



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ ZE SLINUTÝCH KARBIDŮ PŘI VYSOKOPOSUVOVÉM FRÉZOVÁNÍ

TESTING OF SINTERED CARBIDE CUTTING TOOLS DURING HIGH FEED MILLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Frank

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Frank**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Testování řezných nástrojů ze slinutých karbidů při vysokoposuvovém frézování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat porovnáním vybraných typů fréz a vyměnitelných břitových destiček od různých výrobců řezných nástrojů při vysokoposuvovém frézování. V práci bude provedena charakteristika aplikovaných frézovacích nástrojů a použitých pracovních podmínek od konkurenčních výrobců. Konkurenční nástroje budou porovnány s navrženým prototypem řezného nástroje od společnosti Dormer Pramet s.r.o. Součástí práce bude i návrh metodiky ověření vybraných parametrů VBD a provedení řezných zkoušek na zkušebně obrábění společnosti Dormer Pramet, s.r.o. V práci bude provedena analýza dosažených výsledků řezných zkoušek a jejich zhodnocení, které společnost Dormer Pramet, s.r.o. využije pro návrh nového sortimentu řezných nástrojů.

Cíle diplomové práce:

Teoretický rozbor řešené problematiky.

Analýza vybraných typů řezných nástrojů a vyměnitelných břitových destiček.

Návrh a příprava experimentu (materiál obrobku, řezné podmínky, řezné prostředí, provedení vlastních řezných zkoušek).

Technicko-ekonomické zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Příručka obrábění: kniha pro praktiky. SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

ERDEL, B. P. High-speed machining. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2003. 247 s. ISBN 0-87263-649-6.

DORMER PRAMET. Frézování: katalog 2021-2022. DORMER PRAMET, s. r. o., 2021. 790 s.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. 1. Vyd. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je porovnání nástrojů pro frézování vysokými posuvy od společnosti Dormer Pramet, s.r.o., která tyto výsledky použije pro dokončení vývojového procesu nové rodiny nástrojů. Nástroje byly porovnány z hlediska axiálního házení, způsobu ochodu třísky z místa řezu a jejího utváření, teplotních poměrů a teplot v místě řezu, drsnosti obroběných ploch a zatížení vřetene stroje, hladiny vibrací při obrábění a trvanlivosti břitů VBD. Testy byly provedeny na obráběném materiálu X37CrMoV5-1 ve dvou stavech, v měkkém stavu s tvrdostí cca 300 HB a ve zušlechťeném stavu s tvrdostí cca 54 HRC. Práce obsahuje také teoretickou část zabývající se technologií frézování vysokými posuvy, opotřebením nástrojů a popisem testovaných nástrojů. Dosažené výsledky jsou shrnuty na konci práce v technicko-ekonomickém zhodnocení.

Klíčová slova

Dormer Pramet, vysokoposuvové frézování, HFM, testování nástrojů, slinuté karbidy

ABSTRACT

The aim of this thesis is to compare high feed milling tools from Dormer Pramet, s.r.o., which will use these results to complete the development process of a new family of tools. The tools were compared in terms of axial runout, chip evacuation and chip forming, temperature ratios and temperatures at the cutting area, roughness of machined surfaces and machine spindle loading, machining vibration levels and VBD cutting edge durability. The tests were carried out on the machined material X37CrMoV5-1 in two states, a soft state with a hardness of about 300 HB and a hardened state with a hardness of about 54 HRC. The thesis also includes a theoretical section dealing with high feed milling technology, tool wear and a description of the tested tools. The results obtained are summarized at the end of the thesis in a techno-economic evaluation.

Keywords

Dormer Pramet, high feed milling, HFM, testing of cutting tools, sintered carbides

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRANK, Ondřej. *Testování řezných nástrojů ze slinutých karbidů při vysokoposuvovém frézování* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zavprace/detail/157819>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Testování rezných nástrojů ze slinutých karbidů při vysokoposuvovém frézování vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 24. 5. 2024

Místo, datum

Ondřej Frank

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat nejen vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Josefovi Sedlákovvi PhD. za ochotu a cenné rady při vypracování mé diplomové práce, ale i panu Ing. Martinovi Drbalovi a dalším zaměstnancům Ústavu strojírenské technologie za technickou pomoc při obsluze měřicího vybavení. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a příbuzným za podporu při studiu, a také společnosti Dormer Pramet, s.r.o. za možnost vypracovat práci ve spolupráci s ní.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	7
PROHLÁŠENÍ.....	8
PODĚKOVÁNÍ.....	9
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 TEORETICKÝ ÚVOD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	11
2.1 Frézování vysokými posuvy.....	11
2.2 Mechanismus tvorby třísky.....	13
2.3 Opotřebení nástrojů.....	15
2.3.1 Mechanismy opotřebení.....	15
2.3.2 Formy opotřebení.....	16
2.3.3 Kritéria opotřebení a trvanlivost nástrojů.....	16
3 NÁVRH A PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK.....	20
3.1 Popis vybraných typů frézovacích nástrojů.....	20
3.1.1 Dormer Pramet, s.r.o. – SZD09.....	20
3.1.2 Dormer Pramet, s.r.o. – SSO09.....	21
3.1.3 Tungaloy Czech, s.r.o. – TXSW 09.....	23
3.1.4 Kyocera Precision Tools, Inc. – MFH 050.....	24
3.2 Obráběný materiál.....	25
3.3 Obráběcí stroj.....	26
3.4 Měřicí vybavení.....	26
3.5 Podoba a průběh řezných zkoušek.....	28
4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ŘEZNÝCH ZKOUŠEK.....	30
4.1 Měření tvrdosti obráběných materiálů.....	30
4.2 Měření axiálního házení osazených fréz.....	31
4.3 Vyhodnocení záznamu vysokorychlostní kamery.....	32
4.4 Vyhodnocení záznamu termokamery.....	34
4.5 Měření zatížení vřetene a drsnosti povrchu.....	37
4.5.1 Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), bez procesní kapaliny.....	37
4.5.2 Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), s procesní kapalinou.....	40
4.5.3 Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), bez procesní kapaliny.....	43
4.5.4 Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), s procesní kapalinou.....	46
4.6 Opotřebení nástrojů po první části řezných zkoušek.....	49
4.7 Vzniklé třísky a diagram utváření.....	53
4.8 Analýza vibrací.....	57
4.9 Měření trvanlivosti břitů.....	59
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	61
ZÁVĚR.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
SEZNAM PŘÍLOH.....	68

ÚVOD

Motivací pro vytvoření této diplomové práce a provedení experimentálního testování, které je v této práci popsáno, je neustálý tlak na zvyšování produktivity a efektivity obrábění kovů, s čímž úzce souvisí i zvyšování požadavků na řezné nástroje. Výrobci řezných nástrojů se v reakci na požadavky trhu snaží o vývoj nástrojů, které jsou schopny dosahovat maximálního úběru materiálu za jednotku času, při zachování vysoké trvanlivosti břitů a kvality obrobenech ploch.

Jednou ze společností, které se zabývají výrobou a vývojem řezných nástrojů je i Dormer Pramet s.r.o. Tato společnost pracuje na inovaci svého sortimentu v oblasti frézování vysokými posuvy, což je obráběcí strategie zaměřená právě na produktivní obrábění. Díky geometrii, která se u těchto nástrojů používá, je možno obrábět při velmi vysokých hodnotách posuvů a tím dosáhnout i velkých úběrů obráběného materiálu.

V rámci této diplomové práce je popsán průběh a výsledky experimentálního testování nového prototypu nástroje a starší koncepce, která by měla být nahrazena v rámci sortimentu společnosti Dormer Pramet s.r.o.

Experimentální část je řešena v souladu s požadavky společnosti a zabývá se první částí procesu testování, který se zaměřuje na data o způsobu utváření třísky, zatížení vřetene stroje a jakosti obrobenech ploch. Testování je rozšířeno o sledování řezného procesu pomocí termokamery a vibrodiagnostiky. Dále jsou nástroje porovnány z hlediska trvanlivosti břitů VBD.



Obr. 1 Testované nástroje.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem této diplomové práce je uvedení základních poznatků o frézování vysokými posuvy a řezném procesu při tomto typu obrábění, což bude provedeno v její první teoretické části. Dále se bude zabývat rešerší a porovnáním podobných typů nástrojů, které nabízejí různé společnosti, z pohledu jejich konstrukce a geometrie. Dále budou popsány k nástrojům odpovídající vyměnitelné břitové destičky, jejich parametry, materiály a doporučené řezné podmínky.

