


Obrázek 4.1 – Měření krouticího momentu a síly F_z na stacionárním dynamometru.

Opotřebení vrtáků se jako takové liší od ostatních obráběcích nástrojů. Kvůli tolerancím při výrobě je vrták vždy do jisté míry nesymetrický, a proto se nejprve opotřebovává pouze jeden břit (10). Druhý břit do tohoto momentu není v kontaktu s materiálem, je tedy ostřejší a začíná řezat později. Tento střídavý proces pokračuje, dokud se vůle nevymezí a je dosaženo symetrie. V okamžiku dosažení kritického opotřebení dojde k lomu vrtáku.

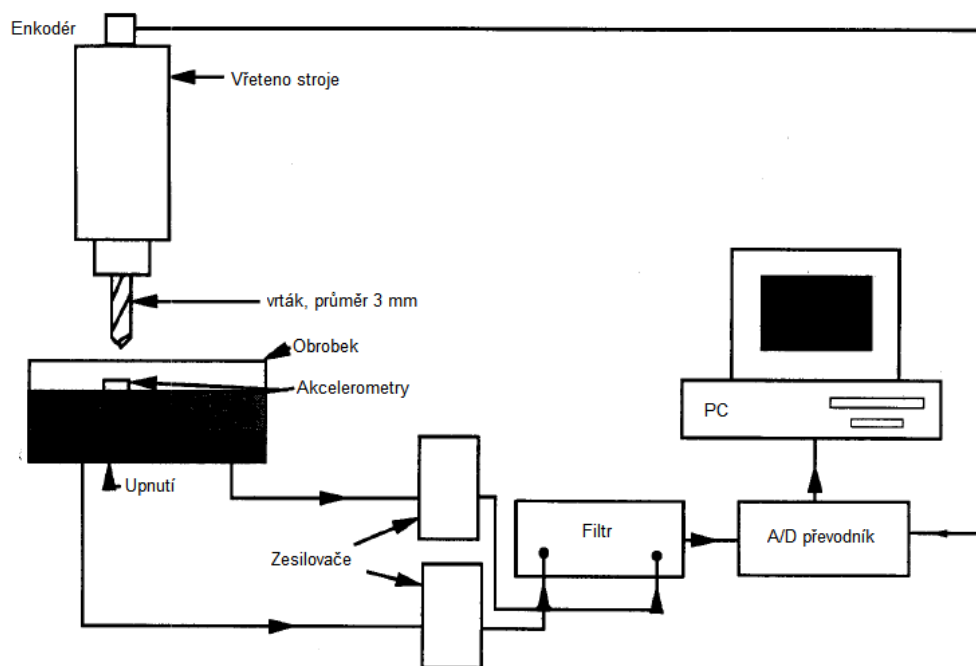
4.2 Vibrace, zvuk a ultrazvuk

Vibrace jsou široce využívány pro monitorování stavu rotačních strojů. Avšak jejich použití již není tak běžné pro sledování obráběcích nástrojů. Toto plyne především ze skutečnosti, že měření zvuku a vibrací je velmi citlivé na rušivé signály z okolí a šumy spojené se samotným obráběcím procesem. Neoddiskutovatelnou výhodou je jednoduchost implementace měřicí techniky a skutečnost, že není nutné modifikovat nástroj ani zasahovat do upnutí obrobku (11). Na druhou stranu se v literatuře uvádí řada nevýhod jako např. závislost na použitých materiálech obrobku, změně řezných podmínek a struktuře obráběného materiálu. Záznam signálu vibrací může vypadat jako např. na následujícím obrázku.



Obrázek 4.2 – Záznam monitorování vibrací (11).

Práce (11) se zabývá vývojem monitorovací metody založené na měření vibrací pro detekci opotřebení a lomu vrtáků s průměry 3 až 6 mm. Během experimentu zde byly měřeny vibrace jak v příčném, tak v podélném směru a autoři dokázali, že přirozené frekvence v jednotlivých směrech nejsou závislé na rozměru vrtáku. Toto zjištění významně zjednodušuje monitorování pro široký rozsah průměrů vrtáků. Dále potvrdili, že hlavní budící vliv do směrů Y a Z při vrtání mají točivý moment a axiální síla.



Obrázek 4.3 – Schéma aparatury pro měření a vyhodnocení signálu od vibrací (11).

V experimentu, který je popsán v (12) byly použity tři akcelerometry, každý z nich měřil ve směru jedné osy. Kombinace měření signálu vibrací a zvuku byla použita v práci (13). Měření a analýza zvukového signálu jsou probírány podrobněji v (10).

Teoreticky je možné získat stejné výsledné hodnoty jak měřením zvuku, tak detekcí vibrací, neboť na rozhraní povrchu obrobku / nástroje jsou mechanické vibrace částečně přeneseny na vibrace vzduchu, tedy zvuk. Nicméně tento přenos z pevné látky na plynnou ovlivňuje mnoho faktorů, vstupují do něj šumy z okolí a významně se tak liší výsledné frekvence v porovnání s naměřenými hodnotami u vibrací. Obecně je tedy měření zvuku více náchylné na zkreslení signálu ruchy a šumy, i tak je však tato aplikace logická a vychází z jednoduché tradiční metody, kdy operátor ze zkušenosti sluchem vyhodnocuje míru opotřebení nástroje. Porovnání obou metod, měření zvuku, vibrací i dalších, je uvedeno například v práci (14). Autor uvádí, že při vrtání se měření vibrací projevilo jako spolehlivější metoda.

Se snižujícím se průměrem vrtáku stoupá hodnota frekvence, která je vyhodnocována. Např. v (15) je uvedeno, že přirozená frekvence pro vrták o průměru 1 mm je 25 kHz, ale pro vrták o průměru 3 mm už pouhých 7 kHz. V uvedeném zdroji, také autor prezentuje výsledky měření opotřebení a lomu nástroje, které ukazují, že měření vibrací je pro tuto aplikaci vhodnější než detekce sil od posuvů.

4.3 Příkon pohonů

Vyhodnocení stavu nástroje pomocí měření příkonu na pohonu vřetena stroje je ve své podstatě obdobou měření krouticího momentu. Obě metody osvětlují kolik energie je využíváno v procesu řezání a obě vypovídají o dynamice procesu. Ihned při první porovnání metod lze usoudit, že měření krouticího momentu je citlivější metoda, než měření příkonu na vřetení. Vyplývá to z uspořádání měřicí techniky, kdy sensor pro měření krouticího momentu je umístěn relativně blízko obráběcího nástroje a také měření není natolik ovlivněno dynamikou elektromotoru jako u měření příkonu. Na druhou stranu použití této metody je jednoduché z hlediska instalace měřicí techniky, a proto je tato technika široce testována a používána v praxi. (14; 7; 16; 17)

Podobně jako měření příkonu na vřetení stroje koresponduje s měřením krouticího momentu, tak měření příkonu pohonů posuvů odpovídá analýze vychylujících sil a axiální síly. Opět i zde je rozdíl v citlivosti vyplývající ze skutečností popsaných výše. Podrobnější informace o použití monitorování příkonu na pohonech posuvů lze najít v (14; 16; 17).

Porovnání metod měření příkonu na pohonu vřetena stroje a měření axiální síly je uvedeno v (18). Z provedených testů vyplývá, že měření axiální síly dává přesnější výsledky, než měření příkonu. Nicméně bylo ověřeno, že metoda měření příkonu je ekonomicky efektivnější a jednodušší při použití v provozu a její výsledky jsou pro běžné použití vyhovující. K podobnému závěru dochází i autor v (19). Zde se při testech vrtání do nerezové oceli měření ukázalo, že hodnoty příkonu zůstávali téměř totožné po celou dobu životnosti nástroje. K výrazné změně došlo až v okamžiku destrukce nástroje uvnitř vrtané díry. Z těchto výsledků lze konstatovat, že metoda není vhodná pro monitorování stavu opotřebenosti nástroje a nelze ji tedy využít pro zastavení stroje a zamezení destrukce nástroje při zvýšení hodnoty měřeného signálu.

5 Výběr metody monitorování

Před volbou vhodné monitorovací techniky byla provedena důkladná literární rešerše z dostupných informačních zdrojů. Tabulka 5.1 znázorňuje její shrnutí.

Tabulka 5.1 – Shrnutí používaných monitorovacích metod při vrtání.

Reference	Síly a krouticí moment	Vibrace	Příkon
(5; 9; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27)	✓		
(28; 29; 15; 10; 13)	✓	✓	
(30; 11; 12)		✓	
(14)	✓	✓	✓
(19; 7; 18)	✓		✓
(16)		✓	✓
(17)			✓

Z uvedeného vyplývá, že v souvislosti s vrtáním je nejčastěji používanou metodou monitorování řezných sil a krouticího momentu. To je logickým důsledkem relativně dobré dostupnosti měřicí techniky, její technické vyspělosti a jednoduchosti použití se zárukou získání relevantních výsledků.

5.1 Zařízení pro měření silového signálu

Dynamometr

Pro měření signálu řezné síly se využívá měřicí přístroj dynamometr. Z hlediska konstrukce musí mít dynamometr určité vlastnosti. Především je nutné zajistit nezávislost na provozních vlastnostech stroje a schopnost měřit danou veličinu ve zvoleném rozsahu s dostatečnou přesností.

Základem dynamometru je deformační člen. Jeho pružné vlastnosti jsou dle Hookova zákona přímo úměrné velikosti působící síly. Deformace je během procesu obrábění snímána vhodnými senzory a převáděna na jinou fyzikální veličinu, která je nositelem informace o velikosti působící síly. Dynamometr v sobě obsahuje celou řadu prvků určených pro přenos, transformaci a zpracování signálu a pro splnění všech požadavků je nutné dodržet vhodnou volbu jeho základních charakteristik.

1. **Tuhost** musí být dostatečně veliká, aby nedošlo k ovlivnění samotného procesu obrábění, zejména nastavený průřez odřezávané vrstvy. Tento požadavek je úzce spojen s vlastní frekvencí dynamometru, které je přímo úměrná tuhosti.
2. **Citlivost** souvisí s tuhostí dynamometru a s citlivostí použitého snímače. Musí být přizpůsobena požadovanému rozsahu tak, aby nejmenší naměřené hodnoty řezné síly bylo možné měřit s dostatečnou přesností.
3. **Setrvačnost měřící soustavy** by měla být co nejmenší, především v případě dynamického záznamu časového průběhu sil a momentu. Souvisí s vlastní frekvencí kmitů dynamometru.
4. **Rozsah měření** je dán maximální a minimální silou, kterou lze změřit. Zvětšováním rozsahu měření se snižuje citlivost dynamometru.
5. **Přenos měření** se obvykle udává relativní chybou, tj. rozdílem mezi skutečnou hodnotou a hodnotou naměřenou udaným v procentech. Přesnost měřícího zařízení musí být vždy větší, než je požadovaná přesnost měření.
6. **Stabilita kalibrování** je dána stálostí naměřených hodnot ke kalibrační křivce. Předpokladem stability je stálost tuhosti, citlivosti a přesnosti dynamometru v čase.

Renomovaným výrobcem dynamometrů určených pro účely měření sil při obrábění je např. Kistler. Pro příklad je dále uveden dynamometr Kistler typ 9255B s výpisem jeho hlavních charakteristik.


Tabulka 5.2 – Specifikace dynamometru Kistler Typ 9255B. (Zdroj: www.kistler.com)

Více komponentní stacionární dynamometr Kistler Typ 9255B			
	Specifikace:		
	Rozsah	F_x, F_y [kN] F_z [kN]	-20 ~ 20 -10 ~ 40
	Kalibrované měřicí rozsahy	F_x, F_y [kN] F_z [kN]	0 ~ 20 0 ~ 40
	Citlivost	F_x, F_y [pC/N] F_z [pC/N]	≈ -8 $\approx -3,7$
	Přirozené frekvence	f_{nx} [kHz] f_{ny} [kHz] f_{nz} [kHz]	≈ 2 ≈ 2 $\approx 3,3$
	Teplota	[°C]	0 ~ 70
	L x W x H	[mm]	260 x 260 x 95
	Hmotnost	[kg]	52
	Ochranna		IP67 s připojeným kabelem
	Připojení		Fischer Flange 9 – pólů neg.

Nástrojový držák s tenzometry

Pro snímání a vyhodnocení síly a krouticího momentu je možné využít i speciální upínače se soustavou tenzometrů. Jako příklad lze uvést přenosný systém DDU-4 WiSy vyvinutý společností Artis Marposs. Tento systém umožňuje kontinuálně měřit průběh síly a krouticího momentu v čase a monitorovat tak opotřebení nebo lom nástroje. Díky bezdrátovému systému je tento přístroj snadno použitelný. Další výhodou je modularita monitorovacího systému. Díky vyměnitelným rotorům je možné konfigurovat systém pro konkrétní aplikace a volit z řady typů s různými rozsahy, citlivostí apod. Nevýhodou může být větší vyložení nástroje způsobené přidáním rotorem, nižší tuhost upnutí nástroje, vyšší hmotnost upínací soustavy a omezení času provozu kapacitou akumulátoru. Další nevýhodou je vstupní investice do pořízení systému DDU-4 WiSY, která je i v porovnání s nákladným dynamometrem značná. Specifikace rotoru systému DDU-4 WiSy jsou shrnuty níže (Tabulka 5.3).

Tabulka 5.3 – Specifikace přenosného systému DDU-4 WiSy. (Zdroj: www.artis.de)

DDU-WiSy Přenosný systém			
	Specifikace:		
	Rozsah	F [kN] M _k [Nm]	max. 20 max. 200
	Přesnost	[%]	± 5 (z naměřené hodn.)
	Komponenty		CTM V6, DDU-4 WiSy, DDU rotor, DDU anténní modul
	Operační čas	[h]	1,5 ~ 6
	Teplota	[°C]	0 ~ 50
	L x W x H	[mm]	520 x 420 x220
	Hmotnost	[kg]	12
	Ochrana		IP67, odolnost proti chladičím kapalinám
	Radiová frekvence	[MHz]	868 (Evropa)

6 Síly při vrtání

Výslednou řeznou sílu F lze obecně při vrtání dvoubřítým šroubovitým vrtákem rozložit na tři složky – řeznou (tangenciální) F_c , posuvovou (axiální) F_f a pasivní (radiální) F_p . Ze symetrie nástroje vyplývá, že výsledné síly jsou součtem nebo rozdílem hodnot jednotlivých složek na obou břitech vrtáku (31).

