

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie  
– technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv radiálního házení vrtáku na jeho trvanlivost

Autor: **Ing. Pavlína REŠLOVÁ**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Pavlína REŠLOVÁ**  
Osobní číslo: **S17N0073K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Vliv radiálního házení vrtáku na jeho trvanlivost**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace experimentu
4. Zhodnocení výsledků
5. Závěr

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

Seznam odborné literatury:

- KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- ŘEHOŘ, J. *Technologie HSC*. In *Technologické a informačné činitele obrábania*. Košice : Technická univerzita, 2009, s. 101-136. ISBN: 978-80-553-038-9
- FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**


Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Antonín Šofka**

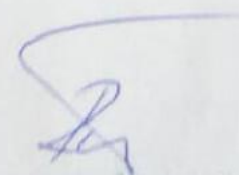
PM - TECH s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2018

## Prohlášení o autorství

**Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.**

**V Plzni dne: .....**

**.....  
podpis autora**

## Poděkování

Děkuji panu Doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vedení a cenné rady při zpracování této práce a zároveň děkuji vývojovému centru RTI Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni za možnost realizace experimentu. Poděkování patří také společnosti PM-Tech s.r.o. za umožnění vzniku práce. Dále bych ráda poděkovala Antonínu Šofkovi, Ing. Tomáši Bakšovi a Ing. Jaroslavu Habichovi za odborné konzultace a rady k řešenému problému.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Rešlová	Jméno Pavčina	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. ZETEK, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv radiálního házení vrtáku na jeho trvanlivost		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	65	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	55	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce obsahuje základní informace o vrtání, opotřebením vrtáku a o silovém zatížení vrtáku. V práci je zpracovaná analýza vlivu házení na trvanlivost vrtáku o průměru 3 mm. Z hlediska vlivu házení na opotřebením a zatížení vrtáku, musí být házení vrtáku minimální. Toto tvrzení bylo v práci potvrzeno.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Vrtání, vrtání malých děr, házení vrtáku, opotřebením vrtáků, zatížení vrtáků, měření sil při vrtání</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Rešlová	Name Pavčina		
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 „Mechanical Engineering - Machining Technology“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing.ZETEK, Ph.D.	Name Miroslav		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The influence of the radial runout of drill on its durability			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	65	<b>TEXT PART</b>	55	<b>GRAPHICAL PART</b>	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis contains basic information about drilling, drill wear and drill load. The thesis analyzes the impact of runout on the durability of a 3 mm diameter drill. From the point of the influence for the wear and the load of a drilling bit it is important to keep the runout of the drilling bit on it as small as possible. This fact was confirmed.
<b>KEY WORDS</b>	Drilling, drilling of small holes, drill runout, drill wear, drill load, measurement of drilling forces

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Rozbor současného stavu.....	10
2.1	Vrtání.....	10
2.1.1	Upínání vrtáků .....	12
2.1.2	Vrtání malých otvorů.....	13
2.1.3	Kvalita vrtaných otvorů .....	13
2.2	Opotřebení vrtáku .....	14
2.2.1	Opotřebení řezných nástrojů .....	14
2.2.2	Opotřebení vrtáku, zlomení .....	22
2.2.3	Vliv házení na opotřebení vrtáku .....	24
2.2.4	Upínače pro přesné nastavení házení .....	24
2.3	Měření opotřebení .....	25
2.3.1	Hodnocení opotřebení pomocí kritérií dle ISO 3685 .....	26
2.4	Měření sil a momentů při obrábění .....	28
2.4.1	Nepřímé měření sil a momentů .....	29
2.4.2	Přímé měření sil a momentů .....	30
2.4.3	Řezné síly při vrtání .....	31
3	Návrh a realizace experimentu .....	35
3.1	Průběh a popis experimentu.....	35
3.2	Měření řezných sil .....	38
4	Zhodnocení výsledků.....	40
4.1	Posuvová složka řezné síly.....	40
4.2	Krouticí moment .....	41
4.3	Pasivní složka řezné síly.....	45
4.4	Měření děr.....	47
4.4.1	Průměry děr.....	47
4.4.2	Průměr válce .....	49
4.4.3	Kruhovitost děr.....	50
4.4.4	Válcovitost děr .....	50
4.4.5	Profil děr .....	51
4.5	Opotřebení .....	52

4.5.1	Velikost opotřebení na hřbetu .....	52
4.5.2	Velikost opotřebení na čele.....	52
4.6	Charakter opotřebení.....	53
4.7	Drsnost .....	56
5	Závěr.....	58
	Seznam obrázků: .....	60
	Seznam grafů:.....	61
	Seznam Tabulek: .....	61
	Zdroje: .....	65



## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	průměr nástroje nebo obrobku
n	[min-1]	otáčky vřetene
$v_c$	[m.min-1]	řezná rychlost
$\alpha$	[°]	úhel hřbetu
$\gamma$	[°]	úhel čela
$\omega$	[°]	úhel stoupání šroubovice
$\epsilon$	[°]	úhel špičky
$\kappa$	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
$\varphi$	[°]	úhel příčného ostří
f	[mm]	šířka fazetky
Ra	[ $\mu$ m]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
VB	[mm]	opotřebení na hřbetě
VB <sub>c</sub>	[mm]	opotřebení v oblasti špičky nástroje
VB <sub>n</sub>	[mm]	opotřebení ve formě vrubu
VB <sub>b</sub>	[mm]	opotřebené přímé části ostří (průměrné)
VB <sub>max</sub>	[mm]	opotřebené maximální
KT	[mm]	hloubka výmolu
KF	[mm]	vzdálenost výmolu od čela
KM	[mm]	střední vzdálenost výmolu
KB	[mm]	šířka výmolu
VR	[mm]	radiální opotřebení
F	[N]	síla
R	[N]	řezný odpor
F <sub>c</sub>	[N]	tangenciální (řezná) složka síly obrábění (řezání)
P <sub>už</sub>	[W]	užitkový výkon
P <sub>c</sub>	[W]	celkový výkon
P <sub>o</sub>	[W]	obráběcí výkon
$v_c$	[m.s <sup>-1</sup> ]	řezná složka rychlosti obrábění
M <sub>k</sub>	[Nm]	krouticí moment
C <sub>ff</sub> , C <sub>fc</sub>	[-]	konstanty vyjadřující vliv obráběného materiálu
X <sub>Ff</sub> , Y <sub>Ff</sub>	[-]	exponenty vyjadřující vliv průměru vrtáku
Y <sub>Fc</sub> , X <sub>Fc</sub>	[-]	exponenty vyjadřující vliv posuvu vrtáku

## 1 Úvod

*„Praxe je nejlepší učitelka“*

Tato slova použil již mezi lety 106 - 43 př. n. l. Marcus T. Cicero [1]. Myšlenka se používá dodnes a každý si ji ve svém životě potvrdí. Škola a lidé kolem nás, nás učí mnoho důležitých faktů, ale často až s praxí si uvědomíme jejich důležitost.

Žijeme v době, které se říká 4. průmyslová revoluce. Díky vývoji umělé inteligence a rychlému rozvoji v IT je dnes celkově život mnohonásobně rychlejší. Tato rychlost zasahuje do všech odvětví. Stejně tak je i strojní výroba na velice vysoké úrovni co se týče kvality, rychlosti a flexibility. Právě rychlost výroby a její kvalita přináší mnohé požadavky a také vysoké nároky na nástroje. Díky internetu, dnes mohou jednotliví výrobci poptávat například právě nástroje od nepřeberného množství dodavatelů a neomezeně tak získat nástroje zvolené kvality. Získáním kvalitních nástrojů, však nemá výrobce vyhráno. Pro maximální využití kvalit nástroje a jeho výhod je potřeba kvalitní vybavení, upnutí jak obrobku, tak nástroje, nastavení procesu, kvalifikovaná obsluha a v neposlední řadě vyhovující strojní zařízení. Mnohdy opomenutí zdánlivě nedůležitému kroku, může způsobit nemalé problémy.

Cílem této práce je analyzovat vliv radiálního házení vrtáku na jeho trvanlivost. Práce je založena na spolupráci s firmou PM-Tech s.r.o.. Firma PM-Tech s.r.o. působí v České republice a na Slovensku a již od roku 2006 se zabývá prodejem, poradenstvím, vývojem a testováním řezných nástrojů a také jejich upínáním. Důvodem vzniku této práce je dlouholetá zkušenost firmy a upozornění na skutečnost, že někteří zákazníci podceňují důležitost upnutí nástrojů. Chybné upnutí nástroje může způsobit radiální házení nástroje.

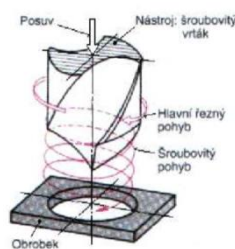
V práci bude v rámci rozboru současného stavu popsána technologie vrtání se zaměřením na vrtání malých děr, jelikož k testům budou využity monolitní vrtáky od firmy PM-Tech s.r.o. o průměru 3 mm, a teoretické posouzení vlivu na jakost vrtaných děr. Dále bude popsána problematika opotřebení nástrojů, jejich příčiny a způsob měření. V návaznosti na teoretickou část bude navržen, uskutečněn a popsán experiment, který bude následně vyhodnocen. Samotným výsledkem práce bude posouzení vlivu špatného upnutí vrtáku, na jeho trvanlivost.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Vrtání

Vrtání patří mezi nejstarší technologie třískového obrábění. Technologie spočívá v obrábění vnitřních rotačních ploch pomocí dvou a vícebřitého nástroje.

Vrtání rozdělujeme na strojní a ruční. Hlavní rozdělení vrtacích prací je vrtání a vyvrtávání. Vrtáním se rozumí vrtání do plného materiálu a vyvrtáváním vrtání do již připravené díry, která může být například předlitá či předvrtaná. Dále se pak rozlišuje vrtání podle délky vrtané díry vůči průměru vrtáku na krátké - hloubka vrtání  $3 \times D$ , střední - hloubka vrtání  $5 \times D$  a dlouhé - hloubka vrtání  $10 \times D$  a více. Základním principem technologie je, že v systému stroj-nástroj-obrobek vykonává nástroj rotační pohyb a posuv. Rotační pohyb může být vykonáván i obrobkem, jako například při vrtání na soustruhu. Rotační pohyb nástroje je hlavním řezným pohybem a spolu s vedlejším pohybem – posuvem, vytváří šroubový pohyb. Pro názornost poslouží obrázek č. 2-1 a obrázek č. 2-2, kde jsou znázorněny i základní působící síly. [2, 3, 4]

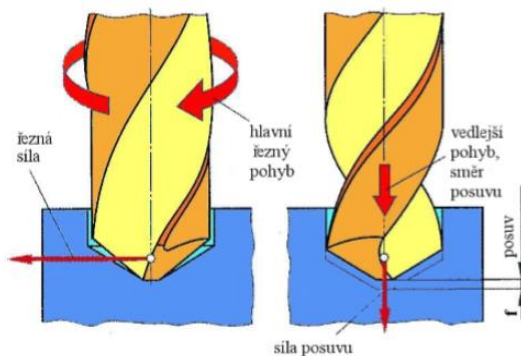


Obrázek 2-1 Pohyby při vrtání [2]

Mezi vrtací operace patří také vyhrubování, vystružování a zahlubování. Jelikož je práce zaměřena pouze na vrtání, bude popisováno pouze vrtání.

Řezná rychlost se vypočte ze vztahu [4]:

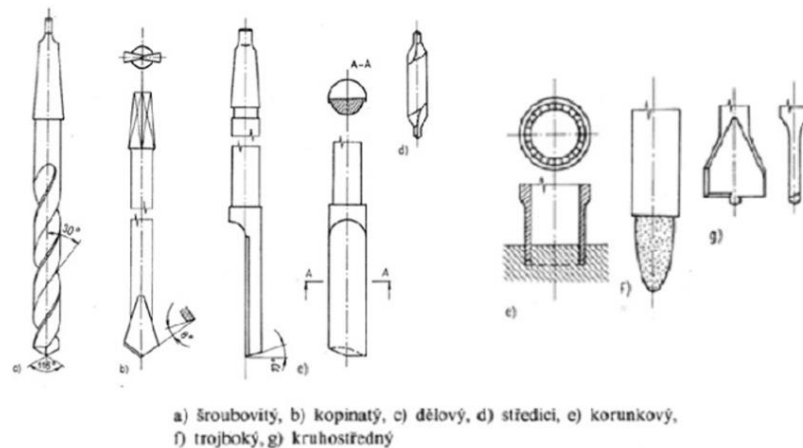
$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2-1)$$



Obrázek 2-2 Schéma řezného pohybu se základními silami [3]

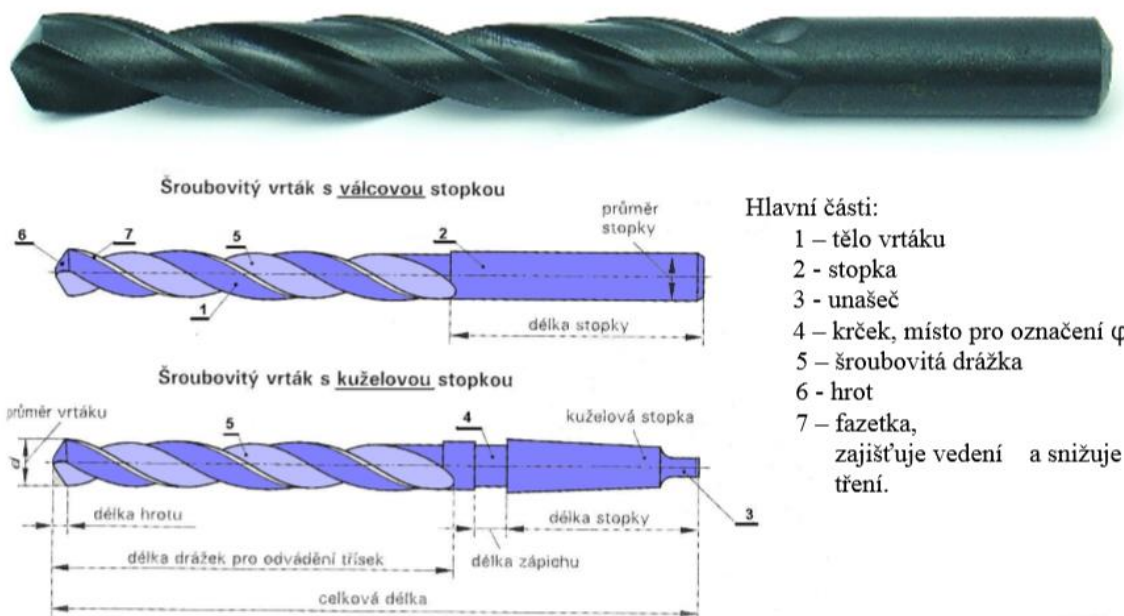
## Nástroj

Nástrojem je vrták. Dle použití existuje mnoho druhů vrtáků, které se volí podle obráběného materiálu, velikosti či tvaru díry. Na obrázku č. 2-3 jsou znázorněny základní druhy vrtáků.



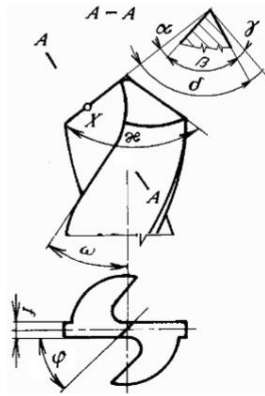
Obrázek 2-3 Základní druhy vrtacích nástrojů [2]

Šroubovitý vrták je nejběžnějším vrtákem a je taky hlavním tématem této práce. Jeho tělo je typické šroubovitými drážkami pro odvod třísky a přívod procesní kapaliny. Základní popis a vzhled je na obr. č. 2-4. [2]



Obrázek 2-4 Základní popis šroubovitého vrtáku[2]

Šroubovitý vrták je nejčastěji dvoubřitý, tak jako testovaný vrták v praktické části. Jeho řezné vlastnosti, stejně jako u jiných nástrojů, ovlivňuje geometrie nástroje. Na obrázku č. 2-5 jsou znázorněny úhly na nástroji. [5]

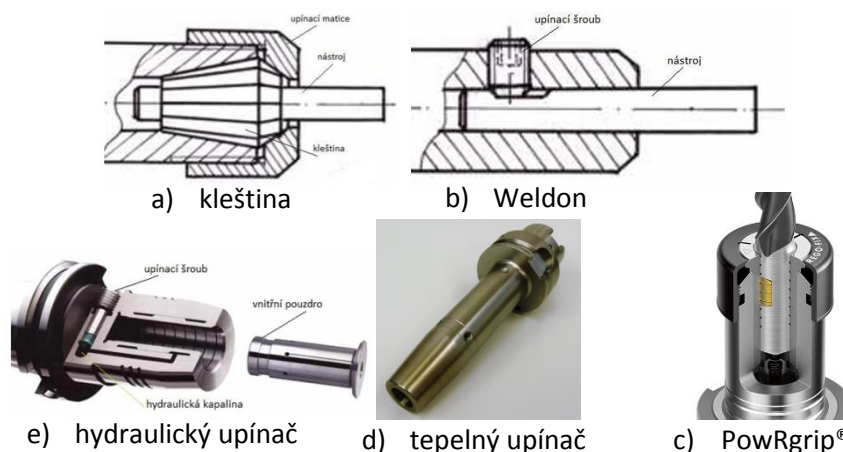


Obrázek 2-5 Geometrie šroubovitého vrtáku [5]

- $\alpha$  – úhel hřbetu
- $\gamma$  – úhel čela – plocha čela závisí na sklonu stoupání šroubovitě drážky  $\gamma = \omega$
- $\omega$  – úhel stoupání šroubovice (např.  $8^\circ, 22^\circ, 33^\circ, 45^\circ$ )
- $\epsilon$  – úhel špičky  $\epsilon = 2/\alpha$  (například  $70^\circ \dots 118^\circ$  - ocel,  $140^\circ$  - tvrdé mat.)
- $\kappa$  – úhel nastavení hlavního ostří
- $\varphi$  – úhel příčného ostří
- $f$  – šířka fazetky

### 2.1.1 Upínání vrtáků

Upínání všech rotačních nástrojů a tedy i vrtáků, vyžaduje přesné upnutí, minimální obvodové házení a dostatečnou tuhost upnutí. Vrtáky s MORSE kuželovou stopkou se upínají přímo do dutiny vrtacího vřetene. Vrtáky s válcovou stopkou se nejčastěji upínají pomocí tříčelistového vrtačkového sklíčidla, které je samostředící. Dalšími možnostmi upnutí vrtáků s válcovou stopkou jsou pomocí upínače typu Weldon, hydraulického upínače nebo tepelným upínačem viz obrázek č. 2-6. Zajímavým typem upínače je zde zobrazen také upínač PowRgrip® firmy PM-Tech s.r.o., který má lisovaný spoj a je užíván například v leteckém průmyslu a tam, kde jsou vysoké nároky na přesnost. U všech typů upnutí by měla být vždy zkontrolováno házení a to například pomocí úchytkoměru. [29]



Obrázek 2-6 příklady upínačů [29, PM-Tech s.r.o.]

### 2.1.2 Vrtání malých otvorů

Výroba malých otvorů pomocí vrtání je stále nejrozšířenějším způsobem jejich výroby, která je také prováděna například laserem či elektroerozivně. Postup při vrtání malých děr je víceméně stejný jako u běžných větších průměrů 5 a více mm. Se snižujícím se průměrem vrtáku se vyskytují určité problémy. V první řadě problém s upnutím. Kvůli malému průměru a tím malé třecí ploše, se může vrták během vrtání protáčet v důsledku nedostatečné třecí síly. Pro tento případ existují speciální kleštiny pro malé průměry. Běžně se však vrtáky o malých průměrech vyrábějí se stopkou o větším průměru, který je možné bez problému upnout do běžných upínačů. Malý průměr vrtáku přináší snižování jeho pevnosti a odolnosti proti působícím zatížením. Tím je vrták náchylnější ke zlomení. Dále se s malým průměrem vrtáku navyšuje počet požadovaných otáček. Velikost otáček je ve spojitosti s řeznou rychlostí, která se s průměrem snižuje a v ose vrtáku se rovná 0. Problémy u malých vrtáků jsou také s odvodem třísky, která se začne pýchovat v malém průřezu vodící drážky vrtáku. To vede k rychlému nárůstu řezných sil a momentů. Je také nutné si uvědomit, že se snižujícím průměrem se zvyšuje i poměr  $L/D$ , což je další nepříznivý fakt pro odvod třísky i dostatečné chlazení. Dále se u vrtání malých otvorů objevuje zvýšená teplota nástroje z důvodu špatného odvodu tepla nástrojem. Teplota nástroje se také zvyšuje s nedostatečným přísunem procesní kapaliny, které je, jak již bylo napsáno, spojeno se špatným odvodem třísky a zvýšením tření nástroje. Vyšší teploty nástroje pak urychlují jeho opotřebení. Proces vrtání malých děr je tedy náročnější a je potřeba dbát na hlídání procesu, respektive na průběh řezných sil. [24]

### 2.1.3 Kvalita vrtaných otvorů

Monolitní karbidové vrtáky dosahují tolerancí otvoru IT5-10 a drsnosti povrchu  $R_a$  v rozmezí 1-5  $\mu\text{m}$ . K dosažení těchto hodnot je však za potřebí dobré odvádění třísek, upnutí vrtáku s minimálním házením, zamezení vibrací a použití vrtáku s minimálním opotřebením. Házení způsobuje vyšší radiální zatížení vrtáku a tím i tření mezi fazetkou a stěnou díry což má vliv jak na drsnost povrchu, tak i na geometrické a rozměrové tolerance. Opotřebení vrtáku má negativní vliv na tvorbu a odvod třísky, která pak nepříznivě ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu. Celkově kvalitu vyvrtaných děr ovlivňuje upnutí nástroje, jeho geometrie a opotřebení, dostatečný přísun procesní kapaliny a to v potřebném množství a tlaku, správné upnutí obrobku či správné nastavení řezných podmínek. [25, 26]

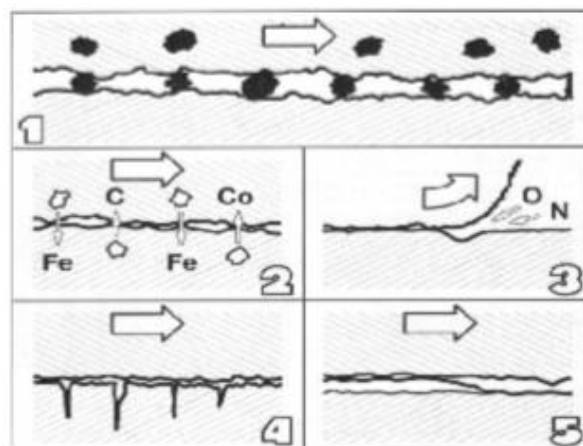
## 2.2 Opotřebení vrtáku

### 2.2.1 Opotřebení řezných nástrojů

Během obrábění, kdy břit nástroje vniká do materiálu obrobku a odděluje ho ve formě třísky, vzniká značné množství tepla působící jak na čelo, tak i na hřbet nástroje. Materiál břitu je tak velice namáhaný a dochází k opotřebení nástroje. Na opotřebení má vliv více faktorů. Například u frézování se k namáhání přidává i dynamické zatížení, které vzniká postupným vnikáním a vystupováním břitů z řezu. Dalším činitelem, který zvyšuje opotřebení, jsou například různé tvrdé částice v materiálu, které pak způsobují abrazivní opotřebení. Opotřebení je tedy proces, který je kombinací tepelných, mechanických, chemických a abrazivních faktorů zatěžujících břit a majících vliv na jeho opotřebení. [6, 7]

**Opotřebení řezných nástrojů probíhá na základě následujících mechanismů:** [6, 7]

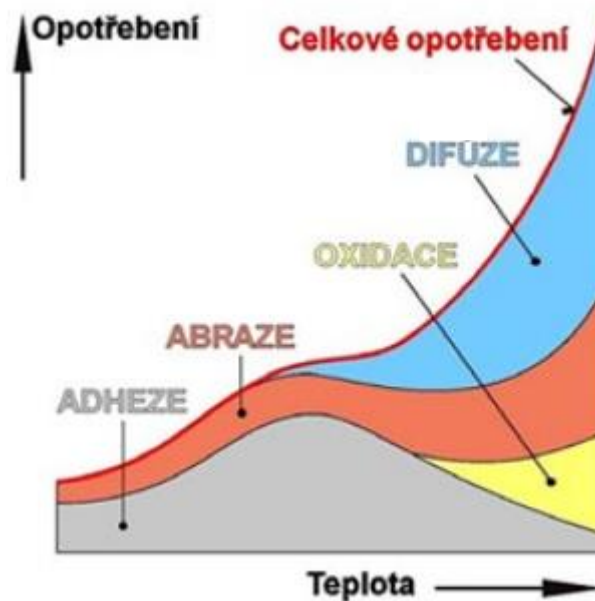
- **Abraze** - Tvrdé mikročástice z obráběného materiálu a mikročástice uvolněné z nástroje způsobují brusný otěr.
- **Adheze** – Chemická příbuznost nástroje a obráběného materiálu spolu s působením vysokých teplot a tlaků, vznikají a následně jsou okamžitě porušovány mikrosvary.
- **Difuze** – Atomy z obráběného materiálu migrují do materiálu nástroje a obráceně. V povrchu nástroje se pak vytváří nové tuhé roztoky, které ovlivňují mechanické vlastnosti břitu. Měkká vrstva je pak více náchylná k abrazi.
- **Oxidace** – Kyslík obsažený v okolí řezu vytváří chemické sloučeniny-oxidy na povrchu nástroje.
- **Plastická deformace** – Vysoká teplota v důsledku špatného odvodu tepla spolu s vysokým mechanickým zatížením způsobí plastickou deformaci povrchu břitu. Nejvyšším stupněm deformace je pak tzv. lavinové opotřebení.
- **Křehký lom** – Dynamickým zatížením způsobeným například přerušovaným řezem, nebo vměstky v obráběném materiálu, mohou způsobit křehký lom břitu.



