

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přerušovač řezu při soustružení

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bauer** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **437700**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Přerušovač řezu při soustružení

Název diplomové práce anglicky:

The quick-stop device for a turning process

Pokyny pro vypracování:

Popis mechaniky tvorby třísky
Způsob studia ukončených změn při tvorbě třísky
Přehled současných řešení přerušovačů řezu při soustružení
Návrh, realizace a ověření vlastní koncepce přerušovače řezu
Analýza dosažených výsledků a hodnocení funkce přerušovače.

Seznam doporučené literatury:

Mádl, J.: Teorie obrábění, Skripta, ČVUT v Praze
Mádl, J.: Experimentální metody v teorii obrábění, Skripta, ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

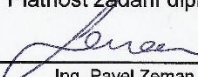
Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

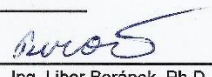
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

17. 4. 2019
Datum převzetí zadání

Bauer
Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Přerušovač řezu při soustružení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Pavla Zemana, Ph.D. Veškerou použitou literaturu jsem řádně označil a uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne

.....

Bc. Tomáš Bauer

Anotační list

Jméno Autora: Tomáš Bauer
Název bakalářské práce: Přerušovač řezu při soustružení
Anglický název: The quick stop device for a turning process

Rok: 2019
Obor studia: Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav: 12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran: 75
Počet obrázků: 73
Počet tabulek: 9
Počet příloh: 1

Klíčová slova: Přerušovač řezu, zmrazení kořene třísky, mechanika tvorby třísky, soustružení
Key words: Quick stop device, chip root freezing, mechanics of chip formation, turning

Anotace:

Diplomová práce poukazuje na smysl využití přerušovačů řezu pro obrábění obecně. Poskytuje základní náhled na problematiku mechaniky tvorby třísky a značná část práce je věnována popisu typů přerušovačů, které jsou (případně byly) používány při soustružení. Práce si bere za cíl nalezení nejvhodnějšího řešení (přerušovače) pro konkrétní podmínky obrábění a funkci tohoto přerušovače následně experimentálně ověřit.

Abstract:

The thesis points to the use of quick stop devices (QSD) for machining in general. It provides basic insight into the problems of the mechanics of chip formation and a considerable part is devoted to describing the types of QSDs that are (or were) used in turning. Labor takes aim at finding the most appropriate solution (QSD) for specific machining conditions and the function of this circuit then experimentally verified.

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu, panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a způsob, kterým mě při zpracování této práce vedl.

Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s výrobou navrženého přerušovače, a také těm, kteří mě při psaní práce psychicky podporovali.

Tato práce vznikla s podporou projektu OPVVV: „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008396.

Obsah

PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD	11
2 ZÁKLADNÍ POJMY	12
2.1 Klasifikace soustružení.....	12
2.2 Geometrie břítu nástroje.....	13
3 TEORETICKÝ VÝZKUM TVORBY TŘÍSKY.....	16
3.1 Deformace v zóně řezání	16
3.1.1 Oblast primární plastické deformace	16
3.1.2 Oblast sekundární plastické deformace	18
3.1.3 Oblast plastické deformace obrobeného povrchu	20
3.2 Tvorba třísky	21
3.2.1 Vliv řezných podmínek	23
3.2.2 Objemový součinitel třísek.....	24
4 EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM V PROCESU TVORBY TŘÍSKY	26
4.1 Studium plastických deformací.....	26
4.1.1 Studium změn probíhajících	26
4.1.1.1 Přímé pozorování mikroskopických změn	27
4.1.1.2 Přímé pozorování makroskopických změn	28
4.1.2 Studium změn ukončených	28
4.1.2.1 Přerušovače řezu na straně obrobku	29
4.1.2.1.1 Přerušování oddálením obrobku	29
4.1.2.1.2 Přerušování zastavením procesu	29
4.1.2.1.3 Přerušování vytržením segmentu.....	30
4.1.2.2 Přerušovače řezu na straně nástroje.....	31
4.1.2.2.1 Přerušovače řezu využívající pružin	32
4.1.2.2.2 Přerušovače řezu využívající nárazu	36
4.1.2.2.3 Přerušovače řezu využívající výbuchu.....	38
4.1.3 Sledované charakteristiky	40
4.2 Stav napjatosti před břítem nástroje.....	42

4.3	Zpevnění obrobeného povrchu	43
5	VÝBĚR VHODNÉHO TYPU PŘERUŠOVAČE.....	44
5.1	Rozhodovací analýza.....	44
5.2	Zvolené varianty přerušovačů.....	44
5.3	Kritéria hodnocení	46
5.4	Hodnocení vybraných variant.....	46
5.5	Vyhodnocení variant.....	47
6	NÁVRH A VÝROBA PŘERUŠOVAČE	49
6.1	Návrh rozměrů a úprav polotovaru	49
6.2	Výroba přerušovače.....	52
7	EXPERIMENT A JEHO VYHODNOCENÍ.....	54
7.1	Průběh experimentu.....	54
7.2	Získané snímky kořenů třísek, třísek a hodnocené parametry	56
7.2.1	Přerušení č. 1	57
7.2.2	Přerušení č. 2	59
7.2.3	Přerušení č. 3	61
7.2.4	Přerušení č. 4	63
7.3	Vyhodnocení získaných parametrů.....	65
7.4	Shrnutí výsledků experimentu.....	67
8	ZÁVĚR.....	69
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
	SEZNAM PŘÍLOH	I

Přehled použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
A_α	Rovina hřbetu	-
A_γ	Rovina čela	-
a	Vnější průměr pístu	mm
a_p	Hloubka řezu	mm
a_{min}, a'_{min}	Minimální hloubka řezu	mm
D	Průměr upínací části	mm
F_b	Síla působící na šroub	N
F_c	Řezná síla	N
F_i	Výslednice sil	N
F_r	Radiální síla	N
F_s	Síla působící na suport	N
f	Posuv	mm
G_s	Stupeň segmentace třísky	-
$\overline{G_s}$	Průměrná hodnota stupně segmentace třísky	-
H	Celková výška pístové části	mm
h	Výška vyvýšené plocha čela	mm
h_D	Tloušťka odřezávané vrstvy	mm
h_{Dc}	Tloušťka třísky	mm
h_i	Hodnocení i -té varianty	-
h_p	Maximální tloušťka třísky	μm
h_v	Tloušťka třísky v místě spojení segmentů	μm
$l_{1,3}$	Hloubka zásahu primární plastické deformace	mm
l_2	Výška odpružení obrobeného povrchu	mm
l_γ	Délka plochy čela	mm
n	Otáčky	1/min
P	Řezná část nástroje	-
P_f	Boční nástrojová rovina	-
P_g	Nástrojová rovina největšího spádu čela	-
P_b	Nástrojová rovina největšího spádu hřbetu	-
P_n	Normálová nástrojová rovina	-
P_o	Ortogonální nástrojová rovina	-

P_p	Zadní nástrojová rovina	-
P_r	Základní nástrojová rovina	-
P_s	Nástrojová rovina ostří	-
p_i	Přiřazená váha i -tému kritériu	-
r	Poloměr špičky	mm
r_n	Poloměr špičky měřený v normálové nástrojové rovině	mm
r_ε	Poloměr špičky měřený v základní nástrojové rovině	mm
s	Šířka segmentu třísky	μm
\bar{s}	Průměrná hodnota šířky segmentu třísky	μm
t_s	Ekvivalent tloušťky třísky	μm
$t\bar{s}$	Průměrná hodnota ekvivalentu tloušťky třísky	μm
$VN_{\check{c}}$	Výška nárůstku měřená od plochy čela nástroje	mm
VN_h	Výška nárůstku měřená od obrobené plochy	mm
v_{bullet}	Směr úderu střelou	-
v_c	Řezná rychlost	m/min
v_f	Rychlost posuvu	mm/min
v_i	Vypočtená váha i -tého kritéria	-
v_o	Osová rychlost	mm/min
v_t	Směr odchodu třísky	-
v_{tool}	Vektor pohybu nástroje	m/min
$v_{workpiece}$	Směr pohybu obrobku	-
y	Výška pístu	mm
y_{ij}	Hodnoty kritériální matice	-

α	Úhel hřbetu	°
α_b	Úhel hřbetu měřený v rovině největšího spádu hřbetu	°
α_f	Úhel hřbetu měřený v boční nástrojové rovině	°
α_n	Úhel hřbetu měřený v normálové nástrojové rovině	°
α_o	Úhel hřbetu měřený v ortogonální nástrojové rovině	°
α_p	Úhel hřbetu měřený v zadní nástrojové rovině	°
β	Úhel břitu	°
β_f	Úhel břitu měřený v boční nástrojové rovině	°
β_n	Úhel břitu měřený v normálové nástrojové rovině	°
β_o	Úhel břitu měřený v ortogonální nástrojové rovině	°
β_p	Úhel břitu měřený v zadní nástrojové rovině	°
γ	Úhel čela	°
γ_f	Úhel čela měřený v boční nástrojové rovině	°
γ_g	Úhel čela měřený rovině největšího spádu čela	°
γ_n	Úhel čela měřený v normálové nástrojové rovině	°
γ_o	Úhel čela měřený v ortogonální nástrojové rovině	°
γ_p	Úhel čela měřený v zadní nástrojové rovině	°
δ	Úhel řezu	°
$\delta_{nár}, \delta_{nsk}$	Úhel řezu způsobený nárůstkem	°
ε	Úhel špičky	°
ε_r	Úhel špičky měřený v základní nástrojové rovině	°
κ	Úhel nastavení hlavního ostří	°
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří měřený v základní rovině	°
κ'	Úhel nastavení vedlejšího ostří	°
κ'_r	Úhel nastavení vedlejšího ostří měřený v základní rovině	°
λ	Úhel sklonu hlavního ostří	°
λ_s	Úhel sklonu hlavního ostří měřený v základní rovině	°
ρ	Poloměr ostří	mm
ρ_n	Poloměr zaoblení nárůstku	mm
Φ	Úhel střižné roviny	°
Φ_1	Úhel počátku primární plastické deformace	°
Φ_2	Úhel konce primární plastické deformace	°
Ψ	Doplňkový úhel nastavení hlavního ostří	°
Ψ_r	Doplňkový úhel nastavení hlavního ostří měřený v základní rovině	°

1 Úvod

Podstatná část výrobků dnešní produkce prochází některou z forem třískového obrábění. Výrobní náklady zároveň činí významný podíl prodejní ceny výrobku. Je tedy patrné, že pro dosažení co možná nejnižších nákladů nestačí pouze vybrat nejvhodnější výrobní technologii, ale nadále tuto technologii vhodnými postupy optimalizovat.

Optimalizace obráběcího procesu je prováděna změnou pracovních podmínek (např. zvýšení rezné rychlosti za účelem dosažení kritéria produktivity, úpravou geometrie břitů nástroje pro docílení vhodného utváření třísky apod.). Změna těchto podmínek se ovšem neděje náhodně, ale na základě teoretických očekávání, která jsou závislá na stupni porozumění reznému procesu. Z tohoto důvodu probíhá i tzv. studium tvorby třísky, jehož úlohou je dokumentování dějů odehrávajících se mezi nástrojem a obrobkem v průběhu obrábění. Na těchto pozorováních může být dále založena i zmíněná optimalizace (spočívající v procesu utváření třísky), která vede k hospodárnější výrobě nebo k vyšší kvalitě vyráběných součástí. Pozorování jsou prováděna buď přímo v průběhu obrábění, nebo na vzorcích vzniklých pomocí přerušovačů až po jeho ukončení.

Přerušovače nám tu slouží k okamžitému přerušení řezu (někdy také uváděno jako zmrazení právě vznikající třísky). Pro pozorování mikroskopických změn je totiž nutné zachovat neporušený tzv. kořen třísky, utvářený za daných pracovních podmínek. V případě, kdy by přerušení řezu – přerušení kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, případně úplného zastavení rezného procesu – neproběhlo okamžitě (např. by nástroj opustil místo řezu posuvovou rychlostí), došlo by „pouze“ ke změně pracovních podmínek (na dostatečně dlouhý časový okamžik, aby se změnilo utváření třísky) a výsledky pozorování by byly zkresleny.

V minulosti vznikla řada teorií, které si kladly za cíl popis procesu tvorby třísky. Některé již byly vyvráceny, buď na základě teorie, nebo experimentálně získaných výsledků z pozorování kořenů třísek. Na vzorcích získaných přerušením řezu lze sledovat např. vznik a průběh plastických deformací v obráběné vrstvě, třísce nebo povrchové vrstvě plochy řezu. Dále je sledován např. tvar vznikající třísky nebo fázové změny vyvolané extrémními podmínkami obrábění.

Cílem teoretické části je popis mechaniky tvorby třísky a způsobu jejího studia pomocí ukončených změn spolu s přehledem současných řešení přerušovačů řezu při soustružení. Následná praktická část má za cíl výběr vhodného typu přerušovače použitím vícekritériální rozhodovací analýzy (metody bodovací), jeho zkonstruování a experimentální ověření funkčnosti s následným zhodnocením dosažených výsledků.

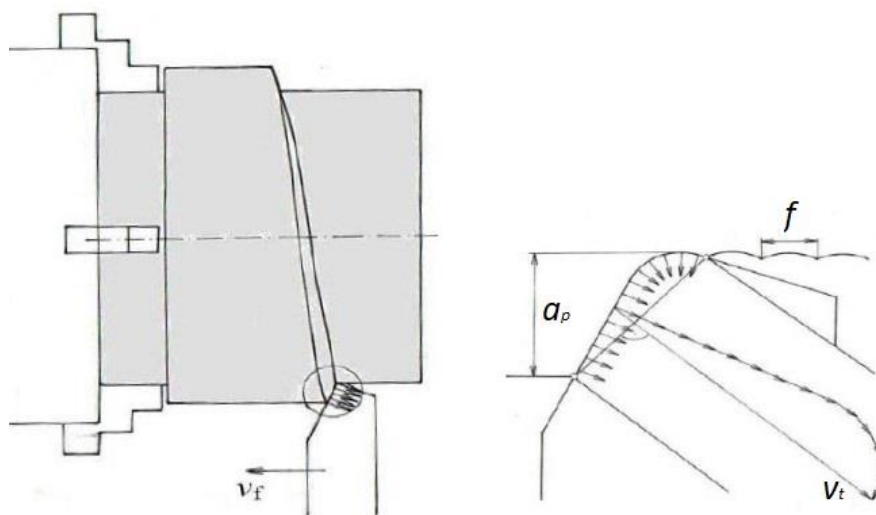
2 Základní pojmy

Je mnoho aspektů, které se podílejí na procesu vzniku třísky. V této kapitole dojde k zařazení výrobní technologie, která je předmětem práce a budou předvedeny základní informace o nástroji. Vliv jednotlivých aspektů bude následně uveden u probírané tematiky.

2.1 Klasifikace soustružení

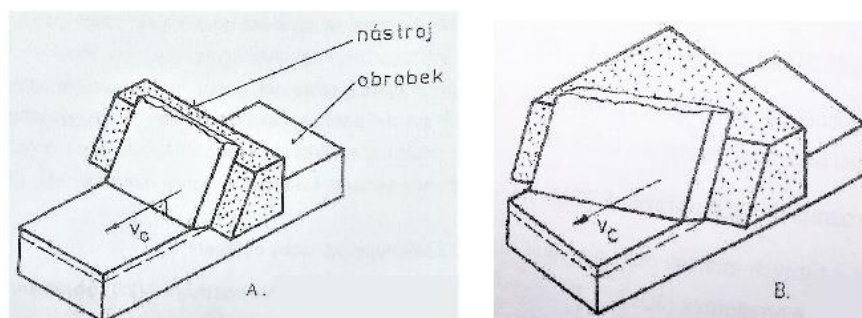
Soustružení se řadí mezi výrobní metody obrábění s definovanou geometrií břitu¹, kdy je docíleno změny tvaru pevného tělesa pomocí místně zrušené soudržnosti [1]. Přebytečný materiál je odebírán ve formě třísek, převážně pomocí soustružnických nožů. Cílem je dosažení požadovaných kvalit obráběných součástí – přesnosti rozměrové i tvarové, drsnosti a mikrostruktury, vlastností povrchové vrstvy [2]. O tom, do jaké míry budou tyto kvality zajištěny rozhoduje soustava obrábění stroj – nástroj – obrobek (resp. volba této soustavy) [3].

Jelikož je proces obrábění velice složitý (existuje velké množství faktorů podílejících se na způsobu utváření třísky) a nelze jej dokonale teoreticky řešit, byla zavedena tzv. klasifikace obrábění [1]. Tato klasifikace představuje soubor omezení a předpokladů, za kterých bylo obrábění provedeno. Nejběžněji jde o dělení obrábění na volné a vázané, v závislosti na pohybu třísky vzhledem k řezné hraně [4]. V literatuře [1] je dále o tomto dělení uvedeno, že při vázaném obrábění dochází k prostorové napjatosti v kořeni třísky – jde tedy o trojrozměrné obrábění. Volné obrábění je zde dále děleno na kosoúhlé a ortogonální (oboje je považováno za dvojrozměrné), liší se od sebe sklonem ostří –



Obrázek č. 1: Příklad trojrozměrného vázaného obrábění s naznačenou hloubkou řezu, velikostí posuvu, rychlostí posuvu a vektorem směru odchodu třísky [4].

¹ Definice obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitu podle [1]: „... je takové obrábění, při kterém je používán nástroj, u něhož je jednoznačně určen počet břítů, geometrie břitu a jejich poloha vůči obrobku.“



Obrázek č. 2: Dvojrzměrné volné obrábění: A) ortogonální, B) kosoúhlé [1].

v případě ortogonálního řezání je sklon ostří nulový a nedochází tak ke stáčení třísky. Takto popsané rozdělení způsobů obrábění je zachyceno na obrázcích č.1 a 2.

Nejčastěji je dále uváděno dělení z pohledu délky záběru nástroje na obrábění plynulé (kdy je nástroj v záběru neustále) a přerušované (kdy nástroj střídavě vystupuje a vstupuje do řezu – např. při frézování) [1]. Podle literatury [4] je pak nejvhodnější dělení v závislosti na použité metodě a vzájemné kinematice obrobku a nástroje. Je tak umožněno tvořivé nacházení nových způsobů obrábění a snazší automatizace výrobního procesu.

Pro následné experimentální studium tvorby třísky je využíváno ortogonální obrábění, popsané literaturou [5] jako systém pravoúhlého řezání, při kterém dochází k plošné plastické deformaci. Dále jsou zde uvedeny předpoklady jako: úhel hřbetu je volen tak, aby nedocházelo ke kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, smyková rovina se šíří vpřed vzhledem k břítu nástroje, ostří nástroje je kolmé ke směru hlavního řezného pohybu, hloubka řezu je neměnná, délka ostří je větší než šířka odřezávané vrstvy, konstantní řezná rychlost.

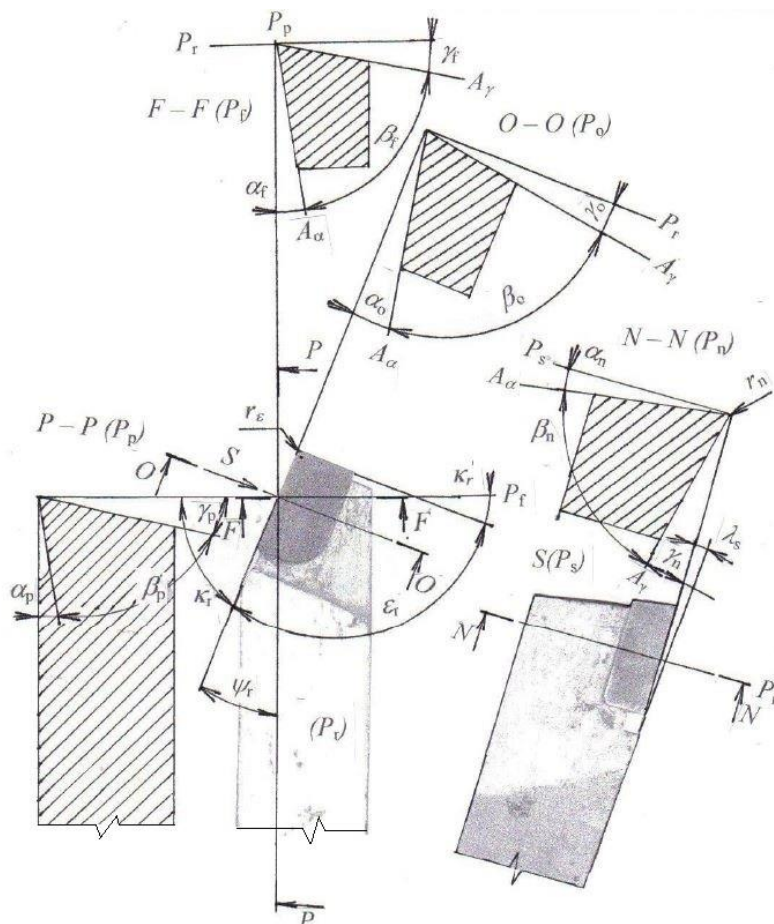
2.2 Geometrie břítu nástroje

Jak bylo výše naznačeno – geometrie břítu nástroje je jedna z nejdůležitějších pracovních podmínek, která přímo ovlivňuje mechanismus utváření třísky. Řeznou část nástroje představuje řezný klín složený z ploch čela a hřbetu. Řezný klín bývá na snímcích kořenů třísek často znázorněn. Na obrázku č. 3 je uvedena geometrie soustružnického nože (nevhodného pro ortogonální obrábění – dle výše zmíněných předpokladů).

Nástrojové úhly jsou měřeny v rovinách různě orientovaných vzhledem k řezné hraně. Úhly následně nesou indexové označení roviny, ve které byly změřeny. Těmito rovinami jsou: zadní nástrojová rovina (P_p), boční nástrojová rovina (P_l), ortogonální nástrojová rovina (P_o), nástrojová rovina ostří (P_s), základní nástrojová rovina (P_r), nástrojová rovina normálová (P_n) a literatura [7] uvádí ještě nástrojové roviny největšího spádu čela (P_g) a hřbetu (P_b). Kromě posledních dvou zmíněných jsou roviny naznačené

u jednotlivých pohledů a jejich polohu lze zpětně určit pomocí vyobrazených řezů. Rovina největšího spádu čela je kolmá na základní nástrojovou rovinu, a také na stopu roviny čela (kdy prochází uvažovaným bodem ostří). Rovina největšího spádu hřbetu je kolmá na základní nástrojovou rovinu a rovinu hřbetu (prochází uvažovaným bodem ostří). Rovina největšího spádu čela se vyznačuje maximální hodnotou úhlu čela (γ_g), naopak v rovině největšího spádu hřbetu je úhel hřbetu (α_b) minimální [6, 7].

Měřenými úhly jsou: úhel břitu β , úhel špičky ε , úhel hřbetu α , úhel čela γ , úhel hlavního nastavení ostří κ , úhel vedlejšího nastavení ostří κ' a úhel sklonu břitu λ . Na obrázku je také znázorněn poloměr špičky r a doplňkový úhel nastavení hlavního ostří Ψ . Naopak není zobrazen úhel řezu δ (který je roven součtu úhlů hřbetu a břitu). Úhly vždy musí obsahovat index roviny, ve které byly měřeny [6].



Obrázek č. 3: Nástrojové úhly soustružnického nože (pravého ubíracího) [6].

Nástrojové úhly a roviny uvedené na obrázku č. 3 patří do tzv. nástrojové souřadnicové soustavy využívané zejména pro výrobu a ostření. Dále je využívána pracovní souřadnicová soustava (také nazývána efektivní), která slouží k identifikaci nástrojové geometrie v procesu řezání. Úhly a roviny této soustavy jsou značeny ještě navíc indexem „e” (jinak shodně s nástrojovou souřadnicovou soustavou) [7].

Mimo pracovní nastavení nože lze geometrii břítu nástroje dále upravovat např. utvářeči třísek. Ty mohou mít jednoduchý tvar, v případech, kdy jsou tvořeny příložnou destičkou (také nazývané jako lamače třísek [8]), případně výbrusem (vybroušeným žlábkem nebo schodem) na ploše čela nástroje. Nebo je možné – zejména, ale ne pouze – pro dosažení složitějších tvarů, utvářeče předlisovat při výrobě vyměnitelných břitových destiček (dle [4] bylo využíváno také technologie vyjiskřování) [9].

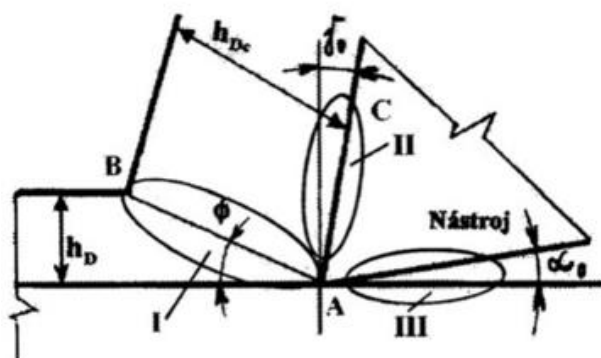
K těmto úpravám tedy dochází buďto za účelem změny geometrie řezného klínu, nebo za účelem změny tvaru plochy čela nástroje. Tvar řezného klínu ovlivňuje tlakové působení nástroje na obráběný materiál a dále souvisí například s velikostí opotřebení nástroje, kvalitou obrobené plochy nebo tuhostí břítu. Plocha čela nástroje má pak zásadní vliv na podobu vznikající třísky. Dochází na ni k dodatečné plastické deformaci, což mnohdy zapříčiní vhodnější utváření (lámání). Na této ploše může také docházet k tvorbě nárůstku, který způsobí zhoršenou kvalitu obrobené plochy, a také nadměrné opotřebení břítu.