Platí:

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} \text{ [N]}, \quad (6.1)$$

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} \text{ [N]}, \quad (6.2)$$

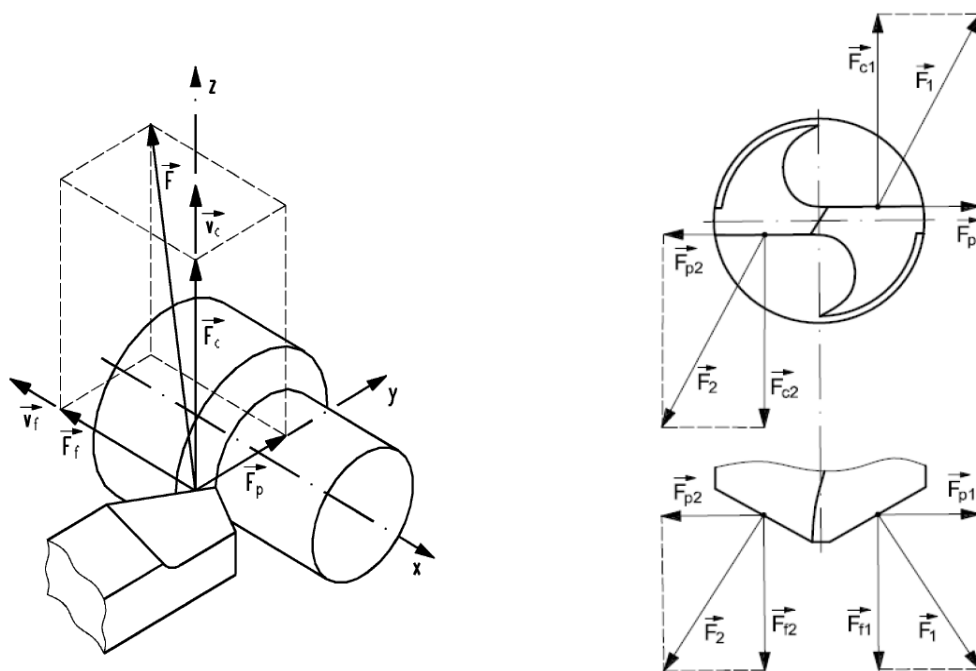
$$F_p = F_{p1} + F_{p2} \text{ [N]}. \quad (6.3)$$

Pokud je vrták správně nabroušen, platí rovnost složek síly na obou břitech:

$$F_{c1} = F_{c2} = F_c/2 \text{ [N]}, \quad (6.4)$$

$$F_{f1} = F_{f2} = F_f/2 \text{ [N]}, \quad (6.5)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p/2 \rightarrow F_p = 0 \text{ [N]}. \quad (6.6)$$

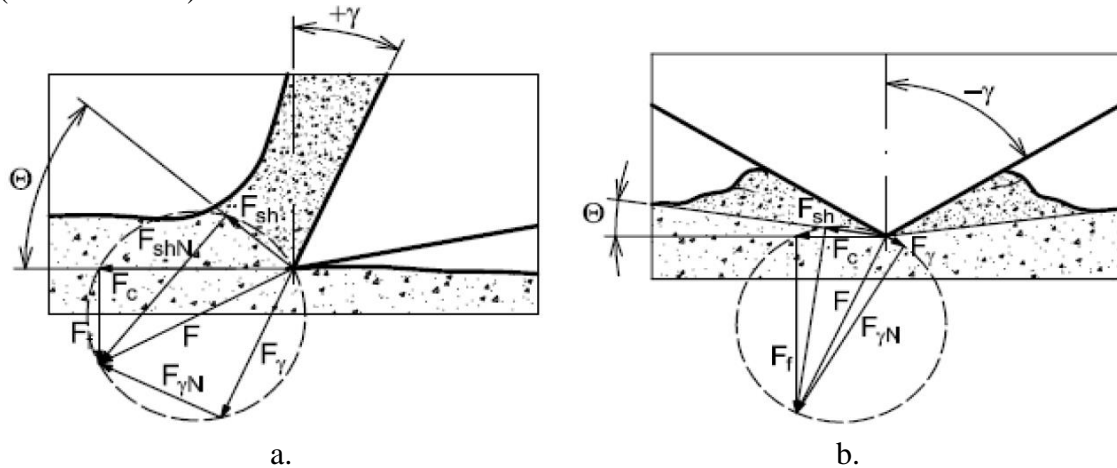


Obrázek 6.1 – Složky řezné síly (32).

6.1 Rozklad sil na břitu vrtáku

Příčný břit šroubových vrtáků má negativní úhel čela γ a úhel střižné roviny θ je velmi malý. Proto příčné ostří nevytváří třísku, ale materiál obrobku je v tomto místě plasticky deformován a přesouván z oblasti jádra vrtáku pod oba břity. Důsledkem těchto jevů je lokální zvýšení posuvové síly F_f v bodech příčného ostří (Obrázek 6.2 b).

Na hlavním ostří je úhel čela γ pozitivní a rozklad sil je analogický se soustružením (Obrázek 6.2 a).



Θ – střižná rovina
 γ – úhel čela
 F_c – řezná síla
 F_f – posuvová síla

F_{sh} – tangenciální síla v rovině stříhu
 F_{shN} – normálová síla v rovině stříhu
 F_γ – tangenciální síla na čele
 $F_{\gamma N}$ – normálová síla na čele
 F – výslednice sil

Obrázek 6.2 – Rozklad sil na břitu šroubovitého vrtáku (33).

6.2 Empirické výpočty sil a krouticího momentu

Vzhledem ke složitosti řezných podmínek při vrtání a složité geometrii nástroje není možné jednoduše popsat a vypočítat jeho namáhání. Proto se při výpočtu sil vychází z empirických vztahů určených a sestavených přímo pro tuto technologii.

6.2.1 Posuvová síla

Posuvová síla je nejčastěji definována následujícím empirickým vztahem:

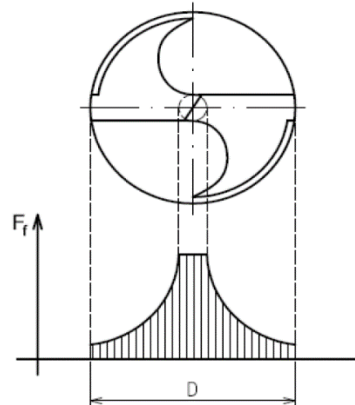
$$F_f = C_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N], \quad (6.7)$$

kde C_{F_f} [-] je konstanta vlivu materiálu,

x_{F_f} [-] je exponent vlivu průměru vrtáku,

y_{F_f} [-] je exponent vlivu posuvu na otáčku.

Jádro vrtáku a jeho příčné ostří má zásadní vliv na velikost posuvové síly F_f , což je zřejmé z uvedeného rozložení (Obrázek 6.3). Tato část nástroje je namáhána 50 až 80% celkové posuvové síly (32; 34).



Obrázek 6.3 - Rozložení posuvové síly na průměru vrtáku (34).

Stephenson a Agapiou (34) uvádějí, že jádro zaujímá asi 15 až 20% průměru vrtáku, u malých nástrojů dokonce až 50%. Změna průměru jádra o 10% přitom způsobí dvojnásobný vzrůst posuvové síly a při 20% změně stoupne síla přibližně čtyřnásobně.

6.2.2 Řezná síla

Řezná síla je nejčastěji definována následujícím empirickým vztahem (31; 32):

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N], \quad (6.8)$$

kde C_{F_c} [–] je konstanta vlivu materiálu,

x_{F_c} [–] je exponent vlivu průměru vrtáku,

y_{F_c} [–] je exponent vlivu posuvu na otáčku.

Hodnota konstanty a exponentů je určována experimentálně a jejich rozpětí je diskutováno v literatuře (31; 32) a katalozích výrobců nástrojů.

Dalším možným způsobem je určení řezné síly skrze měrný řezný odpor. Do součinu se zde dostává síla ve směru hlavního řezného pohybu k_c a průřez odřezávané vrstvy A_D :

$$k_c = k_c \cdot A_D [N]. \quad (6.9)$$

6.2.3 Krouticí moment

Řezný moment lze jednoduše odvodit, pokud je známa celková řezná síla F_c :

$$M_c = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot x_M = F_c \cdot x_M [N \cdot m], \quad (6.10)$$

kde x_M vyjadřuje vzdálenost působíště síly F_c od osy rotace vrtáku (obr. 5.4).

Lze dohledat, že působíště celkové řezné síly je obvykle umístěno do poloviny poloměru vrtáku (32; 35). Poté platí:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{4} [N \cdot m]. \quad (6.11)$$

Jedná se o zjednodušenou metodu určení řezného momentu, založenou na empirických vztazích. Přesné určení hodnot krouticího momentu je složitou problematikou závislou na mnoha parametrech – řezných podmínkách, typu vrtáku, způsobu broušení břitu vrtáku apod. Podrobněji se těmito výpočty zabývá řada autorů odborné literatury.

7 Experimentální část práce

Cílem experimentu je pro daný materiál vybrat vhodný nástroj, otestovat předem zvolené varianty řezných podmínek a určit vhodnost jejich použití. Následující úlohou je měření sil pomocí dvou různých technik, porovnání průběhů sil a citlivosti dané metody. Poslední částí experimentu je zkouška opotřebení nástroje, zjištění závislosti velikosti opotřebení břítu nástroje a změn silových poměrů na počtu vyvrtaných děr.

Doplňujícím výsledkem experimentu je formulace doporučení vhodnějšího materiálu z hlediska obrobitelnosti pro výrobu forem určených ke vstřikování plastů.

7.1 Materiál obrobků

Obráběným materiálem je slévárenská slitina hliníku typu Al – Si, tzv. silumin. Tato skupina hliníkových slitin je charakterizována obsahem křemíku 5 – 25%, který zlepšuje zabíhavost a zmenšuje objem staženin. Zhoršuje ovšem obrobitelnost, neboť zvyšuje abrazivní otěr obráběcího nástroje a snižuje tak jeho trvanlivost.

Pro experiment byly poskytnuty vzorky Al slitin s označením SF30 a AC70 (Obrázek 7.1).



Obrázek 7.1 – Materiál.

Označení slitin, složení a základní mechanické vlastnosti uvedených slitin hliníku jsou uvedeny dále.

7.1.1 Silafont®-30 (SF30)

Silafont®-30 je obchodní označení pro slitinu **AlSi9Mg**. Jedná se o vysokopevnostní slitinu hliníku s dobrými korozivzdornými vlastnostmi. Tento materiál je široce používán v automobilovém průmyslu.

Tabulka 7.1 – Složení materiálu SF30.

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ti [%]	další [%]
9 - 10	0,15	0,03	0,05	0,30 - 0,45	0,07	0,15	0,03

Tabulka 7.2 – Mechanické vlastnosti materiálu SF30.

$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_5 [%]	Tvrdość HB
80 - 310	160 - 360	2 - 10	50 - 120

7.1.2 Anticorodal®-70 (AC70)

Tato slitina nese označení **AlSi7Mg0,3**. Jedná se o slitinu s vysokou pevností, dobrou odolností proti korozi a dobrými slévárenskými vlastnostmi. Používá se především k výrobě součástí leteckého průmyslu, komponent spalovacích motorů a odlitků kol osobních automobilů.

Tabulka 7.3 – Složení materiálu AC70.

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]	Ti [%]	další [%]
6,5 - 7,5	0,15	0,03	0,05	0,30 - 0,45	0,07	0,15	0,03

Tabulka 7.4 – Mechanické vlastnosti materiálu AC70.






$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A_5 [%]	Tvrdość HB
80 - 280	140 - 340	2 - 12	45 - 125

7.2 Výběr nástroje

Požadavkem bylo použití karbidového vrtáku o průměru 3 mm pro vrtání do hloubky 5 x průměr břitu. Tento nástroj musel být zvolen i s ohledem na materiál obrobku, tedy slitinu hliníku s vysokým obsahem křemíku.

Poptání byli přední světoví výrobci a dodavatelé obráběcích nástrojů. Hlavními kritérii pro výběr byla řezivost nástroje a jeho cena. Poptané nástroje a jejich základní vlastnosti shrnuje následující tabulka.

Tabulka 7.5 – Výběr nástroje.

GÜHRING				
#	v_c [m / min]	f_n [mm / ot]	Cena [Kč / kus]	Popis
5511	260	0,16	1 016	spirálový vrták do 5xD s vnitřním chlazením
				
GÜHRING				
#	v_c [m / min]	f_n [mm / ot]	Cena [Kč / kus]	Popis
768	330	0,16	1 713	vrták s rovnou drážkou do 7xD s vnitřním chlazením
				
SANDVIK Coromant				
#	v_c [m / min]	f_n [mm / ot]	Cena [Kč / kus]	Popis
860.1	300	0,14	3 285	
				
SECO				
#	v_c [m / min]	f_n [mm / ot]	Cena [Kč / kus]	Popis
SD205A	200	0,14	2 530	
				
WALTER				
#	v_c [m / min]	f_n [mm / ot]	Cena [Kč / kus]	Popis
A3399XPL	220	0,15	2 162	
				

Z výše uvedených byl pro realizaci experimentu zvolen nástroj s označením **5511** od výrobce **Gühring s.r.o.** a to především z důvodu příznivé ceny a velice uspokojivému

udávanému výkonu. Dalším důvodem k volbě byly příznivé zkušenosti s nástroji od tohoto výrobce z minulosti.

7.3 Technická příprava experimentu

Zdárné provedení experimentu bylo podmíněno důkladnou přípravou všech potřebných náležitostí.