Praktická část se bude zabývat experimentálním porovnáním těchto frézovacích nástrojů z různých hledisek. Mezi možné varianty řezných zkoušek patří testy trvanlivosti břitů užitých nástrojů, testy zaměřené na kvalitu obrobených ploch, na výkonnost nástrojů, tedy úběr materiálu za jednotku času či například porovnání nástrojů z hlediska zatížení vřetene stroje.

Pro tuto diplomovou práci bylo naplánováno mnoho dílčích měření, které jsou zaměřeny na různé parametry nástrojů a obráběcího procesu. Základní soubor testů, které se týkají měření drsnosti obrobených ploch a zatížení vřetene stroje při různých řezných podmínkách bude rozšířen o měření vibrací vřetene stroje, záznam řezného procesu pomocí vysokorychlostní kamery a termokamery. Před zahájením testování bude prověřeno axiální házení fréz a měření tvrdosti obráběných materiálů. Ve druhé části řezných zkoušek bude provedeno porovnání trvanlivostí břitů nástrojů.

- **Společnost Dormer Pramet, s.r.o.**

Tato diplomová práce vznikla za spolupráce se společností Dormer Pramet, s.r.o. se sídlem v Šumperku (obr. 2). Společnost se zabývá komplexní činností v oblasti nástrojů pro třískové obrábění, jejich vývojem a výrobou ale také prodejem a distribucí.

Historie společnosti sahá až do roku 1951, kdy byl v Šumperku založen Pramet, n.p. Tento název vznikl spojením slov „Prášková metalurgie“. Pramet, n.p. se zabýval výrobou výrobků ze slinutého karbidu, mezi které patřily i řezné nástroje. [2; 3]

Za dobu svého působení prošla společnost mnohými strukturálními změnami. Největší příšla v roce 2014, kdy došlo ke spojení se společností Dormer Tools, Inc. Do této doby se společnost Pramet Tools, s.r.o. zabývala výhradně nástroji s vyměnitelnými břitovými destičkami, společnost Dormer Tools, Inc. nástroji monolitními. Nynější společnost Dormer Pramet, s.r.o. nabízí sortiment obou původních společností a díky tomuto strategickému tahu se také povedlo významně rozšířit distribuční a servisní síť v mnoha zemích světa. [2; 4; 5]

Mezi nabízený sortiment patří nástroje pro frézování, soustružení, vrtání i závitování. Díky vlastnímu vývoji dochází k neustálému zvyšování výkonnosti a konkurenceschopnosti výrobků a společnost se zaměřuje i na nástroje pro speciální aplikace např. v letectví a železniční dopravě. [2; 5]



Obr. 2 Sídlo společnosti Dormer Pramet, s.r.o.

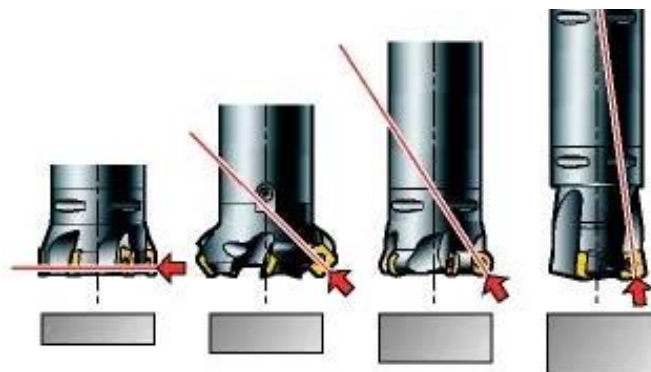
2 TEORETICKÝ ÚVOD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V následující kapitole jsou rozebrány základní informace týkající se řešené problematiky. Obsahuje teoretický základ o frézování vysokými posuvy, nástrojů používaných pro tento typ obrábění, utváření třísek a jejich dělení, charakteristiku opotřebení nástrojů a jejich trvanlivosti.

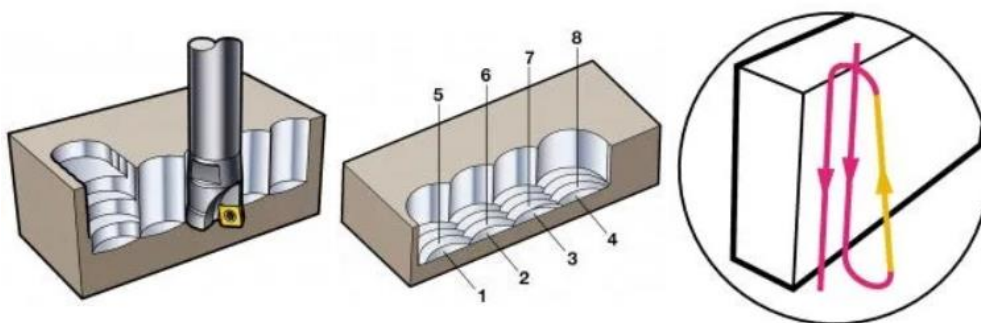
2.1 Frézování vysokými posuvy

Metoda vysokoposuvového frézování (HFM – *High Feed Milling*) vznikla za účelem zvýšení produktivity při frézování, tedy úběru co největšího množství materiálu za co nejkratší čas. V porovnání s konvenční technologií je tento úběr až 3x vyšší. Její využití je tedy zejména pro hrubovací operace. [6; 7; 8]

Typickým znakem této metody je kombinace malé hloubky řezu a_p , která dosahuje hodnot do cca 2 mm a vysokých hodnot posuvů na zub frézy f_z , běžně i 2,5 až 3,5 mm. Typicky se také používají frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. Tyto destičky mají své specifické rozměrové a tvarové vlastnosti, jsou konstrukčně robustnější a bývají pouze jednostranné. Frézy pro HFM mají také malý úhel nastavení hlavního ostří κ_r , což má velmi příznivý vliv na celkovou stabilitu řezného procesu. Řezné síly jsou rozloženy tak, že je dosaženo maximálních sil ve směru osy nástroje (axiální síly) a síly působící v radiálním směru jsou minimální, viz obr. 3. Významně se tak sníží riziko vibrací, které ovlivňují kvalitu výsledného obrobeneho povrchu. Dále je díky převažujícímu axiálnímu silovému namáhání nástrojů možné využít jejich vyšší vyložení (až 7x D). [6; 7; 8; 9]



Obr. 3 Směr sil při změně κ_r [11].

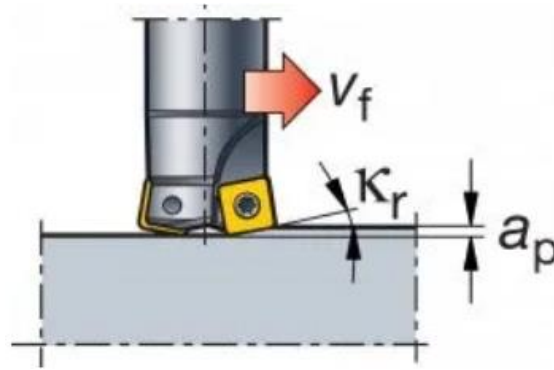


Obr. 4 Ponorné frézování [13].