Obrázek 2-7 Znázornění jednotlivých mechanismů opotřebení [6]

Na obrázku č. 2-7 jsou znázorněny mechanismy opotřebení (1 – abrazivní opotřebení, 2 – difusní opotřebení, 3 – oxidační opotřebení, 4 – statický či dynamický lom, 5 – adhezí opotřebení).

Jednotlivé mechanismy opotřebení se v procesu projevují se vzrůstající teplotou. Na obrázku č. 2-8 je znázorněna závislost jednotlivých faktorů na teplotě.



Obrázek 2-8 Znárodnění jednotlivých mechanismů opotřebení v závislosti na teplotě [7]

Adheze spolu s abrazí se označují jako fyzikální mechanismy opotřebení a difuze s oxidací jako chemické mechanismy. Všechny tyto mechanismy působí plynule během obrábění. Plastická deformace a křehký lom jsou pak mechanismy, které působí náhle a většinou je poté nutná výměna nástroje či destičky. [6, 7]

Opotřebení hřbetu nástroje je způsobeno převážně abrazí a oxidací. U čela nástroje je opotřebení způsobeno především adhezí, difuzí, abrazí a oxidací. Opotřebení nástroje však není způsobeno pouze zmíněnými faktory, ale ovlivňují ho dále například druh operace, geometrie nástroje a samozřejmě řezné podmínky. [6, 7]

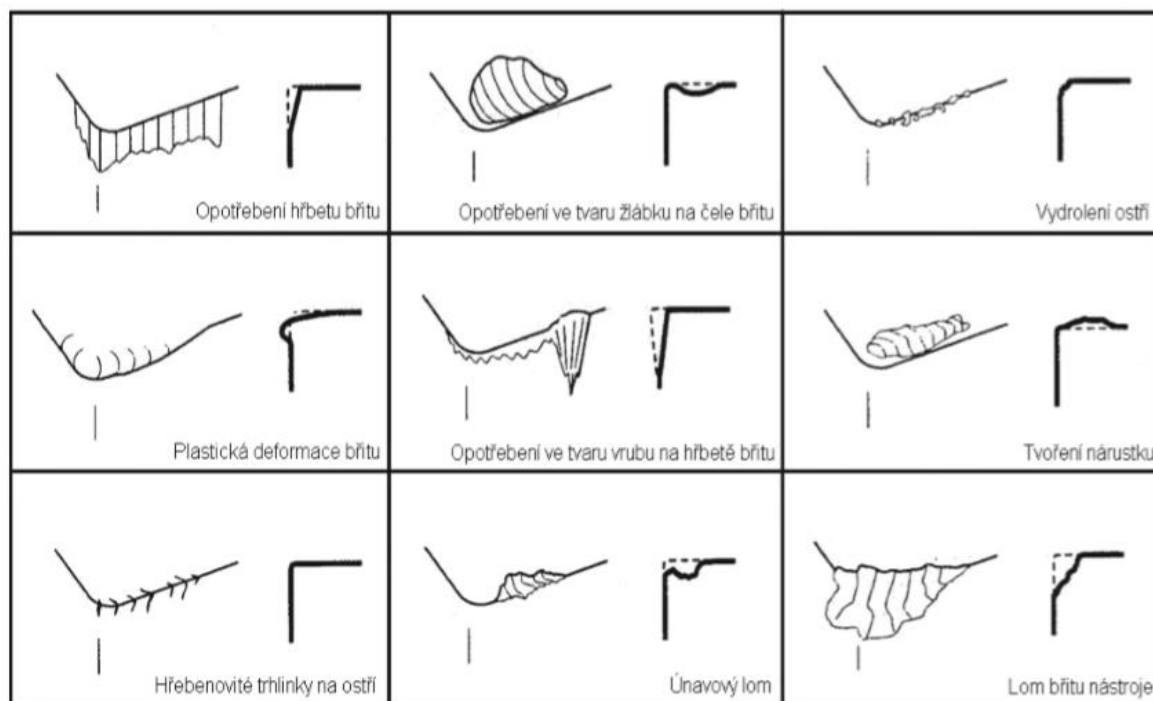
### 2.2.1.1 Typy opotřebení

K posouzení obráběcích operací, které může vést ke zvýšení produktivity, byly klasifikovány typy opotřebení břitů nástroje. Vhodná volba řezných nástrojových materiálů a parametrů obrábění vedoucích k rovnoměrnému opotřebení má významný vliv na tato kritéria:

- Přesnost rozměrů
- Jakost obrobeneé plochy
- Kontrolovaný odchod třísky



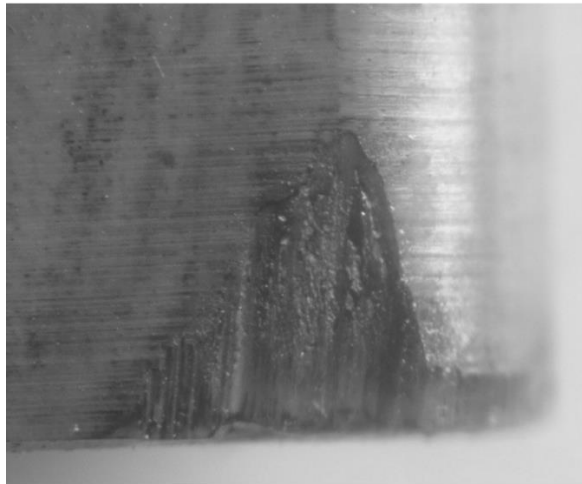
Pomocí mikroskopů je možné posuzovat opotřebení břitu a kontrolovat tak trvanlivost a díky správnému vyhodnocení a zvolením vhodných změn, je možné jí prodloužit. Každý řezný proces zanechá na nástroji určité opotřebení, kdy žádoucí je tzv. optimální průběh opotřebení. Získání tohoto optimálního opotřebení lze ovlivnit volbou nástroje v závislosti na obráběném materiálu, správnou volbou řezných podmínek, zkušeností obsluhy. Na obrázku č. 2-9 jsou znázorněny vyskytující se opotřebení, které budou dále jednotlivě rozebrány. [6, 7, 14]



Obrázek 2-9 Seznam jednotlivých typů opotřebení nástroje [6]

### Opotřebení na hřbetu nástroje

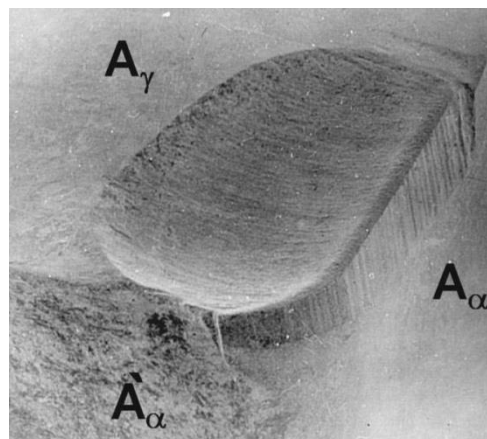
Na ploše hřbetu se projevuje opotřebení způsobené abrazí. Nejvíce jsou vystaveny působení otěru obráběným materiálem plochy hřbetu hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a fazetka před i po utváření třísky. Opotřebení hřbetu je nejčastějším opotřebením. Velké opotřebení hřbetu negativně ovlivňuje jakost povrchu a rozměrů obrobku. Dále se zvyšuje tření, čímž se zvyšuje teplota. To vše díky změně geometrie nástroje. [6, 14]



Obrázek 2-10 Opotřebení na hřbetu nástroje [6]

### Opotřebení ve tvaru výmolu (žlábkku) na čele

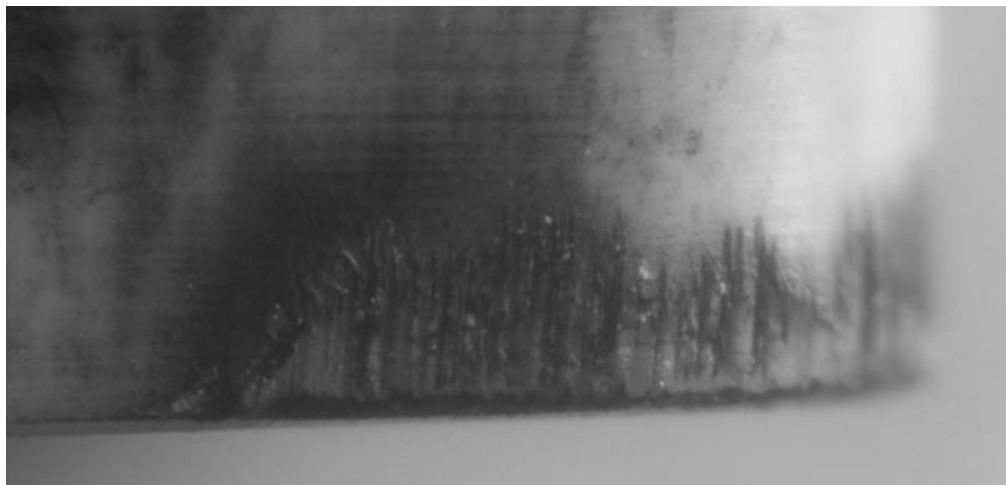
Toto opotřebení je výsledkem působení difuze a abraze, kdy jednak tvrdé částice obsažené v materiálu způsobují obrušování řezného nástroje a zároveň v místě břitu s nejvyšší teplotou tj. v místě kontaktu třísky a břitu, působí difuze. Vytváření výmolu lze snížit díky vhodné kombinaci výběru materiálu nástroje a břitu, který bude mít s obráběným materiálem nižší afinitu. Vzniklý výmol od určité velikosti ovlivňuje geometrii nástroje, ovlivňuje vznik třísky a může i zeslabit břit. [6, 14]



Obrázek 2-11 Opotřebení ve tvaru výmolu na čele [6]

### Vydrolení ostří

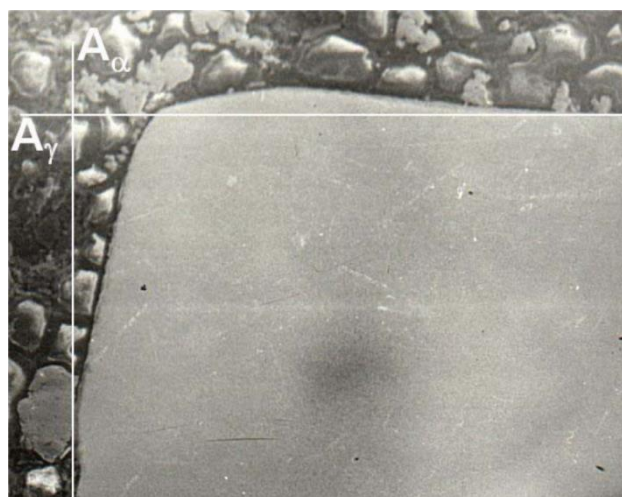
Vydrolené ostří vzniká nestejným opotřebením, kdy se břit vydroluje, respektive z jeho povrchu se oddělují malé částice řezného materiálu. Přerušovaný řez je nejčastějším viníkem tohoto opotřebení mimo nevhodného řezného materiálu či nevhodné geometrie nástroje. Vydrolování břitu lze předpokládat z průběžného pozorování břitu, zda se nevyskytuje odlupování materiálu či trhliny. [6, 14]



Obrázek 2-12 Vydrolení ostří [6]

### Plastická deformace břitu

Vliv tlaků vyvolaných řeznými silami v kombinaci s vysokými teplotami, způsobuje na břitu jeho plastickou deformaci. Vznikem plastické deformace se změní geometrie břitu a vzrůstá teplota vlivem většího tření způsobeného otupováním břitu. Této deformaci odolává vhodně zvolený řezný materiál, který má dostatečnou tvrdost za tepla a tudíž nedojde k plastické deformaci. Snížení plastické deformace se také docílí vyšší otěruvzdorností, správnou volbou zaoblení ostří a geometrie nástroje. [6, 14]

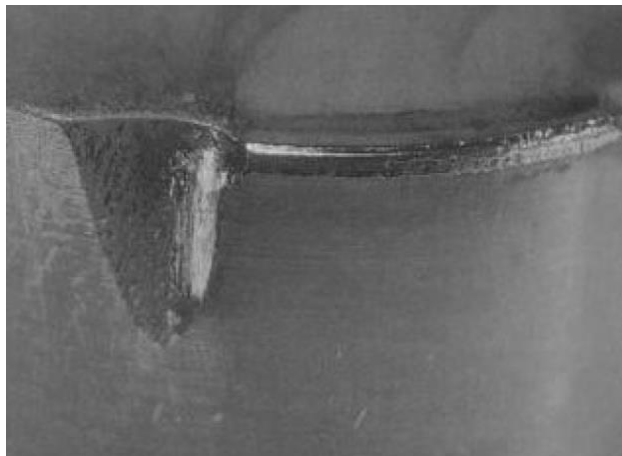


Obrázek 2-13 Plastická deformace břitu [6]

### Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu

Toto opotřebení je způsobeno nejčastěji adhezí, ale může být i projevem oxidačního opotřebení. Vrub se vyskytuje v místě, kde dochází ke kontaktu s bokem třísky a břitu. Právě tímto místem také proudí vzduch do oblasti obrábění. Na vedlejším hřbetu břitu je

toto opotřebení způsobeno pouze mechanicky tvrdými částicemi obráběného materiálu.  
[6, 14]



Obrázek 2-14 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu [6]

#### **Tvorba nárůstku**

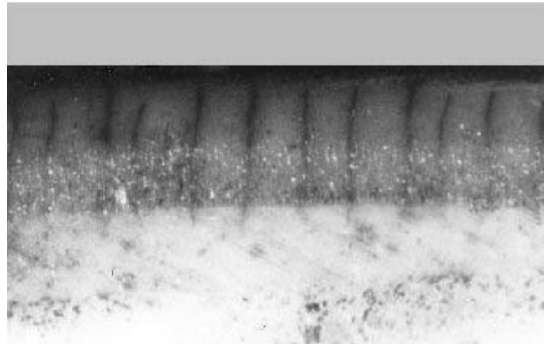
Nárůstek je tvořen díky tzv. sekundární deformaci třísky, kdy mezi čelem nástroje a třískou vzniká velká třecí síla. Plasticky zdeformované částice obráběného materiálu se působením nízké teploty a vysokého tlaku navažují na břit nástroje. Nárůstek postupně roste, až dojde k jeho odlomení a vzniku nárůstku nového. Nárůstek má negativní vliv je na jakost obrobené plochy, rozměry obrobku a způsobuje i kmitání soustavy stroj-nástroj-obrobek. S nárůstkem může dojít i k odlomení břitu. Použitím vhodné procesní kapaliny a řezných podmínek, lze tvorbě nárůstku zabránit. Obecně nárůstek vzniká při nízké řezné rychlosti a dnešní stroje ve většině případů pracují nad oblastí tvorby nárůstku tj. ve vyšších řezných rychlostech. [6, 14]



Obrázek 2-15 Tvorba nárůstku [6]

#### **Vznik hřebenových trhlinek**

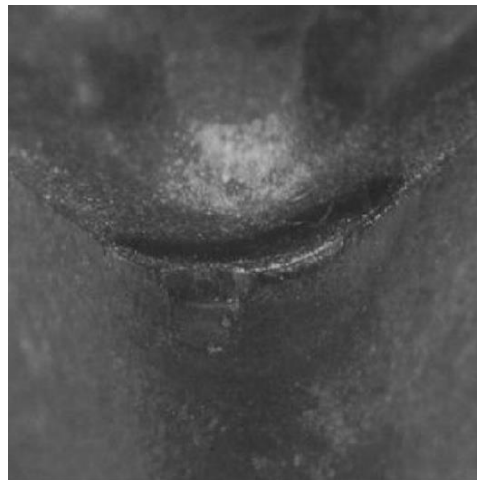
Díky časté změně teploty, například u frézování během střídání jednotlivých břitů v řezu, se může tepelným šokem vyskytnout únavové opotřebení ve formě trhlinek kolmo na ostří. Trhlinky pak mohou snížit pevnost řezného materiálu, který se tak může mezi trhlkami vylamovat, což může vést k lomu břitu. Vzniku trhlinek lze pak zamezit dostatečným chlazením. Nedostatečné chlazení může naopak vznik podpořit, kvůli vyšším tepelným rozdílům. Snížit výskyt trhlinek může volba houževnatějšího řezného materiálu, zvolením geometrie vedoucí ke snížení vzniku tepla či zvolení jiných řezných podmínek. [6, 14]



Obrázek 2-16 Vznik hřebenových trhlinek [6]

### Únavový lom

Skokové změny řezných sil o vysokých hodnotách mohou mít za následek únavový lom. K únavovému lomu dochází změnami směrů a velikostí zatížení, která nejsou tak vysoká, aby se nástroj zlomil ihned, ale jejich součtem dojde až k hranici únosnosti, která vede k únavovému lomu. Plochy lomu jsou paralelně s ostřím. [6, 14]

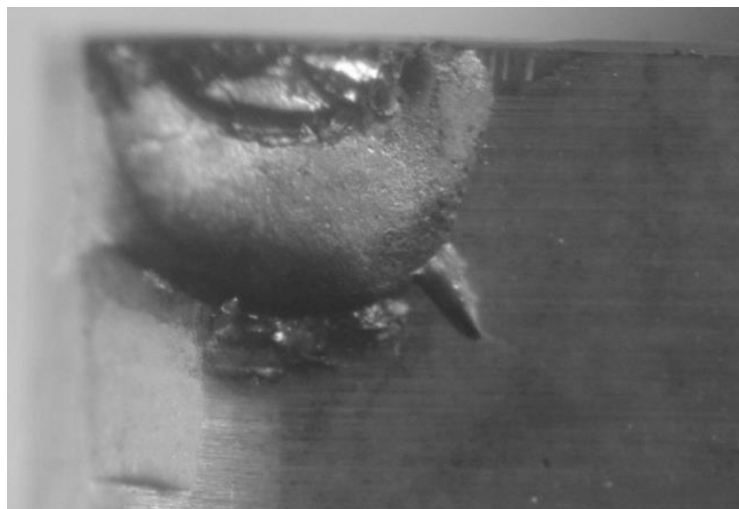


Obrázek 2-17 Únavový lom [6]

### Lom břitu nástroje

Pokud dojde k lomu břitu nástroje, jde o konec trvanlivosti nástroje a nástroj musí být vyměněn. Lom břitu je také nebezpečným jevem, kterému by mělo být předcházeno. Jedná se o křehký lom způsobený mimo jiné změnou geometrie, teploty a sil či zeslabením břitu

způsobeným jiným typem opotřebení. Důležitá je správná volba houževnatosti řezného materiálu. [6, 14]

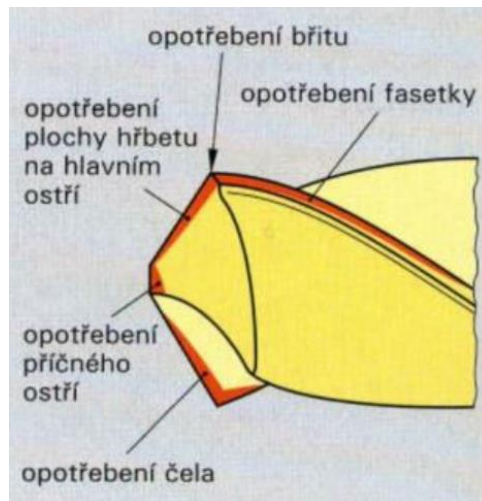


Obrázek 2-18 Lom břitu nástroje [6]

### 2.2.2 Opotřebení vrtáku, zlomení

Výše popsané typy opotřebení byly uvedeny v obecném pohledu. Nyní budou jednotlivé typy a možnosti opotřebení rozebrány konkrétně na vrtáku a jeho plochách.

Na obrázku č. 2-19 je znázorněn běžný šroubovitý vrták s vyznačenými plochami, které podléhají opotřebení během vrtání.



Obrázek 2-19 Vyskytující se opotřebení na šroubovitém vrtáku [8]

U vrtáku se lze běžně setkat s opotřebením čela, příčného ostří, hřbetu na hlavním ostří, břitu a fazetky. Opotřebení příčného ostří vzniká adhezí nebo plastickou deformací. Tato deformace má za následek zvyšování posuvové síly a ovlivňuje centrování vrtáku ve vrtané díře. Opotřebení břitu a hřbetu podél hlavního ostří je výsledkem působení abraze a plastické deformace. Opotřebení břitu zvyšuje posuvovou sílu a tím zvyšuje potřebnou energii a teplotu vrtáku. Zvýšená teplota pak vede ke snížení pevnosti břitů. Enormní opotřebení má za následek, že vrták přestává řezat, dochází k vibracím, nebo se vrták může zlomit. K opotřebení břitu na vnější špičce a opotřebení fazetky dochází působením abraze, tepla a následné plastické deformace, nebo také změnou pevnosti působením difuze. Nadměrné opotřebení vnějších špiček (viz názvosloví příloha č. 1) má za následek zhoršenou kvalitu vyvrtaných děr z hlediska rozměru a povrchu. Zpravidla se s opotřebením zmenšuje průměr vyvrtané díry. Na čele dochází kromě k abrazivnímu opotřebení často k vytvoření výmolů. Tyto výmoly jsou způsobeny odcházející třískou v důsledku snížení pevnosti vlivem teploty nebo difuze. Malé výmoly nesnižují vlastnosti vrtáku, ale větší mohou způsobit deformaci břitu, nebo jeho vylovení či dokonce zlomení vrtáku. [9, 10]

Obecně při nižších a středních rezných rychlostech převládají opotřebení způsobené abrazí a projevuje se nejvíce na vnějších špičkách a bocích vrtáku. Při vyšších rychlostech se k abrazivnímu opotřebení přidává vlivem vyšších teplot i opotřebení způsobené difuzí. Životnost nástroje se pak obecně snižuje vysokými otáčkami při obrábění abrazivních materiálů. Rychlost posuvu nad minimem přináší nižší otěr hřbetu okolo břitu. [9]

Shrnutí vyskytujících se opotřebení u vrtáků a možných opatření je shrnuto v následující tabulce č. 2-1.