7.3.1 Úprava polotovarů

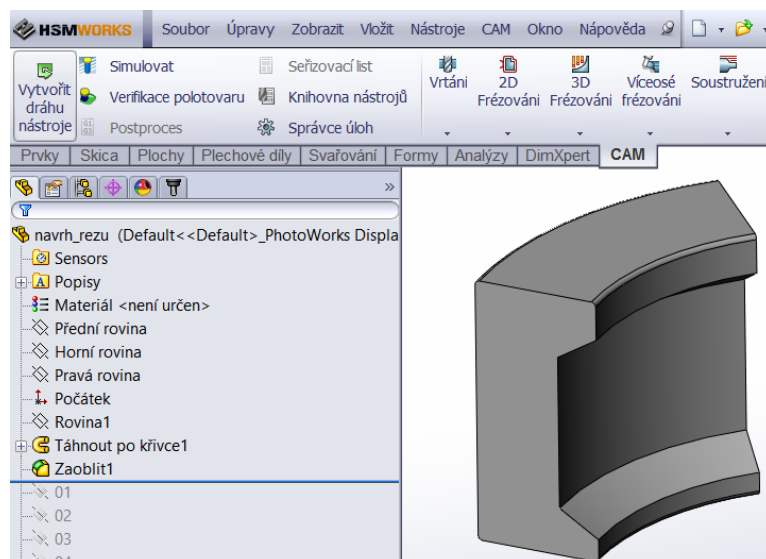
Především bylo nutné výchozí materiál upravit takovým způsobem, aby byla zaručena bezproblémová manipulace a jednoznačné upnutí na stroji. Materiál byl rozřezán na pásové pile a na univerzální frézce byly vytvořeny plochy pro upnutí do strojního svěráku.



Obrázek 7.2 – Příprava polotovaru.

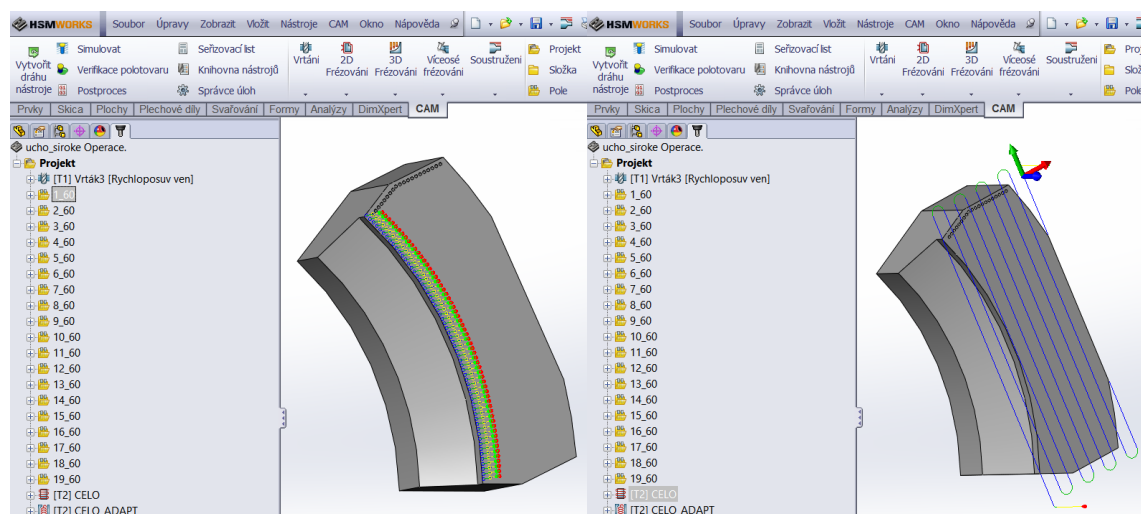
7.3.2 Zpracování v CAD/CAM

Dále byl vytvořen 3D CAD model obrobku pro následné využití CAD/CAM softwaru HSMWorks pro potřeby obrábění. Díky tomu byla usnadněna tvorba NC programů pro řídicí systém Siemens SINUMERIK 840D obsahující jednotlivé série vrtaných děr.



Obrázek 7.3 – Model obrobku.

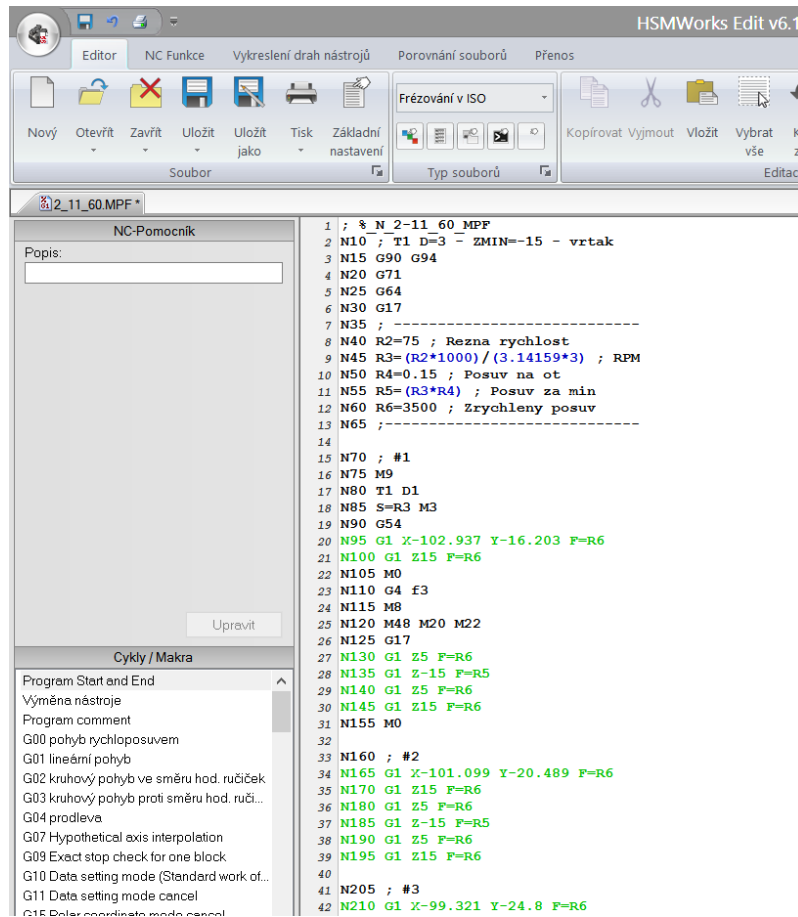
Obrábění bylo rovněž tvořeno v systému HSMWorks. Jednalo se o tvorbu drah nástroje pro zarovnání čela, samotné vrtání a odfrézování vrstvy materiálu po vrtání.



Obrázek 7.4 – Tvorba drah nástrojů.

Pro tvorbu NC programu byl použit základní postprocesor Siemens SINUMERIK 840D, který je součástí systému HSMWorks. Pro zjednodušení práce při experimentu byl základní postprocesor upraven takovým způsobem, aby nebylo nutné ručních zásahů do vygenerovaného NC programu. Zásadní úpravou bylo přidání výpočtu řezných podmínek a jejich přiřazení do jednotlivých parametrů použitých v rámci celého programu (viz. Obrázek 7.5). Dále se jednalo o přiřazení M funkcí pro spuštění odsávání pracovního prostoru stroje a chlazení při obrábění, výstup zastavení stroje M0 po nájzdu na pozici

před začátkem měření sil a přidání bezpečnostní prodlevy před vyvrtáním první díry. Poslední dodatečnou úpravou při testech opotřebení nástroje bylo automatické počítání počtu naprogramovaných děr pro vrtání.



Obrázek 7.5 – Ukázka NC programu.

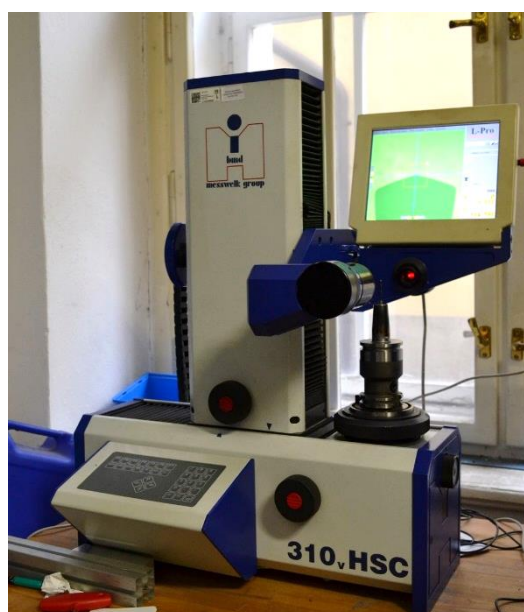
7.3.3 Příprava a seřízení nástroje

Nástroj byl upínán do termo upínačů HAIMLER pro nástrojové systémy HSK – F63 a ISO 40. K výměně nástrojů bylo použito zařízení BILZ ISG 2000 (viz. Obrázek 7.6).



Obrázek 7.6 – Upínání nástroje.

Při každé výměně nástroje byla měřena délková korekce uváděná v parametrech řídicího systému. K tomuto účelu bylo použito zařízení pro optické měření korekce nástroje (Obrázek 7.7).



Obrázek 7.7 – Měření délkové korekce nástroje.

7.3.4 Příprava monitorovací techniky a upnutí obrobku na stroji

Strojní vybavení

Experiment byl postupně realizován na stojích LM1 a LM2. Oba stroje jsou ovládány řídicím systémem SINUMERIK 840D.



Obrázek 7.8 – Stroj LM1.

Stroj LM1 je tříosé vertikální CNC frézovací centrum TAJMAC-ZPS MCFV 5050 LN s lineárními motory. LM1 je osazen elektrovřetenem o výkonu 18 kW a maximálními otáčkami 15 000 ot / min.



Obrázek 7.9 – Stroj LM2.

Stroj LM2 je experimentální horizontální tříosé frézovací centrum s elektrovřetenem o výkonu 40 kW a maximálními otáčkami 40 000 ot / min.

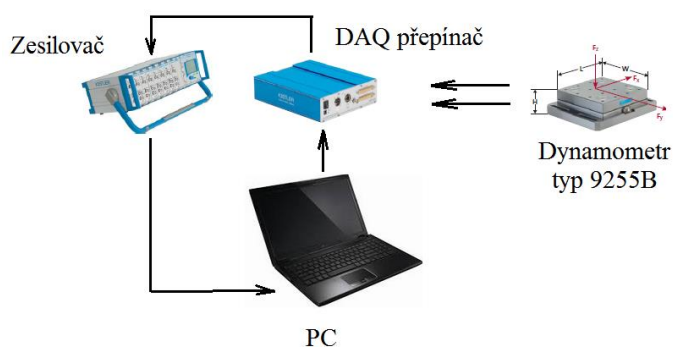
Monitorovací zařízení a jeho realizace

Dynamometr Kistler typ 9255B byl upnut na stůl stroje pomocí upínek. Pro upnutí obrobku byl použit strojní svěrák. Na obrázku níže je ukázka kompletního systému upnutí a vyrovnaný obrobek ve stroji LM1. Analogicky bylo upnutí realizováno i ve stroji LM2.



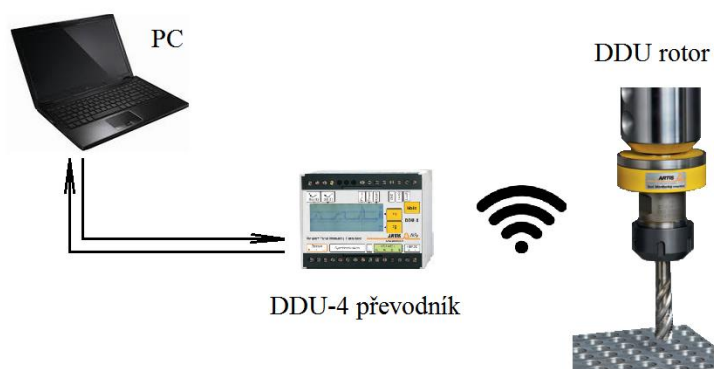
Obrázek 7.10 – Upnutí na stroji LMI.

Schéma zapojení dynamometru:



Obrázek 7.11 – Schéma zapojení dynamometru.

Mobilní bezdrátový systém **DDU-4 WiSy** nevyžaduje díky své konstrukci speciální upnutí. Obráběcí nástroj se jednoduše upne do kleštiny upínače obsaženého v systému, který je osazen tenzometry a elektronikou pro radiový přenos dat. Zapojení tohoto systému je uvedeno níže (Obrázek 7.12).

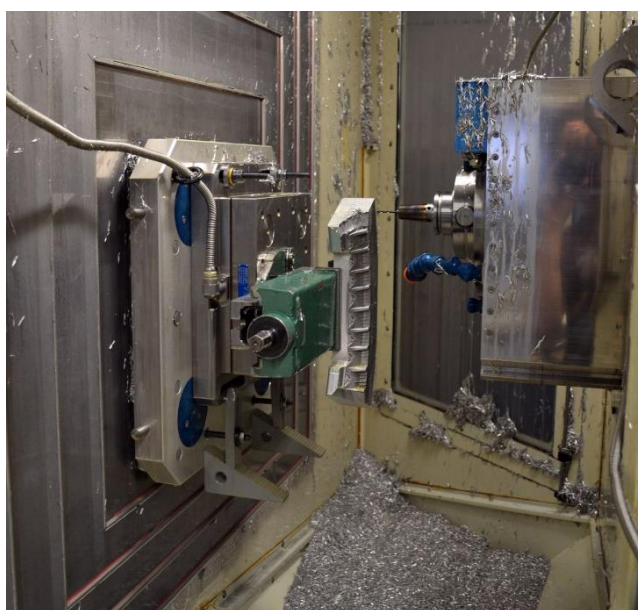


Obrázek 7.12 – Schéma uspořádání systému DDU-4 WiSy.

7.4 Ověření monitorovací techniky

Úvodní částí experimentu bylo porovnání dvou monitorovacích technik založených na měření sil od řezání. Jedním způsobem bylo již mnohokrát zmíněné měření sil pomocí deskového dynamometru *Kistler 9255B* (Obrázek 7.13). Druhou metodou bylo použití bezdrátového přenosného systému *DDU-4 WiSy* zapůjčeného od společnosti *Artis Marposs* obsahující upínač nástroje s vestavěnými tenzometry. Výhodou tohoto systému je prvoplánové určení pro obdobné aplikace a z toho plynoucí přesnost i citlivost. Nevýhodou systému *DDU-4 WiSy* je vysoká cena.