V kombinaci většího vyložení nástroje a možnosti odlehčení těla frézy nad řeznou částí (břitové destičky a jejich řezná část převyšují tělo frézy) lze frézy pro frézování vysokými posuvy využít i na ponorné frézování (*plunging*), kdy frézování probíhá s axiálním přísuvem a celý proces

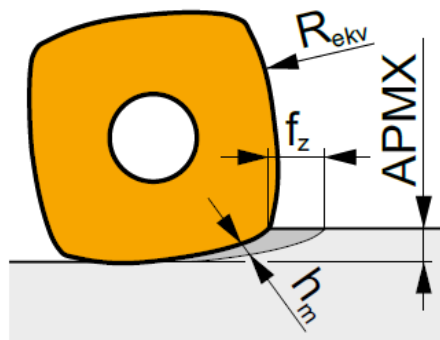
připomíná vyvrtávání, tak jako je naznačeno na obr. 4. Tato metoda se uplatňuje typicky při výrobě forem či zápustek, kde se vyskytují hluboké dutiny a drážky. [8; 12; 13]

Nástroje pro frézování vysokými posuvy (obr. 5) mají typicky úhel nastavení hlavního ostří v hodnotách 10° až 20° . V kombinaci s malou hloubkou řezu a_p je pak dosahováno efektu ztenčení a prodloužení třísky. Tento efekt má pozitivní vliv na odvod tepla z místa řezu, jelikož se zvýší plocha, která toto teplo odvádí a dochází ke snížení tepelného namáhání nejen nástroje, ale také povrchu obráběného materiálu. [11; 12]



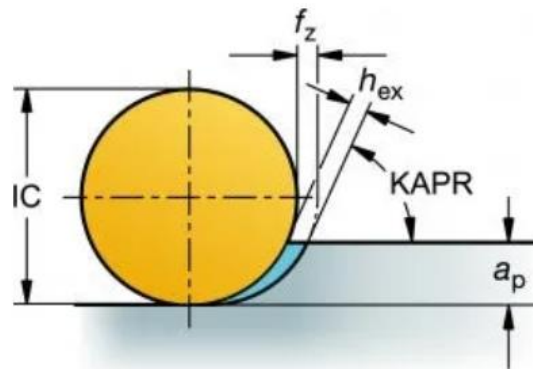
Obr. 5 HFM fréza [11].

Při frézování vysokými posuvy se používají vyměnitelné břitové destičky jiné konstrukce než pro běžné konvenční frézování. Díky vyšším rychlostem jsou destičky více namáhány. Typicky jsou destičky pro HFM robustnější a mají větší zaoblení špičky, díky čemuž lépe odolávají mechanickému zatížení. Velmi často se využívají destičky čtvercového tvaru (označení S), které mohou mít kruhové řezné hrany, viz obr. 6. Dalšími často využívanými tvary jsou např. destičky typu L, P, W nebo kruhové R. [11; 12; 14]



Obr. 6 VBD pro HFM [14].

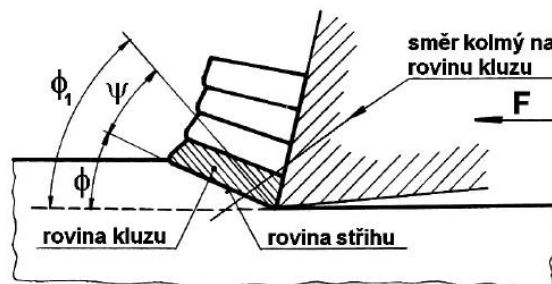
S výhodou lze při HFM využívat frézy s destičkami kruhovitěho tvaru, kde k efektu ztenčení třísky dochází přirozeně, pokud je zachována určitá hloubka řezu. Tato hloubka by měla být v případě frézování vysokými posuvy maximálně 10 % průměru VBD. Při nárůstu hloubky řezu se u kruhové destičky mění také úhel nastavení hlavního ostří, od hodnoty 0° až po 90° , jak je patrné z obr. 7. [7; 11; 15]



Obr. 7 Kruhová VBD [15].

2.2 Mechanismus tvorby třísky

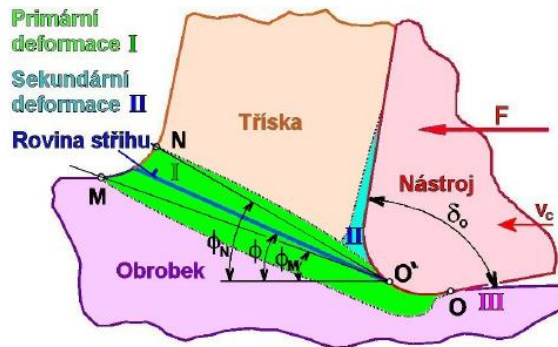
Při řezném procesu je břit řezného nástroje určitou silou tlačén směrem do obrobku, kde vzniká značné napětí, které v obráběném materiálu způsobuje pružné a plastické deformace. Smykové napětí při posunu nástroje narůstá a se zvyšující se plastickou deformací dochází k pětchování a posunu materiálu před břitem. Posuv jednotlivých vrstev materiálu nastává v kluzných rovinách (obr. 8), které jsou definovány úhlem ϕ_1 . Jakmile napětí naroste na hodnotu meze pevnosti ve střihu, dochází k odstřižení jednotlivých segmentů třísky. Ke střihu těchto segmentů dochází v rovině střihu definované úhlem ϕ . U tvárných materiálů je plocha střihu větší a úhel ϕ menší, u křehkých materiálů je chování opačné. Na velikost úhlu ϕ má značný vliv také velikost řezné rychlosti. Při jejím zvyšování roste i úhel ϕ . Zároveň platí, že čím vyšší je úhel ϕ , tím štíhlejší je tříska, a proces řezání je méně energeticky náročný. [16; 17]



Obr. 8 Oblast vzniku třísky [16].

V okolí břitu nástroje jsou rozlišovány následující oblasti (obr. 9), ve kterých dochází k pružným a plastickým deformacím [16; 17]:

- oblast primární plastické deformace před břitem – I,
- oblast sekundární plastické deformace mezi vznikající třískou a čelem nástroje – II,
- oblast terciální plastické deformace v povrchové vrstvě obrobku – III.



Obr. 9 Oblast vzniku třísky [16].

Oblast primární plastické deformace se nachází v okolí střížné roviny skloněné pod úhlem ϕ . Oblast sekundární plastické deformace leží v oblasti styčné plochy třísky s čelem nástroje a značně závisí na podmínkách tření s nástrojem. Oblast terciální plastické deformace pak úzce souvisí se zpevněním povrchové vrstvy obráběného materiálu. Velikost a tvar jednotlivých oblastí je ovlivněn různými faktory, mezi které patří vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky, geometrie řezného nástroje či řezné prostředí. [16; 17]

• Třídění třísek

Na vlastnosti třísek vznikajících při řezném procesu jsou kladeny různé požadavky týkající se jejich rozměrů a tvarů. Vzhledem k pozdější manipulaci s třískami, jako je jejich odstraňování a odvod z prostoru stroje či manipulace při odpadovém hospodářství. Neméně důležitý je jejich samotný odchod z místa řezu, který by měl být také bezproblémový. [16; 17]

Tvar třísek velmi ovlivňuje efektivní využití řezného nástroje. Pokud vzniká dlouhá plynulá tříška, může docházet k jejímu namotávání na nástroj a tím dojít k jeho poškození. Dále může tento tvar třísky svým otěrem velmi negativně ovlivnit kvalitu obrobené plochy. U materiálů, které vykazují sklon k tvorbě uvedeného typu třísky, jako jsou například korozivzdorné oceli, je nutné provádět různá zvláštní opatření. Mezi ně patří použití speciálních utvařečů třísek umístěných na čele nástroje, využití přerušovaného řezu k rozdělení třísek, nebo obrábění materiálů se speciální úpravou jejich struktury – automatové oceli. [16; 17]








Na výsledný tvar třísky má vliv mnoho různých faktorů. Mezi ty nejdůležitější lze zařadit například [16]:

- vlastnosti obráběného materiálu,
- geometrii řezného nástroje a utvařeče třísek,
- řezné podmínky a řezné prostředí,
- materiál řezného nástroje.

Pro hodnocení vzniklých třísek se využívá objemový součinitel třísek W (1.1). Jeho hodnota umožňuje kvantifikovat velikost a tvar třísek a lze je tak zařadit do určitých kategorií (viz obr. 10), které slouží k jejich porovnání a určení jejich vhodností. Objemový součinitel třísek je definovaný následujícím vztahem [16]:

$$W = \frac{V_t}{V_m} [-] \quad (1.1)$$

kde: V_t – objem volně ložených třísek [dm^3],
 V_m – objem odebraného materiálu korespondující s V_t [dm^3].

TVAR TRÍSEK		W	TVAR TRÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obr. 10 Oblast vzniku třísky [16].