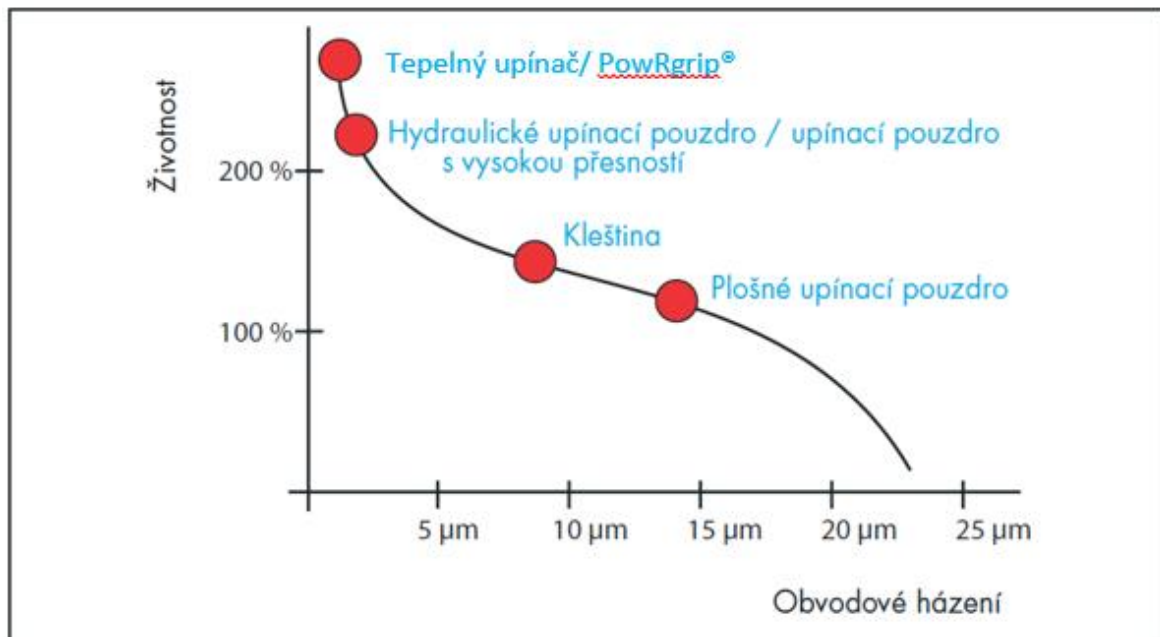
Typ opotřebení	Příčina	Charakteristika	Opatření
Opotřebení plochy hřbetu na hlavním ostří	Abraze	Rovnoběžné rýhy	Použití tvrdšího nástroje Lepší filtrace procesní kapaliny Zvýšit posuv
	Teplem snížení tvrdosti materiálu nástroje		Snížení řezné rychlosti Zvýšení chladicí účinnosti
Opotřebení vnější špičky/břitu	Teplem snížení tvrdosti materiálu nástroje	Menší průměr obrobené díry	Použití tvrdšího nástroje Snížení řezné rychlosti Použití nástroje s větším poloměrem špičky
Opotřebení na čele	Difuze	Výskyt výmolů	Snížení řezné rychlosti Použití tvrdšího nástroje Použití vrtáku povrchovou úpravou Větší úhel šroubovice
Opotřebení příčného ostří	Abraze		Snížení posuvu Použití tvrdšího nástroje Zkrácení příčného ostří
Vylomené ostří	Přerušená díra	Přerušené/vyštípnuté ostří, zlomená vnější špička	Rádus na špičce Snížení posuvu v přechodech Použití tří nebo čtyřchodého nástroje
	Vibrace	Poškozené vedlejší ostří	Zvýšení tuhosti systému Použití vrtacího pouzdra Snížení posuvu
Zlomení vrtáku	Přetížení	Zlomení nastává okamžitě	Snížit posuv, řeznou rychlost Snížit úhel šroubovice
	Vychýlení	Poškozené vedlejší ostří	Snížit vychýlení Použití vrtacího pouzdra
	Vyosení	Zlomení nastává krátce po začátku vrtání	Upnutí vrtáku maximálně v ose Použití nástroje s dobrým samostředěním Snížení posuvu hlavně při začátku vrtání předvrtání
	Shluk třísek	Ucpané šroubovice vrtáku	Přerušované vrtání Větší kanál šroubovice pro odvod třísky Zvětšení úhlu šroubovice Zvýšení množství procesní kapaliny
	Vibrace	Hluk, poškozené vedlejší ostří	Zvýšení tuhosti soustavy Použití tvrdšího nástroje
	Průhyb	Zlomení nastává při provrtání průchozí díry	Snížení posuvu na konci vrtání
	Tření vedlejším ostřím/fazetkou, nebo hřbetem nástroje	Hluk, poškození ploch kde dochází k tření	Změření a zjištění vůlí
Větší rozměr díry	Nárůstek na nástroji		Zvýšení řezné rychlosti Použití rádusu na špičce Použití nástroje s povrchovou úpravou
	Vyosení nástroje	Opotřebované vedlejší ostří	Zkontrolovat nastavení Použití vrtacího pouzdra

Tabulka 2-1 Typy opotřebení u vrtáků a jejich eliminace [9]



### 2.2.3 Vliv házení na opotřebení vrtáku

Upnutí nástroje je jedním z nejdůležitějších faktorů pro trvanlivost nástroje i kvalitu obrobené plochy. Na obrázku č. 2-20 je znázorněn vliv házení na životnost nástroje. Jedná se o graf, kde jsou znázorněny jednotlivé dnes používané upínače v závislosti jejich přesnosti upnutí, respektive dosahovaného obvodového házení na životnost nástroje. Jednoznačně nejlepším upnutím pro minimální házení nástroje je dosaženo pomocí tepelného upínače. [21, 22]



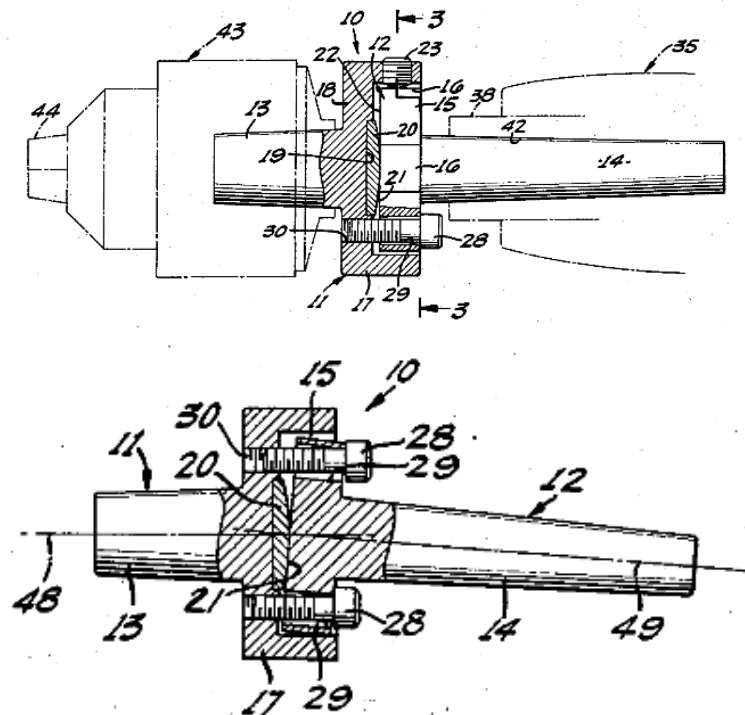
Obrázek 2-20 Vliv obvodového házení na trvanlivost nástroje [23, PM-Tech s.r.o.]

Životnost nástroje je ovlivněna velikostí a rychlostí opotřebení. Špatné upnutí se projevuje lámáním rohů špiček vrtáku (vnější špička viz názvosloví příloha č. 1), štípáním rezných hran, opotřebení vodící fazetky, vyšším opotřebením na hřbetu, opotřebením hřbetu na příčném ostří nebo zlomením vrtáku. Radiální házení vrtáku ovlivňuje tedy jeho životnost, ale také jak již bylo výše uvedeno i kvalitu vrtané díry. Díky házení se může mimo nevhodné drsnosti povrchu objevit také větší rozměr díry, otvor se špatnou válcovitostí, nebo kruhovitostí. [21, 22]

### 2.2.4 Upínače pro přesné nastavení házení

Na obrázku č. 2-20 v předchozí kapitole je vidět, že jednotlivé typy používaných upínačů jsou schopny zajistit určité minimální házení. V případě potřeby dalšího zpřesnění házení je nutné použít jiné řešení. Pro tuto problematiku slouží tzv. aktivní systémy středění nástrojů. Jedná se o systémy, které využívají funkci pasivních systémů využitých u upínačů vypsanych na obrázku č. 2-20, ale umožňují také seřizování míry házení v jednotkách mikrometrů. Základní princip těchto upínačů je patrný z obrázku č. 2-21. Jedná se o provedení z roku 1956. Tento upínač umožňoval nastavení házení nástroje upnutého v tříčelistovém sklíčidle

díky vyrovnávací části (pozice 10, 17). Pomocí seřizovacích šroubů (pozice 28) bylo možné nastavit úhlové naklopení a pomocí stavěcích šroubů (pozice 23) nastavení polohy osy nástroje vůči vřetenu v radiálním směru. Jedná se o příklad historického upínače, ale dnešní moderní aktivní upínače pracují na stejném principu. Použití nastavení pomocí aktivního upínače lze využít v této práci při nastavování dané hodnoty házení. [27, 28]



Obrázek 2-21 Kompenzační držák nástroje - Robert E. Blades, 1956 [28]

## 2.3 Měření opotřebení

Opotřebení popsaná v kapitole výše lze měřit několika následujícími způsoby. [11, 12]

### Přímé měření opotřebení

#### Diskontinuální metody

- Měření vybraného kritéria pomocí dílenského mikroskopu – kritérium VB, profiloměru- kritérium KT nebo délkovým měřidlem – kritérium KVy
- Vážení břitové destičky
- Optické sledování funkční plochy

#### Kontinuální metody

- Elektrické měření - odporové, indukční
- Ultrazvukové měření
- Pneumatické měření
- Radioaktivní měření – ozáření nástroje, snímání mikroizotopů
- Měření rozměrů obrobku

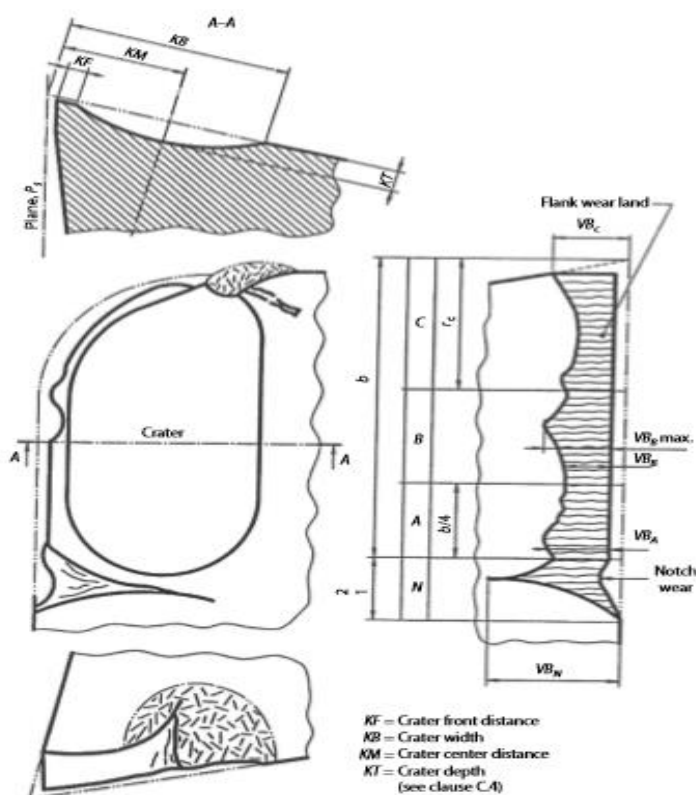
### Nepřímé měření opotřebení (Kontinuální metody)

- Měření a vyhodnocování složek řezných sil a momentů
- Měření a vyhodnocování el. příkonu obráběcího stroje
- Měření kmitání
- Měření teploty řezání
- Měření jakosti povrchu (drsnost Ra apod.)
- Měření druhotných projevů opotřebení – vzhled obrobené plochy, zvuk během obrábění, hodnocení třísky

V této práci bude využito přímého měření vybraného kritéria a nepřímého měření složek řezných sil a momentů. Dále budou tedy blíže popsány pouze tato měření.

#### 2.3.1 Hodnocení opotřebení pomocí kritérií dle ISO 3685

Kritéria opotřebení jsou stanovena normou ISO 3685. Tato norma určuje jako hlavní kritéria opotřebení na hřbetě - VB, hloubka výmolu na čele - KT a radiální opotřebení špičky - KVy. Kritérium KVy je významné hlavně pro dokončovací operace, jelikož tento parametr má vliv na tvar a rozměr obráběné plochy. Nejčastěji jsou měřena kritéria VB a KT. K měření hodnot VB se využívá dílenský mikroskop a pro hodnoty KT se využívá přístroje na měření struktury povrchu. Odměřování jednotlivých kritérií je znázorněno na obr. č. 2-22. [12, 13, 14]

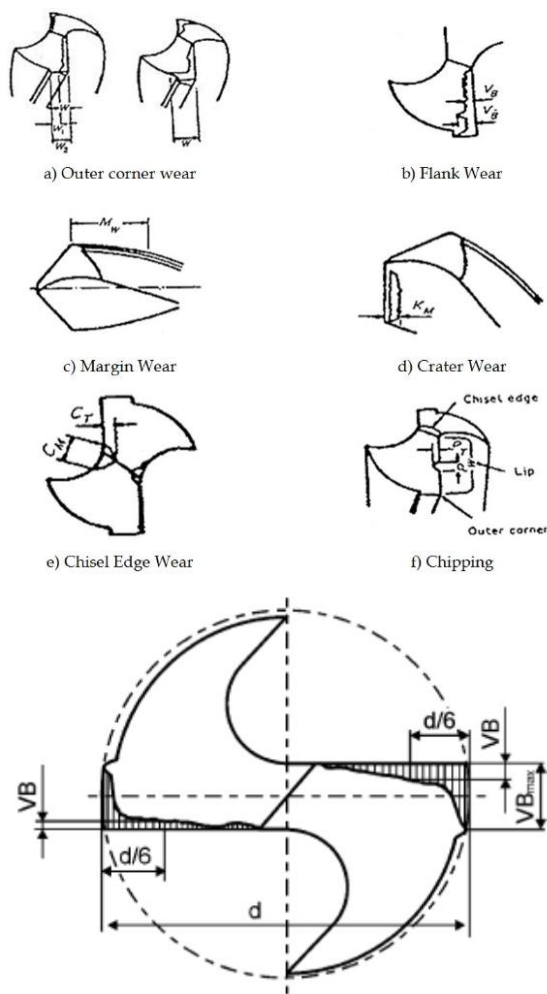


Obrázek 2-22 Měřené hodnoty opotřebení dle ISO 3685 - obecné [9]

Měřené hodnoty na nástroji viz obrázek č. 4-1:

- VB – opotřebení na hřbetě
  - VBc – opotřebení v oblasti špičky nástroje
  - VBn – opotřebení ve formě vrubu
  - VBb – opotřebené přímé části ostří (průměrné)
  - VBmax – opotřebené maximální
- KT – hloubka výmolu
- KF – vzdálenost výmolu od čela
- KM – střední vzdálenost výmolu
- KB – šířka výmolu
- VR – radiální opotřebení

Pro názornost měření na vrtáku slouží následující obrázky č. 2-23:



Obrázek 2-23 Měření jednotlivých kritérií opotřebení na vrtáku [10]

## 2.4 Měření sil a momentů při obrábění

Třískové obrábění je založeno na vnikání řezného klínu do materiálu a jeho dělení v podobě třísky. Proces tvorby třísky je doprovázen plastickými i elastickými deformacemi. Během dělení jsou v různých směrech složky působících sil. Měření těchto sil umožňuje získat informace o mechanickém namáhání jednotlivých částí systému stroj-nástroj-obrobek. Díky tomu je pak možné řešit soustavy z pohledu pevnosti, tuhosti i dynamické stability procesu jako takového. Měření sil a momentů během obrábění je možné získat informace o příkonu obráběcího stroje a o účinnosti procesu. Měření je také vhodné pro hodnocení trvanlivosti řezného nástroje, řezných podmínek či ekonomické hodnocení obrábění. Důležitou měřenou hodnotou je síla obrábění, neboli síla řezání, která je chápána jako časově proměnná veličina. Tato síla musí během procesu překonávat řezný odpor  $R$ , způsobený stavem napjatosti, který klade materiál v důsledku obrábění. Z toho platí podmínka rovnováhy: [11, 15]

$$F = - R \text{ [N]} \quad (5-1)$$

Řezný odpor kladený materiálem se v průběhu obrábění neustále mění. Kolísání může být až +/- 20%. Tyto změny jsou způsobeny mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, jeho vnitřní strukturou a také samotnou tvorbou třísky. Experiment je proto vhodné vždy opakovat. [11, 15]

### Na složky řezných sil mají obecně vliv:

- Tloušťka obráběné vrstvy
- Posuv
- Geometrie břítu
- Řezné podmínky
- Stav břítu a jeho otupení
- Řezné prostředí
- Obráběný materiál

Síly obrábění se dají vypočítat. Pro všechny technologie existuje jiný vzorec pro výpočet. Většina je založena na geometrii průřezu odřezávané vrstvy. Experimentálně lze síly během obrábění stanovit měřeními. Měřeními se mohou stanovit řezné síly, složky síly řezání a momentů, které během řezného procesu působí. [11, 15]

### Základní měření je:

- nepřímé
- přímé

### 2.4.1 Nepřímé měření sil a momentů

Nepřímé měření řezných sil je založeno na měření výkonu elektromotoru daného obráběcího stroje. Nepřímým měřením lze stanovit pouze tangenciální složku síly řezání, kterou lze stanovit právě na základě měřeného výkonu, nebo krouticího momentu. [15]

K nepřímému získávání hodnoty  $F_c$  z výkonu se nejčastěji používají wattmetry, které se připojí k elektromotoru obráběcího stroje. Princip pak spočívá v měření výkonu během obrábění a výkonu v běhu naprázdno. Rozdíl těchto výkonů je pak užitečným výkonem a pro něj platí následující vzorec: [15]

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad (5-2)$$

$$P_{už} = P_c - P_o \quad (5-3)$$

$P_{už}, P_c, P_o$ , – užitečný, celkový a obráběcí výkon [W],

$F_c$ – tangenciální (řezná) složka síly obrábění (řezání) [N],

$v_c$ – řezná složka rychlosti obrábění [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Jedná se o jednoduchou metodu, nevyžadující nákladné vybavení a je univerzální pro všechny druhy obráběcích metod. Nevýhodou je omezená přesnost způsobená různou účinností stroje během chodu naprázdno a samotným obráběním. Nezahrnutí vlivu jiné než tangenciální složky řezné síly přináší další nepřesnost. [15]

Získávání hodnot  $F_c$  z krouticího momentu  $M_k$  se využívá pro vrtání. Měření  $M_k$  je opět založeno na měření výkonu stroje. Během procesu obrábění je pomocí přenosného univerzálního zapisovacího stroje změřen výkon. Následně po změření nástroj odjede ze záběru a otáčky se nezmění. V této fázi se použije vhodná mechanická brzda k brzdění vřetene do té doby, než se získá na měřicím přístroji stejná hodnota výkonu jako během obrábění. Poté z podmínky mezi točivými momenty získáme  $F_c$ : [15]

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (5-4)$$

$M_{kb}$ – točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou [N.m],

$D$  – průměr nástroje nebo obrobku [mm],

$M_k$ – točivý moment od tangenciální složky síly obrábění [N.m]

Výhodou této metody oproti předchozí je to, že měření není ovlivněno rozdílnou účinností mezi obráběním a během naprázdno. Tato metoda se využívá jen zřídka. [15]

### 2.4.2 Přímé měření sil a momentů

Přímé měření síly řezání, respektive jejích složek a momentů je založeno na měření deformací v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Měření je prováděno během obrábění za pomoci dynamometrů. [16]

**Na dynamometr jsou kladeny následující požadavky:**

- Tuhost
- Citlivost
- Stálost údajů
- Reprodukovatelnost údajů
- Setrvačnost
- Konstrukce pro měření sil bez vzájemného ovlivňování

**Měřící aparatura je založena na následujících částech:**

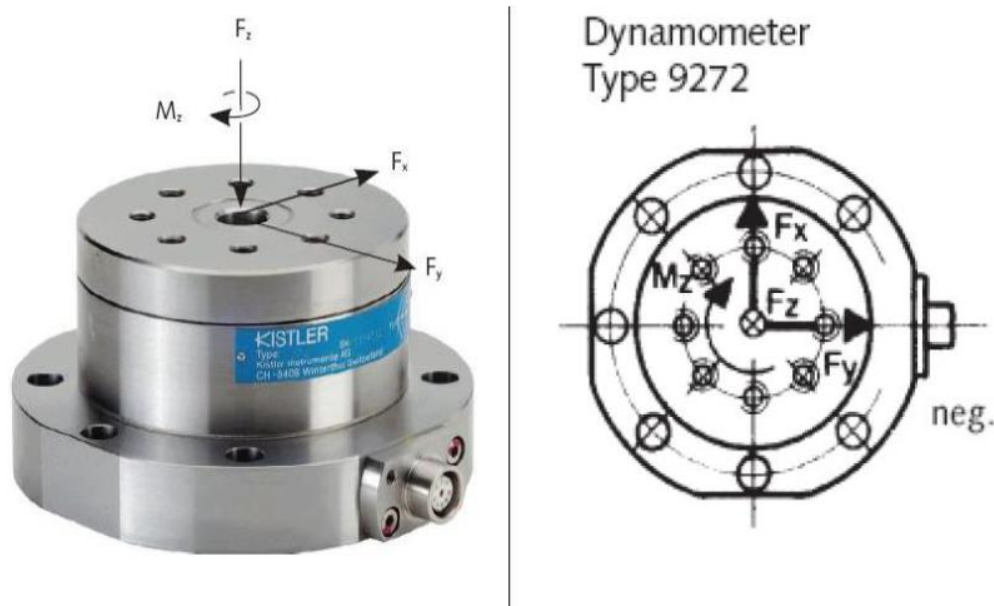
- Pružný člen
- Snímač
- Přijímač

Pružný člen je zatížen silou, která způsobuje jeho deformaci, či změnu polohy. Tato deformace či změna je pomocí snímače převedena na analogický parametr, který je pomocí přijímače zesílen a zpracován, popřípadě je rovnou zapsán údaj velikosti zatížení. [16]

**Dynamometry lze základně rozdělit podle[16]:**

- **Počtu měřených složek** - jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření krouticích momentů
- **Přenosu hodnoty deformace či změny polohy z pružného členu** - mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, piezoelektrické)
- **Metody obrábění** - univerzální či jednorúčelové pro soustružení, frézování, vrtání, broušení atd.

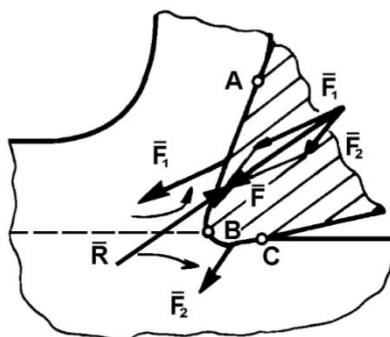
Pro měření zatížení bude využit dynamometr založený na piezoelektrickém jevu, proto bude blíže popsán pouze piezoelektrický dynamometr. Tento dynamometr využívá jevu, kdy působením mechanického zatížení na krystal vzniká na jeho povrchu elektrický náboj. Hlavními využívanými krystaly jsou křemen, materiály obsahující titaničitan barnatý, či Seignettovy soli. Krystal je k využití pro měření zpracován tak, že je z něj vyříznutá destička, která je základem piezoelektrického snímače. Zatížení krystalu se pak projevuje právě vznikem elektrického náboje, který je přímo úměrný působícímu zatížení. S rostoucími silami elektrický náboj roste a s poklesem klesá do nuly při nulovém zatížení. Příkladem piezoelektrických dynamometrů jsou dynamometry od firmy Kistler viz obrázek č. 2-24, které jsou speciálně zkonstruovány pro různé metody obrábění. [16, 17]



Obrázek 2-24 Dynamometr od firmy Kistler type-9272 [17]

### 2.4.3 Řezné síly při vrtání

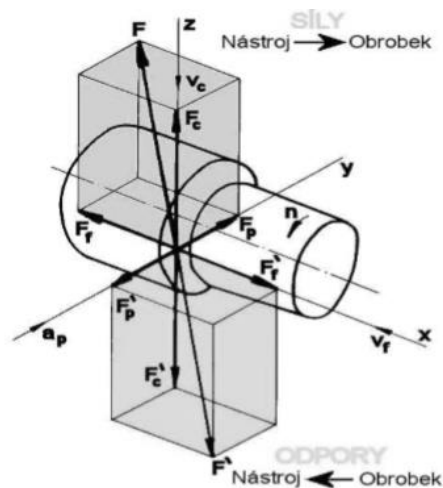
Výše popsaná síla obrábění je na obrázku č. 2-25 označena jako  $F$ . Je patrné, že se jedná o výslednou sílu součtem dvou složek. Jedná se o tzv. aktivní složku  $F_1$  a pasivní složku  $F_2$ . Aktivní složka je pak složena ze síly řezné  $F_c$  a síly posuvu  $F_f$ .