Cílem této části experimentu bylo zjistit, zda naměřené hodnoty oběma způsoby budou korespondovat a ověřit tak použitelnost dostupného dynamometru *Kistler 9255B* pro navržený experiment.



Obrázek 7.13 – Měření pomocí dynamometru Kistler typu 9255B.

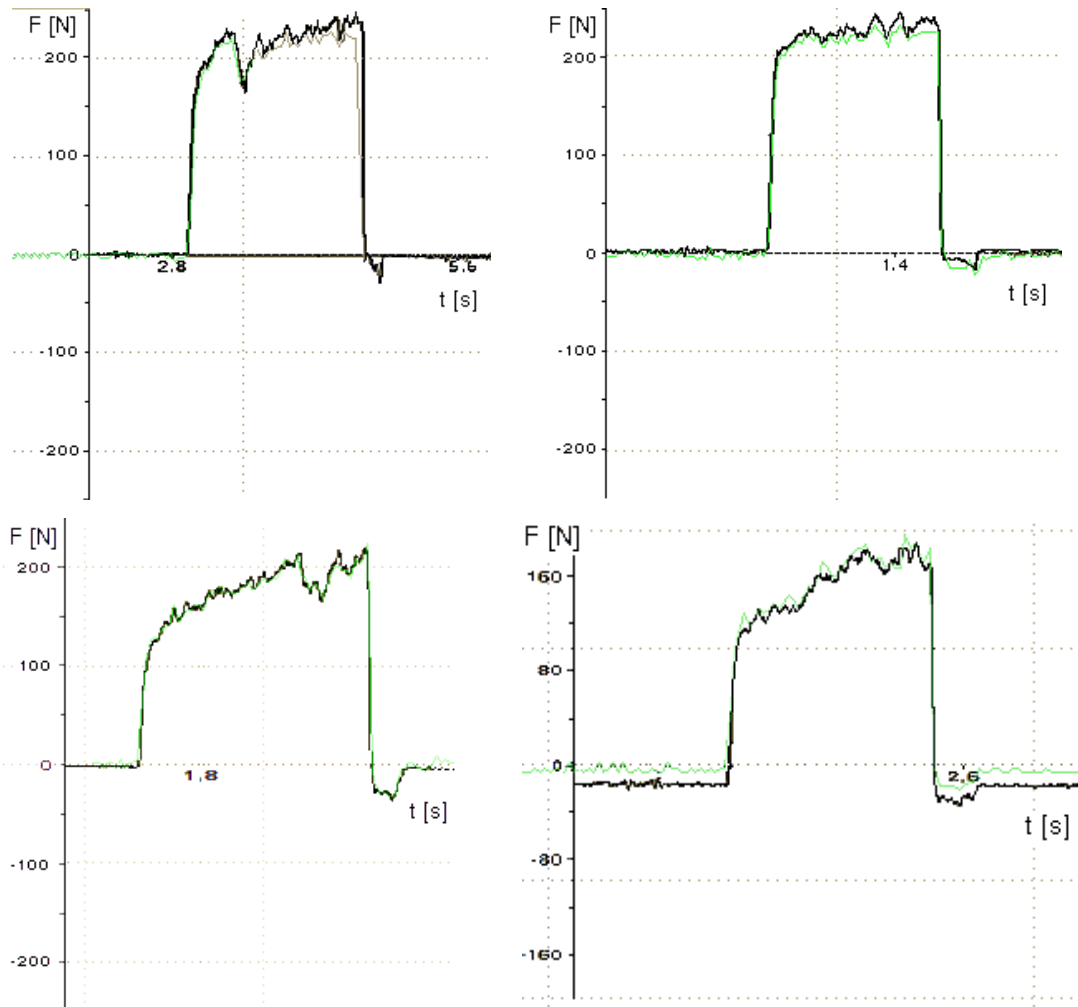
Měření pomocí přenosného systému DDU-4 WiSy bylo realizováno současně s měřením pomocí dynamometru na stroji LM1. Během porovnání bylo vyvrtáno několik jednotlivých děr a zaznamenány příslušné průběhy působení posuvové síly v ose Z a krouticího momentu.



Obrázek 7.14 – Záznam měření síly v ose Z a krouticího momentu pomocí systému DDU-4 WiSy.

Obrázek 7.14 znázorňuje záznam měření pomocí přenosného systému **DDU-4 WiSy**. Horní křivka je průběh krouticího momentu a dolní je působení osové síly při vrtání. Změna hodnoty krouticího momentu je vzhledem k malému průměru nástroje velmi nízká, a proto byla jako monitorovaná veličina zvolena pouze síla v ose nástroje F_z .

DDU-4 WiSy umožňuje také záznam dat do tabulky Excel, nicméně tato obce při měření nebyla aktivována a výstupem se tak staly snímky obrazovky z připojeného PC. Pro porovnání výstupů z obou zařízení byly vytvořeny překryvné obrázky jednotlivých průběhů sil.



Obrázek 7.15 – Porovnání výstupů obou monitorovacích technik.

Každý graf obsahuje dvě navzájem se prolínající křivky, které znázorňují závislost síly na čase. Černě je vždy výstup z dynamometru **Kistler 9255B**. Pouhým pohledem je patrné, že výsledky jsou srovnatelné, a proto je možné pro experiment použít monitorování pomocí dynamometru **Kistler 9255B**.

7.5 Testování řezných podmínek

Před samotným měřením sil při vrtání bylo provedeno testování a postupné ladění řezných podmínek. Výchozí hodnoty udané výrobcem pro zvolený nástroj (Tabulka 7.5) byly účelně poníženy, neboť při jejich dodržení by měření sil bylo problematické z hlediska velmi krátkého času obrábění (Tabulka 7.6). Pro výpočet řezných podmínek byly použity dobře známé vztahy:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad [1 / \text{min}] \quad (7.1)$$

$$f_m = n \cdot f_o \text{ [mm / min]} \quad (7.2)$$

$$f_o = \frac{f_m}{n} \text{ [mm / ot]} \quad (7.3)$$

kde n je počet otáček za minutu,

v_c je řezná rychlost [m / min],

D je nominální průměr nástroje [mm],

f_m je posuv za minutu [mm / min],

f_o je posuv na otáčku [mm / ot].

Při dosazení průměru nástroje $D = 3 \text{ mm}$, počtu zubů $z = 2$ a dráhy obrábění $L = 15 \text{ mm}$ z uvedených vztahů pro doporučené řezné podmínky plynou hodnoty uvedené v následující tabulce.

Tabulka 7.6 – Přepočet doporučených řezných podmínek.

Zadané hodnoty:		Spočítané hodnoty:	
v_c	200 [m / min]	n	21 220,7 [1 / min]
f_o	0,16 [mm / z]	f_m	3 395,3 [mm / min]
L	15 [mm]	čas	0,27 [s]

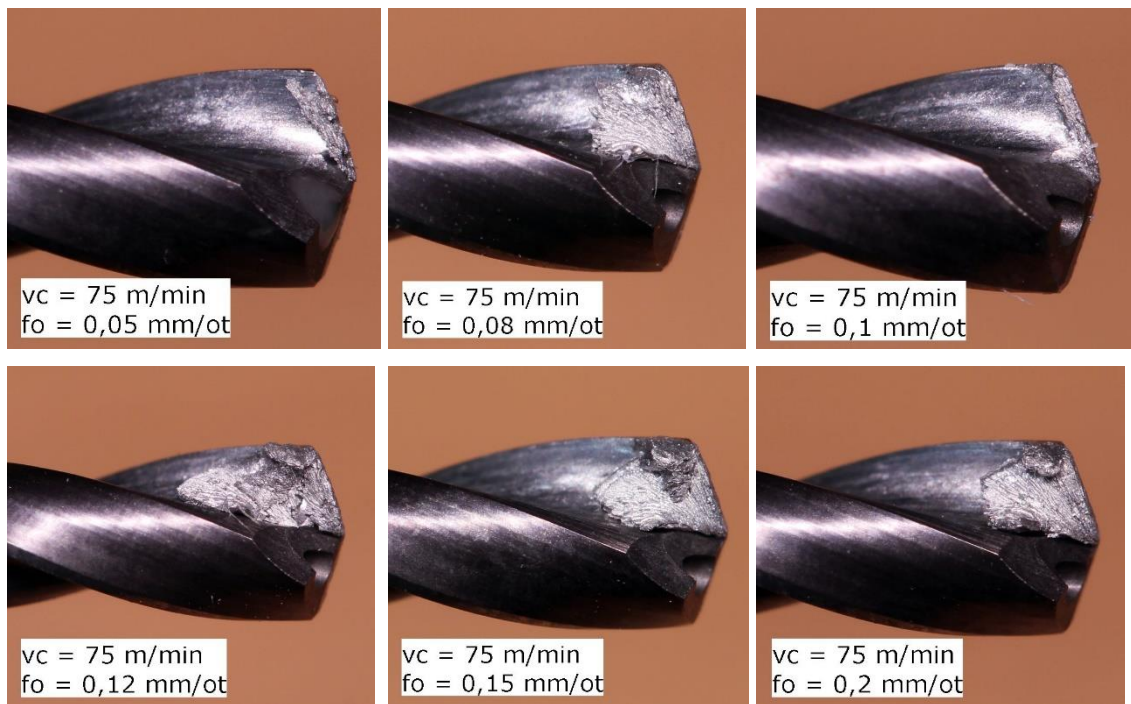
Při testování byla stanovena řada posuvů a řezných rychlostí dle následující tabulky:

Tabulka 7.7 – Řezné podmínky.

v_c [m/min]	25		50		75		100	
f_o [mm/z]	0,05	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	

7.5.1 Stroj LM1 – vnější chlazení

Na stroji LM1 bylo provedeno prvotní ladění řezných podmínek dle výše uvedené řady posuvů a řezných rychlostí s použitím vnějšího chlazení chladicí kapalinou. Pro každou kombinaci obou parametrů byla vrtána série 5 děr za sebou a po skončení cyklu byl nástroj vyjmut ze stroje, opatrně očištěn od chladicí kapaliny a prozkoumán pod dílenským mikroskopem. Dle očekávání se objevil problém s tvorbou nárůstku na břitu vrtáku a nalepováním špony uvnitř šroubovité drážky. Z pořízených fotografií konce vrtáku byla patrná závislost tvorby nárůstku na posuvu i řezné rychlosti.



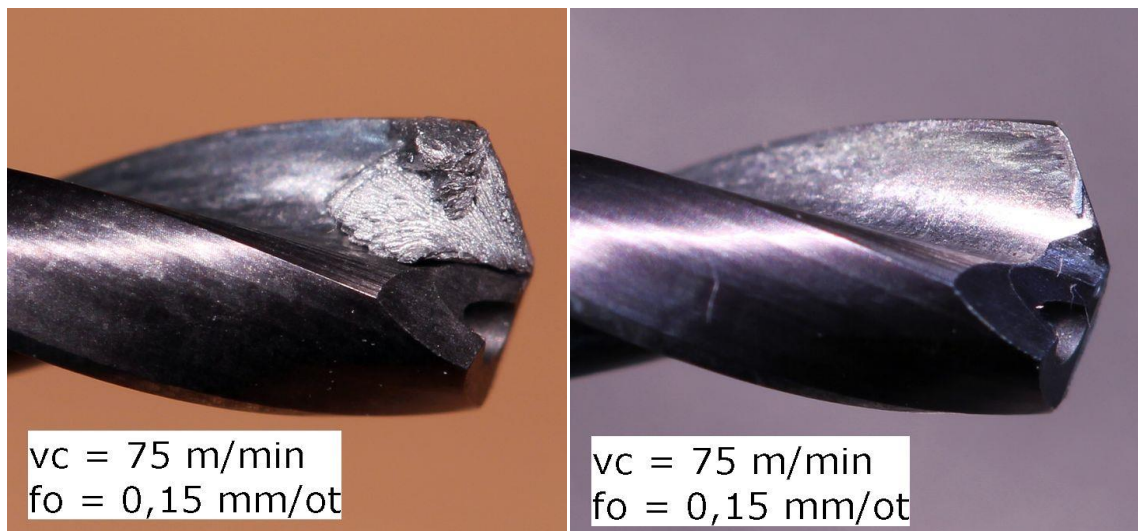
Obrázek 7.16 – Fotografie nárůstků při daných řezných podmínkách.

Pro vrtání slitin problematických z hlediska tvorby nárůstku se v některých případech používají vrtáky s leštěnou drážkou pro odvod špony. Leštěním se sníží adheze mezi materiálem obrobku a nástrojem, což redukuje nebezpečí tvorby nárůstku. Je tedy možné, že povlak nástroje mohl tvorbu nárůstku do určité míry podpořit. Řešení toho problému je například použití vysokotlakého chlazení skrze nástroj, které zajistí rychlý odvod špon a chlazení blízko místa řezu.

7.5.2 Stroj LM2 – vnitřní chlazení skrz nástroj

Na stroji LM2 proběhlo analogické ladění řezných podmínek, jako bylo popsáno v přechozí podkapitole.

Pro uvedenou řadu posuvů a řezných rychlostí bylo provedeno vrtání v sériích po 5 dířích. Nyní ovšem za použití vysokotlakého chlazení skrze nástroj. Tlak chlazení byl nastaven na **60 barů**. Příznivý účinek vnitřního chlazení je na první pohled zřejmý z následujícího porovnání při řezné rychlosti $v_c = 75 \text{ m / min}$ a posuvu na otáčku $f_o = 0,15 \text{ mm / ot}$.

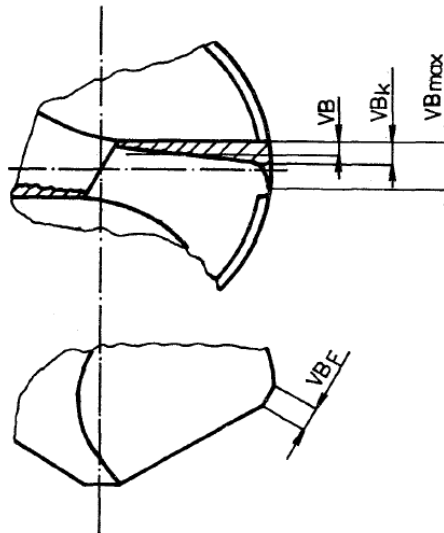


Obrázek 7.17 – Nárůstek - vlevo chlazení vnější, vpravo chlazení vnitřní.