2.3 Opotřebení nástrojů

Díky tomu, že jsou během řezného procesu nástroj, obrobek a tříška ve vzájemném pohybu, dochází k jejich opotřebení. Místa, kde dochází k relativnímu pohybu povrchů vůči sobě, jsou zejména na čele nástroje, nástroj – tříška, a na hřbetě nástroje, nástroj – obrobek. Při procesu řezání je v těchto oblastech zároveň dosaženo velkých měrných tlaků, řádově tisíce MPa a velmi vysokých teplot, řádově stovky až tisíce °C. [16; 17]

2.3.1 Mechanismy opotřebení

Opotřebení nástrojů je velmi složitý proces, který ovlivňuje mnoho faktorů. Mezi ně patří fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu, řezné podmínky a prostředí, druh obráběcí operace a geometrie řezného nástroje apod. Proces opotřebení probíhá za působení mnoha různých fyzikálních a chemických jevů – mechanismů. Mezi základní mechanismy opotřebení se řadí [16; 17; 18]:

- **adheze** – vznik a okamžitý zánik mikro svarů na vrcholcích mikro nerovností mezi čelem nástroje a třískou v důsledku působení vysokých teplot a vysokých tlaků na kovově čistých chemicky podobných materiálech,
- **abraze** – obrušování nástrojového materiálu vlivem uvolněných mikro částic z obráběného materiálu (vměstky),
- **difúze** – vznik nežádoucích sloučenin v nástrojovém materiálu v důsledku migrace atomů z materiálu obrobku,
- **oxidace** – vznik nežádoucích sloučenin na povrchu řezného nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolní atmosféře,
- **křehký lom** – vzniká v důsledku vysokého mechanického zatížení nástroje,
- **plastická deformace** – vzniká v důsledku kumulace tepelného a mechanického zatížení.

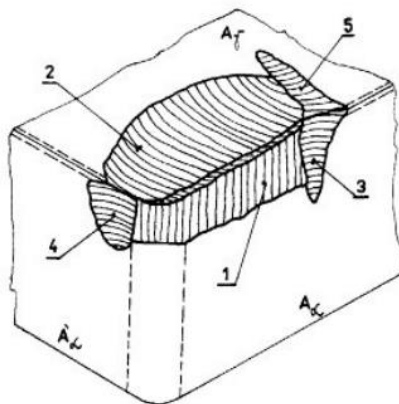
Mechanismy, které působí plynule v průběhu řezného procesu jsou fyzikální a chemické. Mezi fyzikální se řadí adheze a abraze, mezi chemické se řadí difúze a oxidace. Mechanismy, které působí náhle, jsou pak plastická deformace a křehký lom (obr. 11), tyto mechanismy způsobí okamžitou změnu geometrie břitu. [16; 17; 18]



Obr. 11 Vlevo plastická deformace, vpravo křehký lom břitu [18].

2.3.2 Formy opotřebení

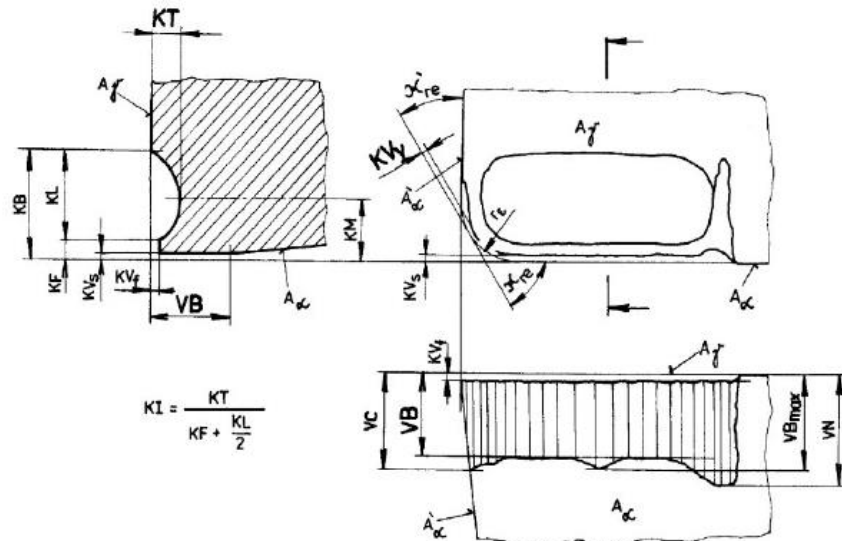
Na břitových destičkách ze slinutého karbidu vzniká několik typických forem opotřebení, které jsou způsobeny kombinací mechanismů uvedených výše. Na obr. 12 jsou všechny typické formy opotřebení označeny. Číslo 1 označuje fazetku opotřebení na hřbetě, 2 označuje výmol na čele, 3 označuje primární hřbetní rýhu, 4 sekundární hřbetní rýhu, 5 rýhu na čele. [16; 17]



Obr. 12 Formy opotřebení VBD [16].

2.3.3 Kritéria opotřebení a trvanlivost nástrojů

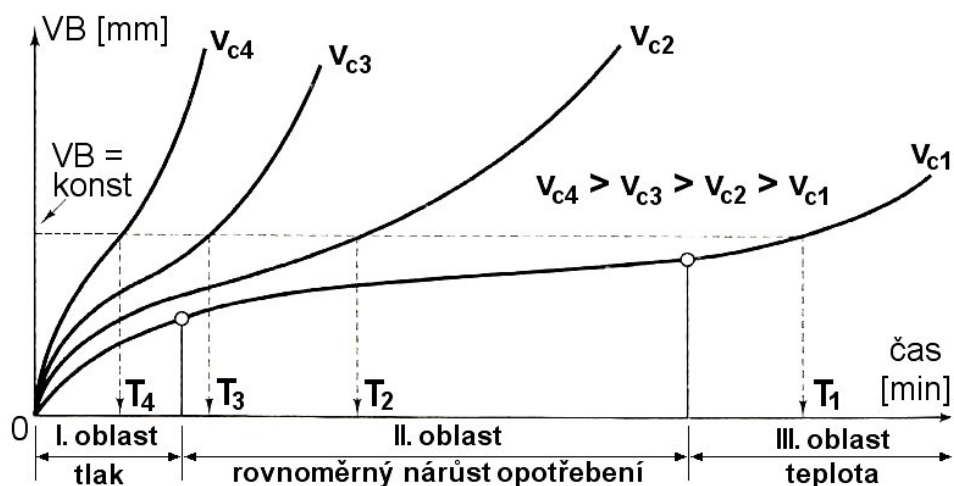
Opotřebení nástrojů je kvantifikováno pomocí různých kritérií. Mezi nejpoužívanější se řadí šířka fazetky opotřebení na hřbetu – VB, hloubka výmolu na čele – KT a radiální opotřebení špičky nástroje – K_{vy} . V průmyslové praxi se nejvíce využívá kritérium VB, které je poměrně snadno měřitelné pomocí mikroskopu. Jeho typická limitní hodnota leží v rozsahu 0,2 až 0,8 mm. Kritérium K_{vy} je používáno hlavně u dokončovacích operací, jelikož způsobuje změnu rozměrů obrobku. Na obr. 13 jsou tato kritéria zobrazena. [16; 17; 19]



Obr. 13 Kritéria opotřebení [16].

Opotřebení nástrojů lze hodnotit mnoha způsoby, které jsou rozděleny na metody přímé a nepřímé. Mezi přímé metody se řadí měření hmotnostního úbytku nástroje nebo měření změny rozměru vybrané formy opotřebení – typicky měření šířky fazetky opotřebení na hřbetě VB. Nepřímo se opotřebení hodnotí na základě změny silového zatížení, nárůstu řezného výkonu, rozboru vibrací S-N-O, změny teploty nebo tvaru třísek apod. [17; 19]

Nejčastěji využívané kritérium VB má svůj charakteristický průběh v čase, který je zobrazený na obr. 14. Lze ho rozdělit na tři typické oblasti. V oblasti I. se nachází rychlý počáteční nárůst hodnoty VB, který je způsoben vysokým měrným tlakem na styku hřbetu nástroje a obrobku v důsledku jejich malé stykové plochy. V oblasti II. je opotřebení ustálené a plynulé. V oblasti III. opotřebení opět rychleji narůstá v důsledku naakumulovaného tepelného zatížení nástroje. [16; 17]



Obr. 14 Průběh opotřebení VB [16].