Obrázek 2-25 Síla řezání (obrábění) a její rozklad při soustružení [11]

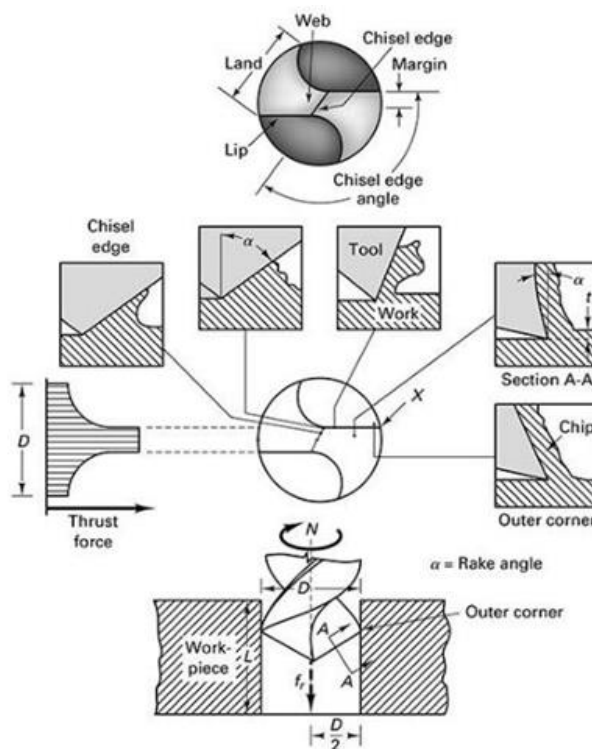
Pro základní představu rozkladu jednotlivých složek sil je vhodný obrázek č. 2-26, který je znázorněn pro soustružení. Poměr jednotlivých sil je dán technologií obrábění a také geometrií použitého nástroje. Největší význam má řezná síla  $F_c$ , označována také jako tangenciální, která je hlavním parametrem například při optimalizaci řezných parametrů.





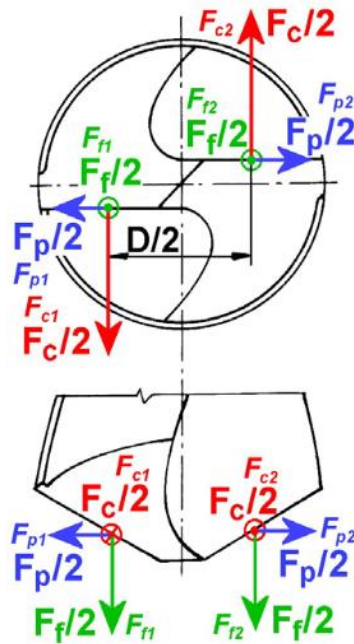
Obrázek 2-26 Rozklad jednotlivých složek sil během soustružení [15]

Na obrázku č. 2-27, jsou znázorněny řezy v jednotlivých částech vrtáku během vrtání. V těchto řezech je pak vidět břity vnikající do vrtaného materiálu. Je zde vidět, jak se mění jednotlivé úhly břitu a tím i jeho zatížení. Graficky je zde znázorněné, že největší posuvová síla působí na příčné ostří ve středu vrtáku a poté se snižuje směrem od středu. [18]



Obrázek 2-27 Znázornění záběru břitu vrtáku v jeho jednotlivých částech [18]

Dvoubřitý šroubovitý vrták má dvě hlavní ostří a materiál odebrán oběma břity najednou. Jelikož jsou břity symetricky k ose nástroje, výsledné síly jsou součtem, či rozdílem sil z obou stran. Na obrázku č. 2-28 jsou znázorněny působící síly během vrtání. [20]



Obrázek 2-28 Rozložení sil působících na vrták během vrtání [20]

Během vrtání se vyskytují následující síly [20]:

Posuvová síla:

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} \text{ [N]} \quad (5-5)$$

Pasivní síla:

$$F_p = F_{p1} - F_{p2} \text{ [N]} \quad (5-6)$$

Řezná síla:

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} \text{ [N]} \quad (5-7)$$

V ideálním případě jsou si síly na obou stranách rovny.

$$F_{f1} = F_{f2} = F_f / 2 \text{ [N]} \quad (5-8)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p / 2 \text{ [N]} \quad (5-9)$$

$$F_{c1} = F_{c2} = F_c / 2 \text{ [N]} \quad (5-10)$$

Výsledná síla  $F_p$  je v ideálním případě rovna 0.

Řeznou a posuvovou sílu je podobně jako u soustružení možné stanovit pomocí empirických vztahů:

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]} \quad (5-11)$$

$$F_c = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]} \quad (5-12)$$

Z výše uvedených vztahů je pak odvozen empirický vztah pro krouticí moment:

$$M_k = 2 \cdot \frac{F_c}{2} \cdot \frac{D}{4} = \frac{1}{4} \cdot F_c \cdot D = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot D = \frac{1}{4} \cdot C_{Fc} \cdot D^{(x_{Fc}+1)} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (5-13)$$

po zjednodušení:

$$\frac{1}{4} \cdot C_{Fc} = C_M, \quad (x_{Fc} + 1) = X_M \quad (5-14)$$

$$M_k = C_M \cdot D^{X_M} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [Nmm]} \quad (5-15)$$

Řezný výkon při vrtání:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2.60 \cdot 10^3} = \frac{F_c \cdot v_c}{1.2 \cdot 10^5} \text{ [kW]} \quad (5-16)$$

### 3 Návrh a realizace experimentu

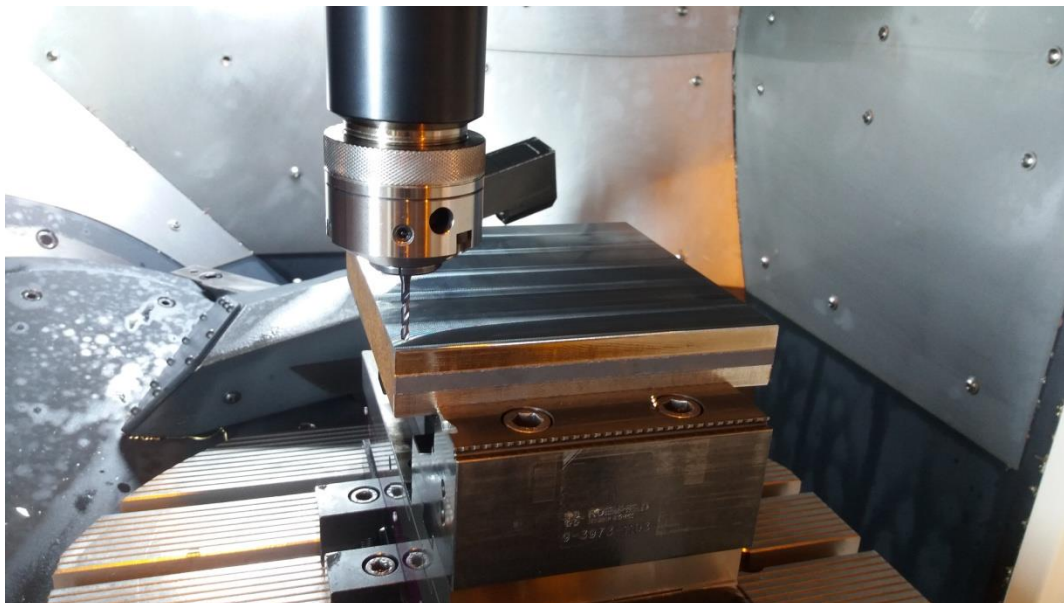
Samotný experiment byl uskutečněn ve vývojovém centru RTI Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Obsahem této kapitoly je rozbor uskutečněného experimentu. V první řadě budou vypsány použité nástroje, obráběný materiál, využití stroje včetně měřicí techniky.

#### 3.1 Průběh a popis experimentu

Experiment spočíval ve vrtání děr vrtáky o průměru 3 mm do hloubky 3xD. Vrtání proběhlo na stroji DMU 40 eVo linear viz obrázek č. 3-1. Použitým vrtákem byl monolitní vrták ze slinutého karbidu s tenkým povlakem bez vnitřního chlazení k vrtání ocelí do tvrdosti 48RHC. Mikrogeometrie vrtáku byla přeměřena na mikroskopu Alicona IFM G4 viz protokol příloha č. 2. Vrtáno bylo do připravených desek o rozměrech 155x155x29 mm. Obráběným materiálem byla ocel 1.2312 - zušlechtná nástrojová ocel o přibližné tvrdosti 32 HRC. Tento materiál je využíván například pro rámy do vstřikovacích forem. Do desek bylo vrtáno z obou stran. Z jedné strany bylo vyvrtáno celkem 1089 děr. Díky vyložení vrtáku 28 mm a možnostem stroje nebylo možné procesní kapalinu nasměrovat přímo na vrták. Při vrtání prvních předních dvou řad se procesní kapalina odrážela od přední hrany desky a nemohla se dostat k vrtáku. Postup byl proto zvolen následovně: nejprve bylo vyvrtáno zadních 5 řad, následovalo přetočení desky o 180 stupňů a pokračovalo se vrtáním 6. řady a následných řad až dokonce desky viz obrázek č. 3-2.



Obrázek 3-1 DMU 40 eVo linear [autor]



Obrázek 3-2 detail vrtání do desky [autor]

Řezné podmínky byly zvoleny tak, aby opotřebení vrtáku bylo urychleno, ale zároveň tak, aby nedocházelo k lomu vrtáku. Řezná rychlost byla zvolena jako 1,5 násobek doporučené. Doporučená řezná rychlost pro daný vrták je 50 [m/min]. Zvolené řezné podmínky jsou zaneseny v tab. č. 3-1.

Řezné podmínky		
Průměr vrtáku	D [mm]	3
Otáčky	n [1/min]	7961
Řezná rychlost	$v_c$ [m/min]	75
Posuv	f [mm]	0,066
Posuvová rychlost	$v_f$ [mm/min]	525
Hloubka otvoru	h [mm]	9
Strojní čas	tAs [min]	0,017
Procesní kapalina		emulze s koncentrací 5-8%, vnější

Tabulka 3-1 Tabulka zvolených řezných podmínek [autor]

Cílem experimentu bylo zjistit a popsat vliv radiálního házení vrtáku na jeho trvanlivost a kvalitu vrtaného otvoru. Proto, aby bylo možné nastavit rozdílné házení vrtáku, byl nástroj upnut do speciální kleštiny viz obrázek č. 3-3, sloužící k nastavení velmi malé hodnoty radiálního házení.



Obrázek 3-3 Upnutí vrtáku v kleštině [autor]



Obrázek 3-4 Upnutý vrták v držáku pro nastavení házení [autor]

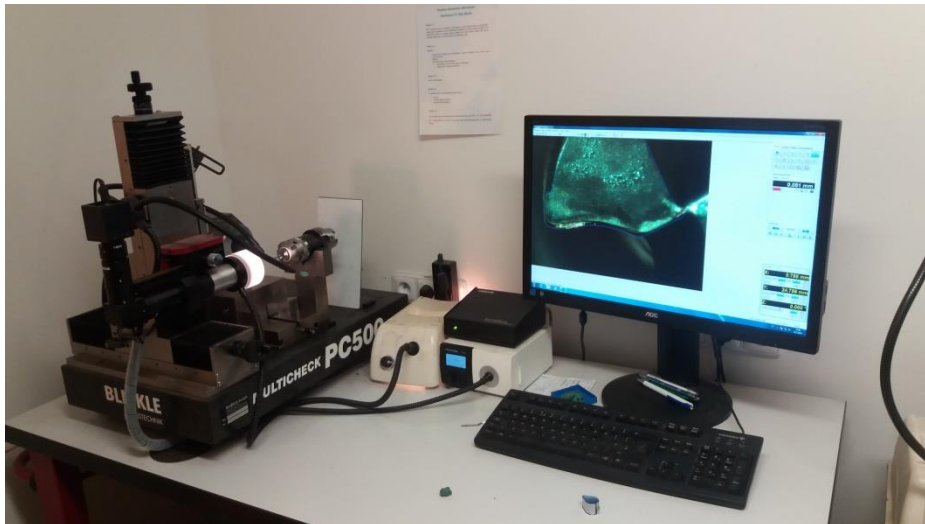
Tyto kleštiny se standardně používají při vrtání velmi přesných otvorů, kde je vysoký požadavek na válcovitost otvoru. To s sebou nese požadavek na velice malou hodnotu radiálního házení sestavy upnutí vrtáku a to do 0,003 mm, které je docíleno jemným nastavením pomocí držáku viz obrázek č. 3-4. V případě experimentu byla tato kleština použita pro definované rozhození sestavy a tedy nastavení definované hodnoty radiálního házení. Kontrola nastavení a celé seřízení sestavy, bylo provedeno na zařízení ZOLLER genius 3s viz obrázek č. 3-5.



Obrázek 3-5 Zoller genius 3s [autor]

Při nastavování radiálního házení bylo náročné dosáhnout naprosto přesné hodnoty házení. Z tohoto důvodu byly při práci na experimentu používány dva pojmy: předpokládané házení a skutečné házení. Předpokládané házení bylo házení, kterého mělo být dosaženo. Skutečné házení znamenalo naměřené házení, které se lišilo od předpokládaného házení o odchylku maximálně 0,015 mm. Při experimentu bylo zpravidla dosahováno přesnosti nastavení v řádech několika tisícín milimetrů. Pro snadnější orientaci v textu práce používáno pouze pojmu házení, které reprezentuje předpokládané házení.

Proces vrtání se uskutečnil s vrtáky s házením 0 mm; 0,05 mm; 0,1 mm a 0,15 mm. Vrtáky byly po vyvrtání jedné strany zkontrolovány a přeměřeny. Na jedné straně bylo vždy vyvrtáno 1089 děr, což odpovídá 33x33 děr o rozteči 4,7 mm na vrtané délce a šířce 155x155 mm. Od začátku se měřila šířka opotřebení na hřbetě VB [mm]. Po vyvrtání 3x1089 děr proběhlo měření opotřebení na čele vrtáku KT [mm]. Měření bylo provedeno na dílenském mikroskopu Multicheck PC 500 viz obrázek č. 3-6. Limitní hodnota opotřebení byla stanovena na  $VB_{lim} 0,1$  mm naměřeného na hlavním ostří na hřbetu.



Obrázek 3-6 dílenský mikroskop Multicheck PC 500 [autor]

### 3.2 Měření řezných sil

Jako jedna z metod pro sledování přímého vlivu radiálního házení na řezný proces je měření řezných sil a především pak pasivní složky řezné síly. Vrtáky s rozdílným házením byly podrobeny měření jednotlivých složek řezných sil pomocí dynamometru. Záznam silového zatížení pro všechna házení, tj. 0 mm; 0,05 mm; 0,1 mm a 0,15 mm, byl proveden u všech nástrojů ve stejný časový okamžik a to před vrtáním první díry, po vyvrtání 2 stran a na konec při dosažení limitní hodnoty opotřebení. Jak již bylo výše zmíněno, na 1 straně bylo vyvrtáno 1089 děr. Na obrázku č. 3-7 je zachyceno působení jednotlivých řezných sil a momentu v závislosti na orientaci obrobku upnutého na statický dynamometr. Schéma sil je i na obrázku č. 2-24.



Obrázek 3-7 Štítek použitého dynamometru s vyznačením měřených sil a momentu [autor]

Dynamometrem byla měřena síla  $F_z$  [N], která představuje posuvovou složku řezné síly  $F_f$ ,  $F_y$  [N], což je pasivní složka řezné síly  $F_p$  [N] a krouticí moment  $M_z$  [Nm], standardně označovaný  $M_{cz}$  [Nm]. Vyhodnocování probíhalo za pomoci aplikace NASOMER 8.5. V grafickém zobrazení naměřených hodnot jsou grafy jednotlivých měření na časové ose  $x$  vůči sobě posunuty. Tento rozdílný čas je dán tím, kdy bylo nahrávání řezné složky zapnuto a začalo zaznamenání řezné složky. Jednotlivá měření však proběhla při stejných podmínkách a za stejný čas a toto posunutí nehraje žádnou roli pro náměr.



Obrázek 3-8 Instalovaný dynamometr v pracovním prostoru stroje [autor]

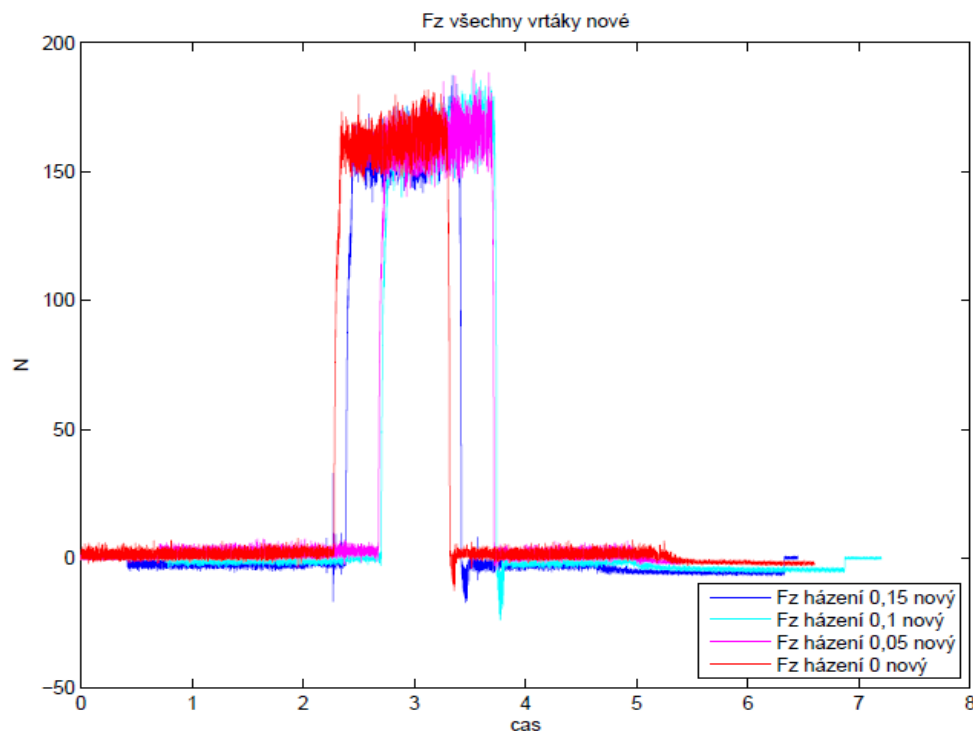


## 4 Zhodnocení výsledků

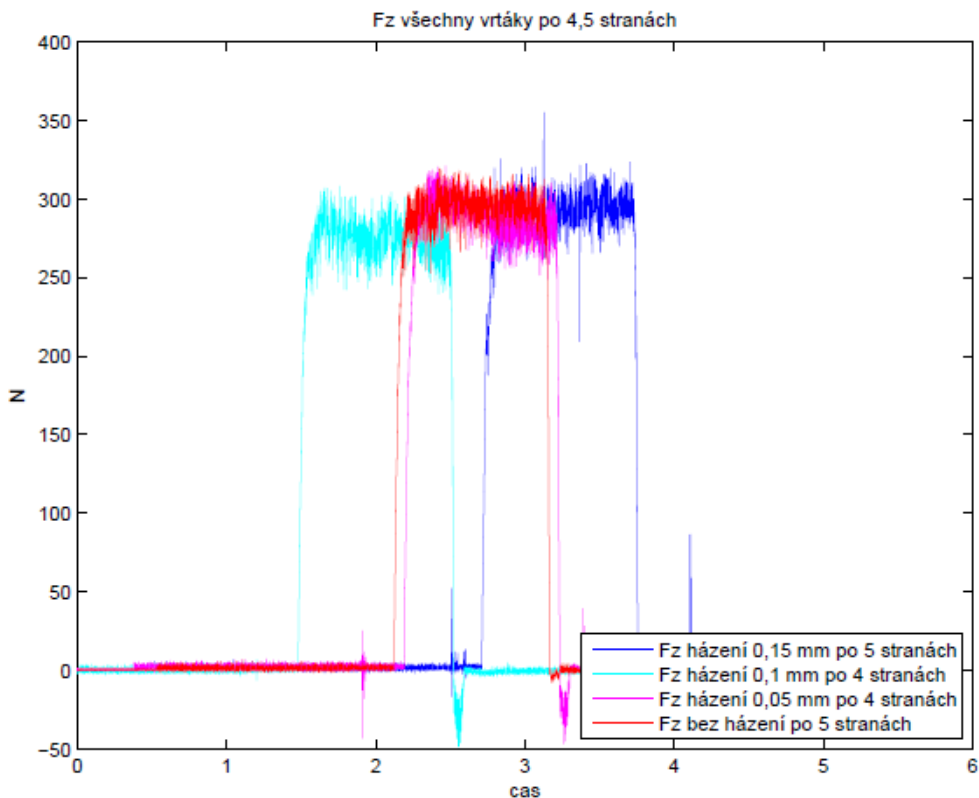
Experiment byl zaměřen na zkoumání změn silového zatížení vrtáků s házením a bez házení. V průběhu vrtání se kladl důraz na průběžnou kontrolu opotřebení, které je ovlivněno upnutím nástroje a má vliv na zatížení vrtáku během procesu. Dále bylo měření směřováno na samotné díry z hlediska rozměrů, drsností a celkové kvality. V následujících podkapitolách jsou postupně rozebrány výsledky jednotlivých měření.

### 4.1 Posuvová složka řezné síly

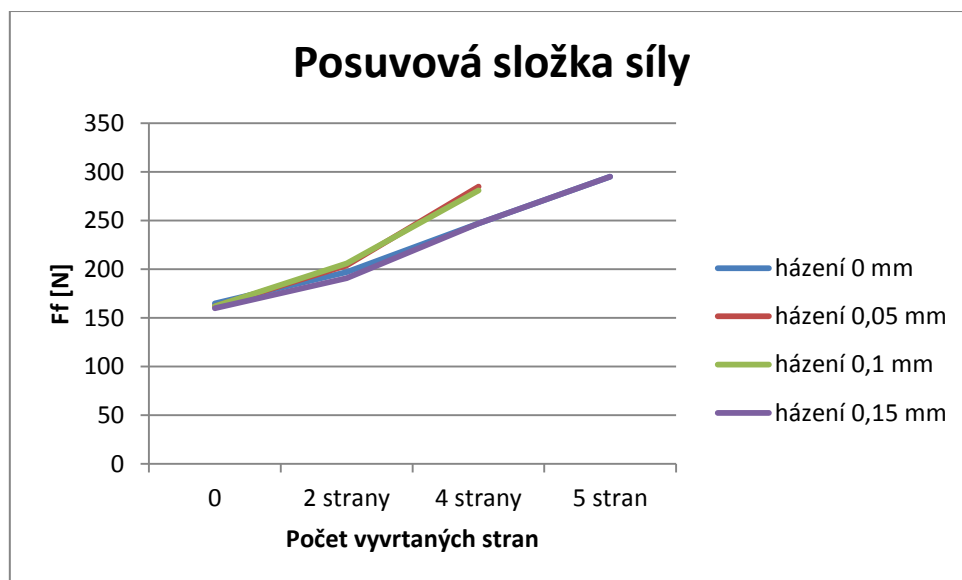
Naměřená složka řezné síly  $F_z$  [N] reprezentuje posuvovou složku řezné síly  $F_f$  [N]. Tato síla u nových vrtáků, bez ohledu na házení dosahuje v průměru hodnot okolo 162 N viz graf č. 4-1. Po vyvrtání dvou stran desky (2x1089 dírách), je průměrná hodnota posuvové síly 200 N. Při limitním opotřebení byla tato síla naměřena 283 N viz graf č. 4-2, bez velkých odchylek mezi vrtáky s rozdílnými házeními. Zkoumané házení tedy nemá na posuvovou složku řezné síly významný vliv. Na posuvovou složku má vliv rostoucí opotřebení. S rostoucím opotřebením roste velikost posuvové složky řezné síly. Při porovnání vrtáků s přibližně stejným opotřebením a s rozdílným házením byly naměřené hodnoty posuvové síly s malými výchyly stejné. Z grafu č. 4-3 vyplývá, že vrtáky s házením 0,05 mm a 0,1 mm byly opotřebovány již po čtyřech vyvrtaných stranách (4x1089 dírách). Podobné opotřebení a posuvovou sílu vykazaly vrtáky bez házení a s házením 0,15 mm, až po vyvrtání 5 stran desek (5x1089 dírách).