Postupné otestování řezných podmínek vedlo k volbě výchozí řezné rychlosti $v_c = 75 \text{ m / min}$ a posuvu na otáčku $f_o = 0,15 \text{ mm / ot}$ pro následné testy životnosti nástroje a monitorování sil při vrtání, které budou v rámci práce následovat. Tato kombinace řezných podmínek měla ve skutečnosti nejlepší výsledky z hlediska tvorby nárůstku, resp. vedla téměř k potlačení tohoto nepříjemného jevu. Toto stanovisko dokumentuje Obrázek 7.17.

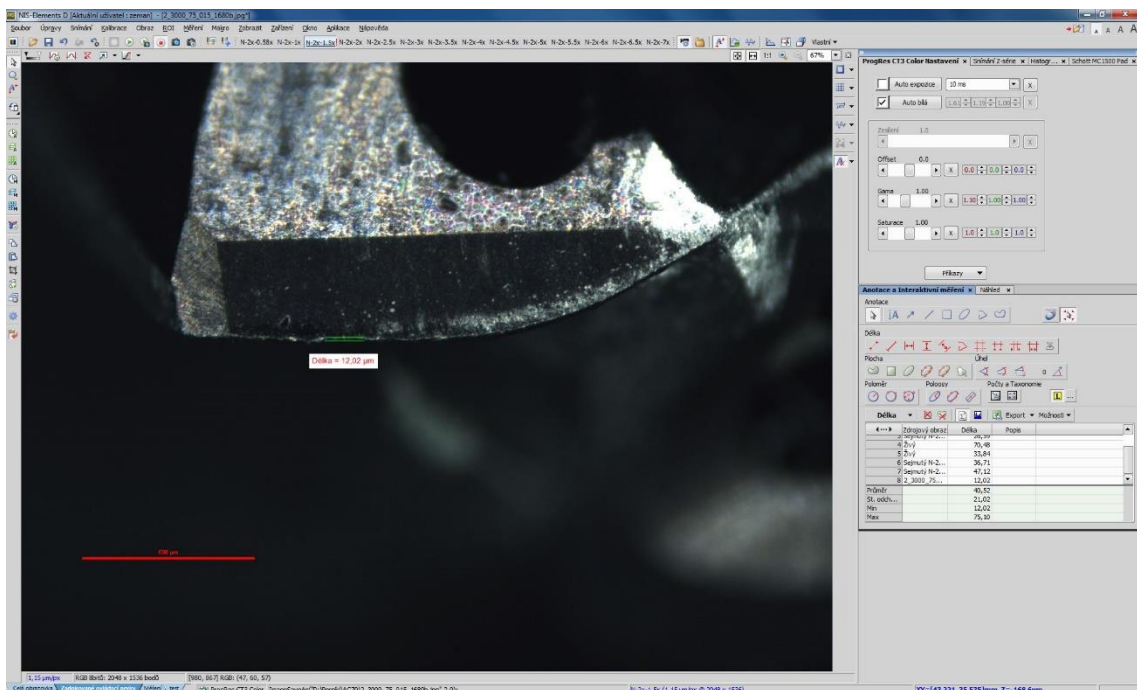
7.6 Testy opotřebení nástroje

Požadavek na trvanlivost nástroje byl stanoven na minimální počet vyvrtaných děr ve výši 3 000. Během experimentu bylo celkem vrtáno **3 240 děr** a to celkem 3 krát pro oba materiály SF30 a AC70. Řezné podmínky vycházely z předchozích měření, tedy $v_c = 75 \text{ m / min}$ a $f_o = 0,15 \text{ mm / ot}$.



Obrázek 7.18 – Způsob odečítání hodnot opotřebení. (31)

V určitých intervalech počtu vyvrtaných děr (přibližně po 500) byla měřena střední hodnota opotřebení VB a opotřebení na špičce VB_{MAX} u obou břitů nástroje (Obrázek 7.18). Toto měření probíhalo na dílenském mikroskopu pomocí PC. Způsob měření znázorňuje snímek obrazovky z prostředí softwaru NIS-Elements D ovládající mikroskop.



Obrázek 7.19 – Měření opotřebení.

Naměřené hodnoty byly shrnuty do tabulky a byla vynesena závislost velikosti opotřebení VB a VB_{MAX} na počtu vyvrtaných děr.

7.6.1 Opotřebení nástroje – SF30

Velikost naměřeného opotřebení pro materiál SF30 shrnuje Tabulka 7.8. Vzhledem k množství dostupného materiálu došlo k měření 2 sérií po zmíněných 3240 dířách.

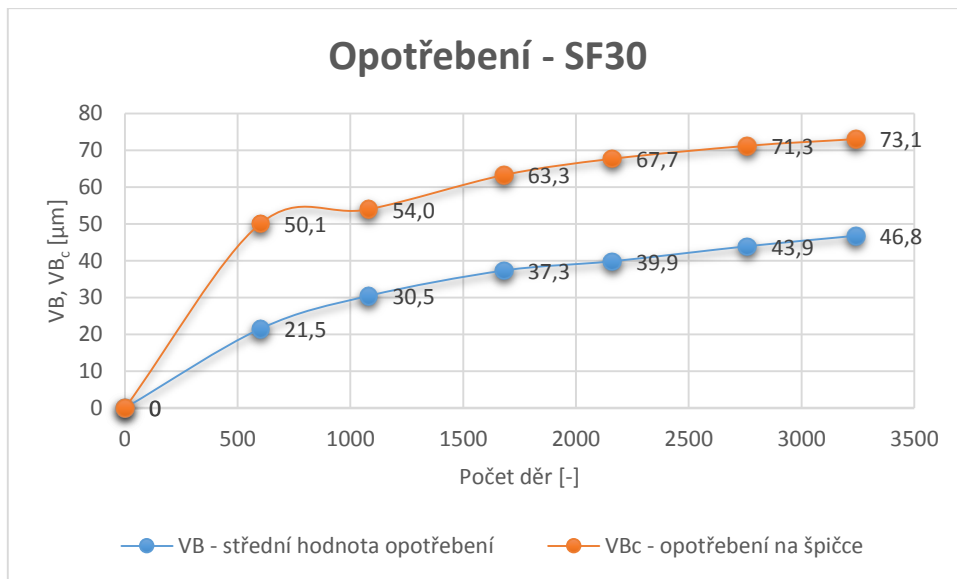
Tabulka 7.8 – Naměřené hodnoty opotřebení, materiál SF30.

Nástroj	1.		2.	
# děr	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]
600	19,1	48,6	23,9	51,5
1080	23,7	49,7	37,2	58,3
1680	35,1	62,7	39,6	63,9
2160	38,8	69,6	40,9	65,8
2760	44,9	73,8	43,0	68,7
3240	47,4	75,4	46,1	70,8

Tabulka 7.9 – Průměrné hodnoty opotřebení, materiál SF30.

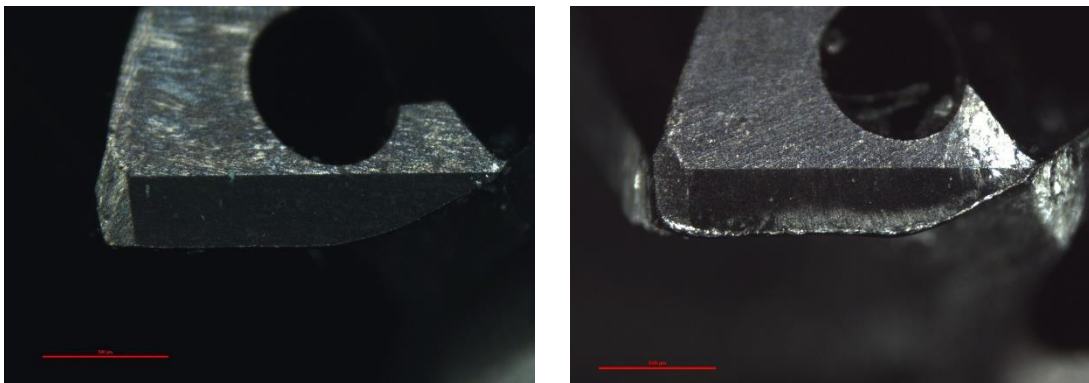
Průměry z naměřených hodnot		
# děr	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]
600	21,5	50,1
1080	30,5	54,0
1680	37,3	63,3
2160	39,9	67,7
2760	43,9	71,3
3240	46,8	73,1

Hodnoty naměřeného opotřebení byly dále pro názornost shrnuty do grafu uvedeného níže (Obrázek 7.20).



Obrázek 7.20 – Závislost opotřebení na počtu vyvrtaných děr, materiál SF30.

Ze závislosti je patrný nárůst opotřebení nástroje. Střední hodnota opotřebení VB po vyvrtání 3 240 děr dosáhla maxima **46,8 µm**, zatímco opotřebení špičky VB_{MAX} hodnoty **73,1 µm**. Snímky nového (vlevo) a opotřebeného nástroje (vpravo) pro porovnání jsou znázorněny níže (Obrázek 7.21).



Obrázek 7.21 – Opotřebení vrtáku, materiál SF30, vyznačené měřítko 500 µm.

7.6.2 Opotřebení nástroje – AC70

Velikost naměřeného opotřebení pro materiál AC70 shrnuje Tabulka 7.10. Pro všechna měření jsou dále uvedeny průměrné hodnoty VB a VB_{MAX} ze všech sérií.

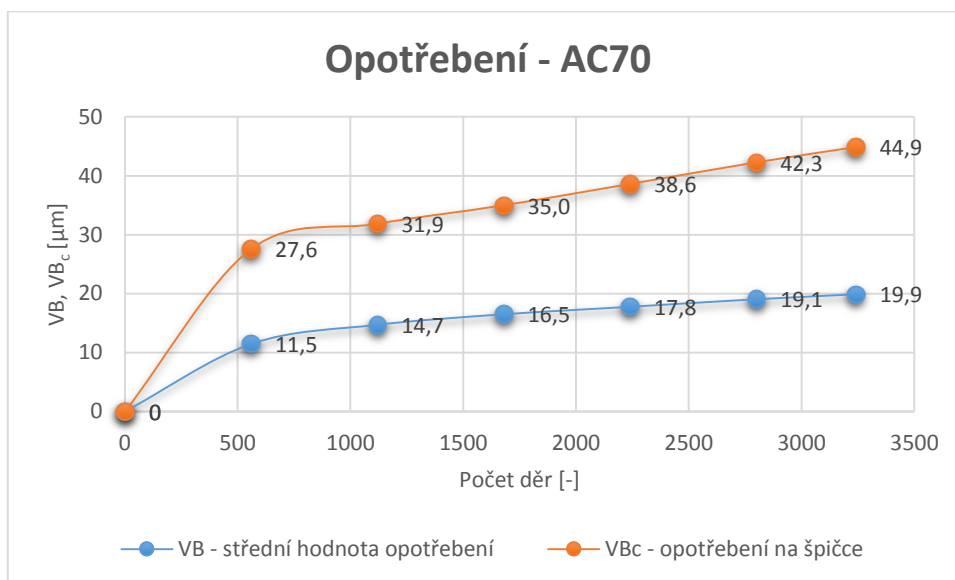
Tabulka 7.10 - Naměřené hodnoty opotřebení, materiál AC70.

Nástroj	1		2		3	
# děr	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]
560	13,1	36,6	12,1	24,8	9,2	21,3
1120	15,0	40,2	13,6	25,3	15,6	30,1
1680	17,3	44,2	15,6	28,0	16,7	32,9
2240	18,7	47,9	16,9	32,8	17,7	35,2
2800	20,0	49,7	18,4	38,7	18,7	38,4
3240	20,7	52,7	19,3	39,1	19,7	42,8

Tabulka 7.11 – Průměrné hodnoty opotřebení, materiál AC70.

Průměry z naměřených hodnot		
# děr	VB [μm]	VB _{MAX} [μm]
560	11,5	27,6
1120	14,7	31,9
1680	16,5	35,0
2240	17,8	38,6
2800	19,1	42,3
3240	19,9	44,9

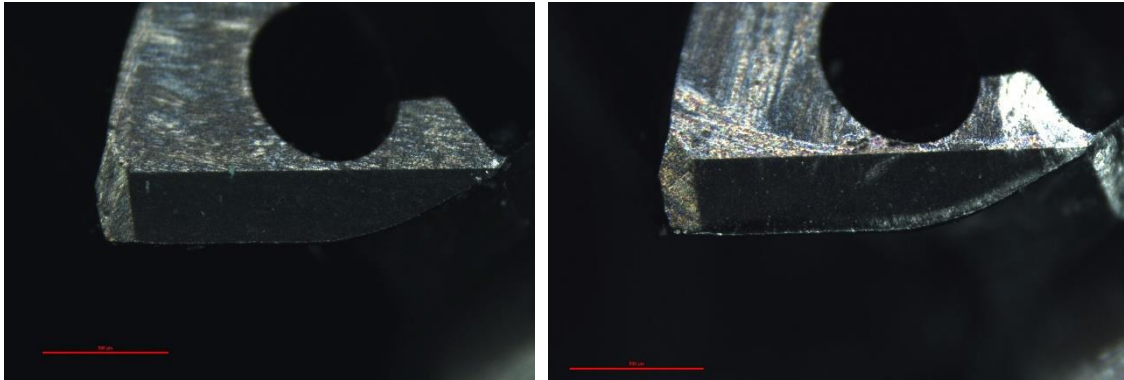
Hodnoty naměřeného opotřebení byly dále pro názornost shrnuty do grafu (Obrázek 7.22).



Obrázek 7.22 – Závislost opotřebení na počtu vyvrtaných děr, materiál AC70.