Trvanlivost řezného nástroje je definována jako součet všech čistých časů řezání od počátku obrábění až po dosažení stanoveného kritéria opotřebení nástroje. Důležité je stanovit toto kritérium tak, aby po celou dobu obrábění při dané trvanlivosti dosahoval obrobek požadovaných vlastností na rozměrovou přesnost či kvalitu povrchu. Trvanlivost nástroje

se významně odvíjí od konkrétní technologie obrábění, materiálu obrobku a nástroje nebo řezných podmínek. [16; 17]

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí. Jinak řečeno je to doba funkčnosti nástroje, než dojde k jeho vyřazení. U nástrojů, které lze ostřit broušením, je jeho životnost definována vztahem 1.2. U nástrojů osazených vyměnitelnými břitovými destičkami, je životnost definována vztahem 1.3. [16; 17]

- Životnost broušeného nástroje [17]:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x + 1) \cdot T \quad (1.2)$$

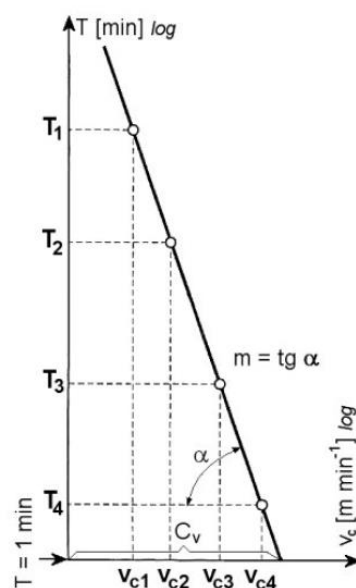
kde: T_i – jednotlivé trvanlivosti [min],
 T – aritmetický průměr hodnot T_i [min],
 x – počet možných ostření nástroje.

- Životnost vyměnitelných břitových destiček [17]:

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T \quad (1.3)$$

kde: T_i – jednotlivé trvanlivosti [min],
 T – aritmetický průměr hodnot T_i [min],
 x – počet použitelných ostří VBD.

Na počátku 20. století zjistil F. W. Taylor, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv řezná rychlost a stanovil „Taylorův vztah“ (1.4), který mezi těmito dvěma veličinami udává vzájemnou závislost. Experimentální stanovení vztahu vychází z několika měření průběhu opotřebení vybraného kritéria (nejčastěji VB) při různých řezných rychlostech. Ostatní řezné podmínky zůstávají konstantní. Pro určitou konstantní hodnotu kritéria opotřebení se odečtou dvojice hodnot $v_c - T$, které se následně vynesou do diagramu s logaritmičnými souřadnicemi, kde vytvoří typický lineární průběh (obr. 15). [16; 17; 19]



Obr. 15 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [16].

Vytvořená přímka je skloněna pod úhlem α jehož tangenta vyjadřuje hodnotu exponentu m . Exponent m se mění podle vlastností materiálu nástroje, respektive vyjadřuje míru citlivosti řezného materiálu na změnu řezné rychlosti. Průsečík s vertikální osou (osa T) udává hodnotu konstanty C_T , což je teoretická trvanlivost při $v_c = 1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Průsečík s osou v_c udává hodnotu C_v , jejíž hodnota je teoretická řezná rychlost pro $T = 1 \text{ min}$ [16; 17; 19].

Matematicky je tato závislost popsána rovnicí 1.4, případně se využívá vyjádření v podobě 1.5, jelikož hodnota konstanty C_T dosahuje velmi vysokých hodnot. [16; 17]

- Vyjádření trvanlivosti z Taylorova vztahu [16]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}] \quad (1.4)$$

kde: C_T – konstanta [-],
 v_c – řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],
 m – exponent [-].

- Vyjádření řezné rychlosti z Taylorova vztahu [16]:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} [\text{m}\cdot\text{min}^{-1}] \quad (1.5)$$

kde: C_v – konstanta [-],
 v_c – řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$],
 m – exponent [-].

Hodnota konstanty C_T se řádově pohybuje až v hodnotách 10^{13} , proto se dle vztahu 1.6 přepočítává na C_v a její hodnota je řádově jen kolem 10^3 . [16; 17]

- Přepočet konstant [16]:

$$C_v = C_T^{1/m} [-] \quad (1.6)$$

kde: C_T – konstanta [-],
 C_v – konstanta [-],
 m – exponent [-].

U stanovení závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti zůstávají kromě řezné rychlosti všechny parametry obrábění neměnné. Mezi tyto parametry patří šířka záběru ostří, posuv, chlazení a mazání, materiál obrobku apod. Pro zahrnutí vlivu dalších proměnných se zavádí rozšířený vztah, který uvažuje i vliv posuvu či šířky záběru ostří. [16; 17]

3 NÁVRH A PŘÍPRAVA EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK




V této kapitole budou podrobně popsány jednotlivé testované nástroje, konkurenční výrobky a k nim odpovídající břitové destičky. Dále bude popsán návrh metodiky testování vybraných nástrojů, využití obráběné materiály, obráběcí stroj, měřicí vybavení a aplikované řezné podmínky. Primárním cílem experimentální části je provedení funkčních testů s měřením drsnosti obrobených ploch a zatížení vřetene stroje, snímání řezného procesu pomocí termokamery a vysokorychlostní kamery, snímání vibrací a srovnání jednotlivých nástrojů. Dále bude porovnána trvanlivost VBD jednotlivých nástrojů.

3.1 Popis vybraných typů frézovacích nástrojů

V následující části bude pojednáno o parametrech jednotlivých vybraných typů vysokoposuvových frézovacích nástrojů. Dále budou charakterizovány odpovídající vyměnitelné břitové destičky, kterými jsou tyto nástroje osazovány.

Vzhledem k neočekávané situaci, která nastala při řešení některých výzkumných projektů ve společnosti Dormer Pramet, s.r.o., do kterých tato diplomová práce spadá, musí být z experimentálního testování vyřazeny nástroje konkurenčních výrobců. Konkrétně jde o nástroje od výrobců Kyocera Precision Tools, s.r.o. a Tungaloy czech, s.r.o. Tyto nástroje budou tedy v následující kapitole jako přímé konkurenční výrobky podrobně popsány, nebudou však zahrnuty do experimentální části diplomové práce. V experimentální části budou porovnány dva frézovací nástroje, a to nový koncept nástroje SSO09, který uvažuje společnost Dormer Pramet s.r.o. uvést na trh, se zastaralým řešením SZD09, které bude během testování novému řešení konkurovat.

Tab. 1 Porovnávané frézy [14; 20; 21].

Výrobce		Označení	κ_r	Max a_p	Typ VBD	Počet zubů
Dormer Pramet, s.r.o.		50A05R-SMOZD09-C	-	1 mm	ZDCW09	5
		50A07R-SMOSO09-C	10°	1,2 mm	SOHT09	7
Tungaloy Czech, s.r.o.		TXSW 09	12°	1,5 mm	SWMT09	5
Kyocera Precision Tools, Inc		MFH 050	14°	1,5 mm	SOMT10	5

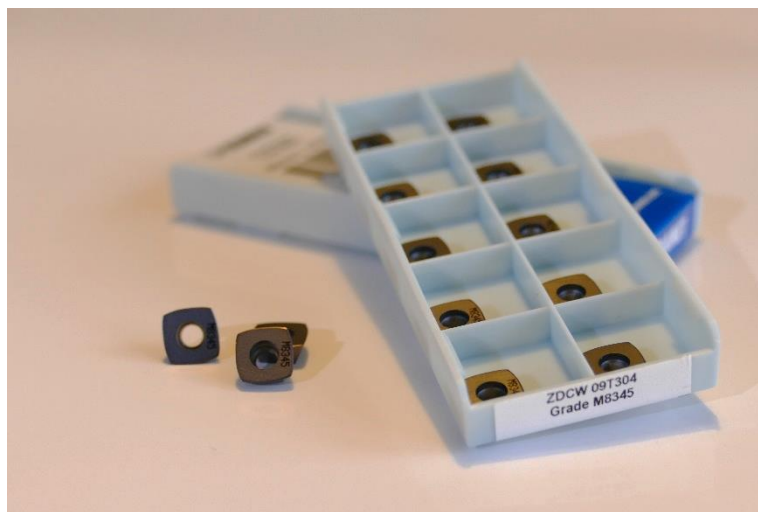
3.1.1 Dormer Pramet, s.r.o. – SZD09

První porovnávaná fréza je od českého výrobce Dormer Pramet, s.r.o. Fréza nese označení 50A05R-SMOZD09-C (obr. 16), dále jen SZD09. Jedná se o nástrčnou frézu o průměru 50 mm s pěti nepravidelně rozmístěnými zuby pro eliminaci kmitání, jištěnou v upínači pomocí šroubu. Je určena pro produktivní frézování vysokými posuvy se širokým spektrem využití u hrubování při dobrých i špatných záběrových podmínkách. [14]



Obr. 16 Fréza SZD09.