3 Teoretický výzkum tvorby třísky

Teoretický (případně podle [1] teoreticko – analytický) výzkum tvorby třísky úzce souvisí s experimentálním studiem. Obě kapitoly se vzájemně prolínají, jak je uvedeno i v [10] – experimentální výzkum může předcházet teoretickému, který se následně snaží zevšeobecnit výsledky studia experimentálního. Při experimentech je tedy cílem sledování a dokumentace dějů odehrávajících se uvnitř obráběného materiálu ve fázi přechodu do třísky. Teoretické studium pak tyto skutečnosti popisuje na základě známých teorií o chování materiálu (např. teorii plasticity).

3.1 Deformace v zóně řezání

Vznik třísky při obrábění je procesem intenzivní plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí. Studium se zde zajímá o tři oblasti deformací: oblast primární plastické deformace, oblast sekundární plastické deformace a oblast plastické deformace obrobeného povrchu (dříve nazývána oblastí terciální plastické deformace). Na obrázku č. 4 jsou tyto oblasti znázorněné [1, 5].



Obrázek č. 4: Oblasti plastických deformací v obráběném materiálu (doplněné charakteristickými kótami řezání): I – oblast primární PD, II – oblast sekundární PD, III – oblast PD obrobeného povrchu [5].

3.1.1 Oblast primární plastické deformace

V oblasti primární plastické deformace dochází k prvotní deformaci obráběného materiálu a vlivem působení smykových napětí také ke změně orientace zrn ve struktuře. Zrna se natáčí do směru působení hlavních smykových napětí o úhel příčně textury². Průchodem oblasti dochází také ke zpevnění materiálu (a s tím souvisejícímu poklesu deformační schopnosti, což může vést až k porušení soudržnosti na výstupní hranici oblasti). Dále vlivem působení plastických deformací v oblasti je zvětšován průřez

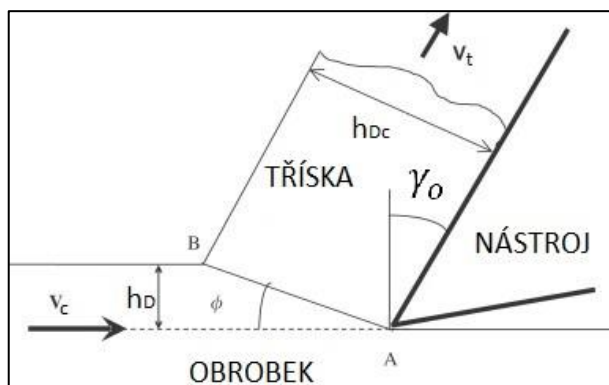
² Na obrázku č. 4 je vyznačen pouze úhel střížné roviny Φ . V případě níže uvedených výpočtových modelů PPD (primární plastické deformace) pro rozšířenou zónu smyku jsou v materiálu dále pozorovány i úhly počátku PPD a konce PPD [1,9].

odebíraného materiálu, délka třísky je menší než délka dráhy nože po čas záběru – dochází k pěchování [1,9].

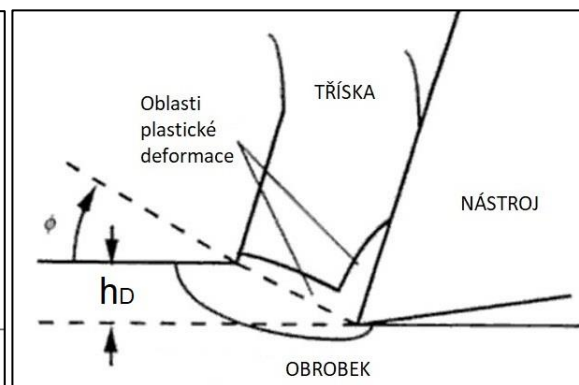
Ve snahách o popsání změn odehrávajících se v oblasti PPD (primární plastické deformace) vznikly mnohé výpočtové modely (2 vybrané viz. obrázky č. 5 a č. 6). Jedna skupina autorů těchto modelů (mezi které patřili např. Time, Tresca, Merchant, Piispanen, Usačev, a další) předpokládala pouze jednu střížnou rovinu, která by představovala oblast PPD. Tyto modely byly ovšem vyvráceny – není možné, aby se rychlost elementu materiálu odřezávané vrstvy skokově změnila (na střížné rovině) co do velikosti i směru. Podobný problém nastal také v případě smykových pnutí, a sice, že v obráběném materiálu až po střížnou rovinu žádné napětí nebylo, když skokově vzrostlo na hodnotu meze kluzu po dosažení střížné roviny. Tedy se oblast PPD nemůže skládat pouze z jediné roviny, ale musí být v materiálu plynulý přechod [1,4].

Některé výukové zdroje (např. [11]) uvádí, že výpočtové modely s jednou střížnou rovinou lze pro zjednodušení využít v případě vysokorychlostního obrábění (z angl. HSC – High speed cutting) z důvodu dostatečného zúžení oblasti PPD (vliv pracovních podmínek na tvar a velikost oblasti viz. text níže). Jiné zdroje (např. [12]) však informují o modelech se zúženou oblastí PPD (např. Oxleyho model), které se jeví jako přesnější.

Druhou skupinou jsou tzv. vyšší teorie tvorby třísky, což je označení pro výpočtové modely uvažující rozšířenou zónou smyku, kdy velikost a tvar deformačních oblastí je určen fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu a reznými podmínkami procesu obrábění. Autory těchto modelů jsou např. Barenblatt se Salganikem, Palmer s Oxleyem, Zorjev, Lee se Shafferem a jiní. Modely spojuje poměrně vysoká míra komplexnosti (např. Barenblatt a Salganik definovali proces obrábění pomocí lomové mechaniky), i přesto dle [1] stále nebylo nalezeno univerzální řešení [1].



Obrázek č. 5: Výpočtový model s jednou střížnou hranou (Merchant) [13].



Obrázek č. 6: Výpočtový model s rozšířenou zónou smyku (Palmer + Oxley) [14].

Podmínkou existence oblasti primární plastické deformace v obráběném materiálu je obrábění plastických materiálů a vznik tvářené třísky. U těchto materiálů se oblast dále mění v závislosti na pracovním prostředí co do velikosti, tak i tvaru [9].

Velikost oblasti je v první řadě závislá na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. A sice čím je obráběný materiál plastičtější (čím snáze se materiál deformuje, příp. čím nižší je velikost kritického smykového napětí), tím je oblast širší – k dosažení meze kluzu dochází ve větší vzdálenosti od břitu a celková deformační schopnost materiálu je vyčerpána po větší celkové deformaci. Dochází také k většímu pěchování třísky [1,9].

Dále je oblast ovlivňována řeznými podmínkami. Zvyšování řezné rychlosti způsobuje zúžení oblasti a její natočení směrem k čelu nástroje. To je důsledek vlivu deformační rychlosti a omezené rychlosti šíření kluzu v polykrystalech. Zvětšením hloubky řezu (příp. posuvu) dochází ke stejnému efektu – průměrnému zúžení oblasti a její natočení směrem k čelu nástroje (k největšímu zpevnění dochází bezprostředně u ostří). Zúžení oblasti s sebou mimo menší pěchování nese i snížení měrného řezného odporu [1,9].

Velmi výrazný vliv má geometrie nástroje, a to zejména úhel čela. Pokud se úhel čela nástroje zvětšuje (tzn. zmenšuje se úhel řezu), oblast se zužuje a natáčí směrem k čelu nástroje. Klesá smykové napětí a úroveň plastické deformace. Totožný vliv má na oblast i zmenšení poloměru ostří [1,9].

Posledním faktorem ovlivňujícím tuto oblast je řezné prostředí – chladicí kapalina. Ta se na řezném procesu může podílet třemi základními způsoby. Rozeznáváme efekt chladící, mazací a řezací. Řezací účinek (u kapalin s povrchově a chemicky aktivními látkami) napomáhá snížení řezné síly a oblast primární plastické deformace zmenšuje. Mazací účinek kapaliny snižuje tření mezi spodní stranou třísky a plochou čela nástroje, což vede k dalšímu snížení řezné síly. Avšak o chladícím účinku nelze jednoznačně rozhodnout, zda oblast zmenšuje, či zvětšuje (záleží na dalších dějích způsobených chlazením – např. tvorba nárůstku nebo změna mechanických vlastností obráběného materiálu) [4,9].

3.1.2 Oblast sekundární plastické deformace

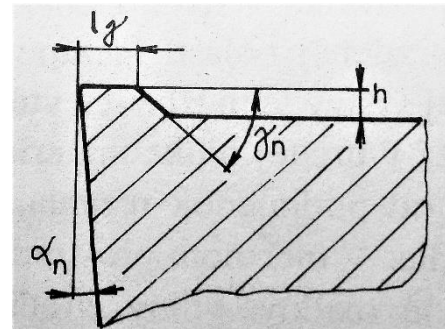
V místě sekundární plastické deformace dochází k intenzivnímu kontaktu spodní strany třísky s plochou čela nástroje. Tříška je zde dodatečně tvářena za vysokých tlaků a teplot. Ke kontaktu mezi nástrojem a obráběným materiálem může docházet dvojitým způsobem. V tomto případě rozeznáváme styk bodový a plošný³. U styku bodového

³ Pokud na čela nástroje dochází ke kontaktu oběma způsoby, je přítomna také přechodová vrstva, která má charakter částečně obou forem styku [9].

dochází k adheznímu spojování obrobku s nástrojem a může se tvořit nárůstek – bodový styk vzniká při nižším mechanickém a tepelném zatížení obrobku. Při styku plošném se na spodní straně třísky tvoří roztavená vrstva materiálu a pro jeho vznik je nutné dosáhnout většího (zejména) tepelného zatížení [1,9].

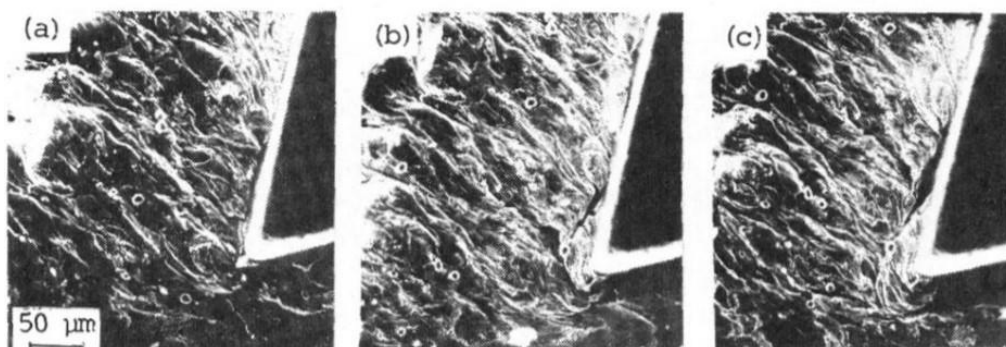
Velikost zatížení je často interpretována pomocí řezné rychlosti, kterou lze z hlediska forem styku mezi nástrojem a obrobkem rozdělit do tří oblastí. Na oblast velmi nízkých řezných rychlostí, kdy obráběný materiál není v plastickém stavu a nevzniká tvářená tříska (oblast sekundární plastické deformace není soudržná). Dále na oblast řezných rychlostí, kdy dochází k bodovému styku (dle [5] při běžných podmínkách obrábění 18 až 72 m/min). A nakonec oblast vyšších řezných rychlostí, kdy dochází ke styku plošnému [4].

S výše zmíněným souvisí mj. také tvorba nárůstku. Nárůstek (v anglické literatuře BUE – build up edge) představuje vrstvu (příp. několik vrstev na sobě) obráběného materiálu, který je adhezně spojený s čelem nástroje. Pozitivum, které nárůstek přináší je, že zastává funkci řezné hrany a teoreticky by tak mohl způsobit nižší opotřebení nástroje. O této vlastnosti je napsáno např. v literatuře [4], kde je popsán experiment, ve kterém byly provedeny úpravy plochy čela za účelem stabilizace vytvářeného nárůstku. Úprava je znázorněna na obrázku č. 7 – nástroj má zkrácenou plochu čela na délku l_γ a zkosení na konci plochy čela o velikosti γ_n , které je větší než úhel směru odchodu třísky. Pokud se tedy vytvoří nárůstek, tříska se vůbec nemusí dostat do kontaktu s nástrojem. Takto bylo dosaženo stabilního nárůstku až do rychlosti 200 m/min [1, 4].



Obrázek č. 7: Úprava čela nástroje pro stabilizaci nárůstku [4].

Tvorba nárůstku je zachycena na sérii fotografií v obrázku č. 8. Z obrázku je patrné, že nárůstek mění geometrii nástroje, a tím výrazně zasahuje do pracovních podmínek. Pokud by série snímků (od vzniku přes růst nárůstku) pokračovala, patrně by následující



Obrázek č. 8: Snímky tvorby nárůstku [8].

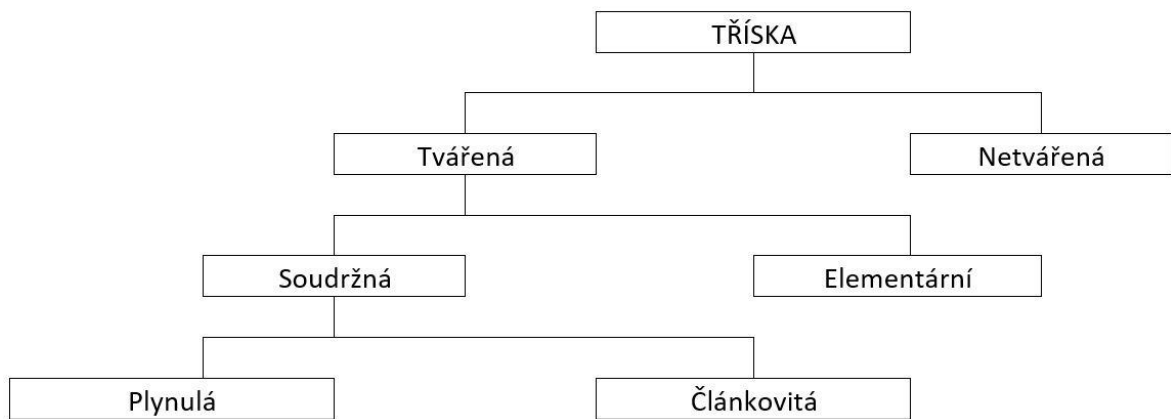
řezu. Ta je před zahájením obrábění ve výšce a_{min} (v pravé části obrázku ji představuje bod A) a po vytvoření třísky se – v důsledku plastických deformací a posunutí největších napětí – změní na výšku a'_{min} (představovanou bodem B). Část materiálu (který není odřezáván) prochází pod břitem a je plasticky i elasticky deformován (za nástrojem dochází k jeho odpružení do výšky l_2) [9].

V povrchové vrstvě nedochází pouze k výše zmíněnému odpružení materiálu, ale vyhodnocuje se zde také zpevnění, příp. zbytková pnutí. Na obrázku č. 9 je zachyceno jakou mírou se na výsledném povrchu podílí primární plastická deformace (pomocí kót l_1 a l_3). Výsledné vlastnosti povrchu jsou dány vzájemnou kombinací zatížení mechanického, tepelného a případně proběhlými fázovými změnami. Zbytková pnutí způsobená čistě mechanickým zatížením jsou tlakového charakteru. Tato pnutí v povrchové vrstvě mají následně kladný vliv zejména na cyklicky namáhané součásti. Vznikají např. při sousledném frézování, nebo za účelem jejich dosažení bývají zařazeny do procesu výroby součástí dodatečné operace – např. hlazení. Čistě tepelné působení (ohřívání povrchu vlivem výroby) způsobuje naopak pnutí tahová. Taková jsou nežádoucí, jelikož na povrchu „rozevírají“ trhliny a jsou výsledkem velkého množství technologií obrábění (jako např. broušení). Při konvenčním obrábění ovšem nepůsobí čistě tepelné zatížení a výsledná pnutí – jak bylo zmíněno – jsou dána vzájemnou kombinací působení většího množství vlivů [9].

3.2 Tvorba třísky

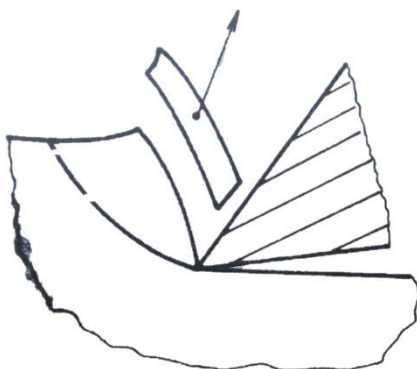
V kapitole věnované primární (a následně také sekundární) plastické deformaci je uvedena jako podmínka vzniku souvislé oblasti – obrábění plastických materiálů (tedy vznik třísky tvářené). Výzkum spojený s tvorbou třísky je obecně zaměřen především na sbírání poznatků při obrábění plastických materiálů. Tato skutečnost je způsobena tím, že v případě netvářené třísky nezpůsobuje její odchod z místa řezu, její dělení a skladování významné obtíže. Taková tříska vzniká např. při obrábění keramiky nebo hornin (zpravidla křehké materiály) [9].

Tříska je tak v první řadě rozdělována na tvářenou a netvářenou. Tvářená se následně ještě dělí – jak je zachyceno obrázkem č. 10 – na soudržnou a elementární, kdy soudržná tříska může být plynulá, příp. článkovitá. O tom, který druh třísky bude vznikat rozhodují především vlastnosti obráběného materiálu, dále ale také řezné podmínky a geometrie břitu nástroje [8, 9].

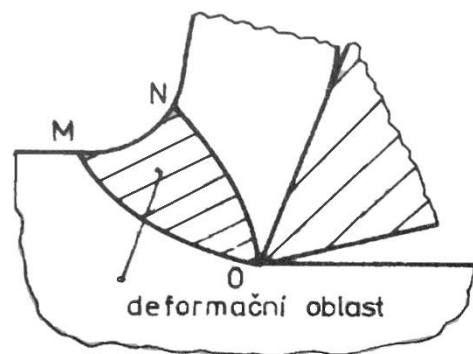


Obrázek č. 10: Schéma dělení třísky [9].

Tříška elementární vzniká, pokud odebíraný materiál při průchodu oblastí primární plastické deformace dosáhne meze pevnosti v tahu. Dojde k porušení kohezní pevnosti a elementy třísky odletují od břitu nástroje. Tvorba této třísky je nejvýhodnější z pohledu objemu zabírajícího třískou (jednotlivé elementy jsou velmi skladné) a ani nepůsobí negativně na řezný proces. Elementární tříška vzniká např. při obrábění litin (a obecně materiálů s nižší mezí pevnosti v tahu) [1, 9].



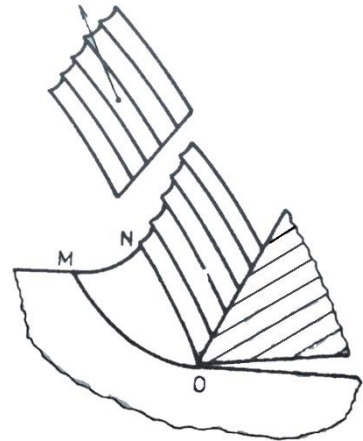
Obrázek č. 11: Elementární tříška [9].



Obrázek č. 12: Plynulá tříška bez viditelného kluzu [9].

Protipólem elementární třísky z pohledu skladu je tříška plynulá. Tyto třísky zabírají velký objem, navíc při jejich tvorbě může docházet k poškození obrobku, příp. nástroje vlivem jejich délky a pohybu uvnitř stroje. Při průchodu odebíraného materiálu oblastí PPD (primární plastické deformace) buďto může, nebo nemusí dojít k dosažení meze kluzu, a v závislosti na tom následně vznikají, nebo nevznikají na vnější straně třísky stopy po kluzu jednotlivých elementů (tzv. pilovitá, příp. vlnitá tříška). Mezi jednotlivými elementy tedy dochází k porušení soudržnosti až při další deformaci [1, 9].

Tříška článkovitá tvoří přechod mezi těmito dvěma extrémy (třískou elementární a souvislou). Její články bývají složené z několika elementů, mezi kterými při průchodu oblastí PPD dochází sice ke kluzu, ale jejich soudržnost není vždy porušena. K jejímu porušení dochází až dalšími vlivy, jako např. působení vlastní hmotnosti třísky, kontakt třísky s nástrojem, obrobkem, či strojem. Případně může docházet k oddělování článků vlivem chlazení [9].



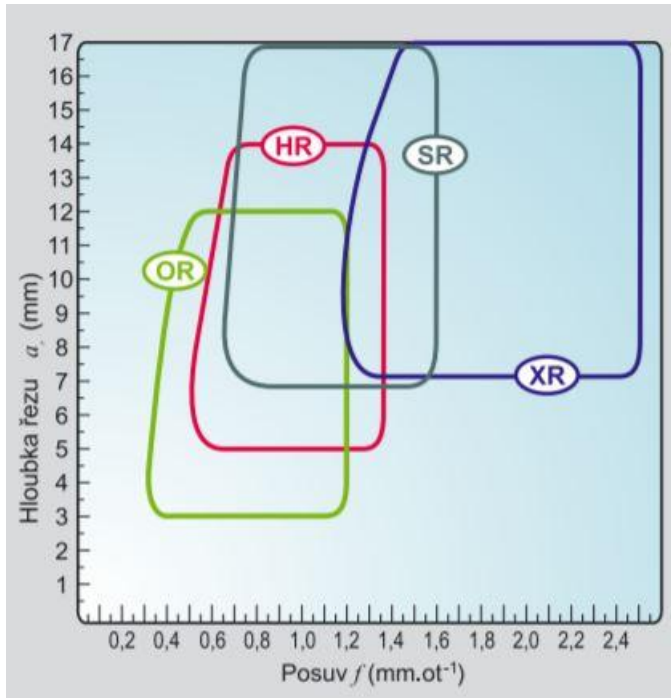
Obrázek č. 13: Článkovitá tříška [9].

Tvary třísek jsou popsány normou ISO 3685, která zavádí jejich tříčíselné označení. První číslice udává jeden z osmi tvarů třísek. Druhá patří podskupině vyjadřující délku, případně míru zapletení třísek a třetí číslice symbolizuje buďto směr odchodu třísky, nebo místo, kde dochází k jejímu lámání [6].

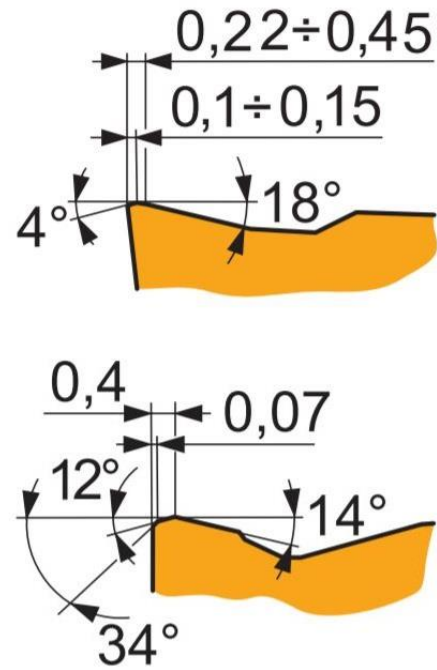
3.2.1 Vliv řezných podmínek

V literatuře [6] je na příkladu soustružení obrobku z materiálu 100CrMn6 pomocí nástroje P20 (a řeznými podmínkami: hloubkou řezu $a_p = 1$ mm a posuvem $f = 0,2$ mm/ot) ukázáno, že se zvyšující řeznou rychlostí dochází k menšímu stupni tváření a tříška je souvislejší. V tomto konkrétním případě je tříška vhodně utvářena (z pohledu skladu) až do rychlosti 45 m/min. Následně se tvoří tříška plynulá a při rychlosti 300 m/min dokonce tříška stužková (rovná) dlouhá [6].

Vliv hloubky řezu a posuvu bývá znázorněn oblastmi vhodného utváření v utvářecích diagramech (literaturou [9] uváděných jako grafy hloubky řezu v závislosti na posuvu, v literatuře [6] naopak – posuv jako funkce hloubky řezu). Tyto diagramy jsou stanovovány experimentálně – pro konkrétní pracovní podmínky se vizuálně posuzuje tvar utvářené třísky. Příklad takového diagramu je na obrázku č. 14. Obsahuje několik oblastí vhodného utváření v závislosti na použitém utvářeči. Tento diagram je vytvořen pro konkrétní systémy upnutí vyměnitelných břitových destiček, podmínky „těžkého hrubování“ a pravděpodobně je platný pouze pro omezený rozsah řezných rychlostí [9, 15].



Obrázek č. 14: Oblasti vhodného utváření pro vybrané utvářeče [15].

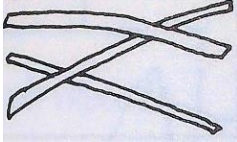
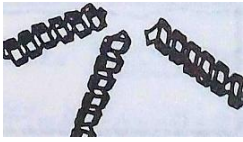

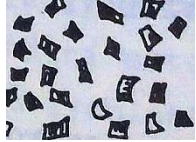


Obrázek č. 15: Dvě možné podoby utvářečů (nahore utvářeč OR, dole HR) [16].

3.2.2 Objemový součinitel třísek

Výše popisovaná vhodnost utváření, případně utváření třísky z pohledu skladu je vyjádřením objemového součinitele třísek. Ten udává poměr objemu „volně uložené“ třísky ku objemu materiálu, ze kterého tříska vznikla. Očekávané hodnoty objemového součinitele pro vybrané tvary třísek jsou uvedeny v tabulce č. 1. Literatura [6] uvádí experimentálně zjištěné hodnoty součinitele např. u obloukové spojené třísky, kde se oba zdroje shodují na hodnotě 8. Dále jsou však hodnoty z [6] mírně optimističtější – např. u vinuté krátké třísky (kde hraje velkou roli počet závitů) došlo „pouze“ o 26násobné zvětšení objemu. Hodnoty v tabulce č. 1 tedy nelze brát jako vyčerpávající [6, 17].

Tabulka č. 1: Vybrané tvary třísek a běžná velikost jejich objemového součinitele [17].