V případě materiálu AC70 má závislost opotřebení na počtu vyvrtaných děr obdobný trend jako u slitiny SF30. Střední hodnota opotřebení VB dosahuje **19,9 μm** a hodnota

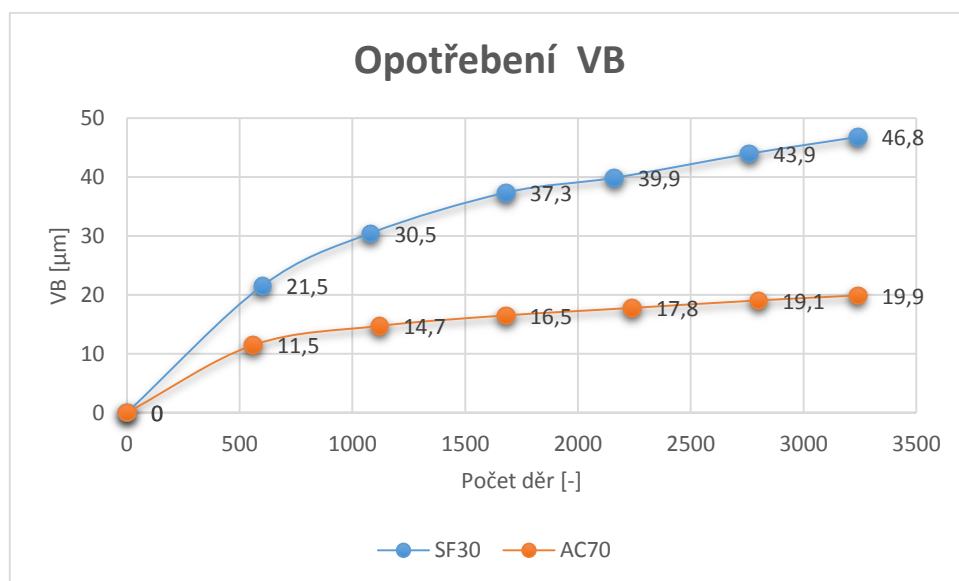
opotřebení na špičce VB_{MAX} je **44,9 μm** . Porovnání s novým vrtákem (vlevo) je uvedeno níže (Obrázek 7.23).



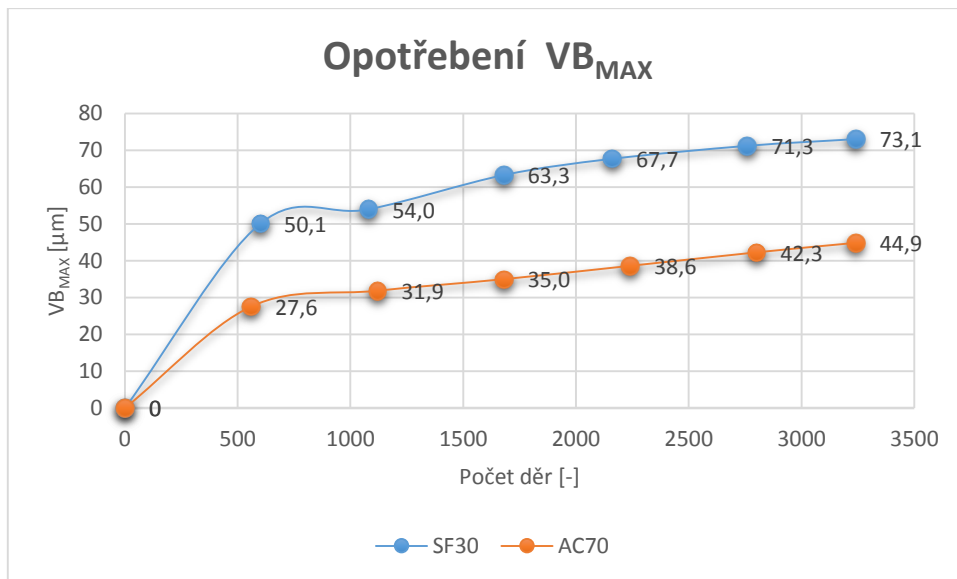
Obrázek 7.23 – Opotřebení vrtáku, materiál AC70, vyznačené měřítko 500 μm .

7.6.3 Vzájemné porovnání obou materiálů

Pro vzájemné porovnání byly vyneseny závislosti opotřebení VB (Obrázek 7.24) a VB_{MAX} (Obrázek 7.25) do společných grafů pro obě slitiny.



Obrázek 7.24 – Porovnání opotřebení VB pro oba materiály.



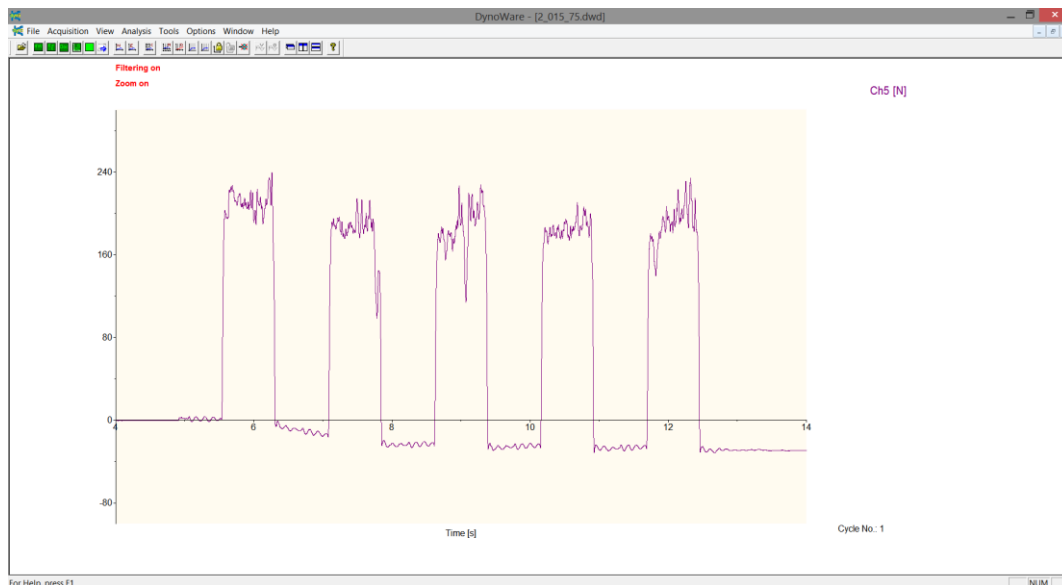
Obrázek 7.25 – Porovnání VB_{MAX} pro oba materiály.

Z grafů je zřejmé, že nástroj pracující se slitinou AC70 vykazoval výrazně nižší opotřebení. Z toho lze usoudit, že slitina AC70 je lépe obrobitelná, než slitina SF30. Menší abrazivní účinek na nástroj pravděpodobně způsobil nižší obsah křemíku ve slitině. Vzhledem k nízkému opotřebení u AC70 lze konstatovat, že by použitý nástroj mohl dále pracovat, nebo by mohly být navýšeny řezné podmínky pro zvýšení produktivity obrábění.

7.7 Monitorování síly F_z při vrtání

7.7.1 Závislost síly na velikosti posuvu

Nejprve bylo pro zvolenou řeznou rychlost $v_c = 75 \text{ m / min}$ provedeno měření síly v ose Z v závislosti na hodnotě posuvu, která byla volena dle uvedené řady (Tabulka 7.7). Měření a záznam hodnot byl realizován pomocí dynamometru **Kistler 9255B** a softwaru **DynoWare**. Pro každou hodnotu posuvu byla vyvrtána série 5 děr a změřeny hodnoty síly. Toto měření se 3 krát opakovalo. Záznam z měření sil pro případ $v_c = 75 \text{ m / min}$ a $f_o = 0,15 \text{ mm / ot}$ je uveden na následujícím obrázku. Z důvodů množství dostupného materiálu bylo měření provedeno pouze pro materiál **SF30**.



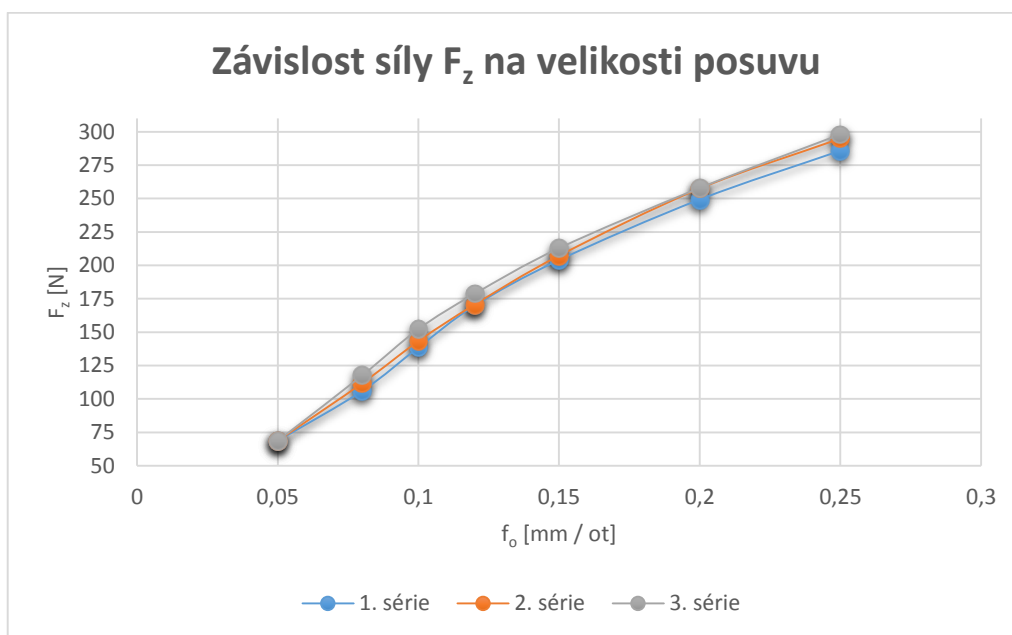
Obrázek 7.26 – Záznam z měření sil při sérii 5 děr.

Zaznamenané hodnoty byly vyhodnoceny pomocí softwaru *DynoWare* a naměřené velikosti sil shrnuty do tabulky:

Tabulka 7.12 – Naměřené hodnoty sil při vrtání 5 děr.

#	v_c [m/min]	f_o [mm/ot]	Δ [N]	1.	2.	3.	4.	5.	F_z [N]
1	75	0,05	-13,16	68,88	56,31	50,62	51,02	50,57	68,64
		0,08	-12,09	110,30	97,84	93,79	87,52	80,00	105,98
		0,1	-12,01	142,40	127,60	121,10	121,90	119,60	138,53
		0,12	-15,03	177,30	152,70	137,80	154,40	151,80	169,83
		0,15	-13,27	200,20	194,50	188,20	184,70	185,50	203,89
		0,2	-13,48	248,20	241,80	224,20	234,40	229,90	249,18
		0,25	-11,92	289,10	274,90	262,00	276,10	266,70	285,68
2	75	0,05	-15,15	66,57	55,61	48,10	44,45	52,49	68,59
		0,08	-16,92	114,40	94,09	90,34	88,74	86,22	111,68
		0,1	-11,97	147,30	127,80	120,50	131,10	129,70	143,25
		0,12	-15,34	171,10	149,60	151,00	148,10	156,20	170,54
		0,15	-14,84	210,50	187,50	186,70	185,60	191,10	207,12
		0,2	-10,06	264,50	256,30	240,90	237,50	237,50	257,40
		0,25	-17,20	293,20	278,10	267,20	268,40	281,10	294,80
3	75	0,25	-12,82	307,20	285,70	281,90	272,50	279,10	298,10
		0,2	-16,80	254,10	240,80	236,70	235,70	238,60	257,98
		0,15	-10,28	218,80	197,90	198,80	195,00	202,70	212,92
		0,12	-15,27	181,80	172,80	161,60	154,50	146,90	178,79
		0,1	-15,45	154,10	138,20	130,00	131,60	130,90	152,41
		0,08	-16,01	117,50	99,35	98,52	94,42	98,80	117,72
		0,05	-10,55	69,14	61,55	58,49	49,97	52,03	68,79

Průměrné hodnoty síly F_z při jednotlivých posuvech byly vyneseny do grafické závislosti:

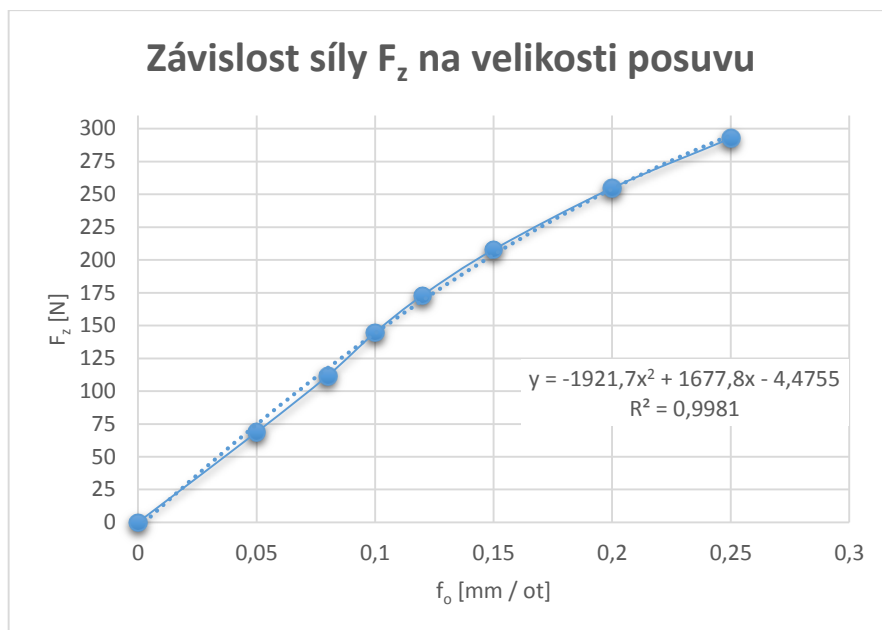


Obrázek 7.27 – Závislost síly v ose Z na velikosti posuvu.

Velikost síly s rostoucím posuvem stoupá. Průběh závislosti není lineární a je patrné, že při vyšších hodnotách posuvů se rychlost nárůstu síly snižuje. Dále lze vyhodnotit, že se síly v jednotlivých sériích liší řádově v jednotkách newtonů. Měření je tedy dobře opakovatelné. Průměrné hodnoty sil pro všechna měření shrnuje Tabulka 7.13.