Graf 4-1 Fz naměřená u nových vrtáků [autor]



Graf 4-2 Fz naměřená u vrtáků s limitním opotřebením 0,1mm [autor]

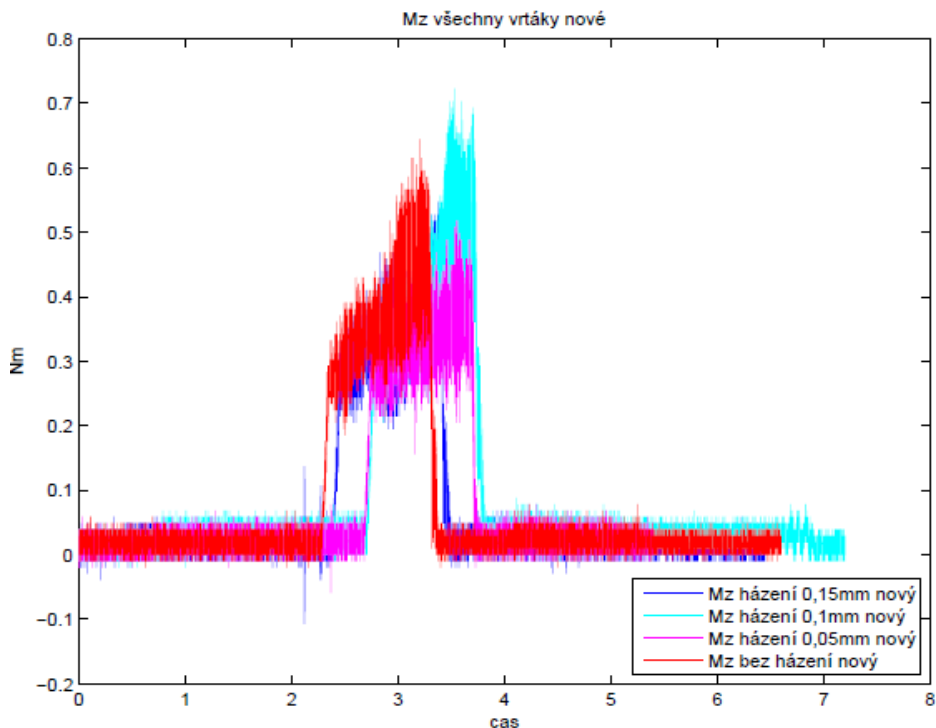


Graf 4-3 Průběh sil Fz do limitního opotřebení vrtáků [autor]

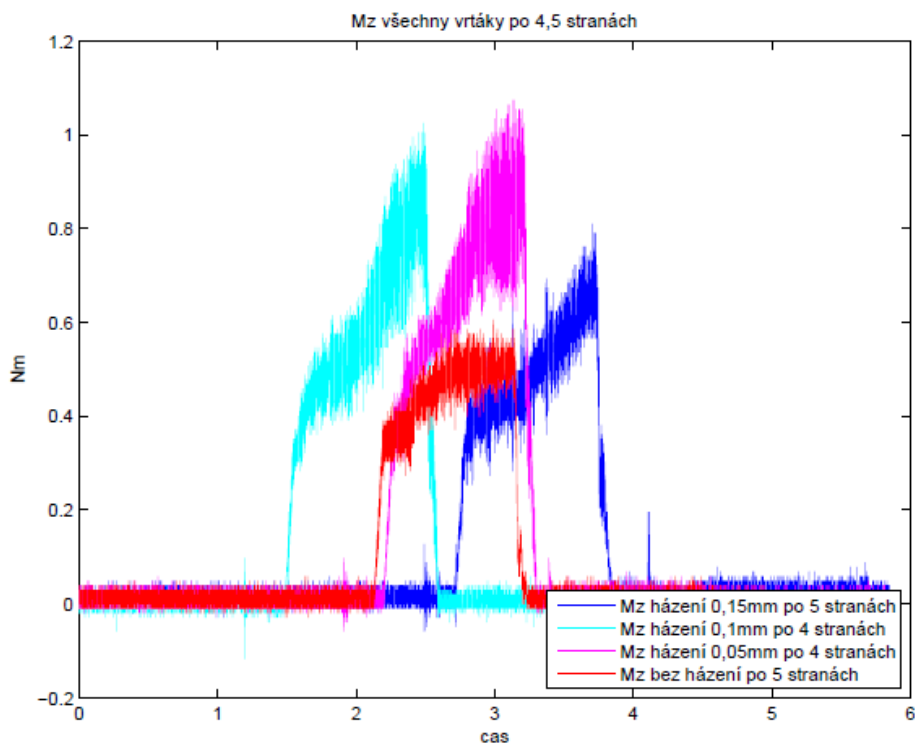
## 4.2 Krouticí moment

Průběh krouticího momentu má rozdílný charakter v porovnání se složkami řezné síly. Ideální krouticí moment naroste na maximum a pak zůstane konstantní. V experimentu

u nových vrtáků se charakter průběhu momentu dá popsat, jako neustále rostoucí v závislosti na čase vrtání viz graf č. 4-4. Jinými slovy během vrtání se krouticí moment po celou dobu zvyšuje. Rostoucí moment souvisí se zvyšující se hloubkou v průběhu jednotlivých vrtání, s rostoucím třením podél vrtáku při jeho zavrtávání a odvodem třísky.

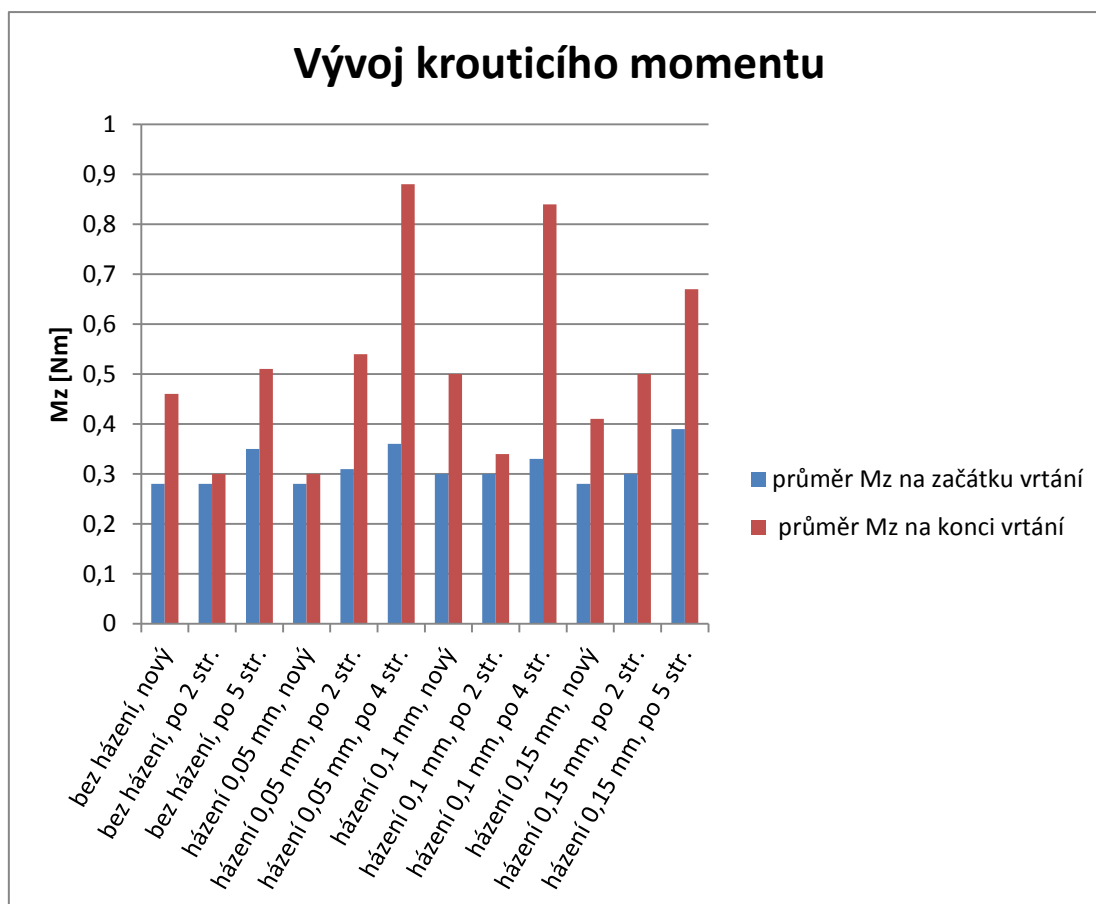


Graf 4-4 Naměřený moment  $M_z$  u nových vrtáků [autor]



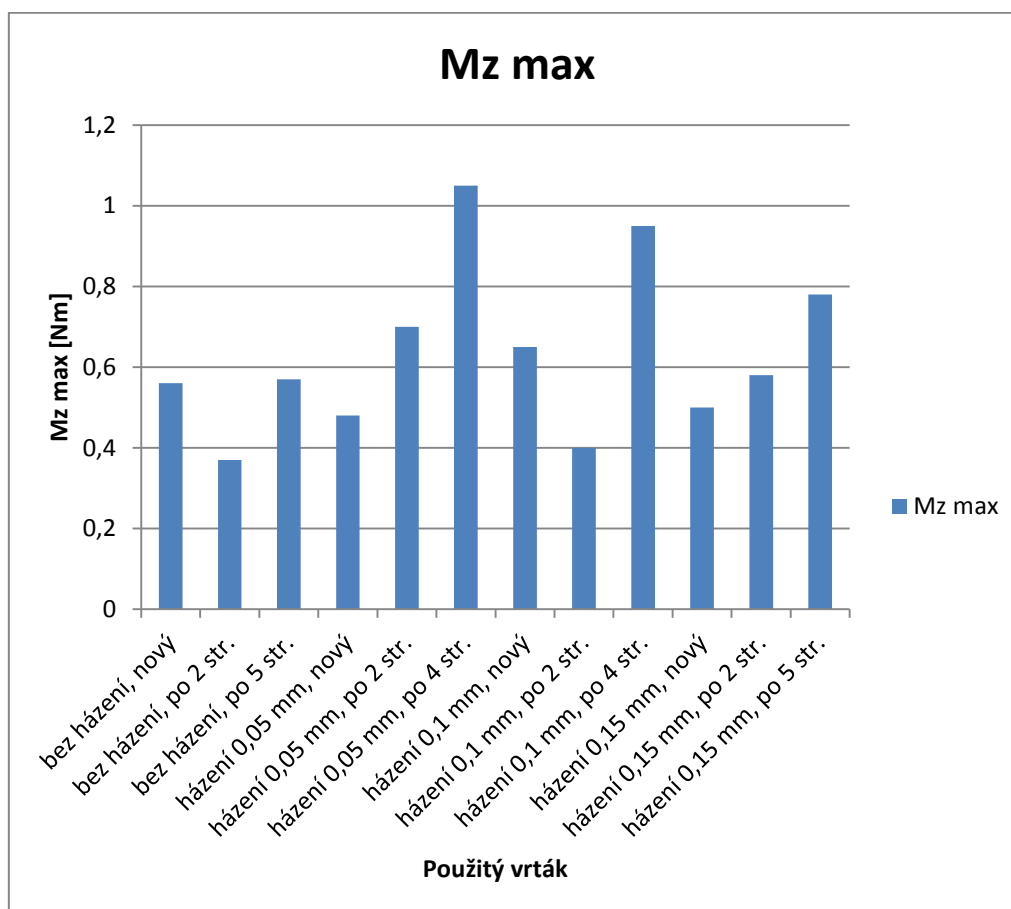
Graf 4-5 Naměřený moment  $M_z$  u vrtáků s opotřebením 0,1mm [autor]

Situace u vrtáků s limitním opotřebením 0,1 mm je čitelná z grafu č. 4-5. U vrtáků bez házení krouticí moment s hloubkou roste a v průběhu řezného procesu se ustálil na konstantní úroveň. Naproti tomu u vrtáků s házením krouticí moment roste po celou dobu vrtání otvoru. Vývoji ustálení momentu s opotřebením v porovnání s novým vrtákem lze přisuzovat ustálení vrtáku. U vrtáků s házením díky charakteru pohybu při házení s přibývajícím hloubkou zvětšuje třecí plocha mezi fazetkou vrtáku a dírou. Průběh momentu souvisí dále se zahříváním vrtáku v důsledku špatného chlazení, špatného odvodu třísky a vyšší řezné rychlosti.



Graf 4-6 Naměřené momenty Mz [autor]

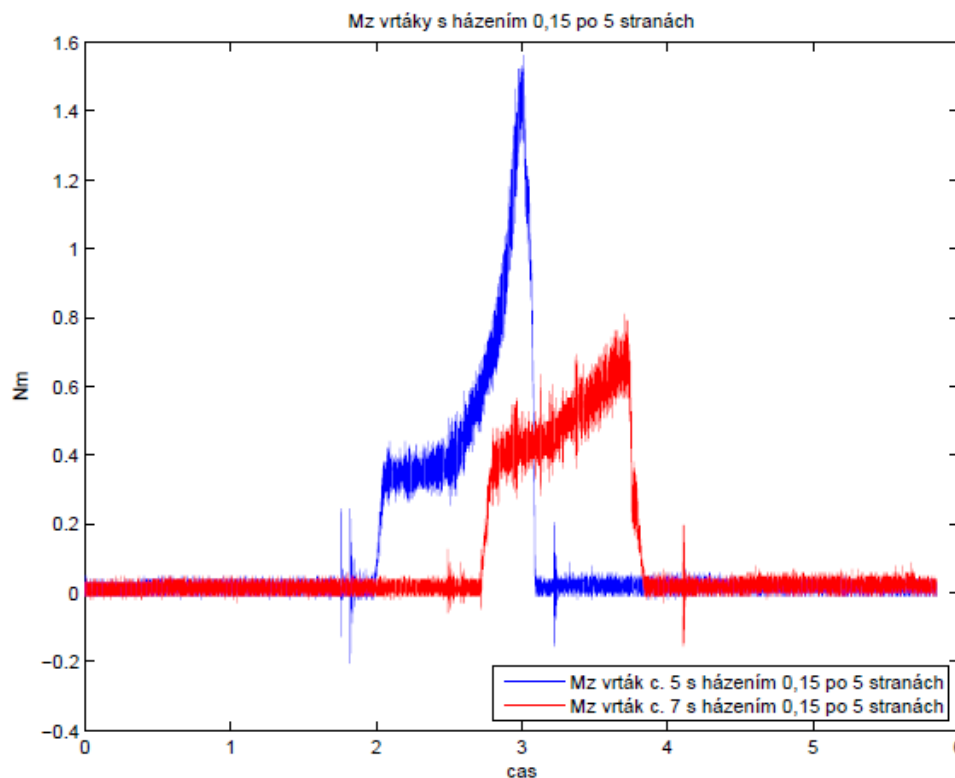
Z naměřených hodnot lze konstatovat, že počátek všech naměřených momentů se mírně s rostoucím opotřebením zvyšuje, průměrně se pohybuje okolo 0,32 Nm. Rozdíly nastávají v konečných fázích momentů, na konci každého vrtání viz graf č. 4-6. Naměřené krouticí momenty na konci vrtání u nových vrtáků s různými házeními nejsou velmi rozdílné, což je vidět nejen v předchozím grafu č. 4-4, ale i v grafu č. 4-6. Krouticí momenty u vrtáků s házením dosahují větších hodnot než u vrtáku bez házení. Celkově byly největší krouticí momenty naměřeny v konečné fázi vrtání díry při kombinaci většího opotřebením a házení. Vrtáky s házením 0,05 mm a 0,1 mm vykazovaly maximální naměřené hodnoty momentů 1,05 Nm a 0,95 Nm již po 4 vyvrtané straně (4x1089 dírách). Vrták bez házení byl po 5 vyvrtaných stranách (5x1089 dírách) zatížen maximálním krouticím momentem 0,57 Nm.



Graf 4-7 Naměřené maximální hodnoty  $M_z$  [autor]

Během měření momentu došlo k jednomu zajímavému výsledku, který vybočoval od ostatních naměřených výsledků. Při vrtání vrtákem s házením 0,15 mm po vyvrtání 5 stran bylo dosaženo maximálního krouticího momentu 1,5 Nm. U vrtáků s podobným opotřebením bylo naměřeno maximálního krouticího momentu 1,05 Nm. Proto se toto měření opakovalo s jiným vrtákem se stejným házením po vyvrtání stejného počtu děr. Moment již svým charakterem i naměřenými hodnotami korespondoval se zbylými výsledky. Tyto dva naměřené krouticí momenty, které pochází od vrtáků s házením 0,15 mm, po vyvrtání 5 stran (5x1089 dírách), jsou zaneseny v grafu č. 4-8. Viditelný výkyv a náhlý nárůst je možné vysvětlit přechováním špony. Nutno upozornit, že k tomuto došlo právě při nejvyšším zkoumaném házení a opotřebením. Tento výrazný nárůst krouticího momentu může mít negativní dopad na životnost nástroje.

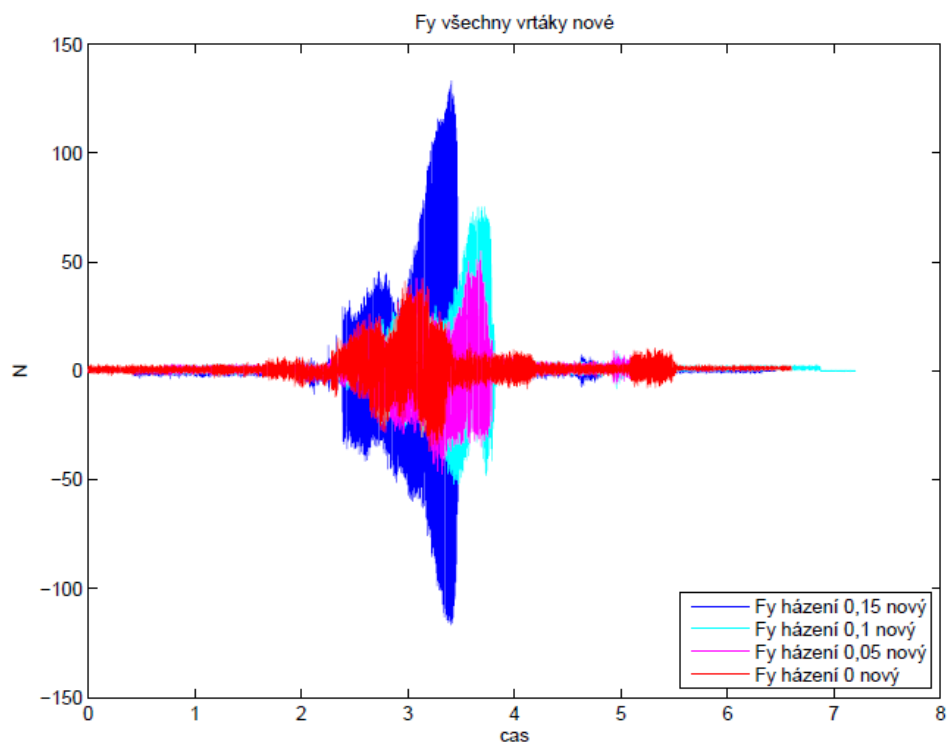
Z naměřených hodnot momentů  $M_z$  [Nm] lze soudit, že házení má vliv na rychlejší nárůst opotřebením vrtáku a tím také na rychlejší nárůst krouticího momentu  $M_z$  [Nm]. U vrtáku, který je zatížen větší krouticím momentem, je větší pravděpodobnost, že dojde k jeho zlomení. V případě špatného odvodu třísky, který je u malých vrtáků častý, může dojít k výraznému nárůstu momentu a tím zatížení vrtáku.



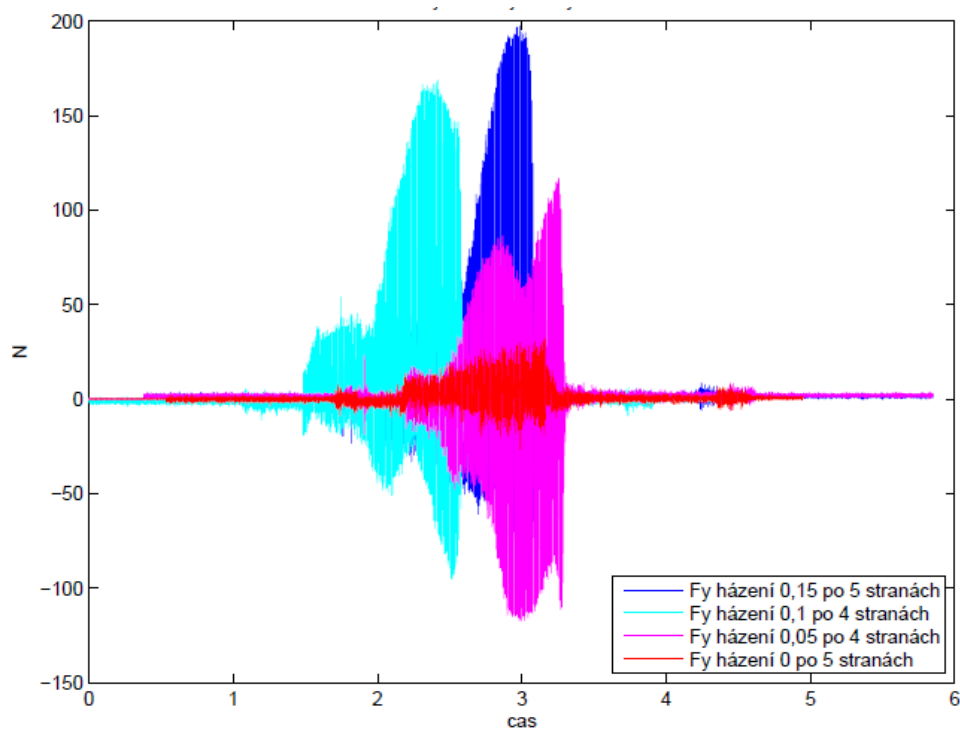
Graf 4-8 Momenty  $M_z$  u vrtáků s házením 0.15mm - pravděpodobný vliv špatného odvádění třísky [autor]

### 4.3 Pasivní složka řezné síly

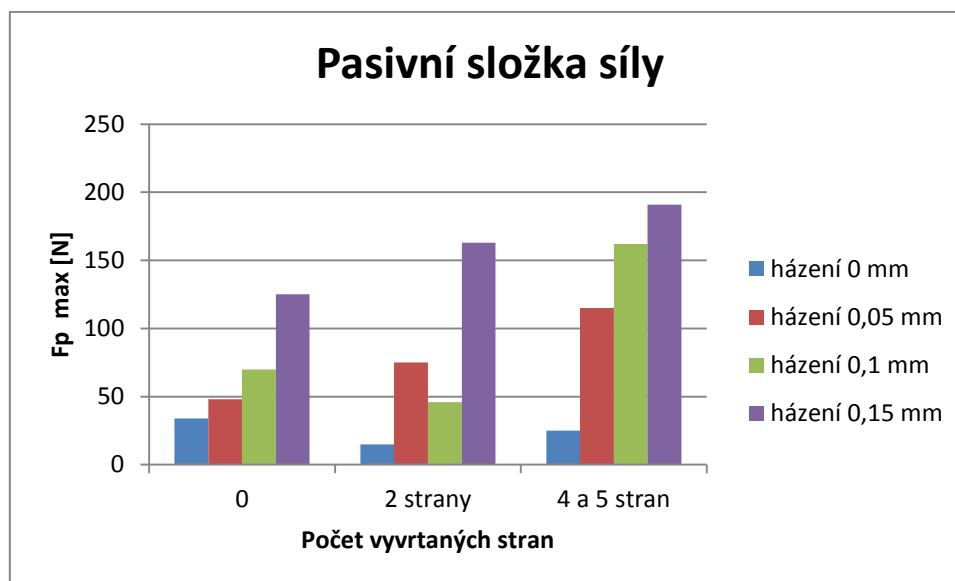
Naměřená složka řezné síly  $F_y$  [N] představuje pasivní složku řezné síly  $F_p$  [N]. Pasivní složka vytlačuje nástroj ze záběru s obráběným materiálem. U této složky je velmi zřetelně vidět ovlivnění vyosením nástroje. Vliv házení na velikost pasivní složky je vidět již u nástroje, který není ovlivněn opotřebením viz graf č. 4-9. U neopotřebovaného vrtáku bez házení byla maximální naměřená pasivní složka o velikosti 34 N. Neopotřebovaný vrták s házením 0,05 mm má maximální naměřenou hodnotu 48 N. Naměřená maximální pasivní složka u neopotřebovaného vrtáku s házením 0,1 mm dosahuje 70 N. U nového vrtáku s házením 0,15 mm byla zaznamenána pasivní složka o velikosti 125 N. Se zvyšujícím se házením se pasivní složka řezné síly zvyšuje. Co se týká charakteru průběhu pasivní složky řezné síly u neopotřebovaných vrtáků, není zde výrazné vychýlení a složka spíše osciluje. Obdobný vývoj pasivní složky je taktéž vidět u nejvíce opotřebovaných vrtáků. Pasivní složka se i zde zvyšuje s rostoucím házením. U vrtáku bez házení byla naměřena maximální pasivní složka síly 25 N po 5 stranách (5x1089 dírách), u vrtáku s házením 0,05 mm 115 N po 4 stranách (4x1089 dírách), u vrtáku s házením 0,1 mm 162 N po 4 stranách a u vrtáku s házením 0,15 mm dosahovalo až 191 N po 5 stranách. Charakter složek je znázorněn v grafu č. 4-10. Z toho grafu je možné vyčíst, že s opotřebením a házením dochází k vychýlení pasivní složky k jedné straně.