Tvar třísky				
	Stužková dlouhá	Vinutá krátká	Oblouková spojená	Elementární
Objemový součinitel w	400 (a více)	40 – 60	8 – 10	4 – 6

Za účelem dosahování co možná nejpříznivějších tvarů třísek jsou vyvíjeny výše zmíněné utvářeče. Dva vybrané jsou uvedeny na obrázku č. 15. Tyto jsou předlisované na vyměnitelné břitové destičky, jejichž výrobci nabízejí velké množství variant geometrií utvářečů, ze kterých si uživatel volí podle konkrétní aplikace [16]. Dále je možné za účelem dělení třísky na menší části využít tlakového přívodu chladicí kapaliny – o tlaku přibližně 80 MPa [18].

Literatura [6] popisuje mj. i souvislost mezi kmitáním nástroje a objemovým součinitelem třísky. Uvádí, že při velkých a častých výkyvech řezné síly je utvářena tříska s vhodnějším tvarem. Také popisuje několik typů nástrojových držáků, které účelně vnášejí stupeň volnosti nástroje do procesu obrábění – a tak umožní nástroji kmitat. Držáky byly úspěšně otestovány, objemový součinitel nově utvářené třísky dosahoval nižších hodnot, a dokonce bylo naměřeno menší opotřebení nástroje [6].

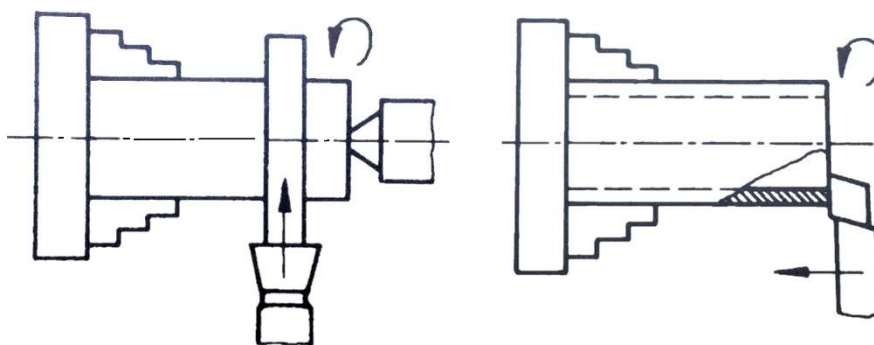
4 Experimentální studium v procesu tvorby třísky

Probíhající experimenty ve studiu tvorby třísky jsou jeho nepostradatelnou součástí. Jsou využívány napříč celou problematikou obrábění (např. studium silových nebo tepelných jevů apod.). V případě tvorby třísky bychom experimentální studium mohli zjednodušeně dělit na 1) studium tvaru třísky, 2) studium plastických deformací a stavu napjatosti a 3) zpevnění obrobeného povrchu [17].

Studiu tvaru třísky byla věnována kapitola výše. Na vzniklé třísce bývá tedy hodnocen její tvar – vizuálním hodnocením i hodnocením pomocí objemového součinitele třísky. Dále oblast vhodného utváření, nebo koeficient pěchování coby poměr tloušťky třísky ku tloušťce odřezávané vrstvy. Vlastnost pěchování také byla výše zmíněna v úzké souvislosti s primární plastickou deformací [1].

4.1 Studium plastických deformací

Z plastických deformací jsou sledovány tři oblasti (shodné s kapitolou mechaniky tvorby třísky). Pro tato studia obvykle bývá využito ortogonálního řezání, které často vyžaduje úpravy obrobků na základě předpokladů („délka ostří je větší než šířka odřezávané vrstvy“). Na obrázku č. 16 jsou znázorněny obrobky vhodné pro tento případ obrábění – vlevo pro radiální (zapichovací) soustružení, vpravo pro podélné soustružení [17].



Obrázek č. 16: Úpravy obrobků pro ortogonální řezání [17].

Změny odehrávající se v obráběném materiálu jsou pozorovány buďto přímo během procesu řezání (v takových případech jde o studium změn probíhajících), nebo až po jeho přerušení (studium změn ukončených). V obou případech je možné pozorovat tzv. makrozměny nebo mikrozměny – v závislosti na velikosti sledovaného objemu [17].

4.1.1 Studium změn probíhajících

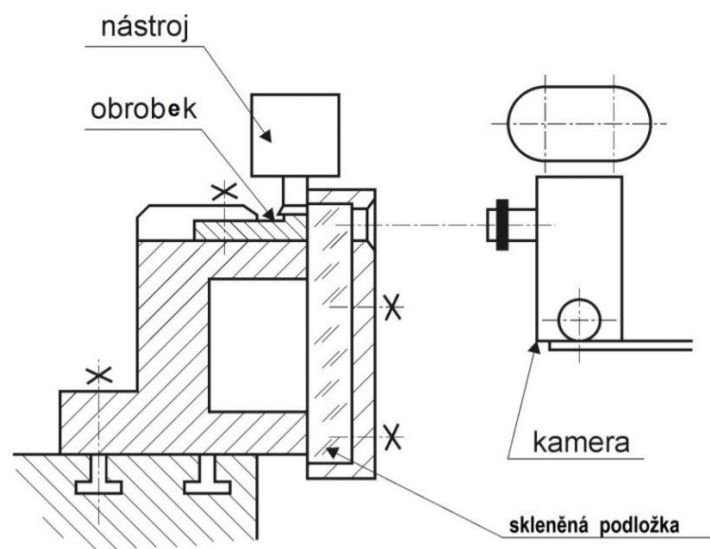
Přímé pozorování procesu obrábění s sebou nese poměrně vysoké nároky na záznamovou techniku a přípravu obrobků. Největší obtíže při tvorbě záznamů způsobují tyto charakteristiky procesu: vysoká deformační rychlost, vysoká rychlost ohřevu

deformovaného materiálu a velmi intenzivní a nerovnoměrná deformace. Z těchto důvodů jsou přímá pozorování prakticky omezena řeznou rychlostí (byla provedena pouze při nízkých rychlostech), avšak i přesto byla pozorování provedena i v mikroskopických objemech – o velikosti odpovídající řádově velikosti zrna [17].

4.1.1.1 Přímé pozorování mikroskopických změn

Aby bylo možné provést pozorování tak malých objemů obráběného materiálu, které odpovídají velikosti zrna, je zapotřebí důkladná příprava vzorku. Ta spočívá ve zhotovení metalografického výbrusu na sledované straně obrobku a jeho následná fixace do přípravku (u malých vzorků dochází k zalití pryskyřicí) [17].

Princip pozorování je zachycen na obrázku č. 17. Obrobek i nástroj jsou natlačeny na skleněnou podložku, která zajišťuje, že při obrábění nedojde k vybočení snímané roviny obráběného materiálu. Nástroj v tomto případě koná přímočarý pohyb a kamerou je snímána oblast primární plastické deformace. Přitom kamera musí dosahovat snímkové frekvence přibližně 4000 snímků za vteřinu – jde o vysokorychlostní kamery, často nazývané jako časové lupy (z něm. die Zeitlupe) [1, 17].



Obrázek č. 17: Sestava pro přímé pozorování mikroskopických změn [8].

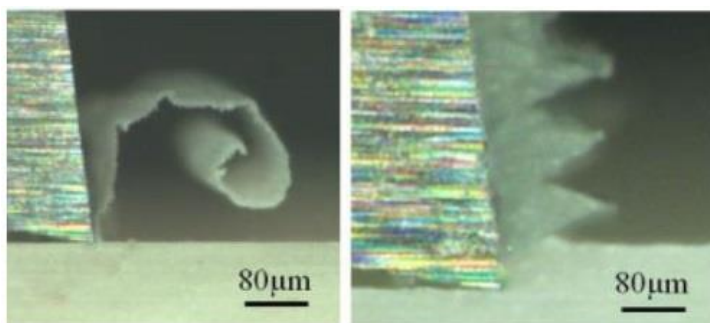
Další problémy, se kterými se přímé pozorování potýká je nastavení hloubky ostrosti a velikosti zvětšení. Oba tyto parametry musí být voleny se zřetelem na chvění vznikající při obrábění – v závislosti na schopnosti konstrukce jeho eliminace byla realizována pozorování při řezných rychlostech v rozmezí 10 a 30 m/min [17].

Příklad přímého pozorování mikroskopických změn při tvorbě nárůstku byl uveden výše – obrázek č. 8.

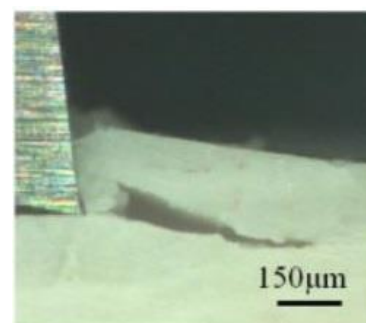
4.1.1.2 Přímé pozorování makroskopických změn

Pozorování deformace probíhající ve větším objemu (pozorovatelné pouhým okem, případně pomocí malého zvětšení [17]) stále vyžaduje použití výkonných kamer⁴. Ani příprava obrobků, ani sestava pro sledování ovšem nejsou tak náročné. Příprava obrobků se v tomto případě sestává „pouze“ z nanesení obrazcové sítě na pozorovanou plochu – může to být mřížka, kruhy nebo např. rovnoměrně rozprostřené vpichy tvrdoměru. Ze zdeformované sítě je následně určen směr hlavní deformace a poměrný kluz. Sestava pro pozorování nemusí obsahovat žádné další součásti (jako je např. skleněná podložka). Je tedy možné sledovat změny při „běžném provozu“ (s ohledem na ustavení kamery a předpoklady ortogonálního obrábění) [1, 10].

Příklad snímků makroskopických změn jsou na obrázcích č. 18 a 19. V těchto případech ovšem nebylo účelem sledovat oblast primární plastické deformace, neb livl tloušťky odřezávané vrstvy na tvar vznikající třísky. Obráběna byla kost při tloušťkách odřezávané vrstvy 5, 40 a 150 μm . Řezná rychlost byla volena 33 mm/min (0,03 m/min) pro udržení teploty obrábění pod 50 °C [19].



Obrázek č. 18: Přímé pozorování tvaru utvářené třísky (vlevo pro tloušťku odřezávané vrstvy 5 μm a vpravo pro 40 μm) [19].



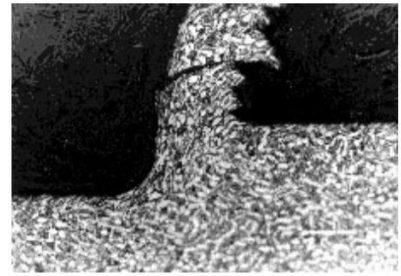
Obrázek č. 19: přímé pozorování tvaru utvářené třísky (pro tl. odřezávané vrstvy 150 μm) [19].

4.1.2 Studium změn ukončených

Vlivem limitujících faktorů přímého pozorování dochází k náročnému získávání výsledků, a také k jejich zkreslení vlivem úpravy řezných podmínek. Během studia změn ukončených nedochází ke zkreslení úpravou pracovních podmínek a provedení přerušení řezu – získání kořene třísky (který byl sledován časovou lupou) – není tak náročné. Z tohoto důvodu bylo významné množství poznatků o procesu tvorby třísky získáno právě přerušením. Vystává zde ovšem potřeba zkonstruování přerušovače a vyhodnocení (následující po přerušení řezu).

⁴ Dle zdroje [17] je možné použití optického mikroskopu. Ovšem jen za předpokladu velice nízkých řezných rychlostí za účelem pozorování spíše instruktážního charakteru.

Kořenem třísky je část obráběného materiálu s připojenou právě vznikající třískou za určitých podmínek obrábění. Kořen třísky pro vyhodnocení nesmí být porušen a musí na něm být zachyceny změny, které odpovídají podmínkám obrábění – přerušení řezu musí být okamžité. Za tímto účelem jsou využívány přerušovače řezu [17].



Obrázek č. 20: Kořen třísky [8].

Přerušovače jsou zařízení, která náhle ukončí (přeruší) proces řezání. Rychlost přerušení musí být rovna rychlosti řezné (případně vyšší), aby došlo ke „zmrazení“ probíhajících změn v kořeni třísky. Přerušení může být provedeno buď ze strany nástroje, nebo ze strany obrobku [1,17].

4.1.2.1 Přerušovače řezu na straně obrobku

Přerušení řezu ze strany obrobku může být provedeno jeho oddálením od nástroje proti směru řezného pohybu, zastavením (zmrazením) celého řezného procesu (vlivem obrobku – např. jeho uvolněním a následným protočením na trnu, viz. níže) nebo vytržením upravené části obrobku [4, 17].

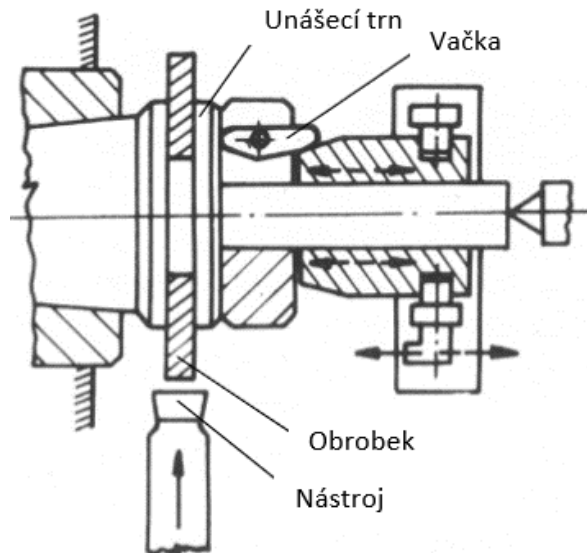
4.1.2.1.1 Přerušení oddálením obrobku

Přerušovače založené na principu oddálení obrobku z místa řezu využívají nejčastěji energii získanou z výbuchu [20, 21]. Dále může být využito např. elektromagnetu [22], nebo speciálního upínacího systému obrobku u technologiích, kdy obrobek nekoná hlavní řezný pohyb (např. u broušení) [23]. Pro případ soustružení jsou přerušovače fungující na tomto principu (oddálení obrobku od nástroje) tedy nevhodné – soustružený materiál je vždy upnut v ose sklíčidla a k umožnění jeho pohybu (změně polohy celé osy) by pravděpodobně bylo nutné vyvinout nový stroj.

4.1.2.1.2 Přerušení zastavením procesu

Okamžité zastavení pohybu obrobku (a tím i celého řezného procesu) má nejširší oblast použití – z pohledu řezných rychlostí – u technologiích jako je hoblování (kdy obrobek vykonává hlavní řezný pohyb přímočarý vratný) [24]. Schéma tohoto typu přerušovače pro soustružení (kdy obrobek koná hlavní řezný pohyb rotační) je na obrázku č. 21. Obrobek prstencového tvaru je uchycen na trnu a rotační pohyb je na něj přenášen pomocí unašeče. Sevření unašeče je definováno polohou vačky, která se zase odvíjí od pravé (pohyblivé) části přerušovače. V případě, že dojde k odsunutí pravé části, vačka se pootočí, povolí sevření unašeče a obrobek se protočí na trnu (čím se zastaví celý proces) [8].

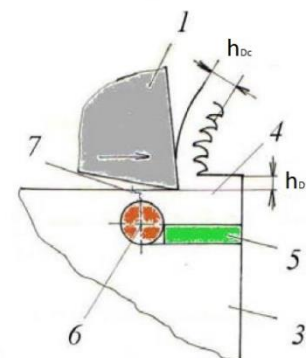
Tento přerušovač je vhodnější pro nižší řezné rychlosti (popř. pro soustružení závitů). Obráběný materiál musí být upraven do prstencového tvaru, a musí být vyřešen mechanismus rozepnutí unašeče [8].



Obrázek č. 21: Přerušení pomocí zastavení procesu [8].

4.1.2.1.3 Přerušení vytržením segmentu

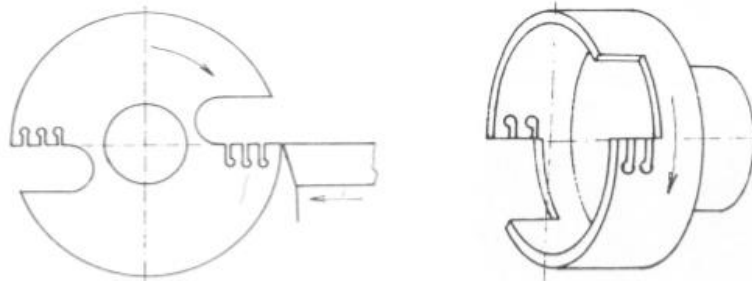
Princip přerušení řezu vytržením segmentu je znázorněn na obrázku č. 22. V průběhu obrábění – nástrojem (1) – se zmenšuje nosný průřez segmentu (7) a v okamžiku, kdy napětí (v nosném průřezu) vyvolané řeznou silou přesáhne hodnotu meze pevnosti v tahu obráběného materiálu (3), dojde k vytržení segmentu (4). Ten je následně vymrštěn ve směru řezné síly. Proti předčasné deformaci vzorku se do drážky vkládá planparalelní destička (5) a do otvoru je vložen drát (6) pro zajištění odvodu tepla [6].



Obrázek č. 22: Vznik kritického průřezu [6].

Tento způsob přerušení procesu byl objeven při pozorování třísek tvořících se během obrábění technologiemi přerušovaným řezem (např. obrážení) – bylo zjištěno, že na třískách odtržených i s obráběným materiálem (vytrhávání materiálu z hran) je možné zkoumat jejich neporušený kořen. Způsob má i více variací, např. se při úpravě obrobků neřeže drážka – jen dochází k vrtání otvoru, který musí být dostatečně blízko hraně obrobku, aby po přetržení nosného průřezu došlo k vylomení segmentu [6].

Jde o univerzální princip, který je využíván napříč technologiemi obrábění. Experimenty mohou být prováděny bez složitějších přípravků a úprav pracovního prostoru stroje. Nevýhodou je nutná příprava obrobků (obráběním a kontrolou předčasné deformace) a zachycení segmentů po vytržení. Vytržené části mohou být zachyceny např. do plechového boxu s molitanovým dnem [8, 25].



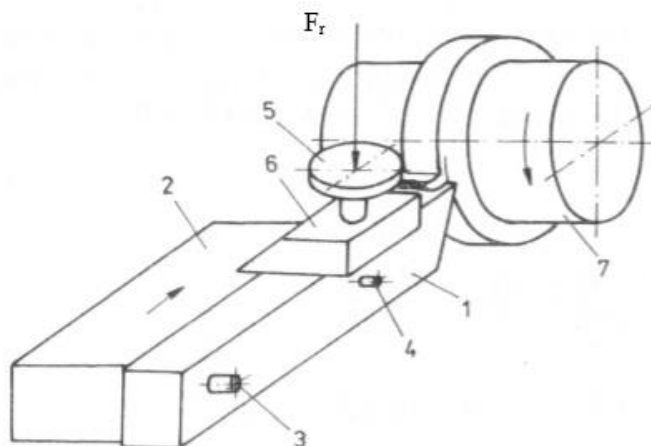
Obrázek č. 23: Úprava obrobků pro přerušování pomocí vytržení segmentu. Vlevo pro radiální a vpravo pro axiální soustružení [8].

4.1.2.2 Přerušovače řezu na straně nástroje

Konstrukce této skupiny přerušovačů se nejběžněji soustředí na vývoj speciálního nožového držáku, který ve vhodnou chvíli umožní nástroji opustit místo řezu a zároveň mu udělí dostatečné další zrychlení. Může jít ale také o úpravu celého (monolitního) nástroje – v případě přerušování jeho destrukcí.

Jak je zde naznačeno, může se tedy jednat o přerušovače destrukční (kdy vlastní přerušování způsobí cílená destrukce některé z jeho částí), nebo o přerušovače nedestrukční (v případě, kdy opuštění nástroje místa řezu není podmíněno cílenou destrukcí žádné z částí přerušovače, a je tak umožněno vícenásobné použití) [17].

Základní princip funkce skupiny přerušovačů na straně nástroje je uveden na obrázku č. 24. V průběhu obrábění dojde k vyvození síly F_r na úderník (5). Síla způsobí přestřižení kolíku / podpěry (4), nástroj (1) se pootočí kolem otočného čepu (3) a zachovalý kořen třísky zůstane na obrobku (7). Tímto způsobem by se jednalo o destrukční princip. Pro případ nedestrukčního principu by ve druhém kroku nedošlo k porušení kolíku / podpěry (4), ale pouze k jejímu vysunutí. Zbývající kroky by byly uskutečněny stejným způsobem [8].



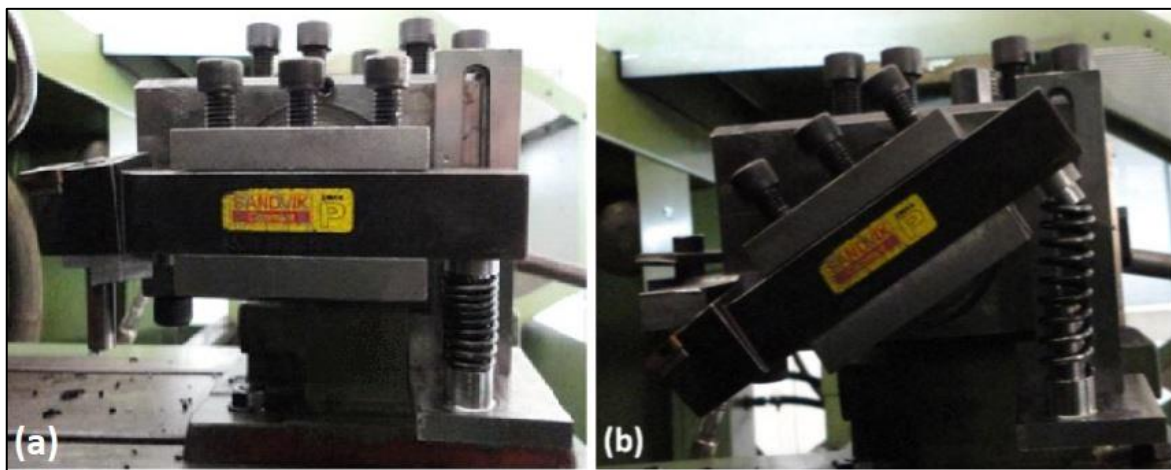
Obrázek č. 24: Schématické zobrazení přerušovače na straně nástroje [8].

Vyvození síly F_r , případně mechanismus odstranění podpěry jsou realizovány různými způsoby, podle kterých budou přerušovače dále rozděleny.

4.1.2.2.1 Přerušovače řezu využívající pružin

Pro rychlé vyvedení nástroje z řezu jsou nejběžněji využívány mechanismy akumulující energii prostřednictvím pružin. V těchto případech je oblast použití (z pohledu řezných rychlostí) dána tuhostí právě zvolené pružiny. Tento údaj přesto není ve většině publikací zmíněn, a proto je nutné vždy oblast použití konkrétního přerušovače stanovit buď výpočtem nebo experimentálně. Následující uvedené řezné podmínky provedených pokusů mají tedy spíše ilustrativní charakter.

Přerušovač typické konstrukce byl zkonstruován a experimentálně otestován např. Pereirou (společně s dalšími autory) [26]. Funkce je zachycena na obrázku č. 25. Přední část nástroje (v tomto případě držáku vyměnitelných břitových destiček) je podepřena „spouští“, na kterou navazuje ručně ovládaná páka (a ta také spoušť uvádí v činnost). Samotný nástroj je uchycen v „sekundárním“ držáku nástroje uloženého na rotačním čepu



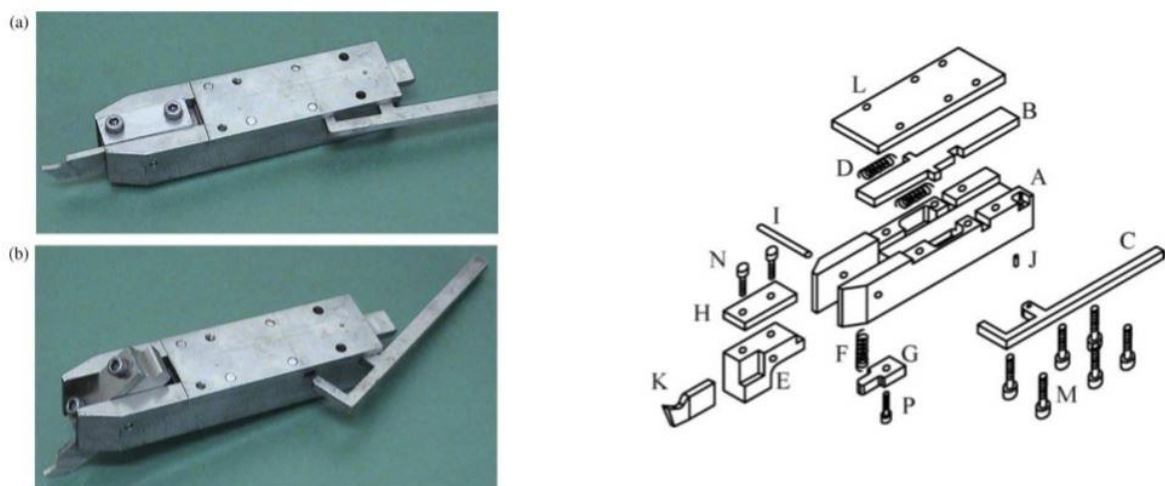
Obrázek č. 25: Přerušovač dle Pereiry, a) před spuštěním; b) po spuštění [26].

základny celé sestavy. Základna je uložena v „primárním“ držáku nástrojů (původní nožová hlava stroje). Zadní část nástroje je podepřena pružinou [26].

Systém se aktivuje tahem za páku, čím dojde k odsunutí spouště. V tom okamžiku se energie akumulovaná v pružině uvolní, což způsobí natočení sekundárního držáku okolo otočného čepu [26].