Tabulka 7.13 – Průměrné hodnoty sil pro jednotlivé posuvy ze všech měření.

	v_c [m/min]	f_o [mm/ot]	1.	2.	3.	F_z [N]
Průměrné hodnoty	75	0,05	68,64	68,59	68,79	68,67
		0,08	105,98	111,68	117,72	111,79
		0,1	138,53	143,25	152,41	144,73
		0,12	169,83	170,54	178,79	173,06
		0,15	203,89	207,12	212,92	207,98
		0,2	249,18	257,40	257,98	254,85
		0,25	285,68	294,80	298,10	292,86



Obrázek 7.28 – Regrese závislosti síly v ose Z na posuvu.

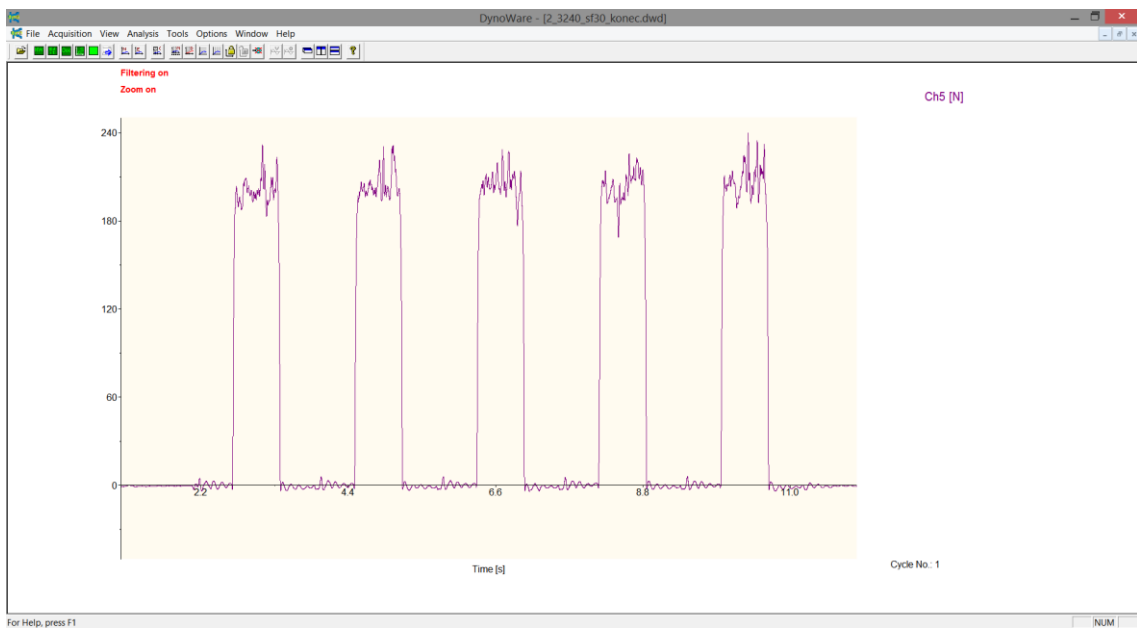
Uvedený graf znázorňuje průběh síly z průměrných hodnot. Pro vynesené hodnoty byla vytvořena spojnice trendu, která je vyjádřena polynomem druhého stupně (viz. Obrázek 7.28).

7.7.2 Měření sil na konci trvanlivosti nástroje

Při měření opotřebení byla zkoumána závislost velikosti posuvové síly na opotřebení nástroje. Síla F_z byla měřena vždy na začátku cyklu, kdy byl nástroj nový, ostrý, neopotrebovaný. Poté bylo vyvrtáno inkriminovaných 3 240 děr a na konci cyklu opět došlo k měření posuvové síly. Toto se opakovalo 3 krát pro každý materiál, stejně jako při měření opotřebení. Výsledky pro oba materiály jsou uvedeny dále.



Obrázek 7.29 – Snímek obrazovky ze záznamu měření posuvové síly na začátku cyklu, materiál SF30.



Obrázek 7.30 – Snímek obrazovky ze záznamu měření posuvové síly na konci cyklu, materiál SF30.

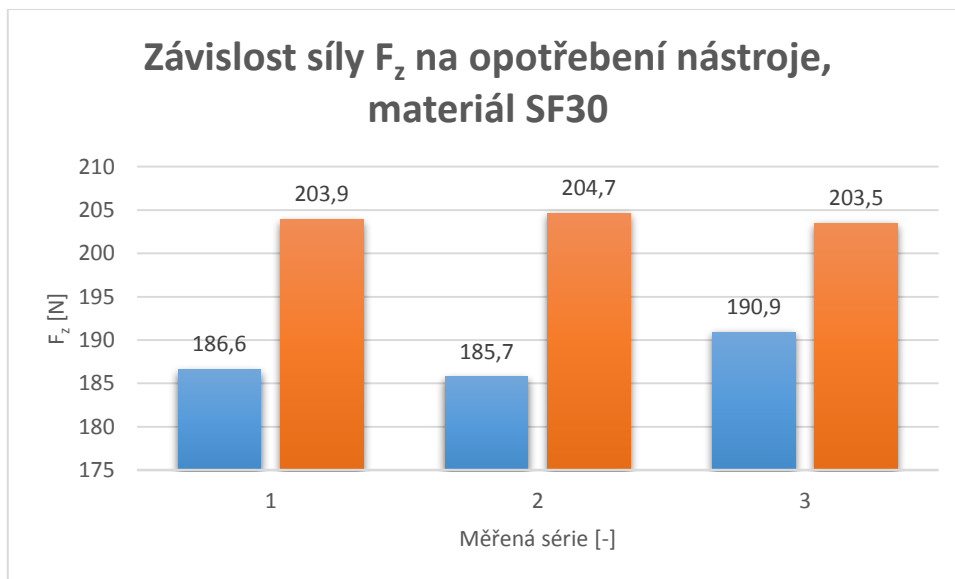
Materiál SF30

Obrázek 7.29 a Obrázek 7.30 znázorňují průběhy sil na čase. Pro vyhodnocení záznamů bylo nutné vždy získat odchylku Δ na začátku a konci měření a tu poté odečíst od výsledné hodnoty síly. Pomocí softwaru **DynoWare** byly získány následující hodnoty posuvové síly F_z .

Tabulka 7.14 – Hodnoty posuvové síly na začátku a konci cyklu, materiál SF30.

#	v_c [m/min]	f_o [mm/ot]	n [-]	Δ [N]	1.	2.	3.	4.	5.	F_z [N]
1	75	0,15	0	-3,7	180,6	182,4	175,6	188,9	187,1	186,6
			3240	-13,3	200,2	194,5	188,2	184,7	185,5	203,9
2	75	0,15	0	-9,7	176,4	171,5	173,6	181,0	177,8	185,7
			3240	-0,6	199,8	205,1	205,5	202,8	207,2	204,7
3	75	0,15	0	-10,2	188,0	170,5	179,2	179,9	185,8	190,9
			3240	1,2	201,2	205,7	211,8	201,2	203,3	203,5

Tabulka 7.14 uvádí hodnoty odchylky Δ , síly naměřené pro prvních a posledních 5 děr a z nich získanou průměrnou hodnotu F_z . Spočítané průměrné hodnoty naměřených sil pro první a posledních pět děr cyklu byly pro názornost vyneseny do grafu uvedeného níže.



Obrázek 7.31 – Závislost posuvové síly na opotřebení nástroje, materiál SF30.

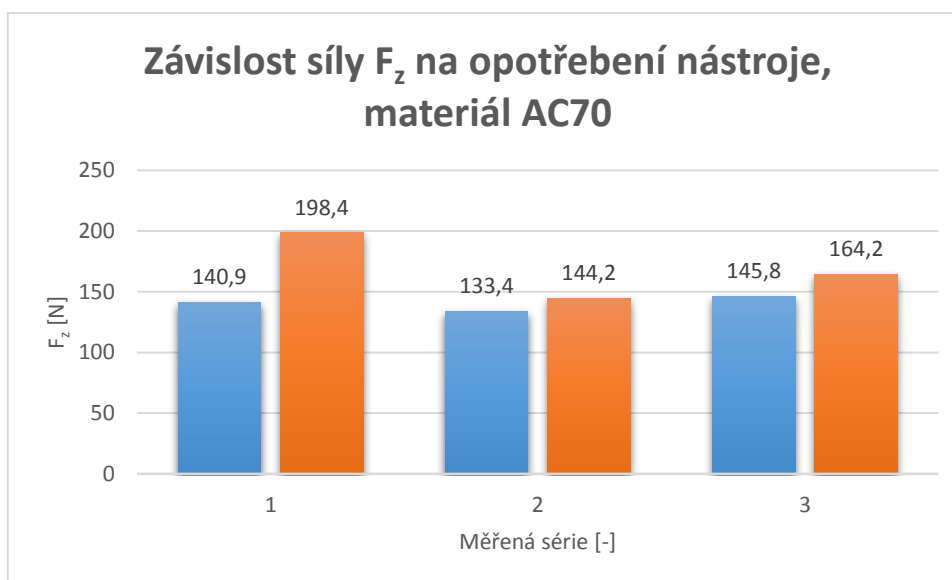
Graf uvádí počáteční hodnotu síly (modře) a hodnotu síly po opotřebení (oranžově). Z výsledné závislosti je patrný nárůst posuvové síly F_z po opotřebení nástroje. Toto zvýšení činí přibližně **9%** oproti počáteční síle. Je pravděpodobné, že síla by s dalším opotřebením rychle stoupala až by došlo k destrukci nástroje.

Materiál AC70

Analogicky bylo provedeno měření pro materiál AC70. Tabulka 7.15 shrnuje naměřené hodnoty. Obrázek 7.32 uvádí grafické porovnání hodnot.

Tabulka 7.15 – Hodnoty posuvové síly na začátku a konci cyklu, materiál AC70.

#	v_c [m/min]	f_o [mm/ot]	n [-]	Δ [N]	1.	2.	3.	4.	5.	F_z [N]
1	75	0,15	0	-1,4	190,7	195,0	198,4	198,5	202,6	198,4
			3240	-1,5	135,8	139,2	133,5	144,0	144,5	140,9
2	75	0,15	0	0,4	119,8	135,5	135,9	138,1	139,7	133,4
			3240	-1,0	141,6	147,5	140,7	142,9	143,1	144,2
3	75	0,15	0	-3,6	182,1	127,1	139,1	166,8	187,7	164,2
			3240	1,3	142,6	157,1	147,1	143,1	145,5	145,8



Obrázek 7.32 – Závislost posuvové síly na opotřebení nástroje, materiál AC70.

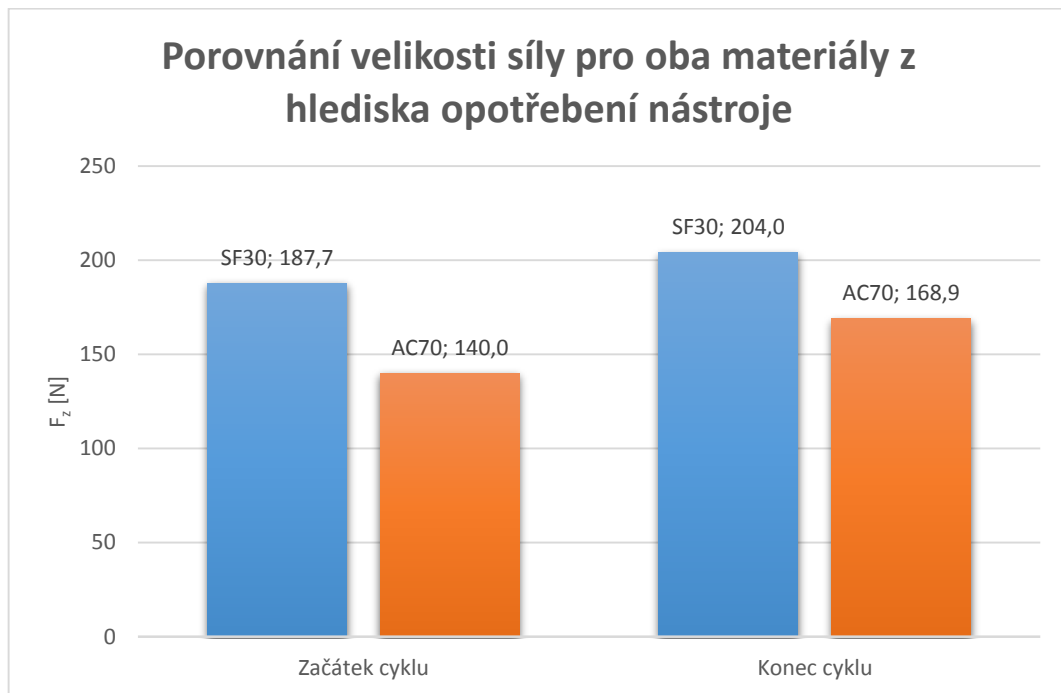
Rovněž u materiálu AC70 se projevilo zvýšení síly F_z s rostoucím opotřebením nástroje. V tomto případě se síla zvýšila přibližně o **20,5%**. U první série je rozdíl sil větší, což mohlo být způsobeno nepřesným nabroušením vrtáku z výroby vedoucí k jeho rychlejšímu opotřebování.

Porovnání obou materiálů

Pro porovnání působící síly z hlediska opotřebení nástroje pro oba materiály byly vypočítány průměrné hodnoty sil ze všech měření. Tabulka 7.16 uvádí výsledné hodnoty. Obrázek 7.33 je graficky interpretuje.

Tabulka 7.16 – Průměrné hodnoty naměřených sil s novým a opotřebovaným nástrojem.

Materiál	F_z [N]	
	Začátek cyklu	Konec cyklu
SF30	187,7	204,0
AC70	140,0	168,9



Obrázek 7.33 – Porovnání síly F_z z hlediska opotřebení nástroje pro oba materiály.

Z grafu je patrné, že při obrábění materiálu SF30 (modrá) působila na nástroj větší síla jak na začátku, tak na konci cyklu. Tento výsledek koresponduje se závěrem v části experimentu zaměřeném na měření velikosti opotřebení nástroje. Zde materiál SF30 způsoboval větší míru opotřebení nástroje, než slitina AC70. Lze tedy konstatovat, že materiál AC70 vykazuje lepší obrobitelnost.