Graf 4-9 Pasivní složka řezné síly Fy - nové vrtáky [autor]



Graf 4-10 Pasivní složka řezné síly Fy - opotřebených vrtáků 0.1 mm [autor]



Graf 4-11 Pasivní složka řezné síly Fy - výsledné hodnoty [autor]

Vývoj naměřené maximální pasivní složky v absolutních hodnotách je zanesen v grafu č. 4-11. Pasivní složka řezné síly je evidentně ovlivněna házením a opotřebením vrtáku. Se zvyšujícím se házením a zároveň se zvyšujícím se opotřebením, pasivní složka síly roste. Tato síla způsobuje namáhání nástroje na ohyb. V důsledku rotace je nástroj namáhán dynamicky. Nárůst pasivní složky může vést k destrukci nástroje v důsledku překročení meze pevnosti v ohybu.

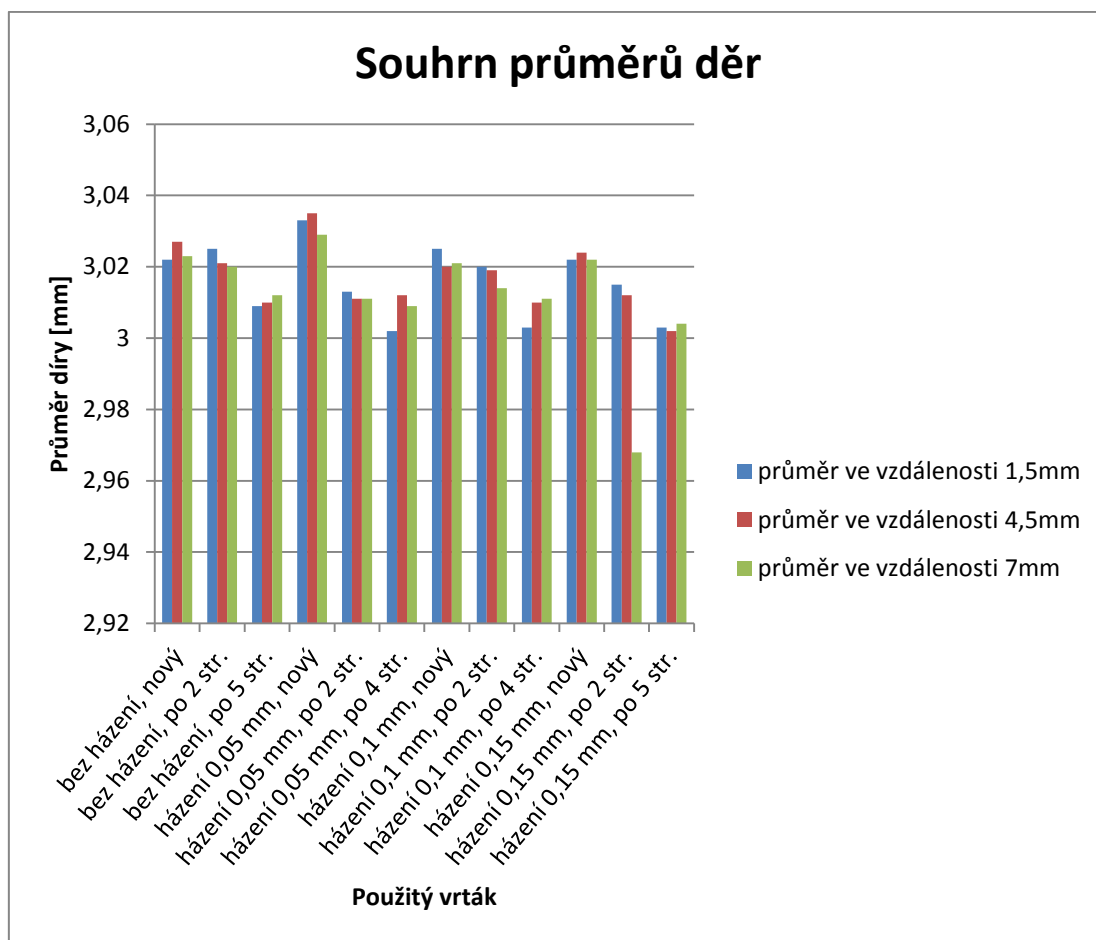
## 4.4 Měření děr

Tato část vyhodnocení je zaměřena na analýzu tvaru a přesnosti vyvrtaných děr v průběhu experimentu. Díry byly proměřovány po vyvrtání vrtáky s házením 0 mm; 0,05 mm; 0,1 mm; 0,15 mm vždy ve fázích: vrták bez opotřebením, po vyvrtání dvou stran a po dosažení limitního opotřebením (zvoleno 0,1 mm). Měření byla provedena v Regionálním technologickém institutu - Laboratoř dílenské metrologie. V rámci měření proběhlo zkoumání průměru, kruhovitosti, válcovitosti a průměru válce děr.

### 4.4.1 Průměry děr

Průměr jednotlivých děr byl měřen ve třech hloubkách. První průměr byl naměřen v hloubce 1,5 mm, druhý v hloubce 4,5 mm a poslední v 7 mm. Výsledky byly zaneseny do grafu č. 4-12. Na ose y je zanesen naměřený průměr konkrétní díry v jednotlivých hloubkách. Na ose x jsou charakterizovány vrtáky, kterými byly díry vyvrtány. U jednotlivých vrtáků, potažmo děr, je v grafu vyobrazena hodnota průměru děr ve všech třech zmiňovaných hloubkách. Mezi průměry děr v rozdílných hloubkách není výrazný rozdíl ani patrná závislost.



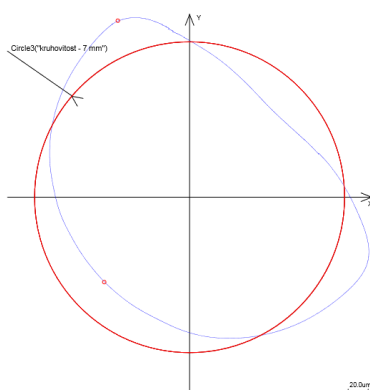


Graf 4-12 Naměřené průměry děr v jednotlivých hloubkách [autor]

Z grafů je zřejmé, že největší průměr díry byl naměřen u nového vrtáku s házením 0,05 mm a to cca 3,032 mm. Ačkoli se vrtalo s vrtáky s větším házením, neprojevilo se to na průměru děr. Pro porovnání je dobré uvést konkrétní hodnoty extrémů. Uvedeny budou naměřené průměry v nejnižše měřené hloubce 1,5 mm, na které by se vliv házení měl nejvíce projevit. Právě v počátcích vnikání nástroje do materiálu by neměl být otvor ovlivněn dalšími proměnnými vyskytujícími se v průběhu vrtání vlivem dalších projevů nepřesného nastavení - házení. V ideálním případě by průměr děr odpovídal průměru použitého vrtáku a účinku plastické deformace. Skutečný průměr vrtáku byl přeměřen a odpovídal hodnotě 3,01 mm. U nového vrtáku bez házení je hodnota průměrů díry 3,022 mm. U nového vrtáku s největším zkoumaným házením 0,15 mm je hodnota průměrů díry taktéž 3,022 mm. Z naměřených výsledků je tedy zřejmé, že házení nemá zásadní vliv na průměr vyvrtaných děr zadaným vrtákem a bude nutné v navazujících pracích provést podrobnější studii. Dále je z grafu evidentní snižující se hodnota průměru děr u jednotlivých vrtáků. Snižující se průměr děr je následkem rostoucího opotřebení vrtáku. S rostoucím opotřebením se snižuje jmenovitý průměr vrtáku. Při použití vrtáků s nejvyšším sledovaným opotřebením, se naměřil průměr díry v hloubce 1,5 mm u vrtáku bez házení 3,009 mm. U vrtáku s házením 0,05 mm to bylo 3,002 mm. U vrtáku s házením 0,1 mm měla díra průměr 3,003 mm a u vrtáku s házením 0,15 mm byla hodnota průměru díry 3,003 mm. Tyto naměřené

výsledky podporují tvrzení, že házení ve zkoumaném rozsahu u zadaného vrtáku nemá zásadní vliv na průměry jimi vyvrtaných děr.

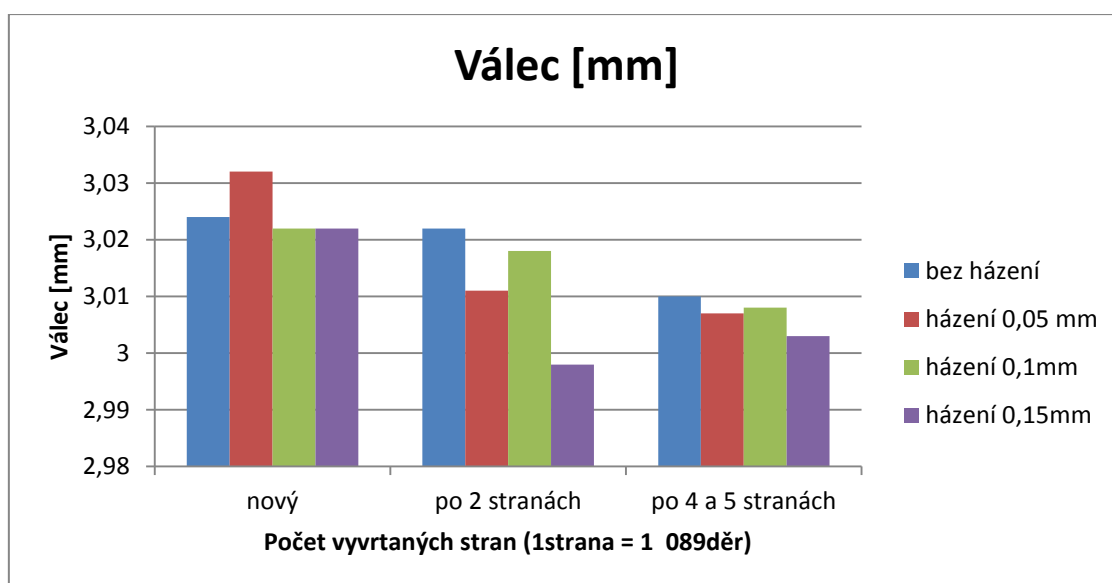
Hodnota průměru u díry po vrtáku s házením 0,15 mm a po vyvrtání 2 stran je výrazně nižší z důvodu jednoho vychýleného průměru v hloubce 7 mm. Ve zbylých dvou hloubkách si hodnoty průměru korespondují. Vychýlená hodnota byla s největší pravděpodobností, způsobena chybou měření viz profil průměru v inkriminované hloubce obrázek č. 4-1.



Obrázek 4-1 Profil průměru v hloubce 7mm u vrtáku s házením 0,15mm [autor]

#### 4.4.2 Průměr válce

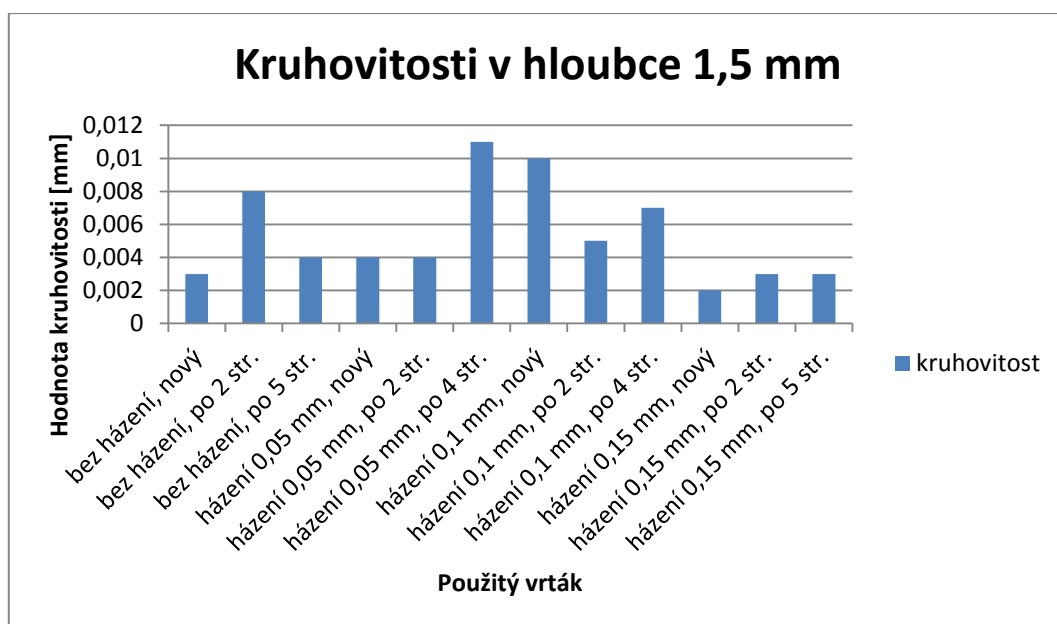
Při zkoumání válce proloženého vyvrtanými dírami byl měřen průměr válce. Naměřené průměry jsou vneseny do grafu č. 4-13. U děr vzniklých vrtáním s novými vrtáky naměřené průměry válce přesahovaly 3,02 mm. V případě maximálního zkoumaného opotřebení vrtáků naměřené průměry válců klesly pod 3,01 mm. Lze tedy stejně jako u průměrů děr konstatovat, že průměry válců děr se snižují v závislosti na rostoucím opotřebení zkoumaného vrtáku. Zkoumaný rozptyl házení u použitého vrtáku nemá zásadní vliv na průměr válce proloženého dírou.



Graf 4-13 Průměr válce proložený vyvrtanou dírou [autor]

#### 4.4.3 Kruhovitost děr

Kruhovitost<sup>1</sup> děr byla opět měřena ve třech hloubkách 1,5 mm, 4,5 mm a 7 mm. Ani v případě kruhovitosti děr vyvrtaných zkoumanými vrtáky nebyly v rozdílných hloubkách zjištěny žádné závislosti. Proto jsou pro účel práce v grafu č. 4-14. uvedeny hodnoty naměřené pouze v hloubce 1,5 mm. Z grafu je zřejmé, že nejvyšších hodnot kruhovitosti ve zmíněné hloubce dosahuje opotřebovaný vrták s házením 0,05 mm. Hodnota kruhovitosti v tomto případě dosáhla hodnoty 0,011 mm. To znamená, že je zde největší diference průměrů naměřených kružnic. Nejnižší hodnota kruhovitosti byla naměřena u díry po novém vrtáku s házením 0,15 mm v hodnotě 0,002 mm. Jedná se o rozdíly v řádu jednotek tisícín mm bez jakékoliv závislosti. Proto je vhodné přiklánět se k názoru, že házení nemělo na kruhovitost výrazný vliv.



Graf 4-14 Kruhovitost v hloubce 1,5 mm [autor]

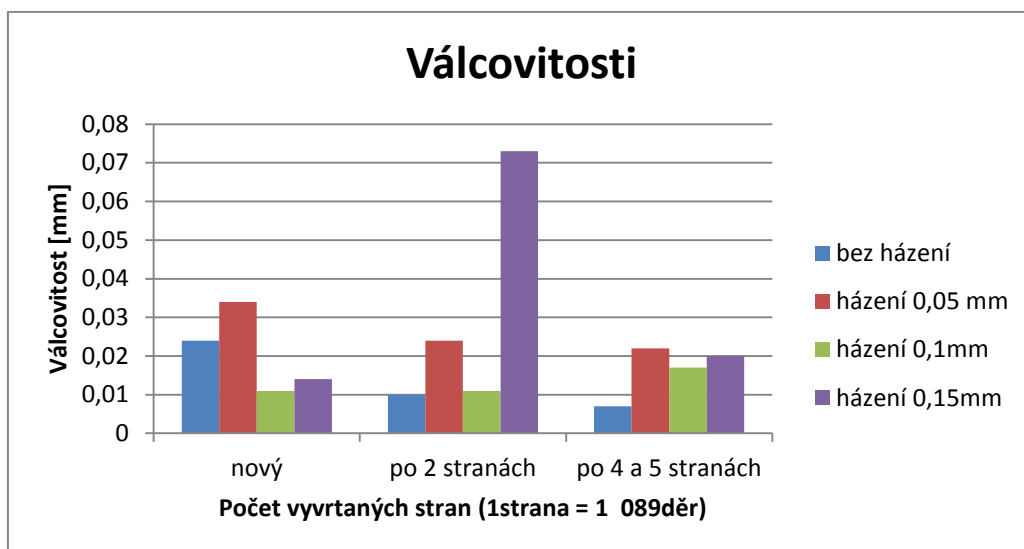
#### 4.4.4 Válcovitost děr

Naměřené výsledky válcovitosti<sup>2</sup> jsou znázorněny v grafu č. 4-15. Hodnota válcovitosti díry po vrtáku s házením 0,15 mm po vyvrtání 2 stran je považován za extrémní hodnotu, nejspíše způsobenou chybným měřením a proto nebude považována za směrodatnou. Pro vrták bez házení se dá z grafu vyčíst klesnutí tolerance válcovitosti z 0,024 mm na 0,011 mm. U nejvíce opotřebovaných vrtáků s házením se pohybují hodnoty válcovitosti vyvrtaných děr okolo 0,02 mm. Opět se tedy neprojevil výrazný vliv házení.

<sup>1</sup>Kruhovitost je geometrická tolerance definovaná dvěma soustřednými kružnicemi, přičemž skutečný profil musí ležet mezi těmito dvěma kružnicemi. Hodnota tolerance je poté rozdíl průměrů těchto soustředných kružnic. Zdroj: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>

<sup>2</sup>Válcovitost je geometrická tolerance, jež se opírá o dva soustředné válce, mezi kterými musí ležet skutečná válcová plocha. Hodnota tolerance je poté rozdíl průměrů soustředných válců.

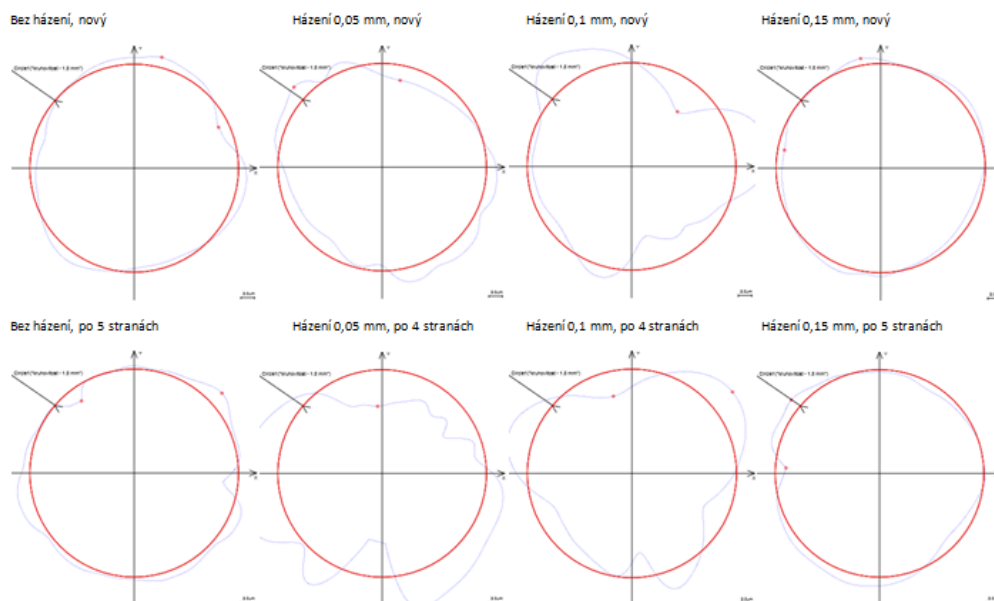
Zdroj: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>



Graf 4-15 Válcovitost děr [autor]

#### 4.4.5 Profil děr

Současně s měřením děr se zkoumal tvar skutečných vyvrtaných otvorů. U každé díry byl zaznamenán profil průměru díry v hloubkách 1,5 mm, 4,5 mm a 7 mm. Největší projev házení je rozeznatelný na tvaru otvoru vždy v jeho počátcích. Profil díry je vytvářen pohybem vnějších špiček při vnikání do materiálu. Házením se zvyšuje pasivní síla na břit vrtáku. Díky házení je do řezného pohybu částečně zapojena i boční fazetka. Se zvyšující se hloubkou je profil díry ovlivněn dalším spektrem proměnných. Z tohoto důvodu byly porovnány profily průměrů v hloubce 1,5 mm viz shrnutí obrázků č. 4-2. Zde je očividné zhoršení profilu otvoru, vytvořeného vrtáky s házením 0,05 mm a 0,1 mm. Po vizuálním zhodnocení profilů děr, lze konstatovat, že házení má vliv na profil vyvrtané díry.