Tento konkrétní přerušovač byl experimentálně využit při řezné rychlosti 104 m/min, hloubce řezu 2 mm a posuvu až 0,32 mm/ot. Lze ho tedy využít i při vyšších řezných rychlostech a konstrukčně není příliš složitý. V tomto případě byla ale celá sestava upnuta do nožové hlavy konvenčního soustruhu (v případě číslicově řízeného stroje by pravděpodobně vyvstala potřeba upravit systém upnutí). Dále – jak bylo výše zmíněno – by pro obrábění vyššími řeznými rychlostmi bylo zapotřebí volit pružinu o vyšší tuhosti (což by mohlo zapříčinit nutnost dalších konstrukčních úprav).

Další nedestrukční přerušovač funguje stejným způsobem. Je kompaktnější, ale předpokládá se od něho využití pružiny s nižší tuhostí (vlivem menšího prostoru). Na obrázku č. 26 je jeho snímek a ukázka komponent sestavy. Přerušení řezu je v tomto případě zahájeno pákou (C), která se v těle držáku (A) otáčí okolo své osy (J). Na páku navazuje posuvný element (B), uložený v drážkách těla držáku. Ve chvíli rozpojení páky s posuvným elementem dojde k jeho posunutí v drážkách pomocí stlačených pružin (D), což uvolní sestavu nástroje (složenou z částí K, E, H, N), a ta se vlivem řezných sil a pružiny (F) pootočí okolo své osy (I) [27].



Obrázek č. 26: Nedestrukční přerušovač dle [27].

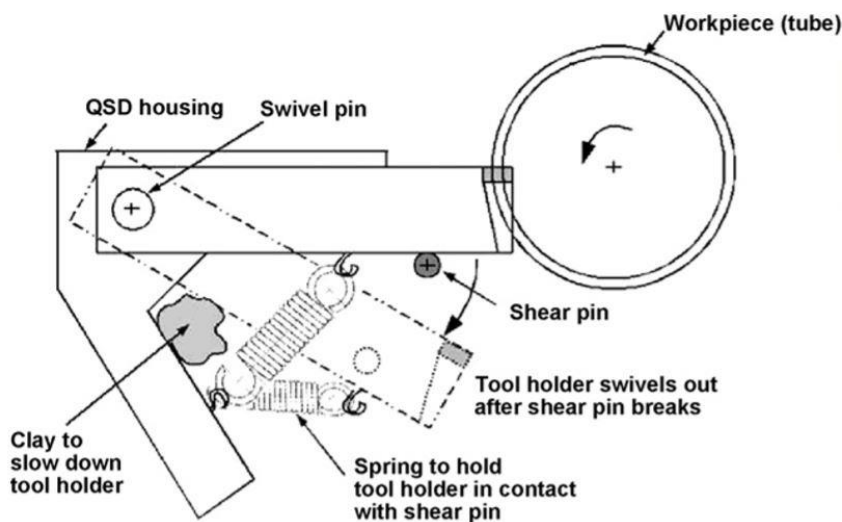
Zařízení bylo vyrobeno z korozi-vzdorné oceli a použito pro obrábění oceli AISI 1017 (ČSN 12 020) zapichovacím způsobem při rychlostech od 14 do 46 m/min a posuvech od 0,101 do 0,191 mm/ot. V tomto případě přerušovač plnil svou funkci i po více než 100 použitích [27]. Dále byl tento princip přerušovače využit pro obrábění slitiny hliníku řady

5000. Jednalo se o podélný způsob soustružení rychlostmi od 12 do 25 m/min, posuvem 0,16 mm/ot a hloubkou řezu 0,5 mm [28].

V těchto případech (literatur [27, 28]) nebyly polotovary nijak výrazně technologicky upravovány a vzorky následně oddělovány pomocí strojní pily. Tímto způsobem docházelo k odřezávání vzorků o objemu i více než 200% než bylo potřeba k provedení experimentu přerušení (což se jeví v porovnání s jinými publikacemi – kde bylo využito např. drátového řezání – jako nevhodné). Za zmínku také stojí složitost sestavy, která je složena celkem z devíti nenormalizovaných dílů. Pravděpodobně na díly nejsou kladeny výjimečné nároky z pohledu přesnosti, přesto je v porovnání s ostatními konstrukcemi složitější.

Otestován za vyšších řezných rychlostí byl např. přerušovač, jehož konstrukce je na obrázku č. 27. Obráběna byla slitina hliníku A12024 – T3, a sice rychlostí 150 m/min (autoři vhodnost použití čerpají z dřívějších publikací a uvádí zrychlení nástroje po přerušení řezu $1,65 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ jako dostatečné). Ostatní řezné podmínky byly voleny v závislosti na použitém nástroji [29].

K přerušení řezu dojde po úderu kladiva, které způsobí přestřížení kolíku. Následně je nástroj stažen pružinou a zbrzděn tlumící vložkou (na obrázku je zmíněn jíl, ale může být použita i např. plastelína) [29, 30].

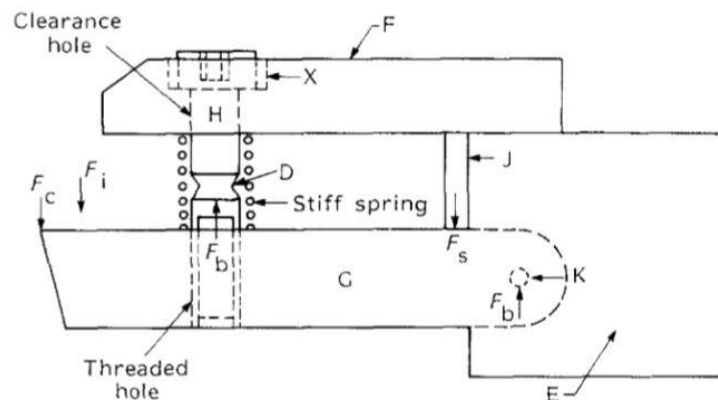


Obrázek č. 27: Destrukční přerušovač dle [29].

V zásadě kombinací posledních dvou uvedených konstrukcí bychom byli schopni sestavit přerušovač popsáný v [31]. Ten pro pootočení nástroje okolo čepu využívá posuvného mechanismu, proto patří mezi nedestrukční. Zároveň je ale nástroj stahován pružinou směrem dolů, díky čemu může být umístěna mimo omezený prostor vlastní sestavy (což umožňuje využití větší, silnější, pružiny). Tento konkrétní přerušovač byl využit

pro experimenty velmi jemného soustružení (z angl. ultra – precision cutting) při řezných rychlostech 2,6 mm/s (0,156 m/min) a hloubkách řezu do 10 μm [31].

Další z destrukčních přerušovačů je schematicky zobrazen na obrázku č. 28. Jeho experimentálnímu použití ale musí předcházet analýza sil působících na nástroj v průběhu obrábění. Dochází zde totiž k porušení soudržnosti šroubu (H) v místě vrubu (D). Prakticky byl okamžik přerušování určován přepětím šroubu během soustružení (utahováním). Po roztržení šroubu došlo k odtlačení nástroje pomocí řezné síly a tlaku vyvolaného pružinou [32].



Obrázek č. 28: Destrukční přerušovač dle [32].

Článek se věnuje analýze sil působících na nástroj a době jeho opuštění místa řezu za použití této konstrukce. Také informuje o nutném vychýlení nástroje z osy řezu v případě přepětí šroubu pomocí jeho utahení. Hlavní předností přerušovače je (dle autora článku) jeho jednoduchá konstrukce. Byl experimentálně otestován při obrábění rychlostmi do 17,9 m/min, posuvech do 0,3 mm/ot a hloubkách řezu do 0,8 mm [32].

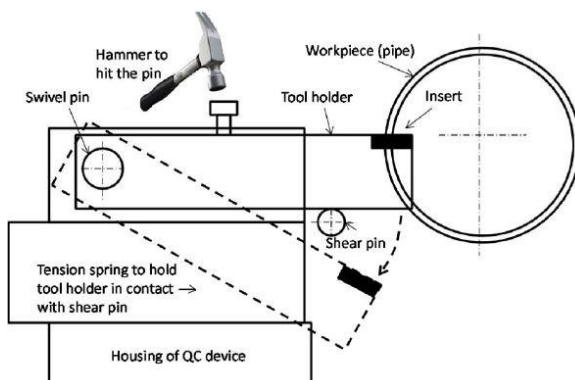
O dalším možném konstrukčním provedení přerušovačů informuje např. literatura [33], kde je držák nástroje upevněn ze strany pomocí otočného čepu a střížného kolíku. Střížný kolík je dimenzován tak, aby se porušil při vyvození tlaku pružiny zpod nástroje. Pružina je ovládána magnetickým polem, což umožní snazší sestavení a lépe načasovat moment přerušování. Střížný kolík má také za funkci nastavení úhlu čela (v pěti možných pozicích). Přerušovač byl sestaven pro účely výuky – s nároky na jednoduchou ovladatelnost (jednočlenná obsluha, časová nenáročnost) a komplexnost (různé úhly čela) [33].

4.1.2.2 Přerušovače řezu využívající nárazu

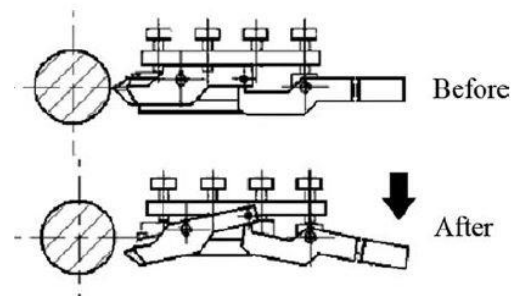
Již bylo výše zmíněno, že pro porušení střížného elementu sestavy přerušovače bývá použito např. kladivo. V případě pružinových konstrukcí je dodatečné zrychlení pro opuštění místa řezu uděleno právě pružinou, dále budou uvedeny mechanismy využívající energii získanou převážně rázem.

Přerušovač na obrázku č. 29 se velmi podobá již zmíněné konstrukci výše, v tomto případě ale nehraje síla pružiny pro pootočení nástroje hlavní roli. Schematicky znázorněné kladivo představuje 10kg závaží dopadající na držák nástroje z výšky potřebné pro dosažení alespoň 0,12 s. To je vypočtená hodnota nutná k úspěšnému přerušování řezu [34].

Publikace sleduje rozdíly v tvorbě třísky různých titanových slitin (slitiny α , slitiny $\alpha + \beta$ a slitiny bohaté na fázi β). Přerušovač byl použit pro maximální řeznou rychlost 146 m/min [34].



Obrázek č. 29: Princip destruktivního přerušovače dle [34].



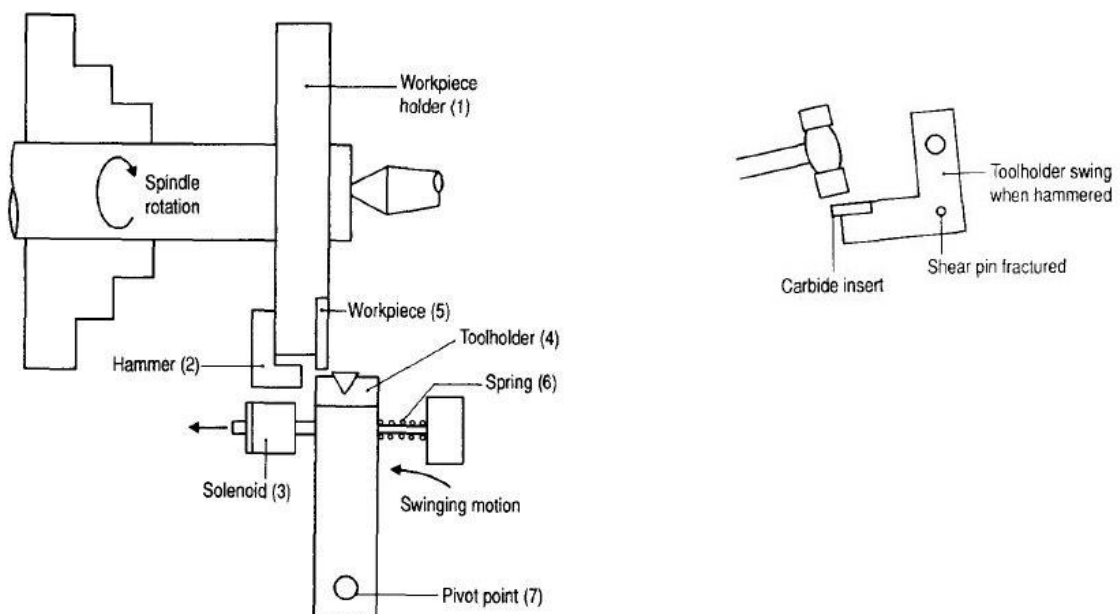
Obrázek č. 30: Znázornění funkce přerušovače popsaného v literatuře [35], zdroj obrázku [28].

Na obrázku č. 30 je znázorněna konstrukce a zároveň i princip funkce přerušovače popsaného literaturou [35]. Sloužil k přerušování řezu při obrábění titanové slitiny (BT5) řeznými rychlostmi do 120 m/min, hloubkou řezu 1,5 mm a posuvem 0,3 mm/ot. Další řezné parametry jsou zmíněny v textu článku. Autoři také popisují možný způsob měření rychlosti vzdálení nástroje od obrobku a uvádí, že jeho zrychlení je více než dostatečné pro obrábění rychlostmi 60 m/min (snímek kořene třísky rozebíraný v článku) [35].

Podle [25] byl vyvinut i přerušovač založený na destrukci soustružnických nožů. Šlo o velmi jednoduchou konstrukci skládající se z držáku nástroje, který byl na konci (směrem k řezné části nože) opatřen úderníkem. Používané celistvé nástroje byly opatřeny vruby (shora i zdola) definujícími místo jejich budoucího porušení. V průběhu soustružení se tedy narazilo kladivem do úderníku, který přenesl impuls síly na nástroj a porušil ho. Tento způsob přerušování řezu byl (vlivem destrukce celého nástroje) velmi nákladný [25].

Další možný způsob přerušení pomocí nárazu je představen na obrázku č. 31. Tento přerušovač využívá nárazu kladiva pevně spojeného s obrobkem, nebo sklíčidlem (tzn. že kladivo rotuje shodnými otáčkami jako obrobek). Zároveň tak dochází k regulaci rychlosti přerušení pomocí nastavení poloměru rotující plošky kladiva – obvodová rychlost je funkcí otáček a poloměru rotace. Jiné konstrukční řešení založené na tomto principu nabízí např. skriptum [10].

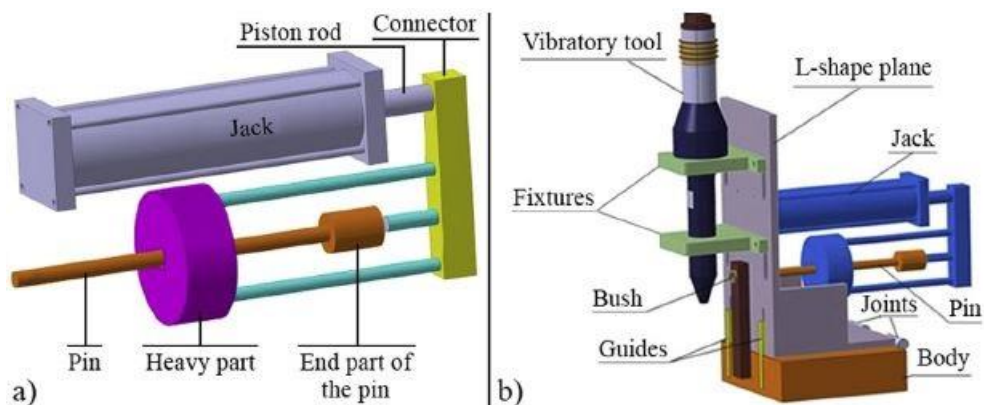
Publikace [36] popisuje vývoj přerušovače použitelného pro obrábění řeznou rychlostí do 300 m/min a posuvy do 0,5 mm/ot. Byl vyroben držák obrobku (1), ve kterém je upnutý jak obráběný materiál (5), tak kladivo (2) pro vyvození rázu / přerušení řezu. Držák je upnutý ve sklíčidle a podepřený koníkem. Posuv nástroje je zde realizován rotací kolem čepu (7). Ta je způsobena magnetickým polem solenoidu (3), nebo pružinou (6) – pokud solenoidem protéká proud, pružina je stlačována a nástroj bude mimo oblast řezu. Posuv řešený tímto způsobem klade požadavek na rotaci nástroje (resp. nožového držáku 4) v první ose. Ten z principu musí být ale také otočný okolo druhé osy (znázorněno v pravé části obrázku), což komplikuje sestavu přerušovače. Na držáku nástroje je mimo prostoru pro vyměnitelnou břitovou destičku ještě také dostatečně velká plocha pro dopad plošky kladiva (aby nedocházelo k poničení destičky). A kladivo samotné musí být upnuto v poloze definované obrobkem (přibližně v jeho polovině, pokud není obrobek po celém obvodu držáku) [36].



Obrázek č. 31: Přerušovač dle [36].

Jako poslední bude v této kapitole uveden přerušovač popsáný v [37]. Konstrukčně je velmi složitý a náročný na výrobu. Byl vyvinut pro sérii 12 experimentů, které porovnávaly konvenční soustružení a soustružení s využitím vibračního nástroje (čím literatura vysvětluje specifické požadavky na tvar držáku břitových destiček). Experimenty byly uskutečněny s hloubkami řezu 0,7 mm, maximálním posuvem 0,18 mm/ot a řeznou rychlostí do 19 m/min [37].

K přerušení řezu dochází po velmi rychlém vytažení pneumatického pístu, který je pevně spojen s kruhovým závažím (označené modrou barvou na obrázku č. 32, část b). Závaží je posuvně uloženo na čepu (označený hnědě v části b, obrázku č. 32), na jehož konci je vyrobeno osazení sloužící jako záračka. Po nárazu závaží na osazení dojde k naklopení celé sestavy (v části b, obrázku č. 32 označené šedou barvou) pomocí pantů, příp. kloubů, kterými je spojena se základnou (hnědá část označena „Body“ v části b obrázku níže). Sestava se do svého původního stavu (před naklopením) již nevrátí. Vyměnitelné břitové destičky jsou upínány zespod vibračního držáku [37].



Obrázek č. 32: Sestava přerušovače dle [37].

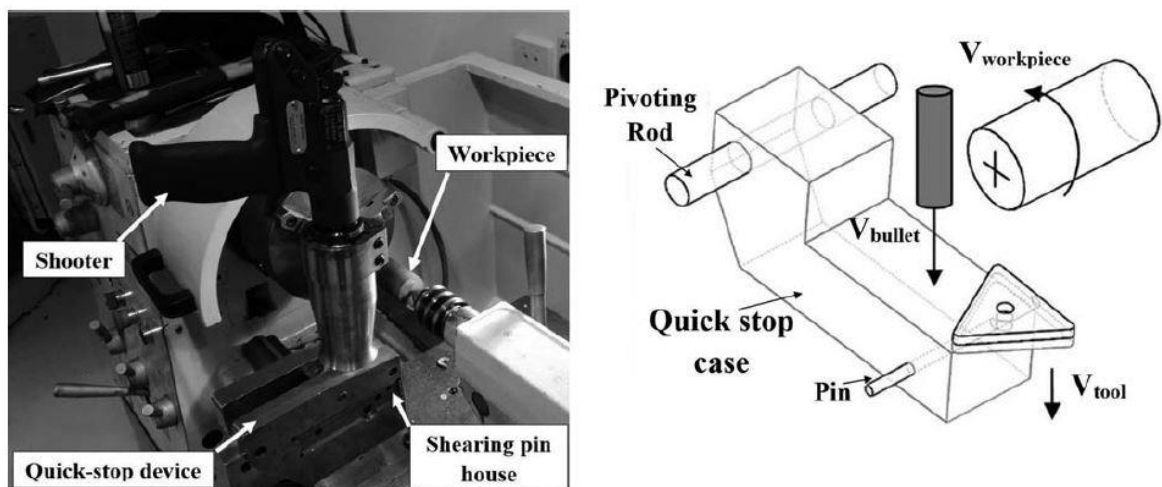
4.1.2.2.3 Přerušovače řezu využívající výbuchu

Výbuch představuje tlakový náraz způsobený expanzí spalin střílného prachu a jako takový by mohl být zařazen mezi nárazové mechanismy. Jedná se ale o povědomě rozšířené konstrukce přerušovačů pracujících za specifických podmínek (z tohoto důvodu je uveden v samostatné kapitole). Využívají např. jatečních nábojů a musí být uzpůsobeny vysokým rychlostem přerušování (z pohledu bezpečnosti i provozu).

Stejně jako předchozí, i tato skupina přerušovačů lze dělit na nedestrukční a destruktivní. V případě nedestrukčních je výbuch využíván k odsunutí opěrného čepu zpod nástroje. Čep bývá osazen a uložen ve válcovém vedení tak, aby expandující plyn působil na plochu mezikruží a způsobil jeho velmi rychlé zasunutí. V případě destruktivních dochází buď k působení tlaku na držák nástroje, který zapříčiní porušení střížného kolíku

(konstrukce popsané dále), nebo destrukci celistvého soustružnického nože (podobně jako v případě nárazových mechanismů) [17].

Využití jateční pistole pro potřeby přerušení řezu je zdokumentováno např. literaturami [38, 39]. Podoba takového přerušovače je zachycena na obrázku č. 33. Ten není příliš složitý, v zásadě je tvořen jen speciálním nožovým držákem, ve kterém je upnut nástroj pomocí čepu (který tvoří otočnou osu nástroje) a střížného kolíku. Shora je ještě opatřen držákem pistole, jejíž hlaveň směřuje na upnutý nástroj (přibližně do míst střížného kolíku) [38, 39].



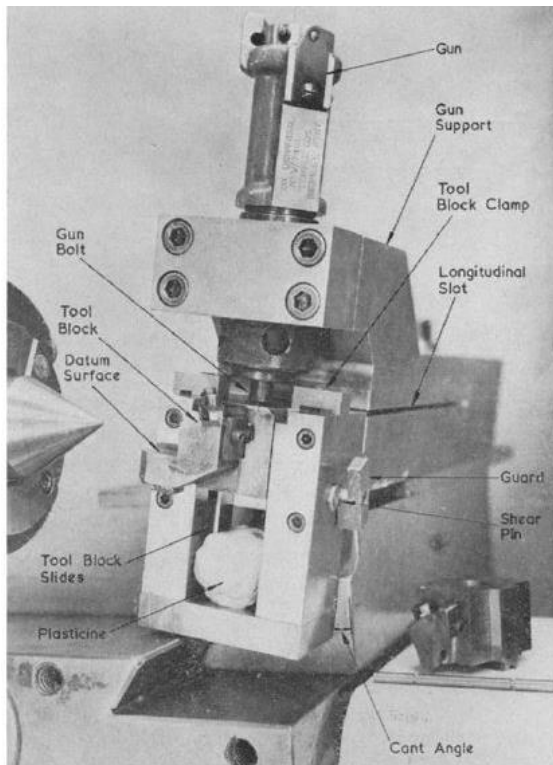
Obrázek č. 33: Přerušovač využívající jateční pistole [38].

V případech těchto publikací byl přerušovač využit pro obrábění slitiny Al-6XN (AISI 904 L s vyšším obsahem molybdenu a dusíku [40]) podle [38] a oceli SAF 2205 podle [39]. Byly voleny rozdílné hodnoty posuvů a hloubek řezu, řezné rychlosti se ovšem shodovaly – 94 m/min. Přerušovače fungující na tomto principu by ovšem měly být použitelné až do rychlostí 305 m/min [39]. Publikace jsou dále zaměřené na opotřebení nástroje vznikající při obrábění těchto slitin.

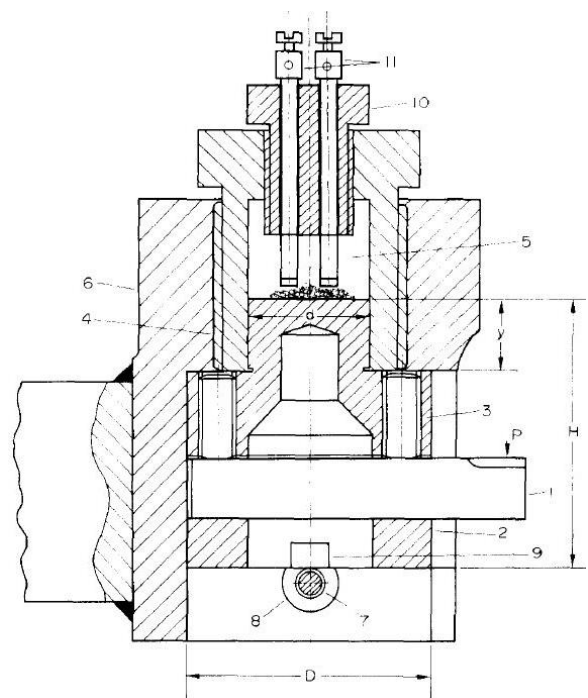
Značně komplikovanější jsou přerušovače na obrázcích č. 34 a 35. Oba vycházejí ze stejného návrhu, a proto se od sebe odlišují jen minimálně. Např. u přerušovače podle [30] je využita opět jateční pistole pro vyvození tlaku na přestřižení kolíku. Naproti tomu přerušovač popsaný v [41] využívá samotného střelného prachu. Vlivem takto malých odlišností bude dále popsán princip funkce pouze pro obrázek č. 35 (i když je v zásadě platný pro oba).

Nástroj (1) je uchycen ve válcové části (2) pomocí šroubů (3). Společně jsou tyto části uloženy v pouzdře (4) a opřeny o střížný kolík (7). Nad nimi je spalovací komora (5), do které je přiveden dalším pouzdrem (10) měděný drát. Za pouzdro (4) je sestava spojena

s držákem (6), který je možné upnout do nožové hlavy (případně jiného přípravku). Po zažehnutí střelného prachu měděným drátem dojde k přestřížení kolíku a následnému přerušení řezu vysunutím částí (1, 2, 3) v pouzdře (podobně jako píst). Pod „pístovou“ část byla v průběhu experimentů vkládána tlumicí vložka (podobně jako na obrázku) a přerušovač byl otestován maximální řeznou rychlostí 120 m/min [30, 41].