8 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval problematikou monitorování procesu vrtání. Cílem práce bylo podat přehled o používaných způsobů monitorování procesu vrtání, popsat princip vybraného způsobu monitorování a navrhnout experiment ověřující použitelnost zvolené techniky. Závěrem práce jsem provedl a vyhodnotil navržený experiment.

Monitorování procesu vrtání je technika, která dovoluje získat dodatečné informace o daném procesu. V úvodní části práce jsem v několika kapitolách popsal důležitost a možné ekonomické i materiální úspory při aplikaci těchto metod. Dále jsem se věnoval bližšímu popisu jednotlivých způsobů monitorování a diskutoval vhodnost jejich nasazení v případě vrtání děr malých průměrů. Ve stručnosti jsem z dostupných informačních zdrojů shrnul četnost použití jednotlivých způsobů monitorování pro případ vrtání a tím obhájil vstupní volbu techniky pro návrh a provedení experimentu.

Praktickou část práce jsem zahájil krátkým popisem vytyčeného cíle. Tím bylo zjištění, zda jsem schopen pomocí stacionárního dynamometru monitorovat síly při vrtání děr malého průměru a zda bude patrný vliv opotřebení nástroje na působící axiální sílu.

K vyřešení zadaného problému jsem navrhl experiment. Ten se sestával z několika kroků. Prvním z nich byla volba vhodného nástroje běžně dostupného na trhu. Poptal jsem tedy přední světové výrobce a dodavatele obráběcích nástrojů a na základě obdržené nabídky vybral nástroj.

Následovala technická příprava experimentu, ve které jsem připravil polotovary, zpracoval projekt v CAD/CAM včetně vytvoření modelů obrobků, upravil postprocesor pro dostupné stroje a navrhl uspořádání upnutí a měřicí techniky.

V dalším kroku jsem provedl ověření zvolené metody monitorování. Současným měřením pomocí dvou technik jsem získal hodnoty, které jsem mohl vzájemně porovnat. Výsledkem bylo potvrzení, že měření pomocí dynamometru Kistler typu 9255B je způsobitelné k dané aplikaci a výsledné hodnoty korespondují s měřením pomocí zařízení DDU-4 WiSy.

Závěrečnou částí experimentu byly testy opotřebení nástroje. Vyhodnotil jsem závislosti opotřebení nástroje na počtu vyvrtaných děr, silových změn při obrábění otupeným

nástrojem a vzájemně porovnal hodnoty pro dva různé materiály. Výsledkem tohoto testu je stanovisko potvrzující možnost monitorování procesu vrtání pomocí stacionárního dynamometru i v případě vrtání děr malých průměrů.

Závěrem práce je potvrzení lepší obrobitelnosti materiálu AC70. Toto vyplývá ze skutečnosti, že při měření sil tento materiál vykazoval menší namáhání nástroje přibližně o 25%. Současně byla v testech opotřeбенí nástroje zjištěna hodnota nižší o 62% v porovnání s materiálem SF30. Oba zmíněné fakty navíc korespondují s nižším obsahem křemíku ve slitině AC70. Z uvedených výsledků tedy mohu podat doporučení z hlediska obrobitelnosti pro volbu materiálu AC70 k výrobě vstřikovacích forem.

Seznam literatury

1. **Mádl, Jan a Kvasnička, Ivo.** *Optimalizace obráběcího procesu.* Praha : ČVUT, 1998. 08-01-01864-6.
2. **López de Lacalle, L. N., a další.** Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2011, 25, stránky 2745-2752.
3. **Sandvik AB.** Produkty. [Online] 2012. [Citace: 6. červen 2015.] <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/gundrills/Pages/default.aspx>.
4. **Kluft, W.** *Werkzeugüberwachungssysteme für die Drebearbeitung.* Aachen : Prometec, 1982.
5. **Thangaraj, A. a Wright, P. K.** Computer-assisted prediction of drill failure using in-process measurements of thrust force. *Journal of Engineering for Industry.* 1988, 110, stránky 192-200.
6. **Hong, S. Y., Ni, J. a Wu, S. M.** Analysis of drill failure modes by multisensors on a robotic end effector. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 1996, 118 (4).
7. **Subramanian, K. a Cook, N. H.** Sensing of drill wear and prediction of drill life. *Journal of Engineering for Industry.* 1977, 99, stránky 295-301.
8. **Kaldor, S. a Lenz, E.** Investigation in tool life of the twist drills. *Annals of the CIRP.* 1980, stránky 23-27.
9. **Lin, S. C. a Ting, C. J.** Tool wear monitoring in drilling using force signals. *Wear.* 1995, 180, stránky 53-60.
10. **Braun, S., Lenz, E. a Wu, C. L.** Signature analysis applied to drilling. *Journal of Mechanical Design.* 1982, stránky 268–276.
11. **El-Wardany, T. I., Gao, D. a Elbestawi, M. A.** Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 1996, stránky 687-711.
12. **Barker, R. W., Kluthe, G. A. a Hinich, M. J.** Monitoring rotating tool wear using higher-order spectral features. *Journal of Engineering for Industry.* 1993, stránky 23-29.

13. **Braun, S. a Lenz, E.** Machine Tool Wear Monitoring, Mechanical Signature Analysis, Theory and Applications. *Academic Press Ltd.* 1986, stránky 321-342.
14. **Jantunen, E. a Jokinen, H.** Automated On-line Diagnosis of Cutting Tool Condition (Second version). *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing.* 1996, stránky 273-287.
15. **Kutzner, K. a Schehl, U.** Werkzeugüberwachung von Bohrern kleinen Durchmessers mit Körperschallsensoren. *Industrie Anzeiger.* 1988, stránky 32-33.
16. **Erdélyi, F. a Sántha, C.** Monitoring tasks on boring and milling production cells. *Computers in Industry* 7. 1986, stránky 65-71.
17. **Li, X.** On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39. 1999, stránky 157-164.
18. **Ramamurthi, K. a Hough Jr., C. L.** Intelligent real-time predictive diagnostics for cutting tools and supervisory control of machining operations. *Journal of Engineering for Industry.* 1993, stránky 268-277.
19. **Routio, M. a Säynätjoki, M.** Tool wear and failure in the drilling of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 52. 1995, stránky 35-43.
20. **Tansel, I. N., a další.** Monitoring drill conditions with wavelet based encoding and neural network. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 1993, 33, stránky 559-575.
21. **Von Nedeß, C. a Himburg, T.** Automatisierte Überwachung des Bohrens. *VDI-Z.* 1986, 128, stránky 651-657.
22. **Christoffel, K. a Jung, W.** Überwachungseinheit für die Bohrbearbeitung. *Industrie Anzeiger.* 1981, 103, stránky 198-199.
23. **Govekar, E. a Grabec, I.** Self-organizing neural network application to drill wear classification. *Journal of Engineering for Industry.* 1994, 116, stránky 233-238.
24. **König, W. a Christoffel, K.** Sensoren für die Bohrbearbeitung. *Industrie Anzeiger.* 1980, 103, stránky 29-33.

25. **Li, P. G. a Wu, S. M.** Monitoring drilling wear states by a fuzzy pattern recognition technique. *Journal of Engineering for Industry*. 1988, 110, stránky 297-300.
26. **Liu, T. I. a Anantharaman, K. S.** Intelligent classification and measurement of drill wear. *Journal of Engineering for Industry*. 1994, 116, stránky 392–397.
27. **Lenz, E., Mayer, J. E. a Lee, D. G.** Investigation in drilling. *Annals of the CIRP*. 1978, 27, stránky 49-53.
28. **Kavaratzis, Y. a Maiden, J. D.** System for real time process monitoring and adaptive control during CNC deep hole drilling. *Proceedings of Comadem '89*. 1989, stránky 148–152.
29. **Schehl, U.** Werkzeugüberwachung mit Acoustic-Emission beim Drehen. *Fräsen und Bohren*. 1991.
30. **Hayashi, S. R., Thomas, C. E. a Wildes, D. G.** Tool break detection by monitoring ultrasonic vibrations. *Annals of the CIRP*. 1988, 37, stránky 61-64.
31. **Mádl, Jan.** *Teorie obrábění*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1990.
32. **Forejt, M. a Píška, M.** *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno : Akademické nakladatelství CERN, 2006. str. 225. ISBN 80-214-2374-9.
33. **Spitler, D., et al.** *Fundamentals of Tool Design*. Dearborn : Society of Manufacturing Engineers, 2003. ISBN 0-87263-650-X.
34. **Stephenson, D. A. a Agapiou, J. S.** *Metal cutting theory and practice*. Boca Raton, FL : CRC Taylor & Francis, 2006. ISBN 0824758889.
35. **Kocman, K. a Prokop, J.** *Technologie obrábění. 2. vyd.* Brno : CERN, 2005. ISBN 80-214-3068-0.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 – Zastoupení technologií dle počtu prováděných operací (vlevo) a spotřeba strojního času dané technologie (vpravo).	8
Obrázek 2.2 – Dělové (vlevo) a šroubovitě (vpravo) vrtáky. (3)	9
Obrázek 2.3 – Porovnání minutových posuvů v závislosti na poměru l / d . (2).....	10
Obrázek 3.1 – Využitelný operační čas stroje. (1).....	11
Obrázek 4.1 – Měření krouticího momentu a síly F_z na stacionárním dynamometru. ...	14
Obrázek 4.2 – Záznam monitorování vibrací (11).....	16
Obrázek 4.3 – Schéma aparatury pro měření a vyhodnocení signálu od vibrací (11). ...	17
Obrázek 6.1 – Složky řezné síly (32).....	23
Obrázek 6.2 – Rozklad sil na břitu šroubovitěho vrtáku (33).....	24
Obrázek 6.3 - Rozložení posuvové síly na průměru vrtáku (34).	25
Obrázek 7.1 – Materiál.	27
Obrázek 7.2 – Příprava polotovaru.	30
Obrázek 7.3 – Model obrobku.	31
Obrázek 7.4 – Tvorba drah nástrojů.	31
Obrázek 7.5 – Ukázka NC programu.....	32
Obrázek 7.6 – Upínání nástroje.	33
Obrázek 7.7 – Měření délkové korekce nástroje.	33
Obrázek 7.8 – Stroj LM1.	34
Obrázek 7.9 – Stroj LM2.	35
Obrázek 7.10 – Upnutí na stroji LM1.....	36
Obrázek 7.11 – Schéma zapojení dynamometru.	36
Obrázek 7.12 – Schéma uspořádání systému DDU-4 WiSy.	37
Obrázek 7.13 – Měření pomocí dynamometru Kistler typu 9255B.	37
Obrázek 7.14 – Záznam měření síly v ose Z a krouticího momentu pomocí systému DDU-4 WiSy.	38
Obrázek 7.15 – Porovnání výstupů obou monitorovacích technik.	39
Obrázek 7.16 – Fotografie nárůstků při daných řezných podmínkách.	41
Obrázek 7.17 – Nárůstek - vlevo chlazení vnější, vpravo chlazení vnitřní.	42
Obrázek 7.18 – Způsob odečítání hodnot opotřebení. (31)	43
Obrázek 7.19 – Měření opotřebení.	43
Obrázek 7.20 – Závislost opotřebení na počtu vyvrtaných děr, materiál SF30.....	45

Obrázek 7.21 – Opotřebenění vrtáku, materiál SF30, vyznačené měřítko 500 μm	45
Obrázek 7.22 – Závislost opotřebenění na počtu vyvrtaných děr, materiál AC70.....	46
Obrázek 7.23 – Opotřebenění vrtáku, materiál AC70, vyznačené měřítko 500 μm	47
Obrázek 7.24 – Porovnání opotřebenění VB pro oba materiály.....	47
Obrázek 7.25 – Porovnání VB_{MAX} pro oba materiály.	48
Obrázek 7.26 – Záznam z měření sil při sérii 5 děr.....	49
Obrázek 7.27 – Závislost síly v ose Z na velikosti posuvu.....	50
Obrázek 7.28 – Regrese závislosti síly v ose Z na posuvu.	51
Obrázek 7.29 – Snímek obrazovky ze záznamu měření posuvové síly na začátku cyklu, materiál SF30.....	52
Obrázek 7.30 – Snímek obrazovky ze záznamu měření posuvové síly na konci cyklu, materiál SF30.....	52
Obrázek 7.31 – Závislost posuvové síly na opotřebenění nástroje, materiál SF30.....	53
Obrázek 7.32 – Závislost posuvové síly na opotřebenění nástroje, materiál AC70.....	54
Obrázek 7.33 – Porovnání síly F_z z hlediska opotřebenění nástroje pro oba materiály.	55

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 – Subjekty monitorování. (1).....	12
Tabulka 5.1 – Shrnutí používaných monitorovacích metod při vrtání.	19
Tabulka 5.2 – Specifikace dynamometru Kistler Typ 9255B. (Zdroj: www.kistler.com)	21
Tabulka 5.3 – Specifikace přenosného systému DDU-4 WiSy. (Zdroj: www.artis.de).	22
Tabulka 7.1 – Složení materiálu SF30.....	28
Tabulka 7.2 – Mechanické vlastnosti materiálu SF30.....	28
Tabulka 7.3 – Složení materiálu AC70.....	28
Tabulka 7.4 – Mechanické vlastnosti materiálu AC70.....	28
Tabulka 7.5 – Výběr nástroje.....	29
Tabulka 7.6 – Přepoččet doporučených řezných podmínek.	40
Tabulka 7.7 – Řezné podmínky.	40
Tabulka 7.8 – Naměřené hodnoty opotřebení, materiál SF30.	44
Tabulka 7.9 – Průměrné hodnoty opotřebení, materiál SF30.	44
Tabulka 7.10 - Naměřené hodnoty opotřebení, materiál AC70.....	46
Tabulka 7.11 – Průměrné hodnoty opotřebení, materiál AC70.....	46
Tabulka 7.12 – Naměřené hodnoty sil při vrtání 5 děr.	49
Tabulka 7.13 – Průměrné hodnoty sil pro jednotlivé posuvy ze všech měření.	50
Tabulka 7.14 – Hodnoty posuvové síly na začátku a konci cyklu, materiál SF30.	53
Tabulka 7.15 – Hodnoty posuvové síly na začátku a konci cyklu, materiál AC70.	54
Tabulka 7.16 – Průměrné hodnoty naměřených sil s novým a opotřebovaným nástrojem.	55