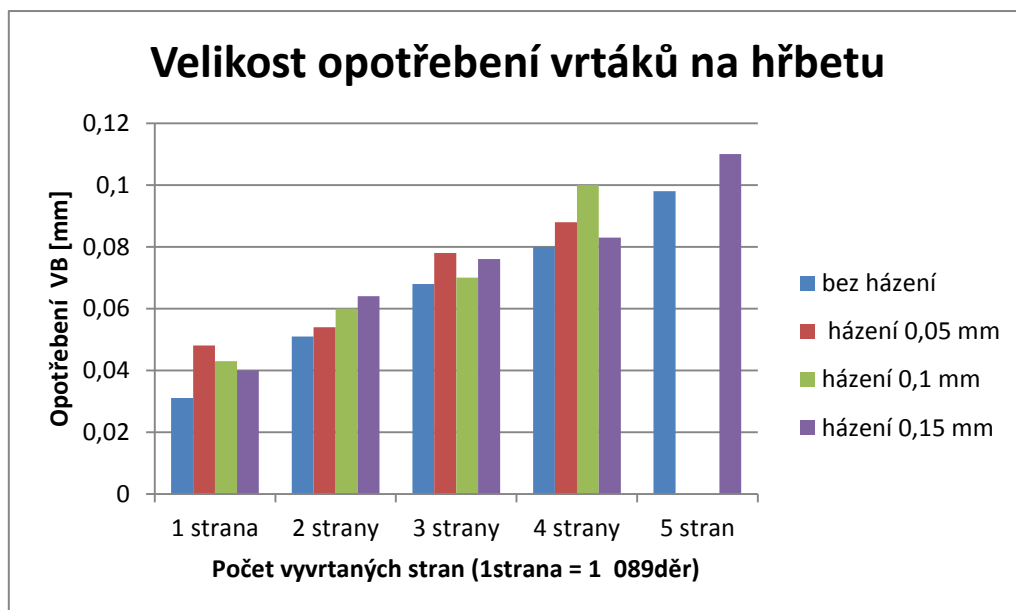


Obrázek 4-2 Profily jednotlivých děr [autor]

## 4.5 Opotřebení

### 4.5.1 Velikost opotřebení na hřbetu

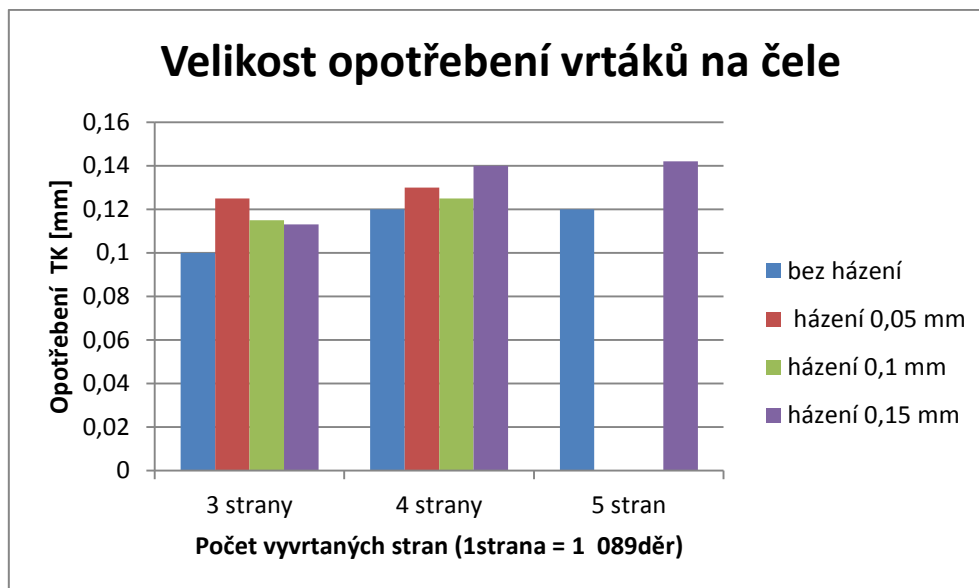
Opotřebení bylo měřeno průběžně vždy po vyvrtání 1 strany, tedy 1 089 děr. Měření bylo primárně zaměřené na opotřebení hlavního ostří na hřbetu. Měřena byla hodnota VB mm. Měření proběhlo na obou hřbetech. Ve výsledcích je pracováno s vyšší naměřenou hodnotou. Naměřené výsledky byly zaneseny do grafu č. 4-16. Po prvním měření vykazoval vrták bez házení opotřebení na hřbetu hodnotu 0,031 mm. U vrtáků s házením byla naměřena hodnota opotřebení průměrně 0,044 mm. Po vyvrtání 5x1089 děr bylo u vrtáku bez házení naměřeno opotřebení na hřbetu 0,098 mm. U vrtáku s házením 0,15 mm byla naměřena hodnota 0,11 mm. Vrták bez házení vykazoval téměř vždy nižší hodnoty opotřebení než vrtáky s házením. Dle naměřených hodnot opotřebení hřbetu je zřejmé, že házení má vliv na rychlost opotřebení vrtáku. Vrták s nastavenou hodnotou házení 0,05 mm dosáhl hodnoty opotřebení 0,1 mm již při 4 vrtané straně. Celkově platí obecný předpoklad, že opotřebení na hřbetu vrtáku roste postupně s počtem vyvrtaných děr.



graf 4-16 Velikost opotřebení vrtáků na hřbetu [autor]

### 4.5.2 Velikost opotřebení na čele

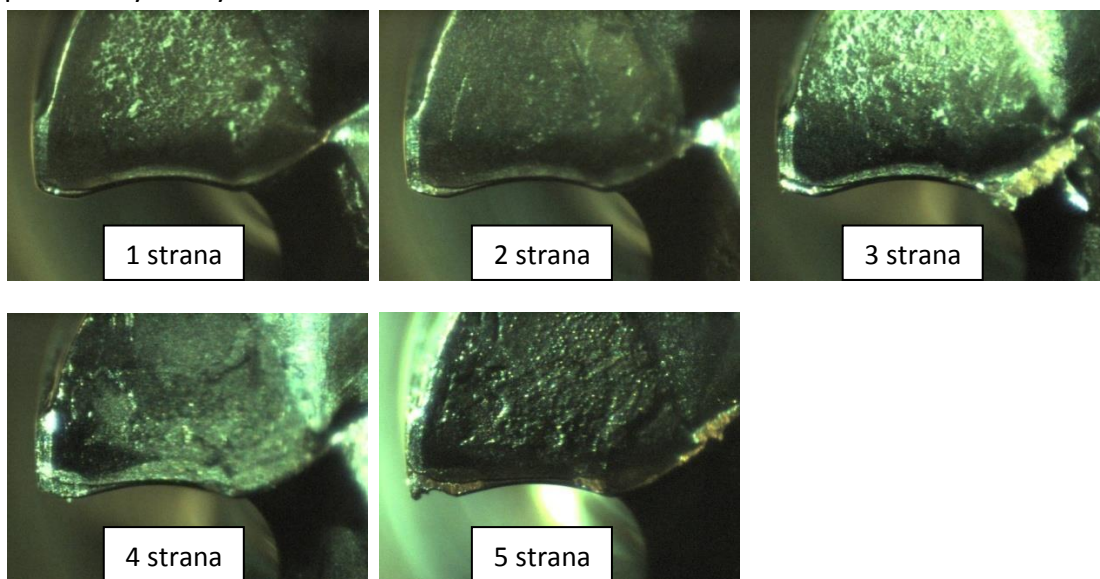
Opotřebení na čele TK [mm] začalo být měřeno po vyvrtání 3x1089 děr. U vrtáku bez házení byla naměřena hodnota opotřebení 0,1 mm. U vrtáků s házeními byla hodnota vždy vyšší. U nejvyššího zkoumaného házení 0,15 mm dosahovalo opotřebení hodnoty 0,113 mm. Opotřebení na čele u všech vrtáků stoupalo se zvyšujícím se počtem vyvrtaných děr. Po vyvrtání 5x1089 děr bylo u vrtáku bez házení naměřeno opotřebení 0,12 mm. U vrtáku s házením 0,15 mm to bylo 0,142 mm. Rozdíl mezi extrémními vrtáky se stejným počtem vyvrtaných děr je tedy 0,02 mm. Opotřebení na čele vrtáku je tedy u vrtáku s házením větší než u vrtáku bez házení.



graf 4-17 Velikost opotřebení vrtáků na čele [autor]

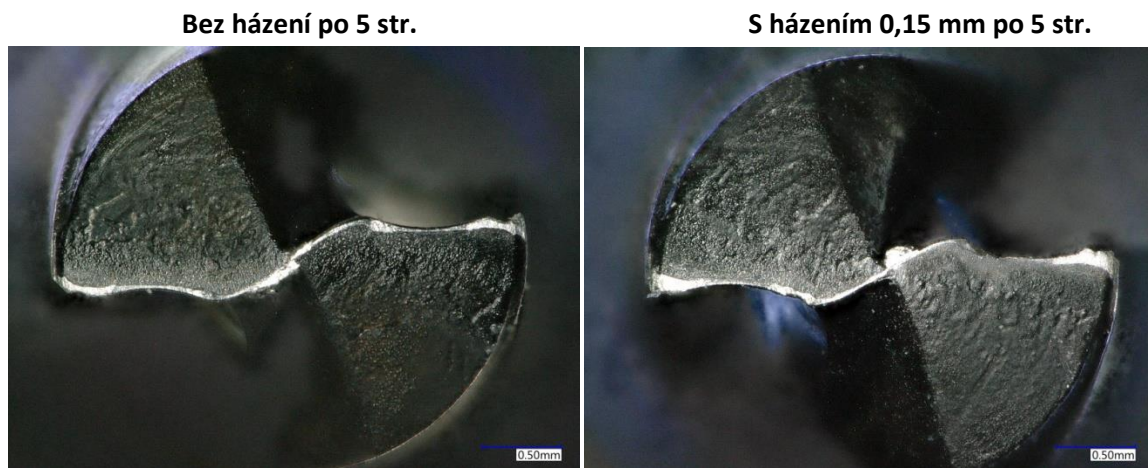
#### 4.6 Charakter opotřebení

U všech vrtáků nastalo obdobné charakteristické opotřebení. Vrtáky se z počátku začaly opotřebovávat na hřbetech a u vnějších špiček. K opotřebování docházelo především v důsledku abraze. Následovalo menší lineární opotřebení podél hlavního ostří. Směrem ke středu, kde je nižší řezná rychlost, se začaly vytvářet nárůstky. Po určeném stupni opotřebení, se nárůstky začaly tvořit také u vnějších špiček nástroje na hlavním ostří. Na následujících obrázcích č. 4-3 je zobrazen průběh opotřebení vrtáku na jeho hřbetu, vždy po 1089 vyvrtaných dírách.



Obrázek 4-3 Postup opotřebení vrtáku bez házení [autor]

Pro porovnání opotřebení hřbetu vrtáků bez házení a s maximálním zkoumaným házením 0,15 mm slouží následující obrázky, získané z mikroskopu Keyence VHX 6000. Demonstrativně byly použity vrtáky po vyvrtání 5x1089 děr. Na hřbetu je opotřebení podobné. Avšak u vrtáku s házením docházelo k dřívější tvorbě nárůstků. Vrták s házením má větší opotřebení u vnějších špiček a podél hlavního ostří směrem k příčnému ostří je vidět i vylomený břit způsobený adhezí.



Obrázek 4-4 Vrtáky s házením 0,15 mm a bez házení po 5 vyvrtaných stranách [autor]

K opotřebení na čele doházelo v průběhu celého řezného procesu. Se zvyšujícím se počtem vyvrtaných děr se opotřebení na čele zvyšovalo. Pro vizuální porovnání opotřebení na čele byl opět použit vrták bez házení a s házením 0,15 mm, po vyvrtání 5x1089 děr viz obrázek č. 4-5. Zde je vidět patrný rozdíl mezi vrtákem bez házení a vrtákem s házením. Zatímco na vrtáku bez házení je vidět opotřebení abrazivní, na vrtáku s házením jsou patrné krátery a lomy. Tyto lomy vysvětlují viditelné vruby na hlavním ostří u předchozích obrázků při pohledu na hřbet. U vrtáku je patrné i neúměrné opotřebení vnější špičky (dle názvosloví v příloze č. 1) nástroje.

Bez házení po 5 str.



S házením 0,15 mm po 5 str.



Bez házení po 5 str.

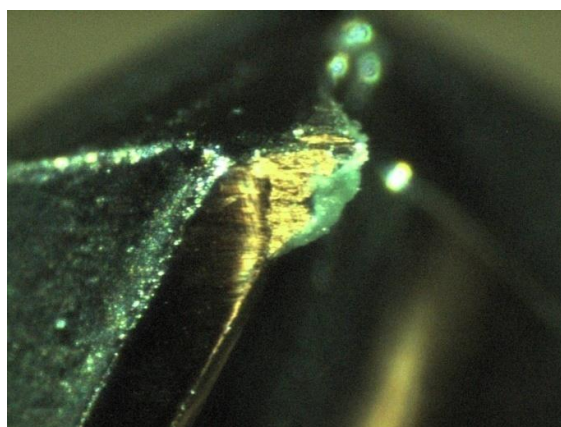


S házením 0,15 mm po 5 str.



Obrázek 4-5 Opotřebení na čele u vrtáku bez házení a s házením 0,15 mm – pohled z 2 stran [autor]

Při vrtání s radiálním házením je namáhána fazetka nástroje v blízkém okolí špičky vrtáku. Vývoj jejího opotřebení u všech vzorků je shrnut v příloze č. 3. U vrtáku bez házení došlo k běžnému opotřebení. U vrtáku s házením se opotřebení zvyšuje a nastává dříve. Taktéž tvorba nárůstků nastala v dřívějších fázích vrtání. Vrták s házením 0,15 mm vykazuje extrémní opotřebení. Fazetka vykazuje známky zboření. Nárůstek se objevoval až za fazetkou, pro ilustraci viz obrázek č. 4-6.

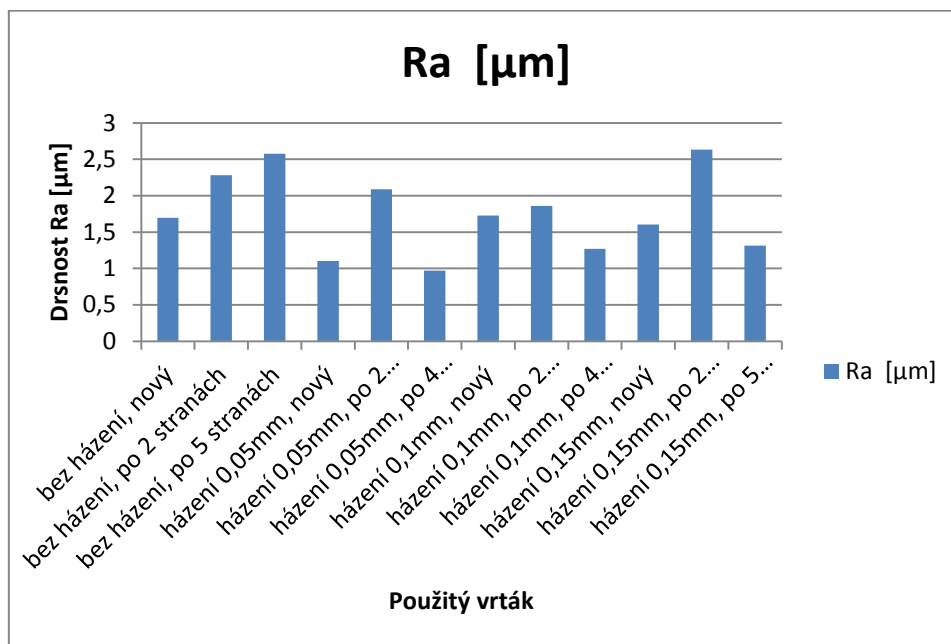


Obrázek 4-6 Pohled na fazetku a vnější špičku vrtáku [autor]

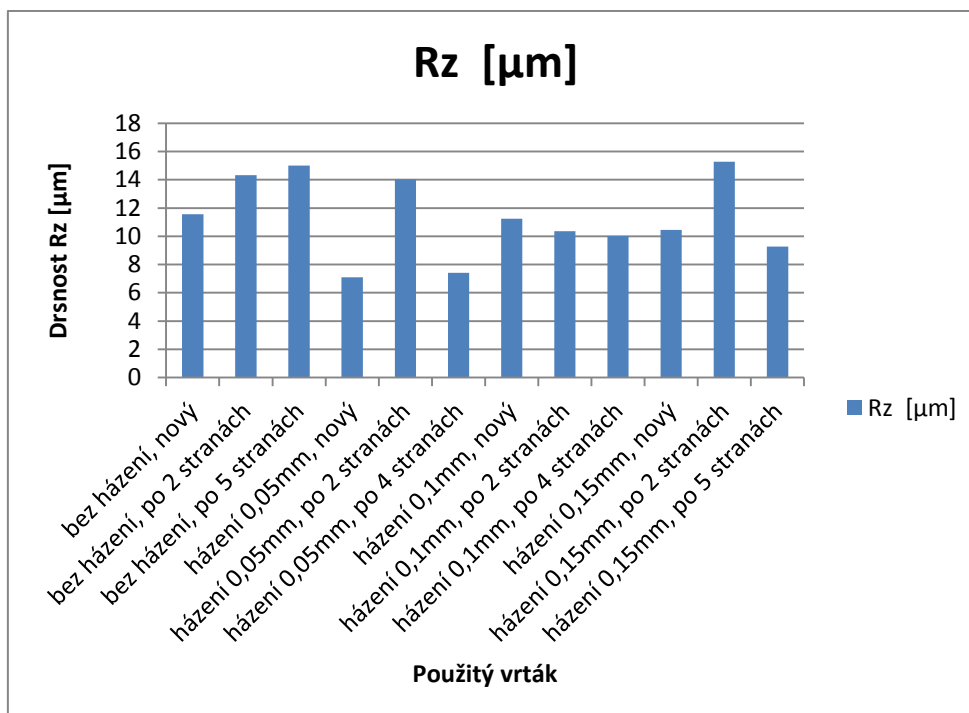


## 4.7 Drsnost

Drsnost otvorů byla měřena na optickém mikroskopu IFM G4. Měření se uskutečnila na délce cca 2mm. Délka zkoumaného úseku neodpovídá požadavkům normy, a proto jsou výsledky tohoto měření pouze orientační. Naměřené hodnoty drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ] a Rz [ $\mu\text{m}$ ] byly zaneseny do grafů č. 4-18 a č. 4-19. Z grafů není patrná žádná zřejmá závislost.

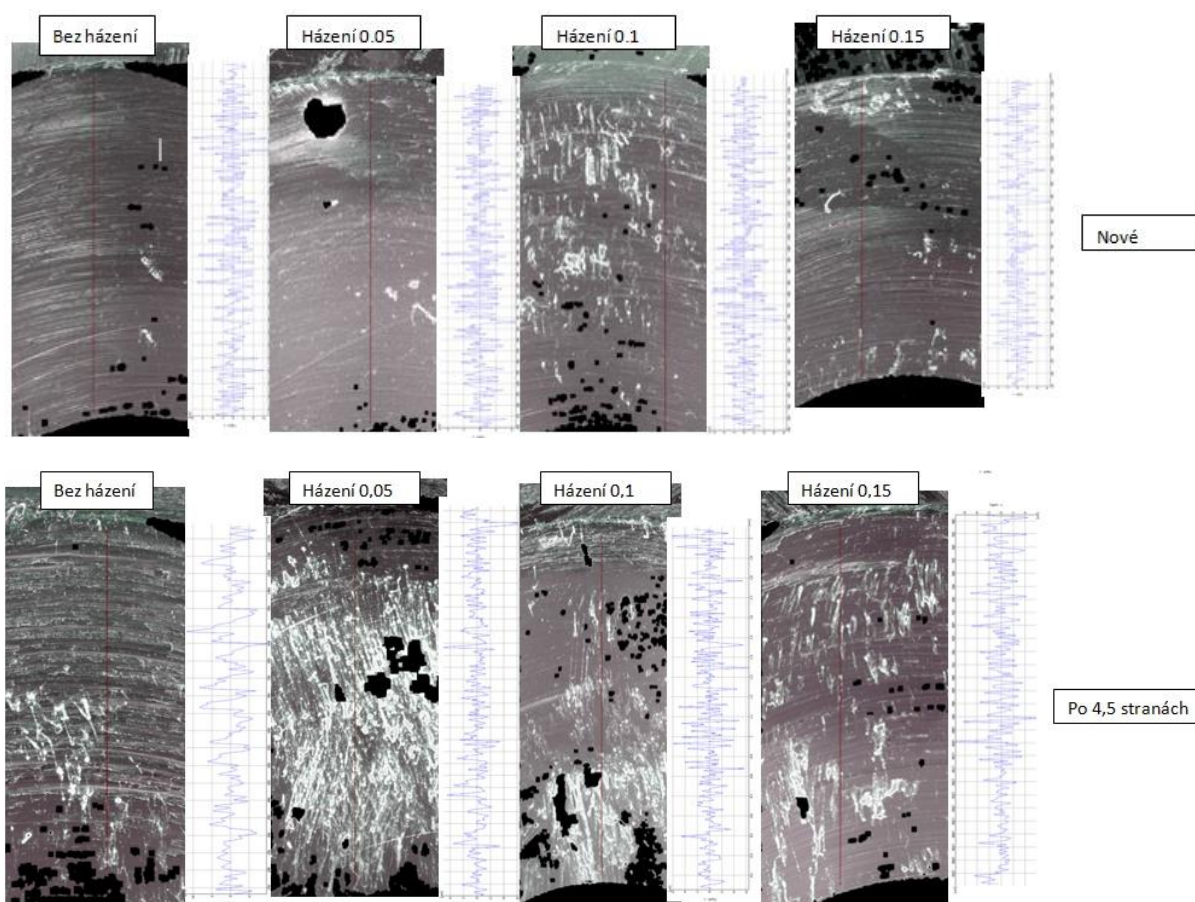


graf 4-18 Orientační hodnota drsnosti Ra jednotlivých děr [autor]



graf 4-19 Orientační hodnota drsnosti Rz jednotlivých děr [autor]

Drsnost obrobené plochy je zapříčiněna stopami, které na povrchu zanechá břit nástroje. Drsnost vyvrtaných otvorů v neposlední řadě souvisí s mikrogeometrií vnějších špiček vrtáku. Tvar a reliéf opotřebení je také vztažen k házení a tlaku, který na plochu vyvinuly boční fazetky. Skutečná profilová drsnost vzorků je shrnuta k porovnání na obrázku č. 4-7. V důsledku zvyšujícího se opotřebení se mění také styková plocha mezi nástrojem a obráběným materiálem. Jak je patrné z porovnání drsností reliéfů otvorů vyvrtaných vrtáky s největším zkoumaným opotřebením, větší drsnost reliéfu obrobené plochy vykazuje vrták bez házení. Reliéf otvorů po vrtácích s házením vykazuje jemnější strukturu, což je spojitě s jejich vyšším opotřebením.



Obrázek 4-7 Porovnání vyvrtaných děr s novými vrtáky a po dosažení limitního opotřebení [autor]

## 5 Závěr

Při shrnutí jednotlivých výsledků experimentu bylo dosaženo několika korelací. Při měření jednotlivých složek řezné síly se házení projevilo ve složce krouticího momentu a pasivní složce síly. Průběh momentu měl v případě vrtáků s házením rostoucí tendenci po celou dobu řezu a nedošlo k jeho ustálení v průběhu řezu. U opotřebovaných vrtáků s házením dosahoval krouticí moment vyšších hodnot v porovnání s vrtákem bez házení. Toto souvisí se zvyšující se třecí plochou mezi fazetkou vrtáku a dírou, zahříváním vrtáku a zhoršujícím se odvodem třísky. Rostoucí házení se nejvíce projevilo na navýšení pasivní složky. Navýšení těchto sil, především výrazné navýšení pasivní složky, může způsobit předčasnou destrukci vrtáku. Pasivní složka síly má tendenci vytlačit vrták ze záběru s obráběným materiálem. Pokud se, jako v případě této práce, jedná o tenký nástroj, může dojít k průhybu a ke chvění nástroje. To má vliv na profil díry a drsnost povrchu.

Pasivní složka řezné síly vytváří tlak na fazetku, která ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu. U naměřených orientačních hodnot drsnosti povrchu nebyly zjištěny žádné vlivy házení v tomto konkrétním případě. Protože se jednalo o tenký vrták, byl nástroj schopný částečně tuto sílu kompenzovat. Rozdíly bylo možné sledovat u reliéfů obrobených povrchů vytvořených opotřebovanými nástroji. U profilu drsnosti otvoru se projevilo vyšší opotřebení u nástrojů s házením. Nejvíce hrubý byl skutečný profil drsnosti zaznamenaný u vrtáku bez házení. Právě vrták bez házení vykazoval nejmenší opotřebení vnějších špiček a fazetky, které mají vliv na reliéf obrobeného povrchu. Dalším projevem navýšení pasivní složky a tím přetížení fazetky se projevilo na profilu otvorů. U vrtáků s házením, kromě házení 0,15 mm, nastalo viditelné zhoršení profilu díry.

Přímý projev zkoumaného rozptylu házení u daného vrtáku se výrazně neprojevilo na průměru otvoru, průměru válce proloženého dírou, kruhovitosti a válcovitosti vyvrtaných děr. Vrták, ačkoliv vyosený, se příčným ostřím dostane do kontaktu s materiálem a v rámci pokračování řezného procesu dojde k samostředění vrtáku.