Obrázek č. 34: Přerušovač dle [30].



Obrázek č. 35: Přerušovač dle [41].

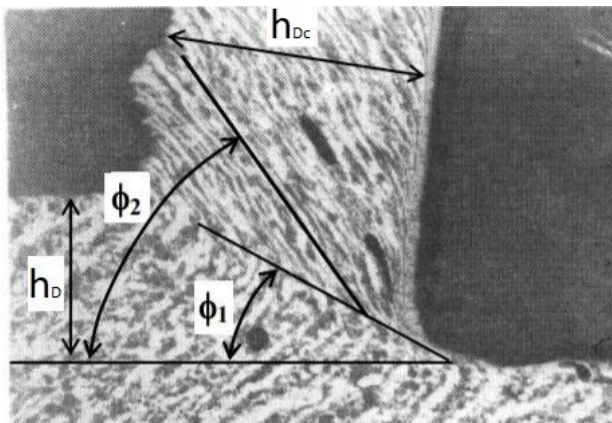
Další konstrukce přerušovačů využívající výbuchu, i jiných principů, jsou uvedeny např. v literatuře [25] (jako i v jiných, citovaných skriptech). Dále je možné jednotlivé mechanismy za účelem získání kvalitního vzorku / kořene třísky různě kombinovat. Zdroj [43] informuje také o počítačem řízeném přerušení řezu. Zde je držák obrobku spojen se závitovou tyčí a ovládán servopohony. Tento přerušovač dosahoval při konkrétním použití (výzkum velikosti nárůstku jako závislosti na poloměru zaoblení špičky hrotu nástroje) vyšší životnosti, bezpečnosti a nižší doby odezvy než konvenční přerušovače.

4.1.3 Sledované charakteristiky

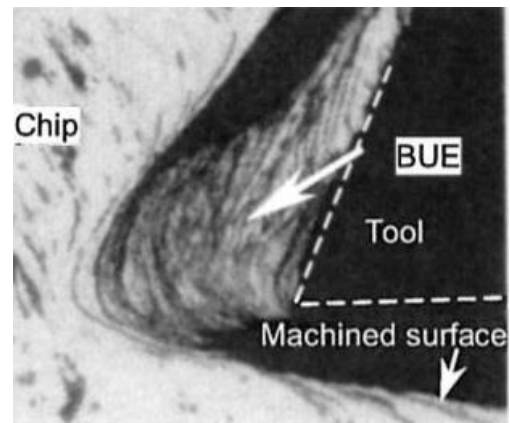
Při vyhodnocování kořenů třísek jsou sledovány nebo dopočítávány zejména tyto charakteristiky:

- poloha, tvar a velikost oblasti primární plastické deformace
- charakteristiky intenzity primární plastické deformace (směr příčné textury, poměrný skluz, deformační rychlost)

- charakteristiky intenzity sekundární plastické deformace (velikost, tvar, vnitřní stavbu deformované vrstvy, příp. třísky a pokud se tvoří, tak i charakteristiky nárůstku)
- intenzita a hloubka deformace obrobeného povrchu
- stav napjatosti břitu nástroje, obrobeného povrchu, odřezávaného materiálu a třísky



Obrázek č. 36: Kořen třísky s vyznačenými odečítanými veličinami [8].



Obrázek č. 37: Ukázka kořene třísky s detailem vytvářeného nárůstku [43].

Mezi veličiny odečítané ze snímků kořenů třísek patří např. tloušťka odřezávané vrstvy (h_D), tloušťka třísky (h_{Dc}), úhel počátku primární plastické deformace (Φ_1) a úhel příčné textury (Φ_2), které jsou zobrazené kótami v obrázku č. 36. Další kóty (veličiny), které by mohly být na obrázku zobrazeny jsou např. úhel čela nástroje (γ_0) nebo úhel příčné textury znázorněný pomocí Ψ (jako rozdíl úhlů Φ_2 a Φ_1). Z těchto jsou následně dopočítávány výše zmíněné charakteristiky [9].

Pokud dochází při obrábění k tvorbě nárůstku (a je zachycen na snímku kořene třísky – viz. obrázek č. 37), je změněna geometrie břitu a jsou odečítány další rozměry. Nejčastěji je měřen poloměr zaoblení nárůstku (ρ_n), skutečný úhel řezu (δ_{nsk}), výška nárůstku zasahující pod úroveň obrobené plochy (VN_h) a výška nárůstku měřena od plochy čela nástroje (VN_c) [17].

V závislosti na účelu měření ovšem mohou být sledovány i další rozměry. Např. v práci [12] byl zkoumán vliv řezné rychlosti na proces tvorby třísky. Mezi sledované parametry patřila tedy i šířka elementu, vzdálenost elementů, délka kontaktu nástroje a třísky, smykový úhel v třísce apod. Práce byla zaměřena na utváření třísky při vysokorychlostním frézování a bylo zjištěno, že při obrábění slitiny hliníku AA2024 – T351 dochází se zvyšující řeznou rychlostí (z 200 m/min na 1700 m/min) k větší segmentaci a zmenšování poloměru stočení třísky [12].

4.2 Stav napjatosti před břitem nástroje

Vnikání břitu nástroje do materiálu obrobku způsobuje stav napjatosti jak v samotném břitu, tak i v obráběném materiálu. Napjatost v obráběném materiálu se ovšem s pohybem břitu mění a zůstává v obrobeném povrchu i po odstranění zatížení (v podobě břitu nástroje) – tato napětí se nazývají zbytková [8].

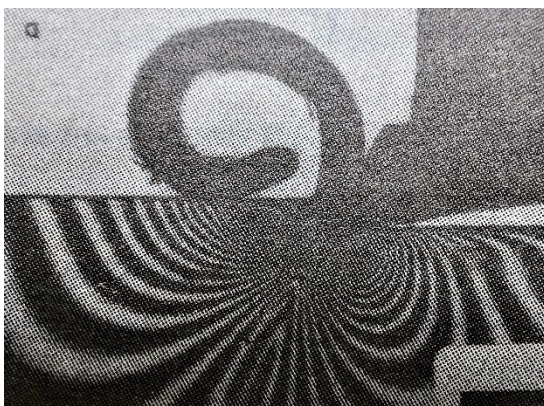
Zbytkovým pnutím byla věnována část kapitoly oblasti plastické deformace obrobeného povrchu, kde byla popsána souvislost jejich vzniku s procesem obrábění a byly naznačeny důvody jejich měření.

Pro získání geometrického popisu stavu napjatosti v obráběném materiálu před břitem nástroje byly využívány např. metody difrakce rentgenových paprsků nebo fotoelasticimetrie. Obě tyto metody vyhodnocují elastické deformace v materiálu a pro názornost bude dále uvedena pouze metoda fotoelasticimetrie [4, 17].

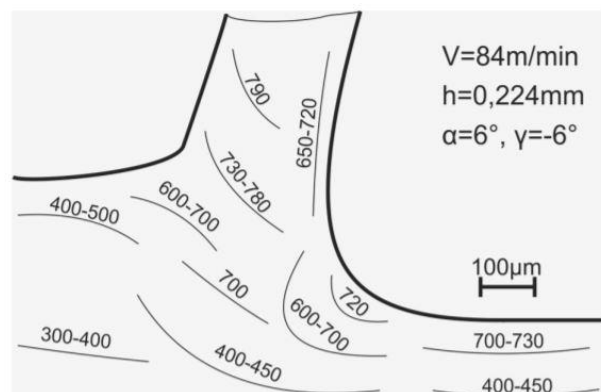
Fotoelasticimetrie využívá opticky citlivých izotropních materiálů (některé průsvitné polymery), které se po vyvolání mechanického zatížení stanou anizotropními. To způsobí, že se vůči procházejícímu polarizovanému světlu chovají jako dvojlomné krystaly. Pokud bychom tedy takto citlivý materiál zatížili a prosvítili přímkově polarizovaným světlem, vlivem dvojlomu dojde k rozložení rovin kmitů světla do dvou navzájem kolmých směrů, které jsou směry hlavních napětí [17].

Tato pozorování jsou prováděna na základě podmínek podobnosti (a za podmínek ortogonálního řezání). Je možné sledovat stav napjatosti buď v břitu nástroje (při obrábění měkkého materiálu polymerním nástrojem), nebo v obráběném materiálu (při obrábění polymerního materiálu běžným nástrojem) [17].

Z výzkumu fotoelasticimetrie víme, že břit v prvním kontaktu s obrobkem (před vznikem plastické deformace) vyvolává v obráběném materiálu z velké části tlaková napětí a velmi málo tahových. Situace z průběhu řezání je zachycena na obrázku č. 38. Před



Obrázek č. 38: Snímek fotoelasticimetrického studia průběhu řezání [4].



Obrázek č. 39: Zpevnění v kořeni třísky [44].

břitem jsou stále tlaková napětí, ale tahová napětí se několikanásobně zvětšila a mohou vytvářet před břitem nástroje trhliny. Rozložení těchto napětí je závislé na úhlu čela [4,6,9].

Rozložení napětí lze také sledovat pomocí měření mikrotvrdosti. To je naopak založené na proběhlé plastické deformaci, která způsobuje zpevnění materiálu. Charakter a intenzitu napětí lze posoudit např. z obrázku č. 39 – naměřené hodnoty mikrotvrdosti v kořeni třísky při obrábění austenitické oceli GX120Mn12. Lze si všimnout, že v obráběné vrstvě dochází k plastické deformaci již před oblastí primární plastické deformace, ve které následně prodělá téměř dvojnásobné zpevnění (v tomto konkrétním případě). Největší tvrdost byla naměřena v odcházející třísce, ale výrazně zpevněný je i materiál plochy po řezu [1, 44].

4.3 Zpevnění obrobeného povrchu

Míra zpevnění plochy po řezu je vyjadřována navýšením tvrdosti povrchu a může mít značný vliv na funkční vlastnosti povrchu součástí (s tvrdostí se zvyšuje také odolnost proti abrazivnímu opotřebení). Tvrdost povrchu je měřena pomocí mikrotvrdosti z důvodu možného ovlivnění výsledků vlivem spodní vrstvy (zpevněná část může mít hloubku jen několik desítek μm [45]). K měření dochází buď – jak je zachyceno na obrázku č. 39 – v kořeni třísky, nebo pomocí šikmého řezu (který nesmí dále ovlivnit původní zpevnění a je představován velmi pozvolným přechodem – 2° až 10° zkosení – mezi oblastí základního materiálu a povrchem) [9,17].

V případě konvenčního obrábění se dle [9] nejčastěji setkáme se třemi průběhy mikrotvrdosti jako funkcí vzdálenosti od povrchu, a sice:

- pozvolný pokles tvrdosti, což je nejpříznivější stav, kdy dochází k dobré soudržnosti zpevněné vrstvy a základního materiálu
- náhlý pokles tvrdosti, kdy je nízká soudržnost a může docházet k odlupování zpevněné vrstvy
- nárůst tvrdosti až do určité vzdálenosti a následný pokles na hodnotu základního materiálu, kde již došlo k mechanickému porušení povrchu přílišnou plastickou deformací, jsou zde často také patrné trhlinky

Velikost zpevnění je dána řeznými podmínkami i geometrií břitu. Z řezných podmínek ji nejvíce ovlivňuje řezná rychlost a posuv, méně hloubka řezu. Z geometrie břitu ji pak nejvíce ovlivňuje úhel čela, následně úhel hřbetu, poloměr ostří, a nebo také stupeň opotřebení břitu [9].

5 Výběr vhodného typu přerušovače

Na základě již zkonstruovaných a otestovaných řešení uvedených v předchozí kapitole bude vybrán přerušovač pro experimentální část diplomové práce. Budou na něho kladeny nároky z hlediska stroje, obráběného materiálu a schopnosti využití vlastního přerušovače. Přerušování řezu bude provedeno v soustružnickém centru SP 430 Y bez využití chladicí kapaliny. Obráběn bude – vhodně upravený, na základě podmínek ortogonálního řezání – polotovar ze slitiny titanu (Ti-6Al-4V) řeznými rychlostmi do 100 m/min. Přerušovač tedy musí být schopen přenést zatížení od řezných sil, vyvinout dostatečnou akceleraci pro přerušování, upnutí ve stroji pomocí nenáročných úprav, několikanásobného použití atd. V případě konstrukčních úprav je dále vhodné zmínit, že oddálení nástroje z místa řezu je uskutečněno vždy tím silnějším mechanismem (pokud by došlo např. ke kombinaci výbuchu a pružiny, mechanismem způsobujícím přerušování by byl s největší pravděpodobností výbuch). Z tohoto důvodu je nutné nabízející se úpravy dostatečně zvážit.

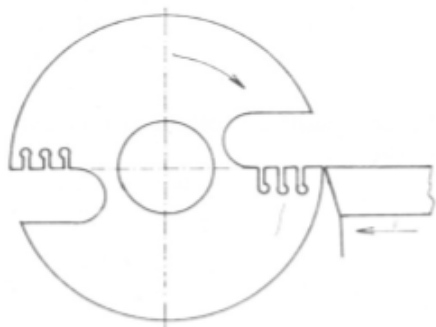
5.1 Rozhodovací analýza

Ve snaze o výběr co možná nejvhodnější varianty přerušovače bude provedeno vícekriteriální hodnocení bodovací metodou. Tato metoda je velmi přehledná a nenáročná [46]. Body budou přiřazovány jednotlivým variantám u jednotlivých kritérií subjektivně. Tento způsob do jisté míry ovlivní výsledné hodnocení, ale pro objektivnější metodu (např. hodnocení pomocí intervalové stupnice [46]) zmíněné publikace současných řešení přerušovačů neobsahují dostatek dat (finanční zhodnocení apod.).

5.2 Zvolené varianty přerušovačů

Konstrukce přerušovačů popisované v předchozí kapitole, jsou níže zredukovány na šest variant. Tyto představují zástupce všech vhodných principů přerušování řezu vyhovující daným omezujícím podmínkám.

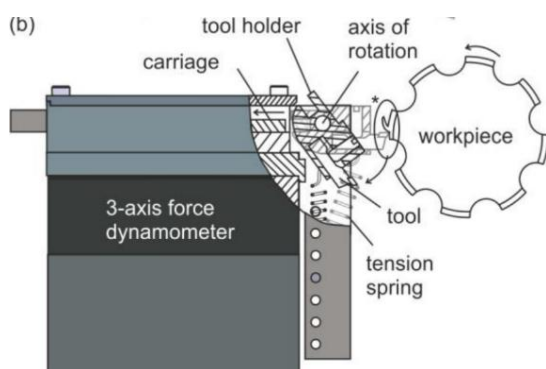
- Varianta č.1 je přerušování řezu na straně obrobku vytržením segmentu,
- varianta č.2 je nedestrukční přerušovač klasické pružinové konstrukce,
- varianta č.3 je nedestrukční přerušovač speciální pružinové konstrukce,
- varianta č.4 je destruktivní přerušovač pružinové konstrukce,
- varianta č.5 je destruktivní přerušovač využívající nárazu kladiva pevně spojeného s obrobkem (příp. sklíčidlem)
- a varianta č.6 je destruktivní přerušovač využívající jateční pistoli.



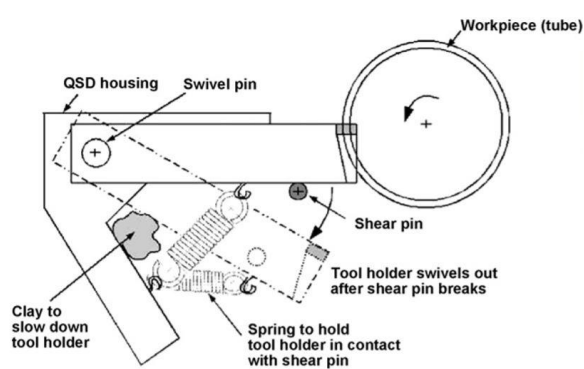
Obrázek č. 40: Varianta č.1 [8].



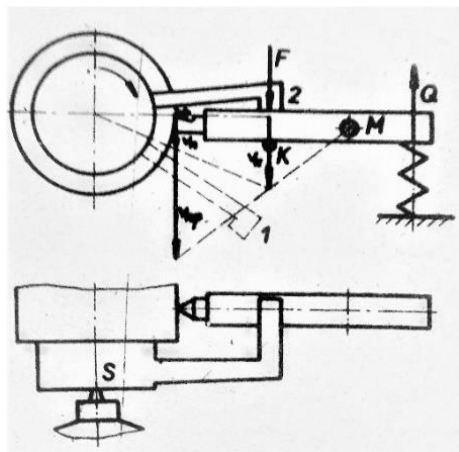
Obrázek č. 41: Varianta č.2 [26].



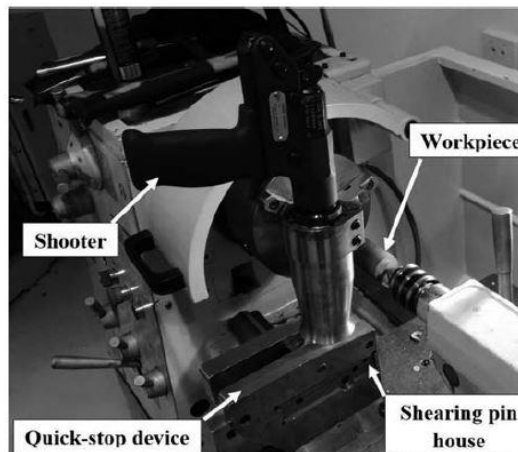
Obrázek č. 42: Varianta č.3 [31].



Obrázek č. 43: varianta č.4 [29].



Obrázek č. 44: Varianta č.5 [10].



Obrázek č. 45: Varianta č.6 [38].

5.3 Kritéria hodnocení

Byla vyvinuta snaha o nalezení kritérií, která by napomohla co nejobektivnějšímu zhodnocení variant přerušovačů. Kritéria byla dále rozdělena do dvou skupin, a sice na kritéria konstrukční a výrobní a kritéria týkající se funkce a provozu.

Mezi kritéria konstrukční a výrobní patří:

- 1) Náročnost konstrukčního provedení – pro zhodnocení konstrukční složitosti přerušovače tak, jak byl použitý v dané publikaci.
- 2) Vhodnost pro zvolené pracovní podmínky – jako absolutní rozdíl experimentálně otestovaných pracovních podmínek (nebo teoreticky využitelných bez nutnosti konstrukčních úprav) a podmínek nastavených pro praktickou část.
- 3) Potřeba konstrukčních úprav – jako odhadované náklady spojené s nutnými konstrukčními úpravami pro použití v konkrétním stroji a obrábění za konkrétních podmínek (stanovené v praktické části).
- 4) Náročnost získání vzorku po přerušení – označující práci potřebnou pro oddělení vzorku (kořene třísky) od polotovaru ⁵.

Následující tři kritéria patří do skupiny funkce a provozu:

- 5) Náročnost opakovaného použití – zastupující nutné úpravy před každým dalším použitím.
- 6) Odhadovaná finanční nákladnost.
- 7) Bezpečnost provozu.

5.4 Hodnocení vybraných variant

Bodovací stupnice je stanovena v rozsahu 1–10 bodů, kdy maximální počet bodů představuje nejvhodnější variantu dle daného kritéria („čím lépe je hodnocena daná varianta, tím vyšší je její bodové ohodnocení“ [46]). Kritéria jsou hodnocena v rozsahu 1 až 5 z důvodu nižšího rozptylu bodů (opět platí, že čím významnější kritérium, tím vyšší bodové ohodnocení). Jejich váhy byly stanoveny po konzultaci s vedoucím práce na základě požadavků konstruovaného přerušovače.

⁵ Kritérium závisí také na stupni úprav obráběného materiálu. Pro zjednodušení bude předpokládán stejný způsob úprav polotovaru před obráběním a oddělování vzorků, jako je uvedený v publikacích s odhadem jeho náročnosti.

Tabulka č. 2: Hodnocení variant.

	Kritérium \ Varianta č.	Varianta č.						Váha kritéria
		1	2	3	4	5	6	
Konstrukční a výrobní	Náročnost konstrukčního provedení	8	6	2	5	4	5	5
	Vhodnost pro zvolené pracovní podmínky	10	4	1	4	10	10	5
	Potřeba konstrukčních úprav	10	2	1	6	9	10	4
	Náročnost získání vzorku po přerušení	5	8	7	8	7	7	3
Funkce a provoz	Náročnost opakovaného použití	3	10	10	9	9	8	4
	Odhadovaná finanční náročnost	8	4	2	4	6	2	1
	Bezpečnost provozu	10	9	9	8	6	6	5

5.5 Vyhodnocení variant

Váhy jednotlivých kritérií byly přepočítány podle vzorce:

$$v_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^k p_i} \quad (5.1)$$

kde v_i je nově vypočtená váha kritéria, p_i je váha kritéria uvedená v tabulce a k je celkový počet kritérií [46].

Váhy kritérií pro následné vyhodnocení tedy byly:

Tabulka č. 3: Váhy kritérií pro vyhodnocení.

Kritérium	Váha kritéria
Náročnost konstrukčního provedení	0,19
Vhodnost pro zvolené pracovní podmínky	0,19
Potřeba konstrukčních úprav	0,15
Náročnost získání vzorku po přerušení	0,11
Náročnost opakovaného použití	0,15
Odhadovaná finanční náročnost	0,04
Bezpečnost provozu	0,19

Následně byly přidělené body vynásobeny nově získanými vahami a pro konkrétní varianty sečteny podle vzorce:

$$h_i = \sum_{j=1}^k v_j \cdot y_{ij} \quad (5.2)$$

kde h_i je hodnocení varianty a y_{ij} jsou hodnoty kritériální matice [46].

Tabulka č. 4: Výsledná hodnocení variant přerušovačů.

	Hodnocení varianty
Varianta č.1	10,0
Varianta č.2	8,0
Varianta č.3	5,9
Varianta č.4	8,1
Varianta č.5	9,4
Varianta č.6	8,9

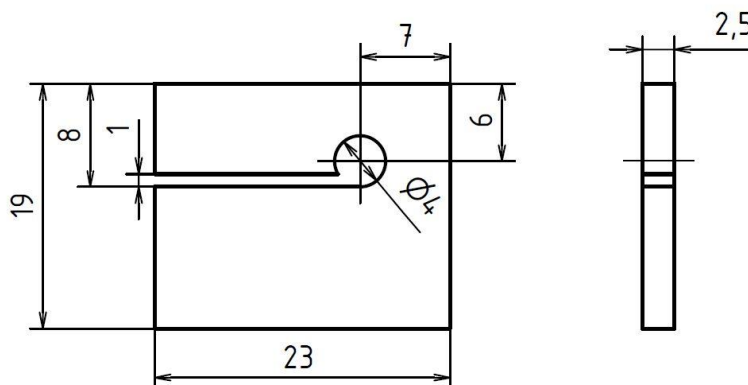
Důvody hodnocení varianty č.1 (sestupně dle uvedených kritérií):

- konstrukčně velmi jednoduchá, její zkonstruování se skládá pouze z přípravy polotovaru
- tímto způsobem je možné získávat kořeny třísek i pro technologii broušení (tzn. vhodnost varianty i pro vyšší rezní rychlosti)
- nejsou nutné výrazné změny oproti konstrukci uvedené v literatuře (pravděpodobnost funkčnosti i pro vlastní experiment)
- vzorky je ovšem obtížné dohledat mezi třískami obrobeneho materiálu
- pro každé použití je nutné přerušovač zkonstruovat znovu
- náklady na zkonstruování této varianty jsou minimální
- bezpečnost provozu je velmi vysoká (stroj obrábí v automatickém chodu plně zakrytovaný)

Dalším přínosem volby přerušovače tohoto typu je i zachování tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek.

6 Návrh a výroba přerušovače

Z výše citovaných literatur popisujících tento typ přerušovače pouze literatura [12] uvádí konkrétní ověřené rozměry. Přesto, že je práce [12] zaměřena na vysokorychlostní frézování hliníkové slitiny, budou rozměry považovány za prvotní návrh.

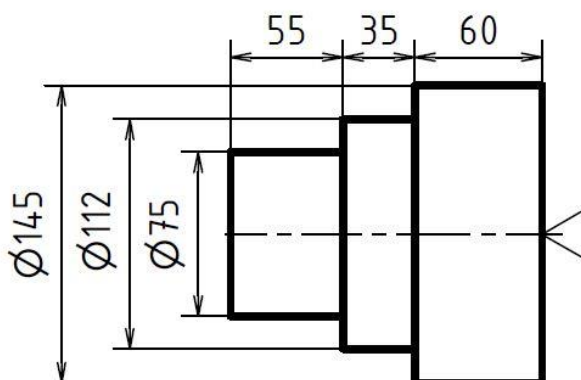


Obrázek č. 46: Přerušovač otestovaný prací [12].

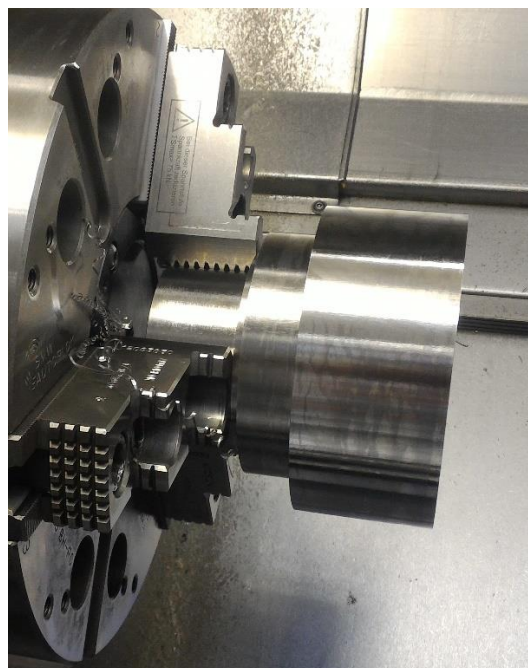
6.1 Návrh rozměrů a úprav polotovaru

Přerušovač představovaný variantou č. 1 je založený na vzniku kritického průřezu v určitém okamžiku obrábění a následném vytržení vhodně upravené části obrobku, kde zůstane nepoškozený kořen třísky. Podle obrázku č. 23 (ze strany 31) lze obrobek – pro dodržení podmínek ortogonálního obrábění – upravit dvěma způsoby. V prvním případě pro radiální soustružení (zapichování), kdy se pomocí zápichů vytvoří na polotovaru disk, do kterého se následně z čela polotovaru vyfrézuje podoba přerušovače. Tento způsob úpravy není tak náročný na zhotovení jako způsob následující a pravděpodobně dochází k vyšší míře úspory materiálu. V druhém případě jde o úpravu pro podélné soustružení. Pokud bychom uvažovali stejný výchozí polotovar (plný hřídel) a využití konvenčních technologií pro jeho úpravu, vhodné uplatnění by takto navržený přerušovač našel nejspíše pouze pro malé průměry hřídelů. Přerušovač je zde totiž vytvořen v plášti stěny trubky.