Úhel nastavení hlavního ostří u osazené frézy není jednoznačný, jelikož odpovídající destičky mají kruhovitou hranu a tím pádem se úhel κ_r mění v závislosti na hloubce záběru ostří a_p , jejíž maximální hodnota je 1 mm. Fréza disponuje vnitřním přívodem řezné kapaliny. Je určena pro různé typy frézování např. rovinné, zapichovací, kopírovací, drážek nebo spirálovou interpolaci. [14]



Obr. 17 Břitové destičky ZDCW09.

Odpovídající destičky pro osazení této frézy nesou typové označení ZDCW 09T304 (obr. 17), jsou jednostranné se čtyřmi řeznými hranami. Břitové destičky jsou vyráběné z materiálů M8310, který je určený pro obrábění litin, kalených materiálů případně ocelí, M8325 pro obrábění ocelí a korozivzdorných ocelí, M8345 se stejnou oblastí použití, ale pro horší záběrové podmínky. Všechny materiály břitových destiček jsou opatřeny PVD povlakem. VBD jsou do těla frézy upínány pomocí šroubu. Délka řezné hrany destičky je 9 mm, poloměr zaoblení špičky činí 0,4 mm a její tloušťka je 4 mm. [14]

3.1.2 Dormer Pramet, s.r.o. – SSO09

Druhá porovnávaná fréza 50A07R-SMOSO09-C, dále jen SSO09, je taktéž od českého výrobce Dormer Pramet, s.r.o. Jedná se o prototyp frézy z nové koncepce pro frézování vysokými posuvy. I v tomto případě jde o nástrčnou frézu s průměrem 50 mm a sedmi zuby jištěnou

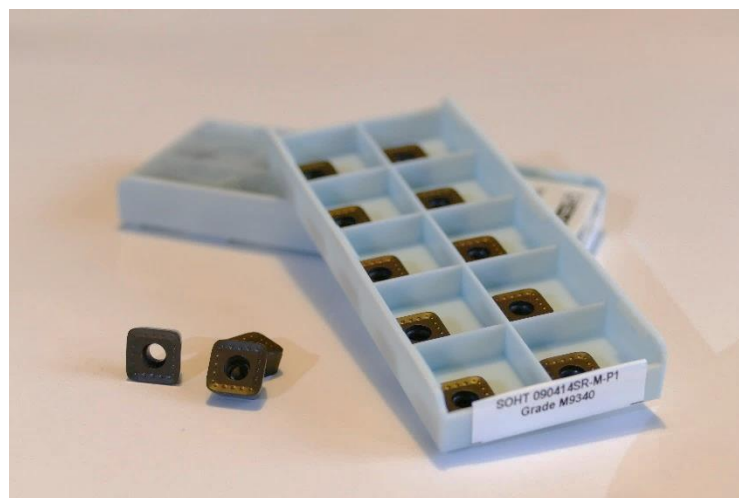
pomocí šroubu (obr. 18). Použití je pro produktivní frézování vysokými posuvy. Její vlastnosti jsou nyní ve fázi experimentálního zjišťování. V budoucnu by tato koncepce měla sloužit k nahrazení stávajícího řešení, a to výše uvedené frézy SZD09.



Obr. 18 Fréza SSO09.

Úhel nastavení hlavního ostří u osazené frézy je 10° . Maximální hloubka záběru ostří a_p je 1,2 mm. Fréza disponuje vnitřním přívodem řezné kapaliny. Má být určena pro různé typy frézování např. rovinné, zapichovací, kopírovací, frézování drážek nebo spirálovou interpolací.

Odpovídající destičky pro osazení této frézy nesou typové označení SOHT 090414SR (obr. 18), jsou jednostranné se čtyřmi řeznými hranami. Břitové destičky pro testování jsou vyrobené z materiálů 8215, který je jedním z nejuniverzálnějších frézovacích materiálů určený pro široké spektrum obráběných materiálů opatřený PVD povlakem, M8330 pro obrábění zejména ocelí, korozivzdorných ocelí a tvárných litin opatřený taktéž PVD povlakem, M9340 je velmi houževnatý s podobnou oblastí použití, ale pro horší záběrové podmínky opatřený MT-CVD povlakem. VBD jsou do těla frézy upínány pomocí šroubu. Délka řezné hrany destičky je 9 mm, poloměr zaoblení špičky činí 1,4 mm a její tloušťka je 4 mm. [14]



Obr. 19 Břitové destičky SOHT09.

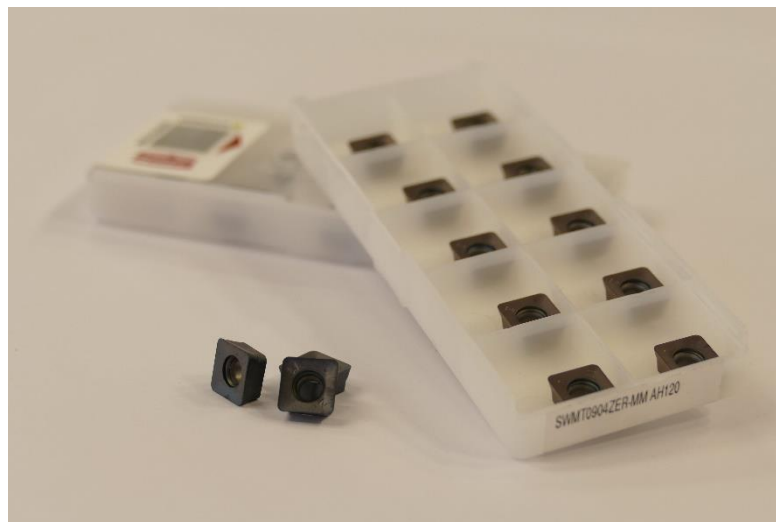
3.1.3 Tungaloy Czech, s.r.o. – TXSW 09

Třetí konkurenční frézou, která však z výše uvedených důvodů není zařazena do experimentálního testování, je vysokoposuvová fréza TXSW 09 (obr. 20) z řady MillQuadFeed od japonského výrobce Tungaloy Czech, s.r.o. Jde taktéž o nástrčnou pětizubou frézu o průměru 50 mm jištěnou pomocí šroubu. Je určena pro vysokoposuvové frézování při maximální univerzálnosti. [20]



Obr. 20 Fréza TXSW 09 [1].

Osazená fréza má úhel nastavení hlavního ostří 12° a maximální hloubka záběru ostří a_p činí 1,5 mm. Fréza disponuje vnitřním přívodem řezné kapaliny. Je určena pro různé typy frézování např. rovinné, zapichovací, zajíždění pod úhlem, frézování drážek nebo spirálovou interpolací. [20]



Obr. 21 Břítové destičky SWMT [1].

Odpovídající destičky pro osazení této frézy nesou typové označení SWMT 0904ZER-MM (obr. 21), jsou jednostranné se čtyřmi řeznými hranami. Břítové destičky jsou vyráběné v různých sortách materiálů, určené pro univerzální použití, pro obrábění ocelí, korozivzdorných ocelí, kalených materiálů i litin. Všechny materiály břítových destiček jsou opatřeny PVD povlakem. VBD jsou do těla frézy upínány pomocí šroubu. Délka řezné hrany destičky je 9 mm, poloměr zaoblání špičky činí 1 mm a její tloušťka je 4 mm. [20]

3.1.4 Kyocera Precision Tools, Inc. – MFH 050

Posledním nástrojem je fréza od výrobce Kyocera Precision Tools, Inc. se sídlem v Japonsku. Nese typové označení MFH 050R-10-5T (obr. 22), jde o nástrčnou, šroubem jištěnou frézu s pěti zuby o průměru 50 mm. Určena je pro různé aplikace frézování vysokými posuvy s maximální efektivitou. [21]



Obr. 22 Fréza MFH 050 [1].

Osazená fréza má úhel nastavení hlavního ostří 14° a maximální hloubka záběru ostří a_p činí 1,5 mm. Fréza disponuje vnitřním přívodem řezné kapaliny. Je určena pro různé typy frézování např. rovinné, zapichovací, zajíždění pod úhlem, frézování drážek nebo spirálovou interpolací. Frézu lze osadit čtyřmi typy destiček, které jsou určeny pro univerzální použití (geometrie GM), velkou hloubku záběru (geometrie LD), pro dosažení lepších vlastností povrchu (geometrie FL) nebo pro lepší odolnost vůči křehkému lomu (geometrie GH). [21]



Obr. 23 Břitové destičky SOMT [1].