K opotřebení vrtáku dochází především v okolí špičky nástroje, tedy na vedlejším hřbetu, zkracuje se délka hlavního ostří a stahuje se jmenovitý průměr vrtáku. Stahování jmenovitého průměru vrtáku je v korelaci s naměřenými klesajícími průměry vyvrtaných děr.

Ke stanovenému limitnímu opotřebení na hlavním ostří na hřbetě vrtáku došlo s házením 0,05 mm a 0,1 mm o 1 089 děr dříve než u vrtáku bez házení. Opotřebení vrtáku bez házení na hlavním ostří, jak ze strany hřbetu tak čela, bylo téměř pokaždé nižší než u vrtáků s házením.

Při shrnutí zjištěných výsledků je dobré si uvědomit, co je od nástroje očekáváno a jaké následky může mít jeho zlomení v procesu vrtání. V některých případech může mít zlomení se vrtáků v procesu vrtání fatální následky. Spolehlivost vrtáku je proto v některých případech zásadní. Z hodnocení opotřebení vyplynulo, že nárůst opotřebení nebyl házením výrazně urychlen, přesto docházelo k opotřebení dřívě. Ačkoliv se při experimentu nenaměřilo velmi rozdílné opotřebení vrtáků, bylo u vrtáků se zvyšujícím se házením zjištěno zvyšující se namáhání na ohyb od pasivní složky řezné síly. Po vizuálním porovnání vrtáků s házením a bez házením, lze konstatovat vyšší opotřebení u vrtáků s házením, které vzniká na vrtáku na vnějších špičkách. Směrem k příčnému ostří docházelo k vytváření nárůstků, které měly za následek vytrhávání materiálu nástroje. Taktéž fazetka nástroje vykazovala vyšší opotřebení. Toto opotřebení může mít za následek zvyšující se tvorbu nárůstků, zhoršený odvod třísky a možné natavení špony. Výrazné navýšení všech těchto negativních efektů a překročení meze pevnosti může způsobit destrukci vrtáku.

Z výše uvedených vyhodnocení se potvrzuje, že házení má vliv na trvanlivost vrtáku, respektive jeho opotřebení, a silové zatížení. Kvalita vyvrtaného otvoru nebyla v daném případě víceméně ovlivněna, až na profil děr.

## Seznam obrázků:

Obrázek 2-1 Pohyby při vrtání [2] .....	10
Obrázek 2-2 Schéma řezného pohybu se základními silami [3] .....	10
Obrázek 2-3 Základní druhy vrtacích nástrojů [2] .....	11
Obrázek 2-4 Základní popis šroubovitého vrtáku [2] .....	11
Obrázek 2-5 Geometrie šroubovitého vrtáku [5] .....	12
Obrázek 2-6 příklady upínačů [29, PM-Tech s.r.o.] .....	12
Obrázek 2-7 Znázornění jednotlivých mechanismů opotřebení [6] .....	14
Obrázek 2-8 Znázornění jednotlivých mechanismů opotřebení v závislosti na teplotě [7] .....	15
Obrázek 2-9 Seznam jednotlivých typů opotřebení nástroje [6] .....	16
Obrázek 2-10 Opotřebení na hřbetu nástroje [6] .....	17
Obrázek 2-11 Opotřebení ve tvaru výmolu na čele [6] .....	17
Obrázek 2-12 Vydrolení ostří [6] .....	18
Obrázek 2-13 Plastická deformace břitu [6] .....	18
Obrázek 2-14 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu [6] .....	19
Obrázek 2-15 Tvorba nárůstku [6] .....	19
Obrázek 2-16 Vznik hřebenových trhlinek [6] .....	20
Obrázek 2-17 Únavový lom [6] .....	20
Obrázek 2-18 Lom břitu nástroje [6] .....	21
Obrázek 2-19 Vyskytující se opotřebení na šroubovitém vrtáku [8] .....	22
Obrázek 2-20 Vliv obvodového házení na trvanlivost nástroje [23, PM-Tech s.r.o.] .....	24
Obrázek 2-21 Kompenzační držák nástroje - Robert E. Blades, 1956 [28] .....	25
Obrázek 2-22 Měřené hodnoty opotřebení dle ISO 3685 - obecné [9] .....	26
Obrázek 2-23 Měření jednotlivých kritérií opotřebení na vrtáku [10] .....	27
Obrázek 2-24 Dynamometr od firmy Kistler type-9272 [17] .....	31
Obrázek 2-25 Síla řezání (obrábění) a její rozklad při soustružení [11] .....	31
Obrázek 2-26 Rozklad jednotlivých složek sil během soustružení [15] .....	32
Obrázek 2-27 Znázornění záběru břitu vrtáku v jeho jednotlivých částech [18] .....	32
Obrázek 2-28 Rozložení sil působících na vrták během vrtání [20] .....	33
Obrázek 3-1 DMU 40 eVo linear [autor] .....	35
Obrázek 3-2 detail vrtání do desky [autor] .....	36
Obrázek 3-3 Upnutí vrtáku v kleštině [autor] .....	36
Obrázek 3-4 Upnutý vrták v držáku pro nastavení házení [autor] .....	37
Obrázek 3-5 Zoller genius 3s [autor] .....	37
Obrázek 3-6 dílenský mikroskop Multicheck PC 500 [autor] .....	38
Obrázek 3-7 Štítek použitého dynamometru s vyznačením měřených sil a momentu [autor] .....	39
Obrázek 3-8 Instalovaný dynamometr v pracovním prostoru stroje [autor] .....	39
Obrázek 4-1 Profil průměru v hloubce 7mm u vrtáku s házením 0,15mm [autor] .....	49
Obrázek 4-2 Profily jednotlivých děr [autor] .....	51
Obrázek 4-3 Postup opotřebení vrtáku bez házení [autor] .....	53
Obrázek 4-4 Vrtáky s házením 0,15 mm a bez házení po 5 vyvrtaných stranách [autor] .....	54
Obrázek 4-5 Opotřebení na čele u vrtáku bez házení a s házením 0,15 mm – pohled z 2 stran [autor] .....	55

Obrázek 4-6 Pohled na fazetku a vnější špičku vrtáku [autor].....	55
Obrázek 4-7 Porovnání vyvrtaných děr s novými vrtáky a po dosažení limitního opotřebení [autor] .....	57

## Seznam grafů:

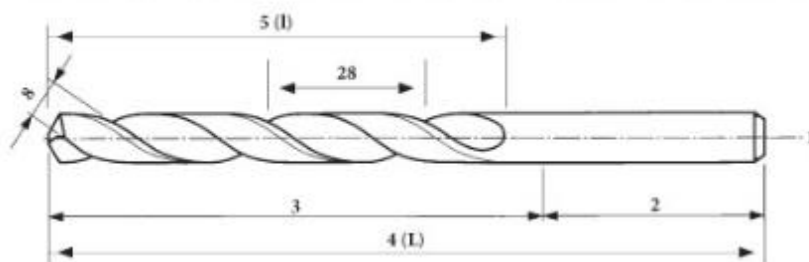
Graf 4-1 Fz naměřená u nových vrtáků [autor].....	40
Graf 4-2 Fz naměřená u vrtáků s limitním opotřebením 0,1mm [autor] .....	41
Graf 4-3 Průběh sil Fz do limitního opotřebení vrtáků [autor] .....	41
Graf 4-4 Naměřený moment Mz u nových vrtáků [autor] .....	42
Graf 4-5 Naměřený moment Mz u vrtáků s opotřebením 0,1mm [autor].....	42
Graf 4-6 Naměřené momenty Mz [autor].....	43
Graf 4-7 Naměřené maximální hodnoty Mz [autor] .....	44
Graf 4-8 Momenty Mz u vrtáků s házením 0.15mm - pravděpodobný vliv špatného odvádění třísky [autor] .....	45
Graf 4-9 Pasivní složka řezné síly Fy - nové vrtáky [autor] .....	46
Graf 4-10 Pasivní složka řezné síly Fy - opotřebení vrtáků 0.1 mm [autor] .....	46
Graf 4-11 Pasivní složka řezné síly Fy - výsledné hodnoty [autor] .....	47
Graf 4-12 Naměřené průměry děr v jednotlivých hloubkách [autor] .....	48
Graf 4-13 Průměr válce proložený vyvrtanou dírou [autor] .....	49
Graf 4-14 Kruhovitost v hloubce 1,5mm [autor].....	50
Graf 4-15 Válcovitost děr [autor] .....	51
graf 4-16 Velikost opotřebení vrtáků na hřbetu [autor] .....	52
graf 4-17 Velikost opotřebení vrtáků na čele [autor].....	53
graf 4-18 Orientační hodnota drsnosti Ra jednotlivých děr [autor] .....	56
graf 4-19 Orientační hodnota drsnosti Rz jednotlivých děr [autor].....	56

## Seznam Tabulek:

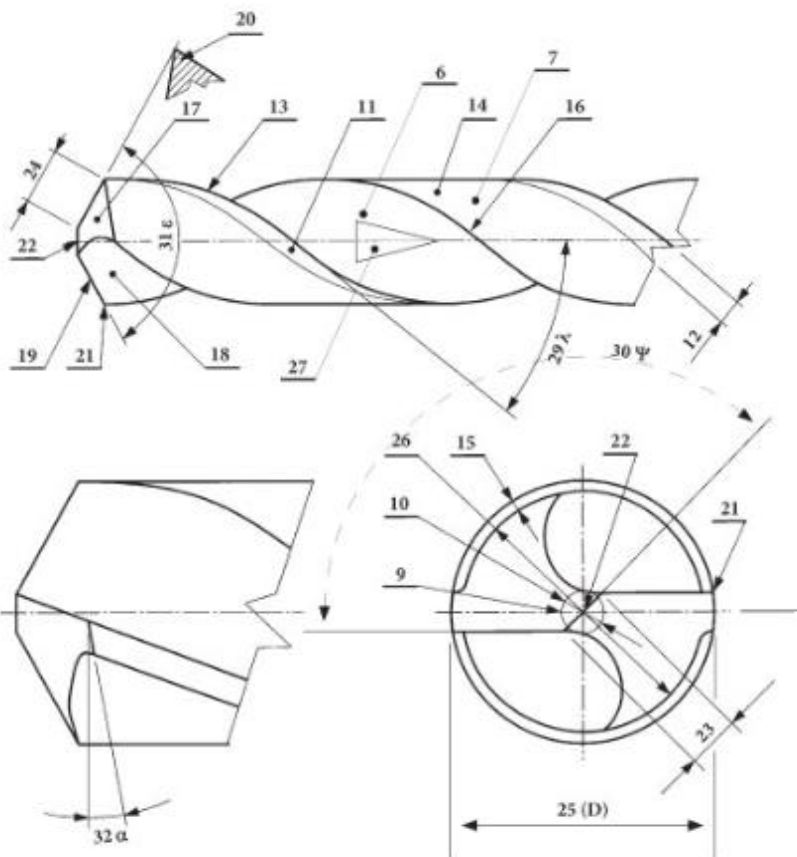
Tabulka 2-1 Typy opotřebení u vrtáků a jejich eliminace [9] .....	23
Tabulka 3-1 Tabulka zvolených řezných podmínek [autor] .....	36

Příloha č.1 Názvosloví vrtáku v CZ,EN,GE [19]

1. osa
2. stopka - hladká, válcová
3. tělo vrtáku
4. celková délka L
5. délka drážky l (šroubovice)
6. drážka
7. plocha vedlejšího hřbetu
8. šířka plochy vedlejšího hřbetu
9. jádro



10. tloušťka jádra
11. fazetka
12. šířka fazetky
13. vedlejší ostří
14. odlehčení
15. hloubka odlehčení
16. pata
17. hřbet
18. čelo
19. hlavní ostří
20. břit
21. vnější špička
22. příčné ostří
23. délka příčného ostří
24. délka hlavního ostří
25. průměr vrtáku
26. průměr odlehčení
27. zpětná kuželovitost
28. stoupání šroubovice
29. úhel šroubovice ( $\lambda$ )
30. úhel příčného ostří ( $\psi$ )
31. úhel špičky ( $\epsilon$ )
32. úhel hřbetu ( $\alpha$ )



1. Axis
2. Taper glossy cylindrical
3. Drill body
4. Overall length L
5. Flute length l (helix)
6. Flute
7. Front flank surface
8. Front flank surface width
9. Core

10. Core thickness
11. Margin
12. Margin width
13. Secondary lip
14. Relief
15. Relief depth
16. Heel
17. Flank
18. Face
19. Lip
20. Cutting edge
21. Outer point
22. Cross cutting edge
23. Cross cutting edge length
24. Lip length
25. Drill diameter
26. Relief diameter
27. Back taper ratio
28. Lead of helix
29. Angle of twist ( $\lambda$ )
30. Angle of gross cutting edge ( $\psi$ )
31. Nose angle ( $\epsilon$ )
32. Lip angle ( $\alpha$ )

1. Bohračs
2. Schaft-glatte walzenförmig
3. Körper Bohrers
4. Gesamt Länge L
5. Länge Nute l
6. Nute
7. Freifläche Nebenschneide
8. Breite Fläche Nebenschneide
9. Kern
10. Kernstärke
11. Fazette
12. Breite Fazette
13. Nebenschneide
14. Entlastung
15. Tiefe Entlastung
16. Feise

17. Rücken
18. Front
19. Hauptschneide
20. Schneide
21. Äußerlich Spitze
22. Querschneide
23. Länge Querschneide
24. Länge Hauptschneide
25. Bohrerdurchmesser
26. Durchschnitt Entlastung
27. Rück Kegel
28. Drallsteigung
29. Spirälwinkel  $\lambda$ (lamda)
30. Querscheidwinkel  $\psi$ (psi)
31. Spitzwinkel  $\epsilon$ (epsilon)
32. Wikel Rücken  $\alpha$ (afa)

Příloha č. 2 Měřicí protokol – břit vrtáku

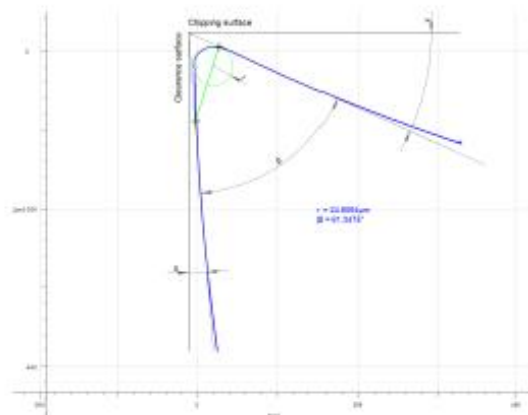
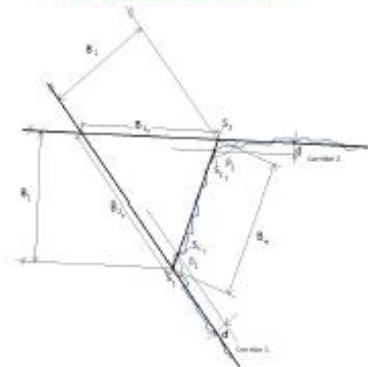
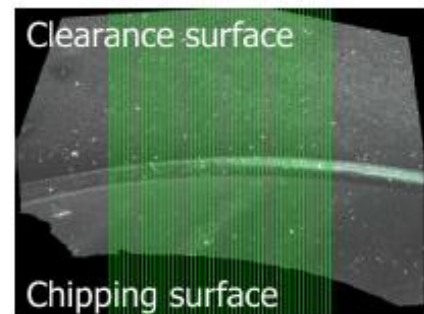
Fakulta strojní - Regionální technologický institut  
Univerzitní 8  
306 00 Plzeň



## Měřicí protokol Cutting Edge Measurement

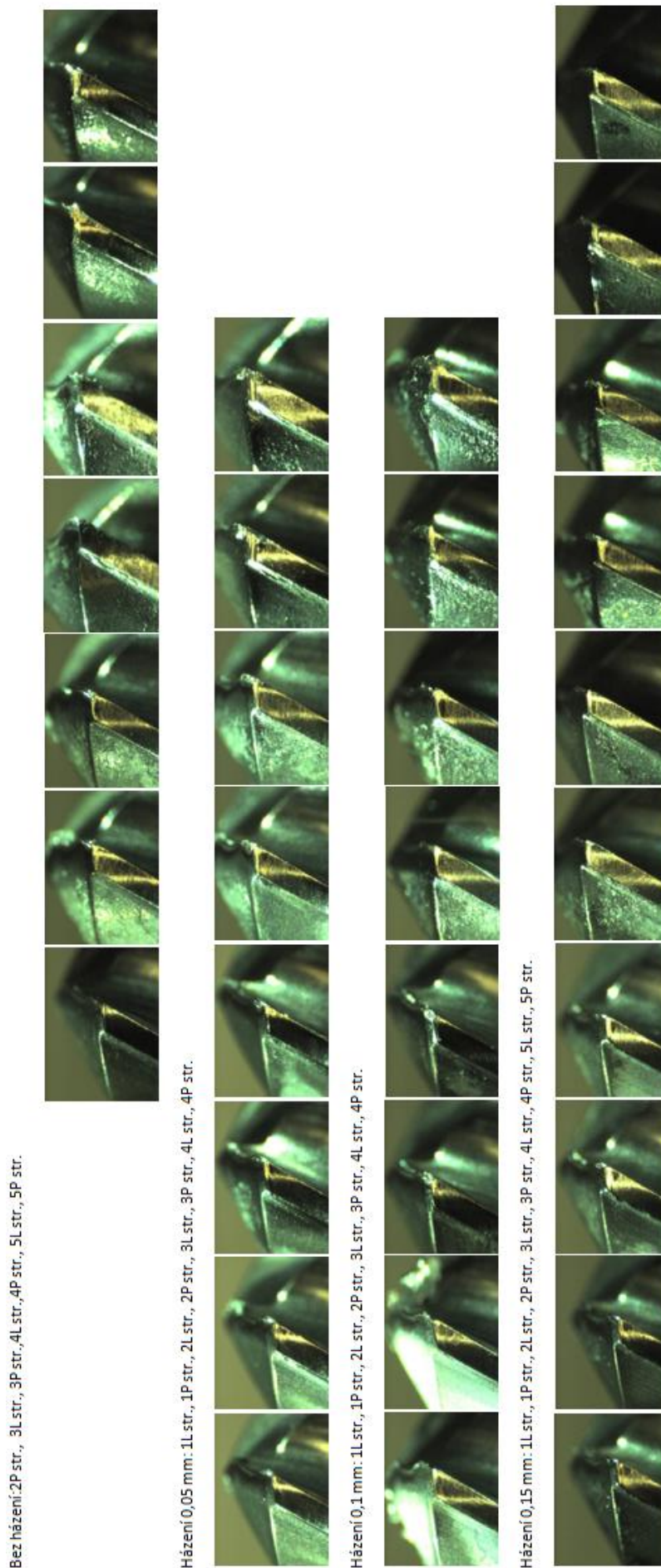
Reference Type: In  
Number of extracted profiles: 50  
Edge profile type: No Bevel  
Date of measurement: 13.2.2019 9:38:26  
Operator: Administrator

Name	Value	[u]	Description
r	24.8064	µm	Mean radius of mean edge
α	4.4032	°	Clearance angle
β	61.3475	°	Wedge angle
γ	24.2493	°	Chip angle
S <sub>a</sub>	42.0211	µm	Dist. apex to end of clearance roundness (former: a)
S <sub>y</sub>	45.9400	µm	Dist. apex to end of chipping roundness (former: b)
K	1.0933		Symmetry of cutting edge
Δr	24.8958	µm	Min. dist. of edge to apex (former: S)
W	32.9838	µm	Edge width
x1 negative	35.7788	µm	Distance from exitpoint 2 to corridor 1 (conform to Bosch N42AP 620)
x2 negative	36.1108	µm	Distance from exitpoint 1 to corridor 2 (conform to Bosch N42AP 620)
B1	37.1511	µm	Edgebreak normal length 1 (conform to ISO 13715)
B2	99.7971	µm	Edgebreak normal length 2 (conform to ISO 13715)
B1 p	42.3353	µm	Edgebreak projected length 1
B2 p	113.7232	µm	Edgebreak projected length 2
Bw	100.5394	µm	Edgebreak width
Bd	14.0926	µm	Average deviation of the profile to the breakline
Bda	14.0926	µm	Average absolute deviation of the profile to the breakline
Bf	0.3618		Robust characterization of the edge roundness
β1	158.3141	°	Edgebreak angle 1
β2	83.0334	°	Edgebreak angle 2
Ecq	0.2741	µm	Form deviation of circle (RMS)





Příloha č. 3 – Jednotlivé snímky opotřebení fazetky na špičce nástroje z obou stran – foto řazené postupně po jednotlivých vrtacích úsecích – viz popis



## Zdroje:

- [1] Citáty [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://citaty.net/citaty/19212-marcus-tullius-cicero-praxe-je-nejlepsi-ucitelka/>
- [2] Teorie třískového obrábění. *TECHNOLOGIE STROJE A ZAŘÍZENÍ* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T11.pdf>
- [3] Vrtání. *Centrum odborné přípravy technické Kroměříž* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=19751&revision=-1&instance=2>
- [4] Základy vrtání. *Centrum odborné přípravy technické Kroměříž* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=18910&docGroup=4931&cmd=0&instance=2>
- [5] Vrtání děr na soustruhu [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18642388-Vrtani-der-na-soustruhu.html>
- [6] Měření opotřebení nástrojů. *VŠB-TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_05.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf)
- [7] Ekonomika, produktivita a hospodárnost obrábění. *DTB Technologie obrábění* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2584267/>
- [8] Vrtání [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/indira-cunningham/vrt-n>
- [9] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 978-1-4665-8753-3.
- [10] Machinability of Titanium Alloys in Drilling. *Intechopen* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/titanium-alloys-towards-achieving-enhanced-properties-for-diversified-applications/drilling-of-titanium-alloys>
- [11] Technologie obrábění. *VŠB-TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf)
- [12] Úvod do teorie obrábění. *VŠB-TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_002/Úvod%20do%20teorie%20obrabeni/02%20Text%20pro%20e-learning/Úvod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opotrebeni%20rezných%20nástrojů.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/Úvod%20do%20teorie%20obrabeni/02%20Text%20pro%20e-learning/Úvod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opotrebeni%20rezných%20nástrojů.pdf)
- [13] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [14] Experimentální metody. *Ústav strojírenské technologie, VUT v Brně* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp\\_metody\\_he2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Exp_metody_he2.pdf)
- [15] Měření složek síly řezání. *VŠB-TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_08.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf)
- [16] Přímé měření sil a momentů. *VŠB-TU Ostrava* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_09.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf)

- [17] Dynamometer. *Kistler* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9272/>
- [18] Drilling and Related Hole-Making Processes. *Casting Parts Manufacturer* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/garron/chapter-23-drilling-and-related-hole-making-processes>
- [19] Technické názvosloví vrtáku. *Nastroje CZ* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.nastrojecz.cz/nazvoslovi.php>
- [20] *Technologie obrábění, Ústav strojírenské technologie, VUT v Brně* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10306340-Technologie-i-technologie-obrabeni-2-cast.html>
- [21] Rady týkající se vrtání. *Sandvik Coromant*. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/pages/drilling-tips.aspx>
- [22] Vrtání - troubleshooting. *Jan Havelka, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.jan-havelka.cz/index.php/katalogy-navody/navody-reseni-problemu-obrabeni/319-reseni-chyb-vrtani-monolitnimi-karbidovymi-vrtaky>
- [23] *Garant – příručka obrábění, s.186*
- [24] Influence of feed motion features on small holes drilling process. *Science Direct* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600008049>
- [25] Zmetky při vrtání. *Ostravská univerzita* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/vrtani/zmetky.html>
- [26] Zmetky při vrtání. *Technický týdeník* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-9\\_8521.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-9_8521.html)
- [27] ŘEHOŘ, Jan, Jaroslava FULEMOVÁ, Kouřil PAVEL a Pavel MATOUŠ. Současné trendy středění nástrojů pro výrobu přesných děr. *Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní, Katedra technologie obrábění* [online]. [cit.2019-05-18]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16132/1/Rehor.pdf>
- [28] BLADES, Robert. *Compensatingtoolholder [patent]*. USA. B23B 31/02, US2833544 A. Uděleno 6. květen 1958. [cit. 2019-05-08] Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US2833544>
- [29] Upínání obrobků, upínání nástrojů. *Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1211>