Za účelem této práce byl jako polotovar vybrán – a následně upraven do výchozího stavu – hřídel ze slitiny titanu Ti – 6Al – 4V. Výchozí stav polotovaru je zachycen na obrázku č. 47. Na tomto polotovaru bude připraven přerušovač řezu pro radiální soustružení (výše popsán první způsob). A sice v jeho „pravé“ části – o délce 60 mm a průměru 145 mm. Část polotovaru s průměrem 75 mm o délce 55 mm bude sloužit pro upnutí ve stroji.



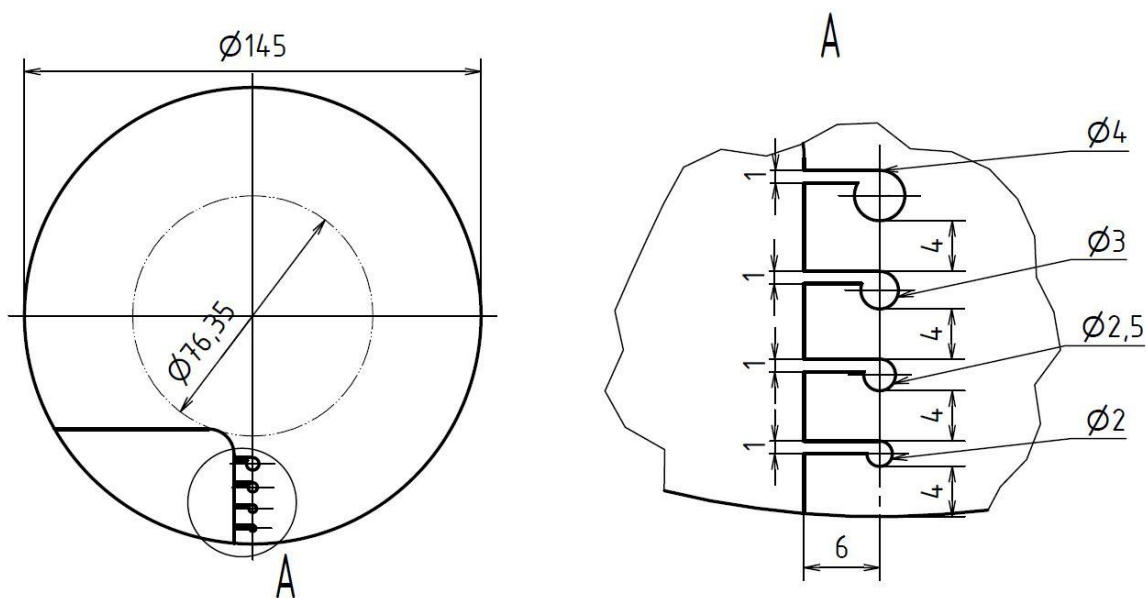
Obrázek č. 47: Výchozí stav polotovaru pro zhotovení přerušovače řezu.



Obrázek č. 48: Polotovar ve výchozím stavu upnutý na stroji.

Výsledný návrh podoby přerušovače (resp. souboru přerušovačů) je na obrázku č. 49. Na obrázku není ovšem uveden níže popsáný rozměr šířky disku – 3 mm, jde o tloušťku přerušovačů, resp. hloubku řezu experimentu vlastního přerušení. Možné variability a důvody volby konkrétních rozměrů:

Množství osazených sektorů – osazen byl jeden sektor (ze čtyř možných), a to zejména z důvodu přehlednosti získaných výsledků. Pokud by bylo osazeno více sektorů, některé kořeny třísek by buďto byly vytvořeny při shodných podmínkách, nebo by bylo



Obrázek č. 49: Výsledný návrh podoby přerušovače (souboru přerušovačů).

náročné jejich následné roztržení (např. při testování funkce přerušovače za použití různých velikostí otvorů). Počet sektorů osazených přerušovači má také vliv na utváření třísky (dochází ke zkracování souvislé dráhy obrábění – častému dělení třísky).

Počet přerušovačů – na jeden disk byly určeny čtyři přerušovače. Množství bylo voleno s ohledem na dostatečný nosný průřez (v obrázku č. 49 je – maximální možný nosný průřez při této volbě rozměrů – znázorněn kótou $\varnothing 76,35$).

Vzdálenost mezi přerušovači – rozměr mezi jednotlivými otvory musí poskytovat dostatečný prostor pro ukončení programu a musí zajistit, že nedojde k ovlivnění následujícího přerušovače. Pro ověření tohoto rozměru byla počítána posuvová rychlost podle vzorců 6.1 a 6.2:

$$v_f = n \cdot f \quad (6.1)$$

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (6.2)$$

kde průměr D byl uvažován maximální (např. pro první přerušovač 145 mm). Výsledky byly následně přepočítány pro zjištění doby obrábění jednotlivých úseků. Vlivem proměnné řezné rychlosti doby obrábění úseků byly vypočteny v rozmezí 9 a 18 sekund.

Průměr otvoru – velikosti průměrů byly voleny podle normovaných rozměrů válcových kolíků (normy DIN 7A). Dále může mít tento rozměr vliv na přípravu přerušovače (mohou vzniknout potíže spojené s výrobou otvoru, případně s manipulací a uložením drobných kolíků).

Šířka drážky – volba velikosti šířky 1 mm byla učiněna 1) na základě dostupných nástrojů a 2) na základě dostupného materiálu (tloušťky dostupného plechu).

Šířka (tloušťka) obráběného disku – tloušťka disku je omezena podmínkou ortogonálního řezání. Nesmí být větší, než je délka rovné části ostří břitu. Jejím zmenšením je ovšem možné snížit řezné síly (z tohoto důvodu byla zvolena šířka disku 3 mm). Pro tento rozměr může být také limitní hodnotou délka ostří frézy (resp. zkosení mezi ostřím a stopkou nástroje), kterou je přerušovač vyráběn.

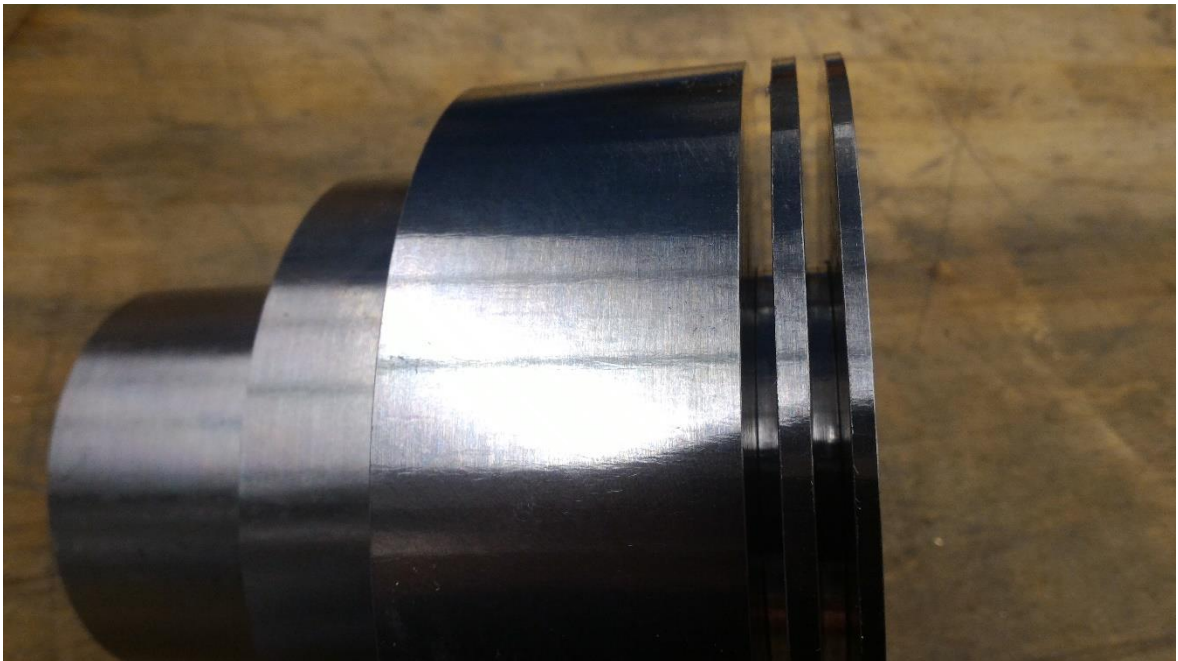
Vzdálenost od osy hřídele (délka drážky) – tato hodnota (spolu s průměrem otvoru) představuje velikost vytrženého segmentu, na kterém je zachycen kořen třísky. Dá se předpokládat, že čím delší drážka bude, tím snadněji bude možné vytržený segment dohledat mezi třískami.

Výrobní výkres souboru přerušovačů tvoří přílohu č. 1.

6.2 Výroba přerušovače

Jak bylo naznačeno v kapitole návrhu, pro výrobu přerušovače byly k dispozici konvenční technologie a bylo postupováno podle výše zmíněného postupu.

Příprava disků pomocí zápichů byla provedena zapichovací planžetou osazenou vyměnitelnou břitovou destičkou z materiálu IC808. Šířka destičky byla 4 mm. Pro případné budoucí použití byl dále vytvořen také druhý disk o šířce 4 mm. Původní řezné podmínky byly stanoveny na: řezná rychlost $v_c = 40$ m/min, posuv $f = 0,08$ mm/ot. V průběhu obrábění druhého zápichu došlo ovšem k poškození destičky a řezná rychlost byla zvýšena na 50 m/min a posuv snížen na hodnotu 0,064 mm/ot. Hloubka zápichu byla 35,5 mm (na průměr 74 mm). Podoba polotovaru po provedení zápichů je na obrázku č. 50.



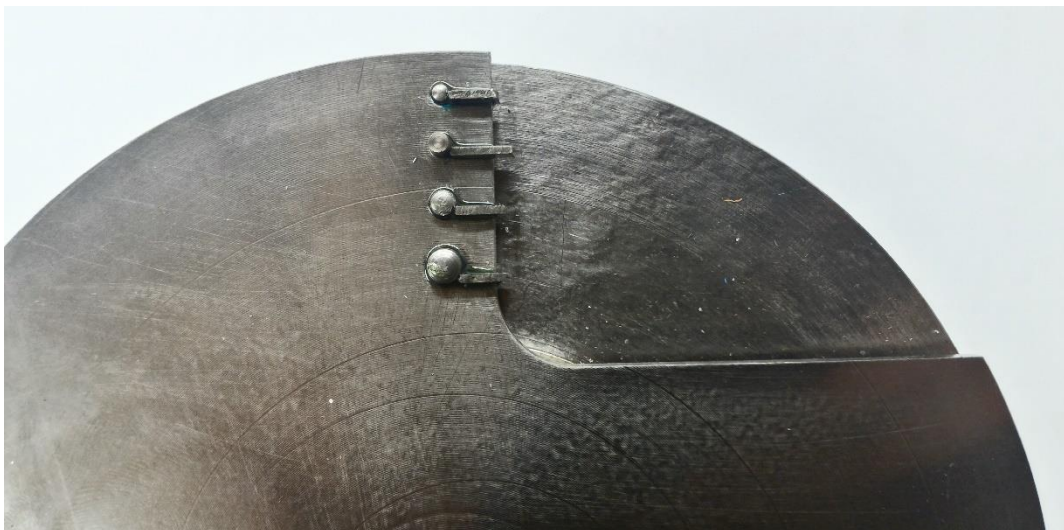
Obrázek č. 50: Polotovar po provedení zápichů.

Následující operací bylo frézování – prvního z disků (o tloušťce 3 mm). Zde došlo k obrobení polotovaru podle výrobního výkresu pro získání přerušovačů o navržených rozměrech. Frézování probíhalo dvěma nástroji, jedním pro výrobu „kapsy“, a druhým, kterým byly vyrobeny drážky pro plíšky a otvory pro kolíky. Stav polotovaru po frézování je zachycen na obrázku č. 51.



Obrázek č. 51: Stav polotovaru po frézování.

Na závěr přípravy přerušovače bylo nutné do frézovaných drážek a otvorů vsadit plíšky s kolíky. V průběhu obrábění by jinak došlo k deformaci těchto míst, což by mělo za následek změnu řezných podmínek a kořen třísky by byl ovlivněn. Vlivem rotace při obrábění dále hrozilo uvolnění plíšků z drážek, a proto bylo nutné jejich přilepení. Lepené součásti tvořily uložení s vůlí (na základě měření posuvným měřítkem), ale i malé nerovnosti (např. otřep u plíšků) znemožnily nenásilné vložení. Je tedy možné předpokládat minimální deformaci segmentů vlivem řezných sil. Pro lepení bylo použito lepidlo Loctite 638, doba vytvrzení byla 48 hodin (při pokojové teplotě, bez použití aplikátoru). Podoba přerušovačů připravených k otestování je na obrázku č. 52.



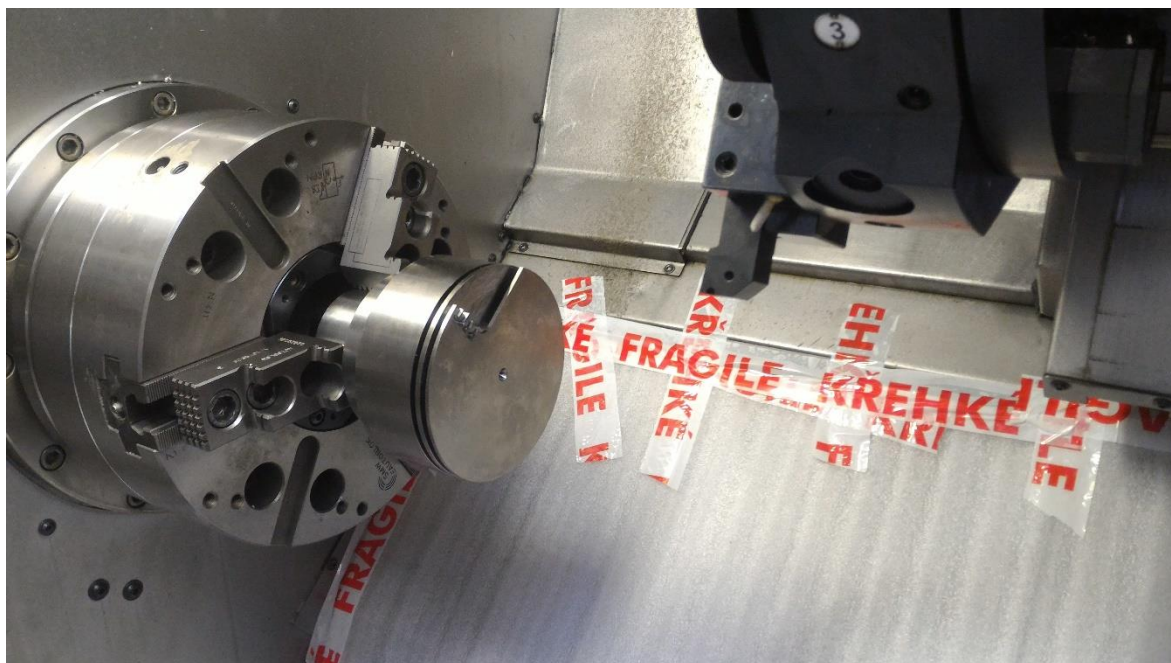
Obrázek č. 52: Finální podoba přerušovače (resp. souboru přerušovačů).

7 Experiment a jeho vyhodnocení

Pro ověření funkce vytvořeného přerušovače ze slitiny titanu byl vybrán stroj SP 430 Y – číslicově řízené soustružnické centrum. Obrábění bylo realizováno vyměnitelnou břitovou destičkou TPGN 160308 TH10 uchycenou v držáku destiček CTFPR 2525 M16. V průběhu obrábění nebyla použita chladicí kapalina.

7.1 Průběh experimentu

Stroj byl před použitím důkladně vyčištěn a musel být doplněn o vybavení pro sbírání třísek. V tomto případě byly třísky shromažďovány v pěnové fólii a kusu bavlněné látky (o rozměrech přibližně 700 x 500 mm). Umístění fólie je zachyceno na obrázku č. 53, látka byla situována pod vřetenem stroje v dopravníku třísek.



Obrázek č. 53: Příprava stroje pro shromáždění třísek.


Průběh experimentu je následně popsán několika opakujícími se kroky:


- nastavení řezných podmínek (posuv byl stanoven pro každé přerušování stejný, řezná rychlost byla proměnná – od 30 m/min až po 75 m/min) a dráhy nástroje (pomocí limitních průměrů)
- dohledání vytržených segmentů
- příprava stroje a nástroje pro další přerušování⁶

Utvořené kořeny třísek a podmínky jejich vzniku jsou popsány v tabulce č. 5.


⁶ V případě stroje bylo zapotřebí odstranění třísek po předchozím obrábění, případně výměna fólie. V případě nástroje se jednalo o výměnu řezné hrany pootočením břitové destičky.

Tabulka č. 5: Získané kořeny třísek s podmínkami jejich vzniku.

Řezné podmínky	Řezná rychlost	60 m/min	
	Posuv	0,15 mm/ot	
Specifikace přerušovače	Ø otvoru	2 mm	
	Šířka mezery	1 mm	

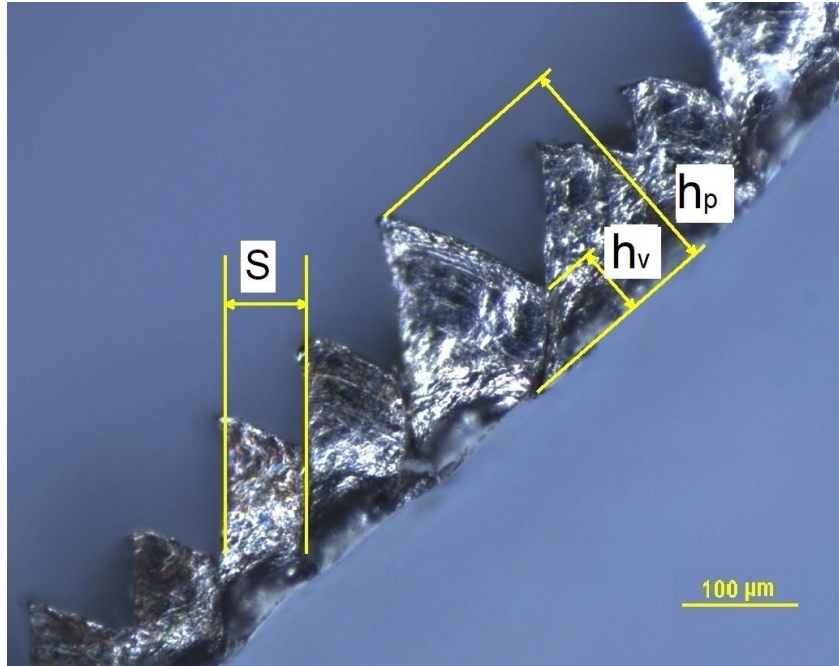
Řezné podmínky	Řezná rychlost	75 m/min	
	Posuv	0,15 mm/ot	
Specifikace přerušovače	Ø otvoru	2,5 mm	
	Šířka mezery	1 mm	

Řezné podmínky	Řezná rychlost	40 m/min	
	Posuv	0,15 mm/ot	
Specifikace přerušovače	Ø otvoru	3 mm	
	Šířka mezery	1 mm	

Řezné podmínky	Řezná rychlost	35 m/min	
	Posuv	0,15 mm/ot	
Specifikace přerušovače	Ø otvoru	4 mm	
	Šířka mezery	1 mm	

7.2 Získané snímky kořenů třísek, třísek a hodnocené parametry

Následně budou uvedeny snímky jednotlivých kořenů třísek a třísek vznikající za zvolených řezných podmínek v bezpečné vzdálenosti od vzniku kritického průřezu. Dojde k ověření hodnot nastavených posuvů a bude porovnána utvářená tříška v bezprostřední blízkosti kořene s třískou vznikající v bezpečné vzdálenosti. Porovnání se zaměří na parametry: šířka elementu (segmentu), stupeň segmentace a ekvivalent tloušťky třísky.



Obrázek č. 54: Parametry pro hodnocení utvářené třísky.

Na obrázku č. 54 jsou zakótovány odečítané rozměry pro následné porovnání utvářených třísek. Zakótovány jsou:

- tloušťka třísky v místě spojení segmentů h_v
- maximální tloušťka třísky h_p
- šířka segmentu s

Parametry stupně segmentace G_s a ekvivalent tloušťky třísky t_s budou vypočítány na základě vztahů (7.1 a 7.2) [47]:

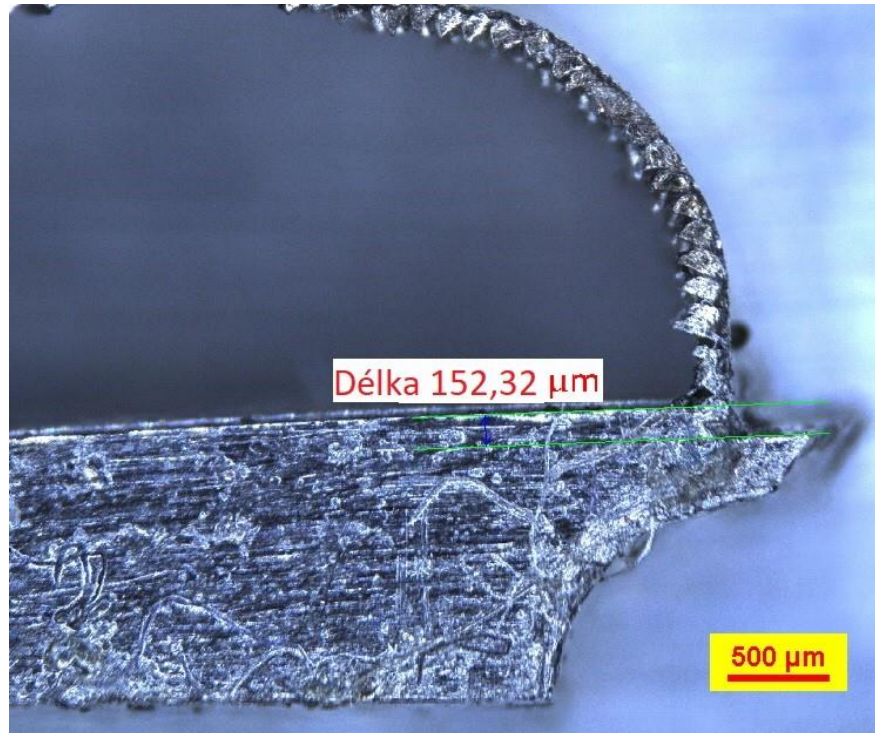
$$G_s = \frac{h_p - h_v}{h_p} \quad (7.1)$$

$$t_s = h_v + \frac{h_p - h_v}{2} \quad (7.2)$$

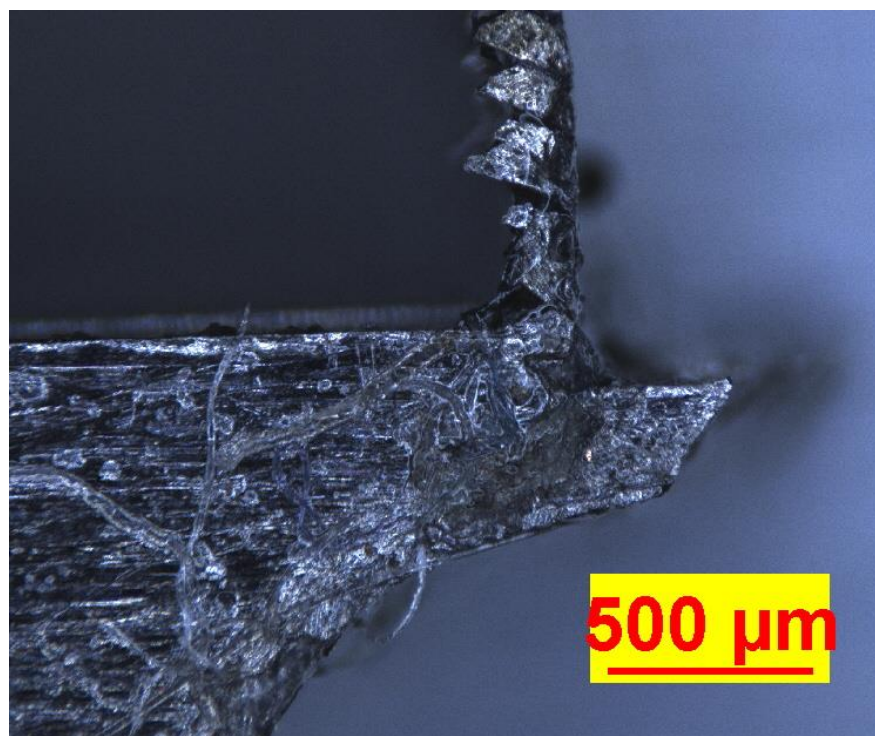
Výpočty budou provedeny pro každý segment třísky. Pro následné vyhodnocení budou použity průměrné hodnoty (měřeno bude 20 segmentů třísky z oblasti kořene a 50 segmentů neovlivněné třísky pro každý případ přerušení).