Odpovídající destičky pro osazení této frézy nesou typové označení SOMT 100420ER (obr. 23), jsou jednostranné se čtyřmi řeznými hranami. Břitové destičky jsou vyráběné v několika sortách materiálů, určené pro obrábění ocelí, korozivzdorných ocelí, kalených materiálů i litin. Všechny materiály břitových destiček jsou opatřeny PVD nebo CVD povlakem. VBD jsou do těla frézy upínány pomocí šroubu. Délka řezné hrany destičky je 10 mm, poloměr zaoblení špičky činí 2 mm a její tloušťka je 4 mm. [21]

3.2 Obráběný materiál

Jako obráběný materiál pro provedení řezných zkoušek byla vybrána nástrojová ocel X37CrMoV5-1 (dle normy EN ISO 4957). Podle starší ČSN normy značena jako ocel 19 552.

Jedná se o středně legovanou nástrojovou ocel pro práci za tepla. Disponuje vysokou houževnatostí, vysokou pevností, malou rozměrovou roztažností a odolností proti opotřebení za tepla. Je dobře obrobitelná ve stavu vyžíhaném naměkko. Je vhodná ke kalení v oleji a na vzduchu s velmi dobrou prokalitelností. [22; 23]

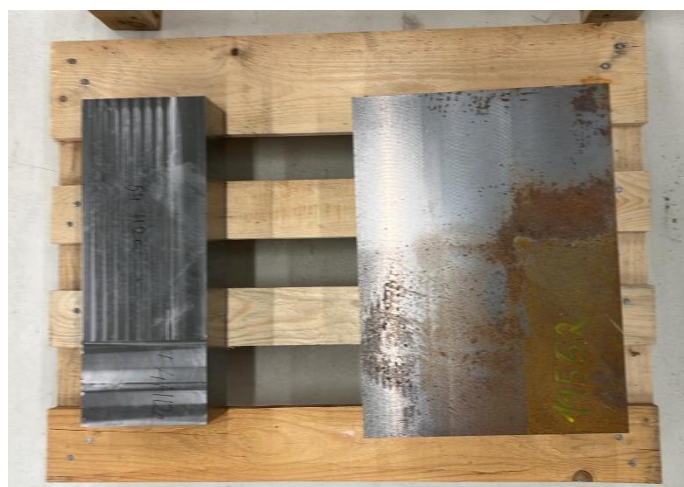
Oblast jejího použití je zejména pro nástroje pracující za zvýšených teplot, ale i pro nástroje pracující za studena při velkém namáhání. Používá se pro střížné nástroje, nástroje pro tváření za tepla, kovací nástroje a zápustky. Dále se používá pro formy na tlakové lití neželezných kovů. V tab. 2 je popsáno chemické složení a mechanické vlastnosti oceli. [22; 23]

Tab. 2 Vlastnosti oceli X37CrMoV5-1 [22; 23].

	C	P	Si	Mn	Cr	Mo	V
Chemické složení [%]	0,33 až 0,41	max. 0,03	0,80 až 1,20	0,25 až 0,50	4,80 až 5,50	1,10 až 1,50	0,30 až 0,50
Mechanické vlastnosti	Tvrdost v žíhaném stavu		Mez pevnosti v žíhaném stavu		Tvrdost v kaleném stavu		
	max. 240 HB		~ 790 MPa		max. 57 HRC		

Tato ocel byla vybrána z důvodu častého využívání pro výrobu forem a zápustek, které jsou zhotovovány pomocí frézovacích nástrojů umožňujících vysoké posuvy. Umožňuje tedy porovnat nástroje na oceli, která přímo odpovídá reálným aplikacím.

Experimentální testování nástrojů bude provedeno na oceli ve dvou stavech (obr. 24). První vzorek oceli je v měkkém stavu s tvrdostí do cca 300 HB, což bude později ověřováno. Druhý vzorek oceli je zušlechtěný na cca 54 HRC, což bude taktéž později ověřováno.



Obr. 24 Obráběný materiál.

3.3 Obráběcí stroj

Experimentální testy obrábění proběhnou na stroji od amerického výrobce Haas Automation, Inc. Konkrétně na tříosé vertikální frézce s vlastním CNC řízením Haas, která nese typové označení VF-2SSYT (obr. 25).



Obr. 25 Obráběcí stroj [24].

Stroj je vybaven vysokorychlostním vřetenem, vynašečem třísek, kotoučovým zásobníkem nástrojů se 30 pozicemi a mechanickou rukou pro výměnu. Nástroje jsou ve vřetení upínány pomocí kužele BT40. Tento konkrétní typ nabízí prodloužený posuv v ose Y oproti standardní verzi VF-2SS [24].

Základní parametry stroje [24]:

- nejvyšší otáčky vřetene – 12 000 min⁻¹,
- maximální výkon motoru vřetene – 22,4 kW,
- maximální kroutící moment vřetene – 122 Nm,
- maximální hmotnost nástroje – 5 kg,
- maximální délka nástroje – 279 mm,
- maximální průměr nástroje – 127 mm,
- maximální pracovní posuv – 21 200 mm/min.

Dráha pojezdu v ose X činí 762 mm a v osách Y a Z činí 508 mm. Rozměry stolu jsou 914 na 457 mm. Jeho maximální plošná zatížitelnost je 680 kg [24].

3.4 Měřicí vybavení

V následující podkapitole bude popsáno přístrojové vybavení pro měření zkoumaných veličin během testování nástrojů. Budou to přístroje pro měření drsnosti obroběných ploch, axiálního házení osazených fréz a tvrdosti obráběného materiálu.

- **Zoller Smile 420**

Před začátkem obráběcího procesu je u nástrojů změřeno axiální házení. Parametr házení přímo ovlivňuje výslednou kvalitu obráběných ploch – její drsnost. Také má velký vliv na rovnoměrnost opotřebení jednotlivých VBD u nástrojů s více břity.

Toto měření proběhne na stroji Zoller Smile 420 (obr. 26). Přístroj je určen pro měření a kontrolu různých parametrů obráběcích nástrojů. Měření může probíhat v radiálním i axiálním směru a naměřené parametry lze elektronickou cestou přenést přímo do obráběcího stroje.

Měření probíhá opticky za pomoci násvitové kamery. Přístroj je vybaven řídicím systémem Pilot čtvrté generace. [25]



Obr. 26 Zoller Smile 420.

Tab. 3 Parametry přístroje Zoller Smile 420 [25].

Měřicí rozsah osy Z [mm]	420
Měřicí rozsah osy X [mm]	210
Maximální průměr nástroje [mm]	420
Měření průměru přes osu [mm]	100

- **Hommel etamic W5**

Pro měření drsnosti obrobených ploch bude použit přenosný dílenský přístroj Hommel Etamic W5 (obr. 27). Přístroj je osazen hrotem T1E s poloměrem zaoblení špičky 2 μm , který umožňuje měření v rozsahu 100 μm . Drsnoměr je schopen určit mnoho parametrů jakosti povrchu jako je Ra, Rz, Rq, Rp apod. Rozlišení měřeného úseku je 0,5 μm . Disponuje vnitřní pamětí až pro 10 000 měření. Měřenou oblast je možné osvětlit vestavěným světlem. [26]



Obr. 27 Hommel Etamic W5.

- **DHT-100**

Na ověření tvrdosti obráběných materiálů bude použit přenosný dílenský tvrdoměr DHT-100 (obr. 28). Přístroj měří tvrdost na principu dle Leeba, kdy je měřena rychlost pomocí pružiny urychleného testovacího projektilu před odrazem od povrchu materiálu a po jeho odražení. Na základě porovnání těchto hodnot je vyhodnocena tvrdost materiálu a převedena na zvolenou stupnici tvrdosti. Přístroj umožňuje měřit tvrdost na stupnicích např. HL, HV, HB či HRC. Rozsah přístroje je mezi 200 až 900 HL (tvrdost dle Leeba) s přesností +/- 5 %. [27]



Obr. 28 Tvrdoměr DHT-100.

3.5 Podoba a průběh řezných zkoušek

Během první části řezných zkoušek bude provedeno několik dílčích měření zaměřených na různé parametry procesu obrábění a řezných nástrojů. Před zahájením obrábění bude provedeno měření axiálního házení nástrojů na stroji Zoller Smile 420 a ověření tvrdosti obráběných materiálů pomocí přenosného tvrdoměru DHT-100.