7.2.1 Přerušení č. 1

Přerušení č. 1 proběhlo na přerušovači s průměrem otvoru 2 mm, posuvem 0,15 mm/ot a řeznou rychlostí 60 m/min. Snímky vytrženého segmentu a utvářené třísky jsou na následujících obrázcích.



Obrázek č. 55: 40x zvětšený kořen třísky s vyznačenou hodnotou posuvu.



Obrázek č. 56: 80x zvětšený kořen třísky.



Obrázek č. 57: Snímek utvářené třísky (zvětšení 40x).



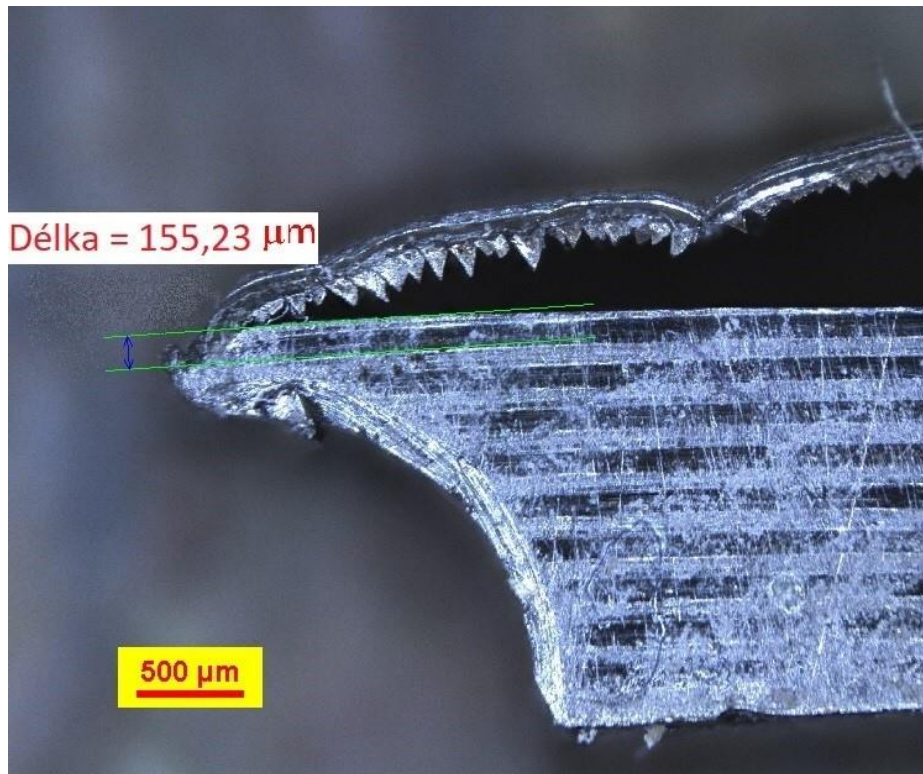
Obrázek č. 58: Snímek utvářené třísky (80x zvětšení).

Tabulka č. 6: Průměrné hodnoty měřených parametrů pro řeznou rychlost 60 m/min.

Tabulka průměrných hodnot	\bar{s} [μm]	\bar{G}_s [-]	\bar{t}_s [μm]
Tříska utvářená v blízkosti kořene	103	0,36	165
Tříska utvářená mimo kořen	121	0,48	149

7.2.2 Přerušení č. 2

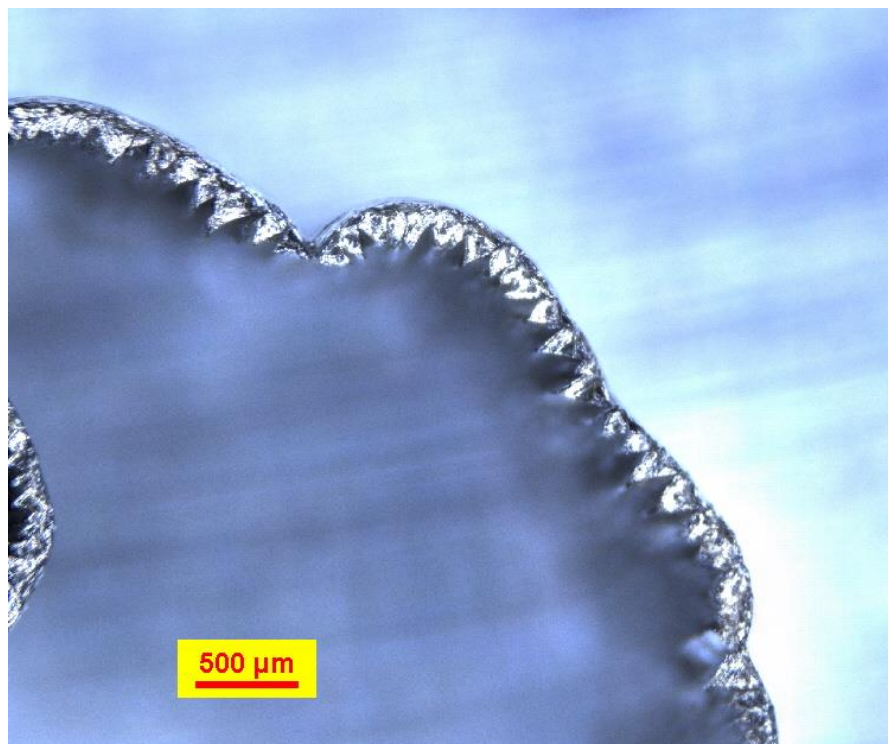
Druhé přerušení bylo uskutečněno přerušovačem s průměrem otvoru 2,5 mm, posuvem 0,15 mm/ot a řeznou rychlostí 75 m/min. Opět jsou jeho snímky zobrazené níže.



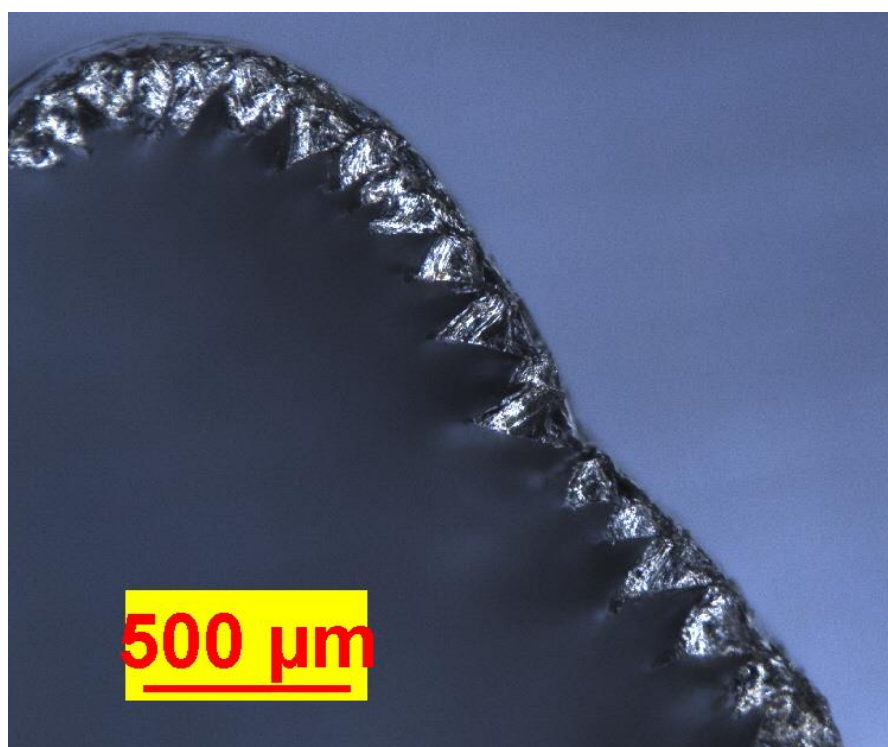
Obrázek č. 59: Kořen třísky druhého přerušení (zvětšený 40x).



Obrázek č. 60: Kořen třísky při druhém přerušení (zvětšený 80x).



Obrázek č. 61: Tříška vznikající při 75 m/min (zvětšení 40x).



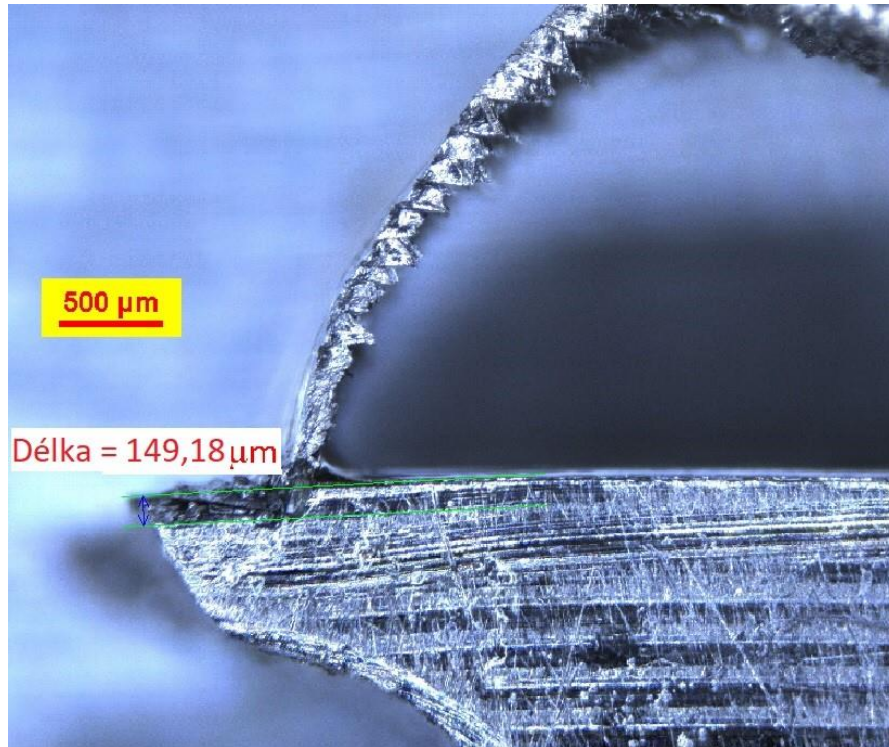
Obrázek č. 62: Tříška vznikající při 75 m/min (zvětšení 80x).

Tabulka č. 7: Průměrné hodnoty měřených parametrů pro řeznou rychlost 75 m/min.

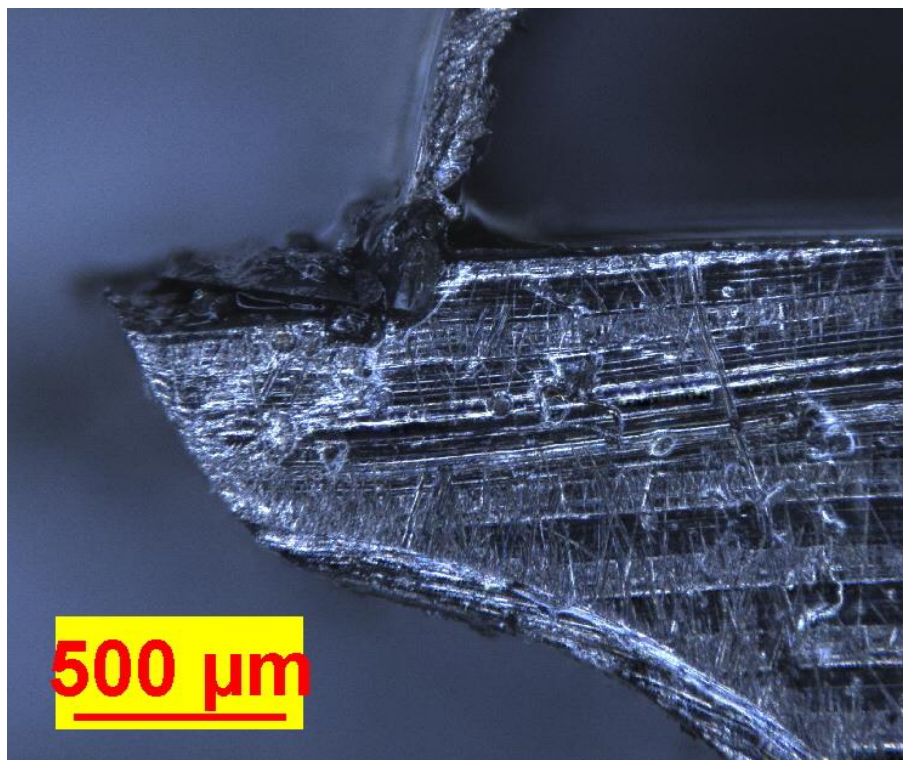
Tabulka průměrných hodnot	\bar{s} [μm]	\bar{G}_s [-]	\bar{t}_s [μm]
Tříška utvářená v blízkosti kořene	80	0,37	130
Tříška utvářená mimo kořen	113	0,56	137

7.2.3 Přerušeni č. 3

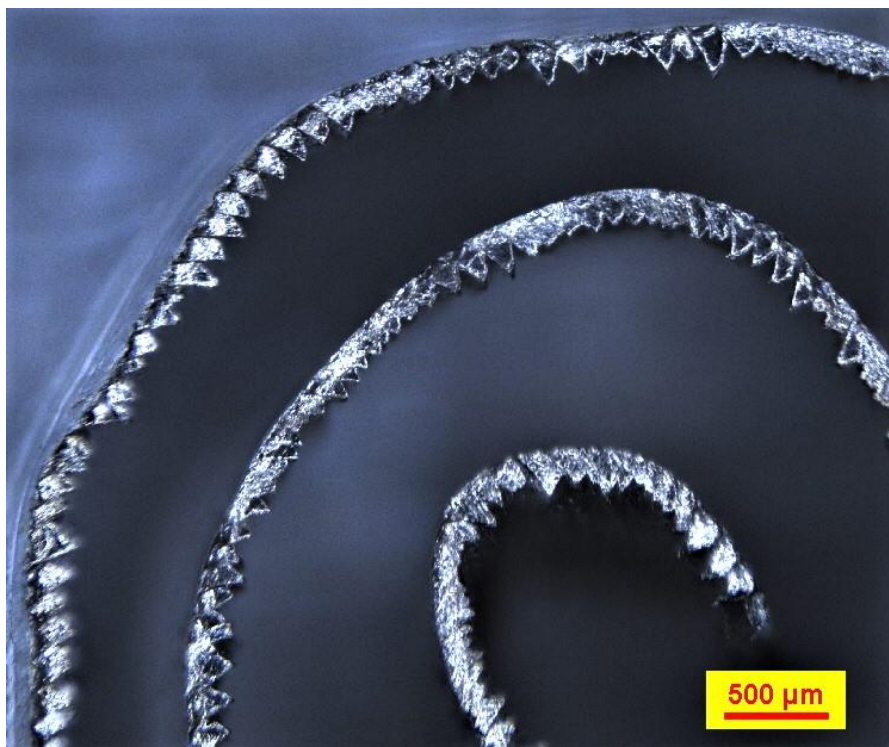
Kořen třísky třetího přerušeni řezu vznikl při obrábění řeznou rychlostí 45 m/min, posuvem 0,15 mm/ot s průměrem otvoru (a vlepeném kolíku v něm) 3 mm. Jeho snímky jsou níže.



Obrázek č. 63: Kořen třísky třetího přerušeni (zvětšení 40x).



Obrázek č. 64: Kořen třísky třetího přerušeni (zvětšení 80x).



Obrázek č. 65: Tříška vznikající při 45 m/min (zvětšení 40x).



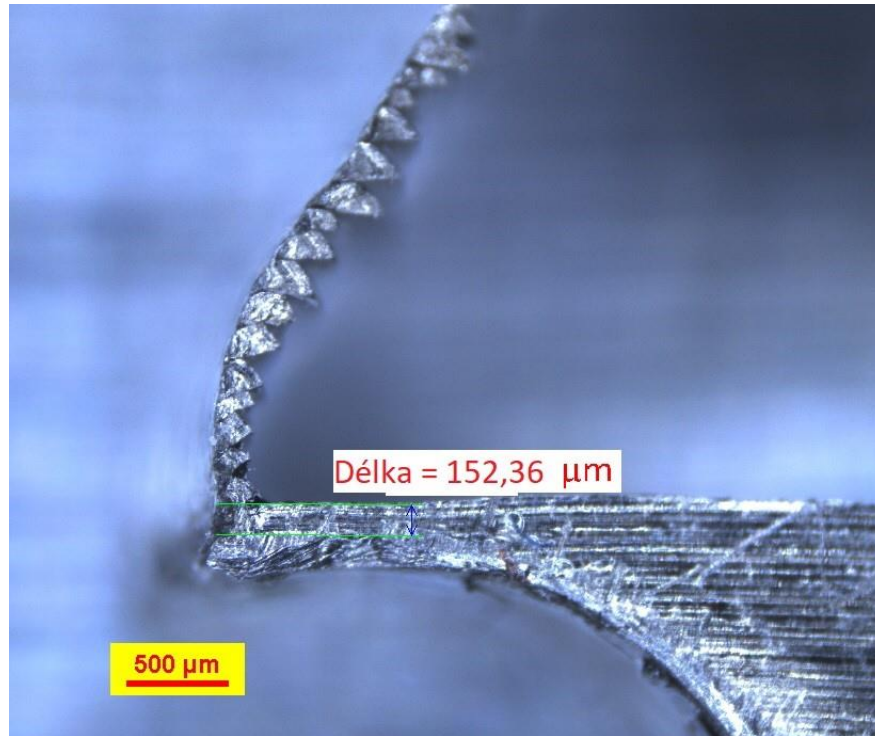
Obrázek č. 66: Tříška vznikající při 45 m/min (zvětšení 80x).

Tabulka č. 8: Průměrné hodnoty měřených parametrů pro řeznou rychlost 45 m/min.

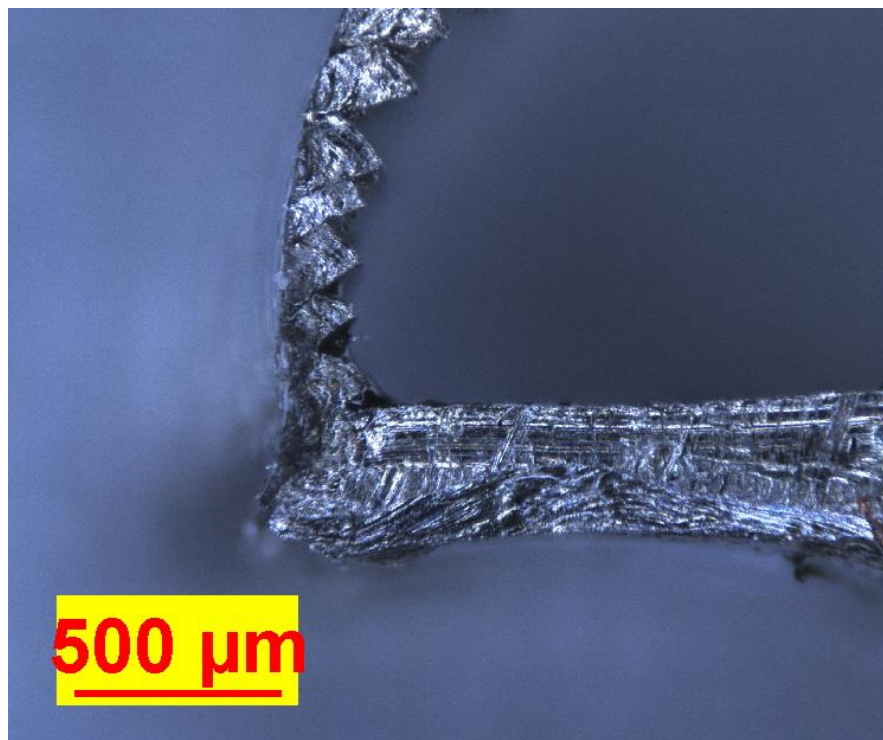
Tabulka průměrných hodnot	\bar{s} [μm]	\bar{G}_s [-]	\bar{t}_s [μm]
Tříška utvářená v blízkosti kořene	120	0,49	154
Tříška utvářená mimo kořen	123	0,50	151

7.2.4 Přerušení č. 4

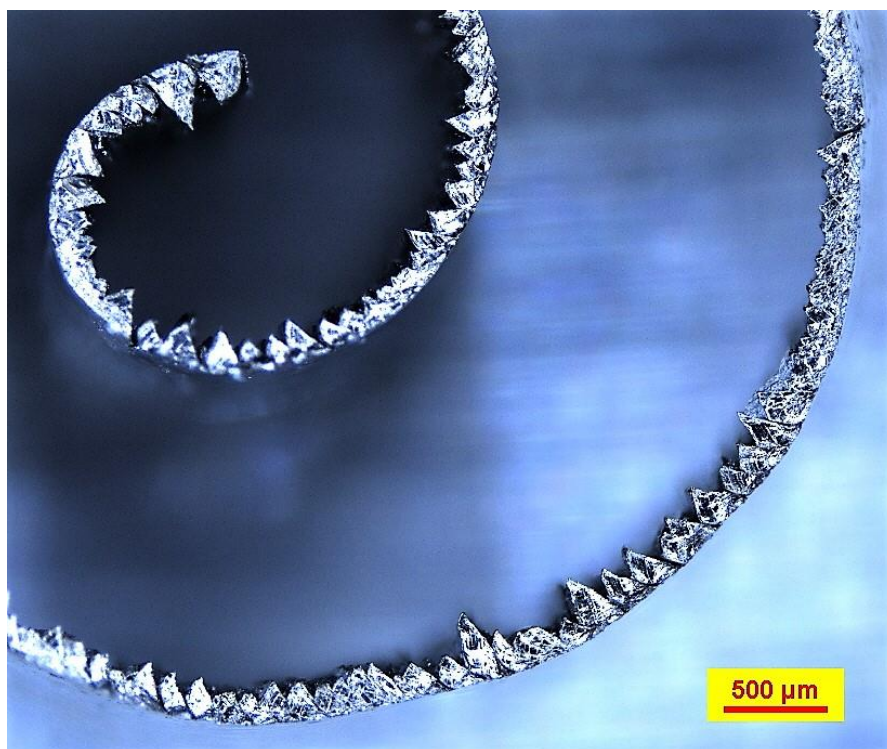
Pro poslední přerušení byl zvolen přerušovač s průměrem otvoru 4 mm. Obrábění probíhalo řeznou rychlostí 30 m/min a posuvem 0,15 mm/ot. Snímky kořene a třísky jsou opět zobrazeny níže.



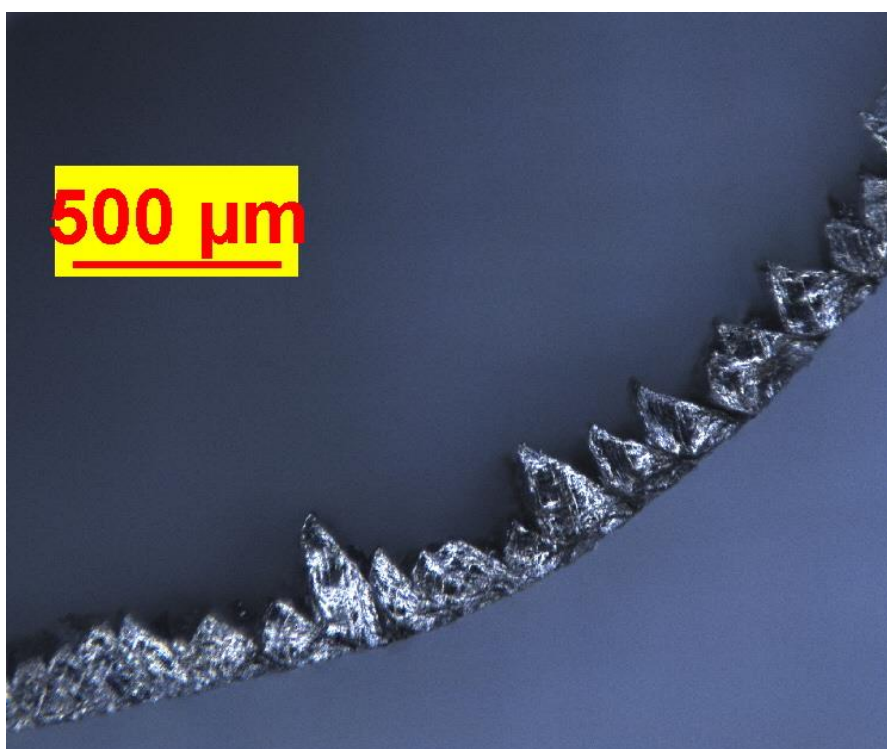
Obrázek č. 67: Snímek kořene třísky při obrábění řeznou rychlostí 30 m/min (zvětšení 40x).



Obrázek č. 68: Snímek kořene třísky při obrábění řeznou rychlostí 30 m/min (zvětšení 80x).



Obrázek č. 69: Tříška získaná obráběním rychlostí 30 m/min (zvětšení 40x).



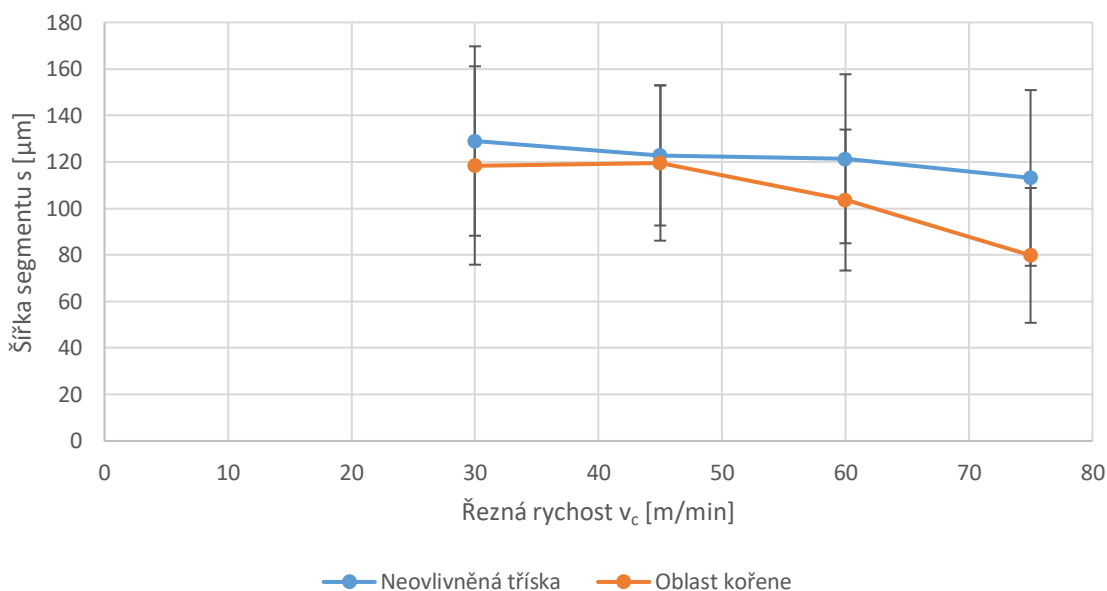
Obrázek č. 70: Tříška získaná obráběním rychlostí 30 m/min (zvětšení 80x).

Tabulka č. 9: Průměrné hodnoty deseti měřených segmentů pro řeznou rychlost 30 m/min.

Tabulka průměrných hodnot	\bar{s} [μm]	\bar{G}_s [-]	\bar{t}_s [μm]
Tříška utvářená v blízkosti kořene	119	0,50	150
Tříška utvářená mimo kořen	129	0,52	162

7.3 Vyhodnocení získaných parametrů

V tuto chvíli byl nasbírán dostatek dat pro získání závislosti vybraných parametrů na řezné rychlosti. Průběhy závislostí jsou zobrazeny na obrázcích č. 71 až 73. Prvním ze sledovaných parametrů je průběh šířky segmentu. Obě ze získaných křivek (jak pro neovlivněnou třísku, tak i třísku z oblasti kořene) mají klesající charakter v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti. Pro řeznou rychlost 45 m/min dosahovaly průměrné hodnoty šířek segmentů pro třísku z oblasti kořene a neovlivněnou třísku největší shody. V rámci chybových úseček se ovšem body při všech měřených řezných rychlostech prolínají. Klesající charakter křivek byl předpokládán na základě výsledků práce [47], kde je tento jev vysvětlován jako důsledek nárůstu teploty (vlivem vyšší řezné rychlosti) spolu s nízkou tepelnou vodivostí slitiny titanu (Ti-6Al-4V).

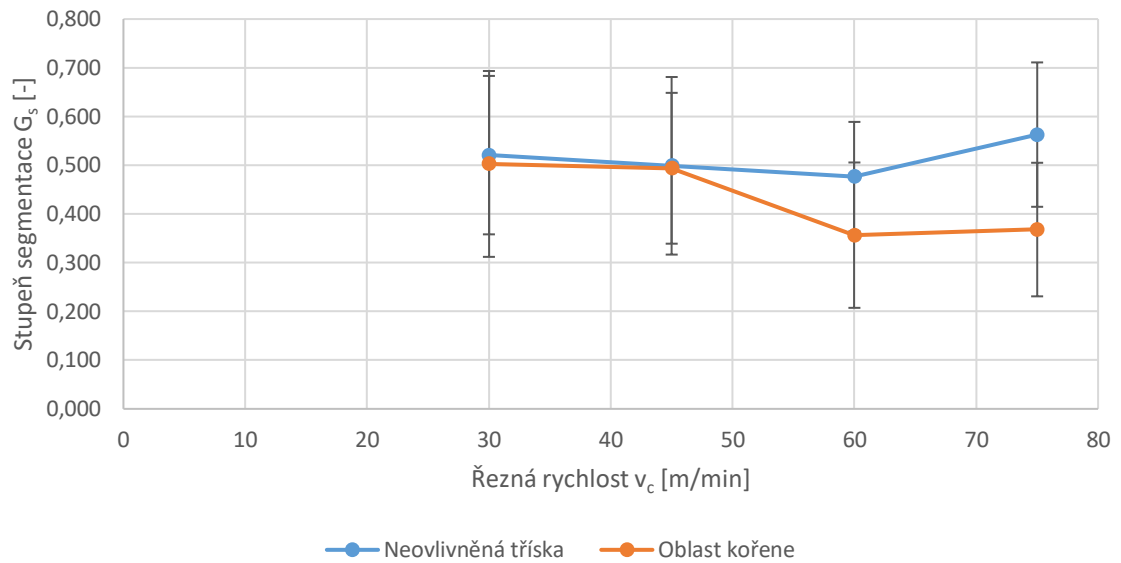


Obrázek č. 71: Závislost šířky segmentu na řezné rychlosti.

Parametrem sledovaným na obrázku č. 72 je stupně segmentace. Ten představuje poměrný rozdíl maximální tloušťky třísky a tloušťky třísky v místě kontaktu segmentů (dal by se také nazvat „mírou pilovitosti třísky“⁷). Vypočtené průměrné hodnoty stupně segmentace pro třísku z oblasti kořene a neovlivněnou třísku se zde rozcházejí pro hodnoty řezných rychlostí 60 m/min a 75 m/min. Rozdílné hodnoty stupně segmentace (pro třísku neovlivněnou a z oblasti kořene) při rychlosti 75 m/min bylo možné předpokládat již na základě obrázků č. 60 a 62, ze kterých je patrný větší rozdíl mezi maximální tloušťkou třísky a tloušťkou třísky v místě kontaktu segmentů právě u neovlivněné třísky. Rozdíl je o to patrnější, že ekvivalent tloušťky třísky je téměř totožný. Na základě provedených

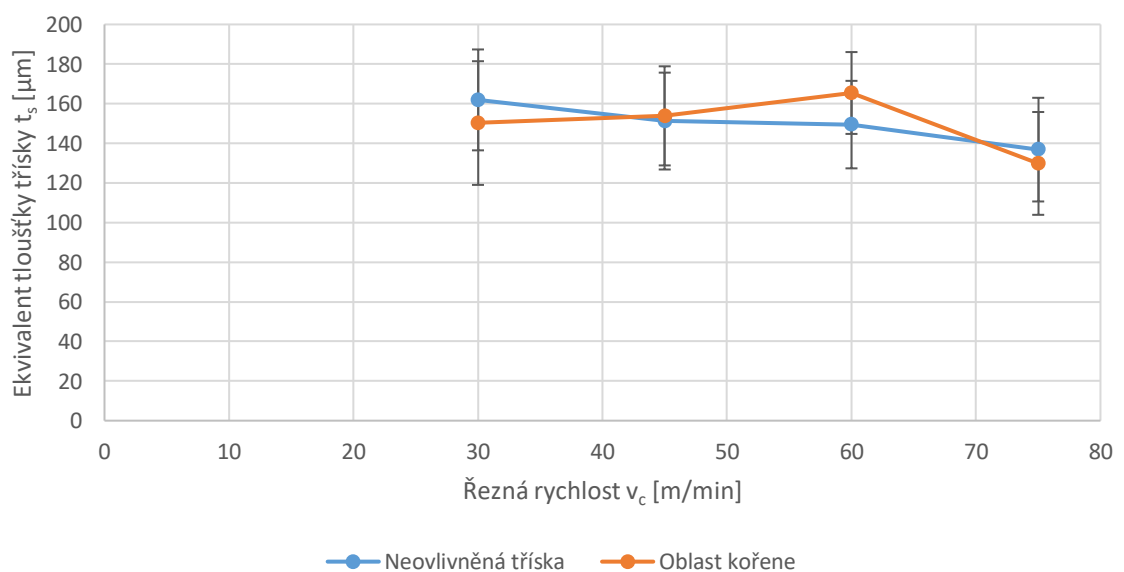
⁷ Nejedná se o používané slovní spojení v technické literatuře. Jde pouze o autorovu snahu přiblížení pojmu „stupeň segmentace“.

experimentů v práci [47] byl předpokládán s rostoucí řeznou rychlostí rostoucí průběh stupně segmentace.



Obrázek č. 72: Závislost stupně segmentace na řezné rychlosti.

Průběh ekvivalentu tloušťky třísky na řezné rychlosti je zachycen na obrázku č. 73. Také v tomto případě body obou z křivek sledují stejný průběh (v rámci chybových úseček). Vypočtené průměrné hodnoty (třísky neovlivněné a z oblasti kořene) se nejvíce liší při řezné rychlosti 60 m/min. Zde byla průměrná hodnota vypočteného ekvivalentu tloušťky pro třísku z oblasti kořene větší než u neovlivněné třísky. Literatura [47] uvádí, že tento parametr se s řeznými podmínkami příliš nemění. V rámci této práce byl zaznamenán s rostoucí řeznou rychlostí pozvolný pokles ekvivalentu tloušťky třísky.



Obrázek č. 73: Závislost ekvivalentu tloušťky třísky na řezné rychlosti.

7.4 Shrnutí výsledků experimentu

Ze známých řešení popsaných v kapitole č. 4 byl navržen a následně experimentálně otestován přerušovač řezu. Na základě výše uvedených výsledků měření je možné konstatovat, že je funkční. Křivky vybraných parametrů sledují stejný směr jak v případě neovlivněné třísky, tak i v případě třísky z oblasti kořene. U parametru stupně segmentace je tato podobnost zachycena pouze chybovými úsečkami⁸. Neshodu průměrných výsledků obou křivek lze interpretovat jako ovlivnění utvářené třísky vlivem blízké oblasti kořene. Tato chyba by mohla být způsobena např. průměrem otvoru pro kolík v přerušovači (jakožto nevhodným konstrukčním řešením), nebo vysokou řeznou rychlostí – průměr otvoru pro řeznou rychlost 60 m/min byl navržen 2 mm, pro rychlost 75 m/min byl navržen průměr 2,5 mm. Z průběhu ostatních závislostí je ale zřejmé, že se zvětšujícím se průměrem otvoru, se průměrné hodnoty sledovaných parametrů neshodují tím více. Je tedy možné, že sestrojený přerušovač není vhodný pro vyšší řezné rychlosti.

Při vizuálním (subjektivním) hodnocení kořenů třísek (na základě snímků z mikroskopu) je v první řadě nutno poukázat na jejich vlastní existenci – kořeny třísek vznikly za všech testovaných podmínek. Dále je možné hodnotit např. vznikající třísku bezprostředně před utržením kořene – při přerušení č. 3 (45 m/min) je možné si povšimnout, že se přestaly tvořit segmenty třísky a nebylo tedy možné ji vyhodnotit. Při přerušení č. 4 (30 m/min) došlo k velmi brzkému vytržení segmentu, kdy nezůstal v kořeni téměř žádný obrobený povrch. Přerušení č. 2 (75 m/min) již bylo zmíněno v souvislosti se stupněm segmentace, kdy dochází také ke změně utvářené třísky. Nástroj v tomto případě byl pravděpodobně v kontaktu s třískou i po vytržení segmentu (čemu nasvědčuje velká deformace odcházející třísky). Na základě vizuálního zhodnocení se jako nejvhodnější jeví přerušení č. 1 s průměrem otvoru 2 mm, při obrábění řeznou rychlostí 60 m/min.

Přerušovače byly vyrobeny výše zmíněným postupem – úprava polotovaru do výchozího stavu, výroba disků (pomocí zápichů), frézování podoby přerušovačů, příprava přerušovačů pro experiment (lepení plíšků a kolíků). Následovalo provedení vlastního experimentu a vyhodnocení. Odhadovaná časová náročnost výroby tohoto souboru přerušovačů a jejich vyhodnocení je následující:

- úprava polotovaru do výchozího stavu (dělení materiálu, osoustružení průměru s plánovanými přerušovači) – 30 minut
- výroba jednoho disku – 45 minut
- frézování přerušovačů spojené s přípravou (pro frézování) – 120 minut

⁸ Velikosti chybových úseček v této práci jsou určeny pomocí směrodatných odchylek.

- odmaštění a lepení plíšků s kolíky do dutin přerušovačů – 120 minut

Následovalo vytvrzení lepidla – 2880 minut (48 hodin).

- příprava stroje a nástroje pro přerušování s následným experimentem přerušování – 240 minut
- vyhodnocení experimentu (pořízení množství snímků, proměření 4 x 70 segmentů třísek) – 675 minut

Odhadovaná celková časová náročnost výroby tohoto souboru přerušovačů a jejich vyhodnocení je 1230 minut (20,5 hodin) bez započtení doby vytvrzování lepidla.

Mezi stěžejní výhody tohoto typu přerušovače patří konstrukční nenáročnost (z pohledu vlastního přerušovače, a také nutných úprav pro zprovoznění v obráběcím stroji). Dále např. násobnost, kdy se vyrábí celé soubory přerušovačů, namísto jednotlivých přerušování (po kterých musí následovat vyjmutí kořene třísky z obráběného polotovaru). V průběhu experimentu ovšem dochází k přerušovanému řezu, což má za následek zvýšené opotřebení břitu. To může být tak kritické, že dojde k destrukci nástroje ještě před samotným přerušováním. Tento efekt bude tím výraznější, čím více sektorů bude osazených přerušovači.

Jako možná konstrukční úprava pro budoucí využití by se mohlo zdát např. osazení přerušovače různými tloušťkami plechů, případně průměry kolíků. Takové experimenty by pravděpodobně dokázaly určit možnost využití přerušovače v konkrétních pracovních podmínkách. Dokázaly by také zdokumentovat zkreslení výsledků způsobené deformací přerušovače od vlivu řezné síly.

8 Závěr

Pro možnost optimalizace třískového obrábění je nezbytná znalost procesu tvorby třísky. Jevy odehrávající se v obráběném materiálu jsou popsány mechanikou tvorby třísky. Nástroj, který tyto jevy umožňuje pozorovat, je nazýván studiem tvorby třísky. Tato diplomová práce si kladla za cíl popis výše zmíněných jevů a možností jejich pozorování. Dále na základě rešerše navrhnout, sestavit a ověřit funkci jednoho z těchto „nástrojů“.

Teoretická část je tedy věnována procesu tvorby třísky se zaměřením na soustružení. Byly popsány způsoby pozorování změn odehrávajících se v obráběném materiálu a tyto změny samotné. Následně byl uveden přehled současných řešení přerušovačů řezu, na který byla navázána praktická část. Ta se k úspěšnému přerušení řezu dostala pomocí níže uvedených dílčích cílů.

Pomocí metody rozhodovací analýzy bylo rozhodnuto o typu přerušovače řezu, kterým se bude zabývat návrh rozměrů. Jednalo se o přerušovač na straně obrobku (fungující na základě vytržení segmentu vlivem vzniku kritického průřezu). Návrh jeho rozměrů byl proveden za účelem ověření funkce – schopnosti získat neovlivněný kořen třísky. Z tohoto důvodu byly vybrány čtyři přerušovače s průměry otvorů od 2 mm do 4 mm. Dále bylo rozhodnuto o jeho otestování různými řeznými rychlostmi (a sice od 30 m/min do 75 m/min).

Přerušovač byl vyroben a připraven k otestování. V průběhu experimentu docházelo k výraznému opotřebení vlivem přerušovaného řezu (způsobeného konstrukcí přerušovače). Všechny čtyři kořeny byly nalezeny a vyhodnoceny.

Přerušovač se tedy ukázal být funkčním ve všech čtyřech případech. Na základě subjektivního (vizuálního) hodnocení se jako nejvhodnější jevila kombinace průměru otvoru 2 mm a řezné rychlosti 60 m/min. Ovšem při posuzování třísky utvářené v oblasti kořene a neovlivněné třísky se přerušovač při vyšších řezných rychlostech může zdát být nespolehlivým. Sledované průběhy parametrů neovlivněné třísky v závislosti na řezné rychlosti se shodovaly s předpokladem (teorií). V závislosti na rostoucí řezné rychlosti: šířka segmentů třísky klesala, stupeň segmentace se zvyšoval a ekvivalent tloušťky třísky mírně klesal.

Cíle této práce byly naplněny. Motivací budoucím pracím by mohlo být např. získání většího počtu kořenů z oblasti vyšších řezných rychlostí a jejich následné vyhodnocení rozšířené např. o metalografické zdůvodnění naměřených rozdílů neovlivněných třísek a třísek ovlivněných přítomností kořene.

9 Seznam použité literatury

[1] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: průvodce tvorbou třísky*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-498-6.

[2] BUMBÁLEK, Bohumil. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI* [online]. In: . 2005 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf

[3] BAUER, Tomáš. *Kvalita povrchu po obrábění*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.

[4] BUDA, Ján, Karol VASILKO a Ján SOUČEK. *Teória obrábania: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fak. vysokých škôl. 2.*, preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1983. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).

[5] BUMBÁLEK, B. *Fyzikální podstata řezání* [online]. In: . 2005 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf

[6] VASILKO, Karol. *Teória a prax trieskového obrábania*. 1. Prešov, 2009. ISBN 978-80-553-0152-5.

[7] *Nástrojové roviny* [online]. In: . 2014 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1188>

[8] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2019-05-14]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf

[9] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.

[10] MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Návody ke cvičení z teorie obrábění*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968.

[11] *Technologie obrábění: přednáška č.4* [online]. In: . [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PREZENTACE/Technologie_obrabeni_prednaska_04.pps

[12] ZEMAN, Pavel. *Experimentální a simulační výzkum vlivu řezné rychlosti na proces tvorby třísky se zaměřením na plastické deformace obráběného materiálu*. Praha, 2005. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze.

[13] MOLINARI, A. a A. MOUFKI. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008, **50**(2), 124-131. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2007.07.015. ISSN 00207403. Dostupné také z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740307001233>

[14] *Metal cutting theory and practice*. 2nd ed. Boca Raton, FL, 2006. ISBN 08-247-5888-9.

[15] *Pramet: Příručka obrábění* [online]. In: . 2004 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrabeni_pramet.pdf

[16] *Pramet: Catalogue* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: https://www.dormerpramet.com/Downloads/PRAMET%20catalogue%202017_updated_S et%204_CZ-RU-PL-SK.pdf

[17] MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. Praha, 1988. Edícia strojárskéj literatúry (Alfa).

[18] *ISCAR: Non rotating catalogue* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2017/Non_Rotating_catalog_06_2017.pdf

[19] LIAO, Zhirong a Dragos A. AXINTE. On chip formation mechanism in orthogonal cutting of bone. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2016, **102**, 41-55 [cit. 2019-07-05]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2015.12.004. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695515300973>

[20] WAGER, J.G. a R.H. BROWN. A new Quick-Stop Device for Milling and Grinding. *CIRP Annals* [online]. 1980, **29**(1), 15-18 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61287-6. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607612876>

[21] GRIFFITHS, B.J. The development of a quick-stop device for use in metal cutting hole manufacturing processes. *International Journal of Machine Tool Design and Research* [online]. 1986, **26**(2), 191-203 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/0020-7357(86)90219-2. ISSN 00207357. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020735786902192>

[22] WU, C.L., K.S. WANG a L.C. TSAI. A new electromagnetic quick stop device for metal cutting studies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2006, **29**(9-10), 853-859 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1007/s00170-005-2608-y. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-005-2608-y>

[23] DENKENA, Berend, Thilo GROVE a Florian SEIFFERT. Chip root analyses in peripheral longitudinal up-grinding by means of a new quick-stop device. *International Journal of Abrasive Technology* [online]. 2015, **7**(1) [cit. 2018-11-28]. DOI: 10.1504/IJAT.2015.070583. ISSN 1752-2641. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=70583>

[24] TÖNSHOFF, Hans Kurt a Berend DENKENA. Chip Formation. TOENSHOFF, Hans Kurt a Berend DENKENA. *Basics of Cutting and Abrasive Processes* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 2013-6-13, s. 21-36 [cit. 2019-07-06]. Lecture Notes in Production Engineering. DOI: 10.1007/978-3-642-33257-9_2. ISBN 978-3-642-33256-2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-33257-9_2

[25] Teorie obrábění: Experimentální výzkum tvorby třísky. In: *Katedra obrábění a montáže* [online]. Liberec, 2009 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/to_cv2.pdf

[26] *Design of quick-stop device easy and safe to operate fo chip formation study on turning* [online]. 2011 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290839020_DESIGN_OF_QUICK-STOP_DEVICE_EASY_AND_SAFE_TO_OPERATE_FOR_CHIP_FORMATION_STUDY_ON_TURNING

[27] *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2005, **45**(7-8) [cit. 2018-11-25]. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504002998>

[28] MOUSAVI AZAM, Seyyed Hamed a Ebrahim AHMADLOO. Analysis of Chip Removal Operations via New Quick-Stop Device. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2015, **31**(13), 1782-1791 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1080/10426914.2015.1127959. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1127959>

[29] SUBBIAH, Sathyan a Shreyes N. MELKOTE. Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of Al2024-T3. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2008, **474**(1-2), 283-300 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/j.msea.2007.04.116. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509307007824>

[30] ELLIS, J., R. KIRK, G. BARROW a Mohsen KAZEMIYOUN. The development of a quick-stop device for metal cutting research. *International Journal of Machine Tool Design and Research* [online]. 1969, **9**(3), 321-339 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1016/0020-7357(69)90007-9. ISSN 00207357. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020735769900079>

[31] SCHNEIDER, F., R. LOHKAMP, F.J.P. SOUSA, R. MÜLLER a J.C. AURICH. Analysis of the Surface Integrity in Ultra-precision Cutting of Cp-titanium by Investigating the Chip Formation. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **13**, 55-60 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.010. ISSN 22128271. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114000110>

[32] SATHEESHA, M., V.K. JAIN a P. KUMAR. Design and development of a quick-stop device (QSD). *Precision Engineering* [online]. 1990, **12**(4), 205-212 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/0141-6359(90)90062-4. ISSN 01416359. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141635990900624>

[33] Development of a Universal Quick Stop Device for Lathe Machine. *Journal of Sustainable Technology* [online]. 2017, **8**(1), 107 - 116 [cit. 2019-07-06]. ISSN 2251-0680. Dostupné z: https://www.futa.edu.ng/journal/home/downloadpdf/paper_5_1537790843

[34] JOSHI, Shashikant, Pravin PAWAR, Asim TEWARI a Suhas S. JOSHI. Effect of β phase fraction in titanium alloys on chip segmentation in their orthogonal machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2014, **7**(3), 191-201 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.03.001. ISSN 17555817. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581714000078>

[35] The use of an indirect impact quick-stop mechanism during the turning of α -titanium BT5 alloy. *Int. J. Machining and Machinability of Materials* [online]. 2008, **3**(1/2), 80 - 90 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/249922291_The_use_of_an_indirect_impact_quick-stop_mechanism_during_the_turning_of_a-titanium_BT5_alloy

[36] YEO, Swee-Hock, Woei-Wen LUI a Viet PHUNG. A quick-stop device for orthogonal machining. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1992, **29**(1-3), 41-46 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/0924-0136(92)90423-P. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092401369290423P>

[37] AMINI, Saeid, Mohammad LOTFI, Hossein PAKTINAT a Mohsen KAZEMIYOUN. Characterization of vibratory turning in cutting zone using a pneumatic quick-stop device. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2017, **20**(2), 403-410 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.03.003. ISSN 22150986. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2215098616311284>

[38] ALABDULLAH, M., A. POLISHETTY a J. NOMANI. Impact of work hardening, tool wear and geometry response on machinability during turning AL-6XN super austenitic stainless steel: A work hardening and wear studies on AL-6XN alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [online]. 2017, **48**(3-4), 190-197 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1002/mawe.201600758. ISSN 09335137. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/mawe.201600758>

[39] POLISHETTY, Ashwin, Guy LITTLEFAIR, Moshe GOLDBERG a Junior NOMANI. Current Trends in Machinability Research. *International Journal of Materials Forming and Machining Processes* [online]. 2016, **3**(1), 1-11 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.4018/IJMFMP.2016010101. ISSN 2334-4563. Dostupné z: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/IJMFMP.2016010101>

[40] Datasheet AL6-XN. In: *METALCOR* [online]. [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/29/>

[41] PHILIP, P.K. Study of the performance characteristics of an explosive quick-stop device for freezing cutting action. *International Journal of Machine Tool Design and Research* [online]. 1971, **11**(2), 133-144 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1016/0020-7357(71)90022-9. ISSN 00207357. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0020735771900229>

[42] OZTURK, Sabri a Erhan ALTAN. Design of a computer aided quick-stop device for study of dead metal zone formation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2012, **34**(4), 501-505 [cit. 2019-07-06]. DOI: 10.1590/S1678-58782012000400011. ISSN 1678-5878. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782012000400011&lng=en&nrm=iso&tlng=en

[43] Development of Low-Carbon Lead-Free Free-Cutting Steel Friendly to Environment. *Nippon Steel Technical Report* [online]. 2007, (96), 45 - 49 [cit. 2019-07-09]. Dostupné z: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9608.pdf>

[44] Effect of cutting on surface hardness and residual stresses for 12Mn austenitic steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. 2012, **55**, 80 - 89 [cit. 2019-07-10]. ISSN 1734-8412. Dostupné z: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol55_1/55111.pdf

[45] GUO, Y.B a J SAHNI. A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, **44**(2-3), 135-145 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2003.10.009. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503002864>

[46] SOUKOPOVÁ, Jana. *Vícekritériální metody hodnocení* [online]. In: . 2013 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1456/jaro2013/MKV_VZVP/um/33149329/Studijni_text_metody_vicekriterialniho_rozhodovani.pdf

[47] SÁNCHEZ HERNÁNDEZ, Yezika, Francisco TRUJILLO VILCHES, Carolina BERMUDO GAMBOA a Lorenzo SEVILLA HURTADO. Experimental Parametric Relationships for Chip Geometry in Dry Machining of the Ti6Al4V Alloy. *Materials* [online]. 2018, **11**(7) [cit. 2019-07-17]. DOI: 10.3390/ma11071260. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/7/1260>

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Výrobní výkres souboru přerušovačů