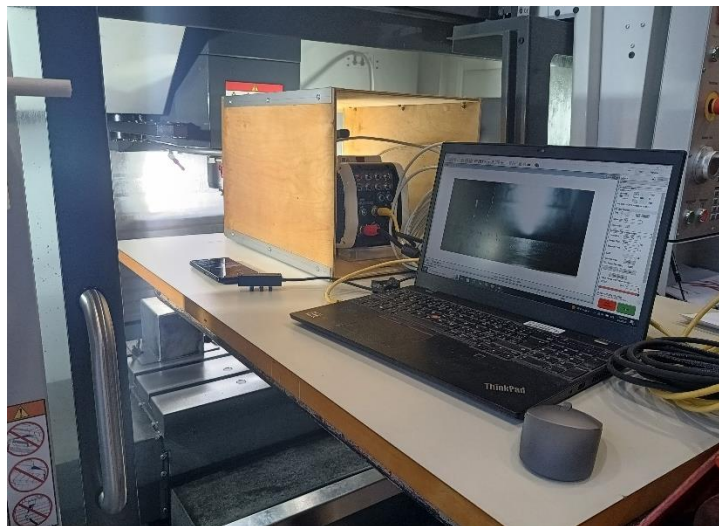
Následuje čelní rovinné obrábění vrstev materiálu při různých řezných podmínkách. Jako proměnné jsou zvoleny šířka záběru ostří a posuv na zub. Řezná rychlost zůstává vždy konstantní pro daný obráběný materiál. Při jedné konstantní šířce záběru ostří proběhne měření při čtyřech různých hodnotách posuvu na zub – jeden blok měření. Následně se hodnota šířky záběru ostří zvýší a opět bude provedeno měření při čtyřech hodnotách posuvů. Konkrétní zvolené řezné podmínky pro jednotlivé bloky měření jsou uvedeny v kapitole 4. Pro každou kombinaci řezných podmínek bude měřena drsnost obrobené plochy (obr. 29) pomocí drsnoměru Hommel Etamic W5 a zatížení vřetene stroje, které umožňuje měřit přímo obráběcí stroj.

Měření proběhne bez použití procesní kapaliny i s jejím použitím. Během řezných zkoušek provedených bez použití procesní kapaliny budou také sbírány třísky jako podklad pro vytvoření diagramů utváření třísky a pro dokumentaci jejich tvaru a velikosti při obrábění jednotlivými typy fréz. Proces obrábění bude dále v některých případech zaznamenáván pomocí vysokorychlostní kamery (obr. 30) a termokamery pro detailnější informace o procesu řezání. Během měření bude také pomocí akcelerometru umístěného na vřeteni stroje snímána hladina vibrací. Na závěr první části řezných zkoušek bude na obou frézách pro porovnání změřeno opotřebení vyměnitelných břitových destiček, a to na dvou kusech VBD.



Obr. 29 Měření drsnosti povrchu.

Druhá část řezných zkoušek bude zaměřena výhradně na trvanlivost vyměnitelných břitových destiček. Měření opotřebení VBD bude provedeno na dvou vzorcích. V případě, že se bude trvanlivost těchto VBD lišit o více než 15 %, bude měření provedeno pro další třetí VBD. Měření bude prováděno při čelním rovinném frézování za konstantních řezných podmínek, které jsou uvedené v kapitole 4. Fréza bude při obrábění osazena vždy pouze jednou VBD. Měření opotřebení proběhne vždy po určitém časovém úseku obrábění a měřeno bude opotřebení na hlavním hřbetu VB_b , jehož limitní hodnota je stanovena na 0,3 mm. Časový úsek je pomocí řezných podmínek optimalizován na hodnotu blízkou se 5 minutám. Dále budou pořízeny fotografické snímky hlavního hřbetu a čela vyměnitelné břitové destičky. Měření proběhne na optickém mikroskopu značky OLYMPUS, propojeným s počítačem, za jehož pomoci budou pořízeny snímky VBD.



Obr. 30 Aparatura vysokorychlostní kamery.

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ŘEZNÝCH ZKOUŠEK

V této kapitole budou uvedeny a podrobně rozebrány výsledky řezných zkoušek a naměřených veličin. Uvedeny budou výsledky měření tvrdosti obráběných materiálů, výsledky měření axiálního házení osazených fréz, naměřené parametry zatížení vřetene stroje a dosažené hodnoty drsnosti obrobených ploch. Analyzovány budou taktéž záběry z vysokorychlostní kamery a termokamery. Z nasbíraných třísek, které vznikaly při různých řezných podmínkách, budou sestaveny diagramy utváření třísky.

4.1 Měření tvrdosti obráběných materiálů

Výsledky měření tvrdosti (obr. 31) obráběných materiálů jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 4). U materiálu ve stavu žíhaném na měkko byla předpokládána tvrdost cca 300 HB. Průměrná hodnota z pěti měření na různých místech obrobku tuto hodnotu potvrdila. U materiálu ve zušlechtěném stavu byla předpokládána hodnota tvrdosti cca 54 HRC. Opět průměrná hodnota z pěti měření na různých místech obrobku potvrdila předpokládanou hodnotu.

Tab. 4 Měření tvrdosti obráběných materiálů.

X37CrMoV5-1, stav žíhaný na měkko		X37CrMoV5-1, zušlechtěný stav	
Měření č.	Tvrdost [HB]	Měření č.	Tvrdost [HRC]
1	310	1	54,5
2	299	2	54,3
3	299	3	54,2
4	295	4	54,3
5	297	5	54,8
Minimum	295	Minimum	54,2
Maximum	310	Maximum	54,8
Průměr	300	Průměr	54,42



Obr. 31 Měření tvrdosti.

4.2 Měření axiálního házení osazených fréz

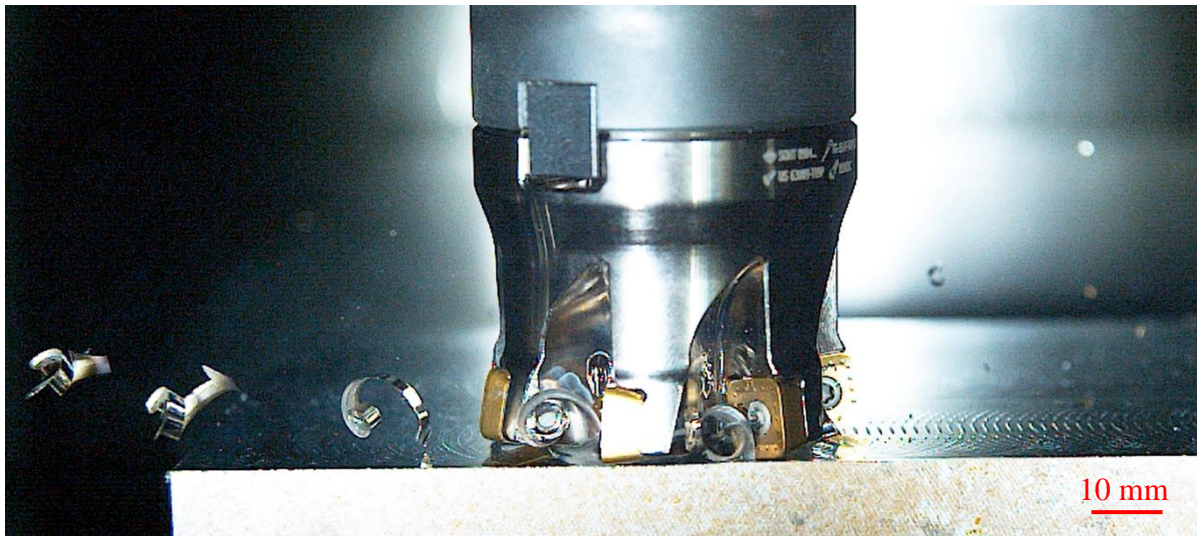
Výsledky měření axiálního házení osazených fréz jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 5). Nejlepších výsledků dosáhla fréza SSO09 osazená destičkami SOHT 091414SR vyrobených z řezného materiálu 8215. Z měření vyplývá, že nová koncepce nástroje splňuje požadavky na snížení axiálního házení a tím i zvýšení přesnosti obrábění.

Tab. 5 Měření axiálního házení osazených fréz.

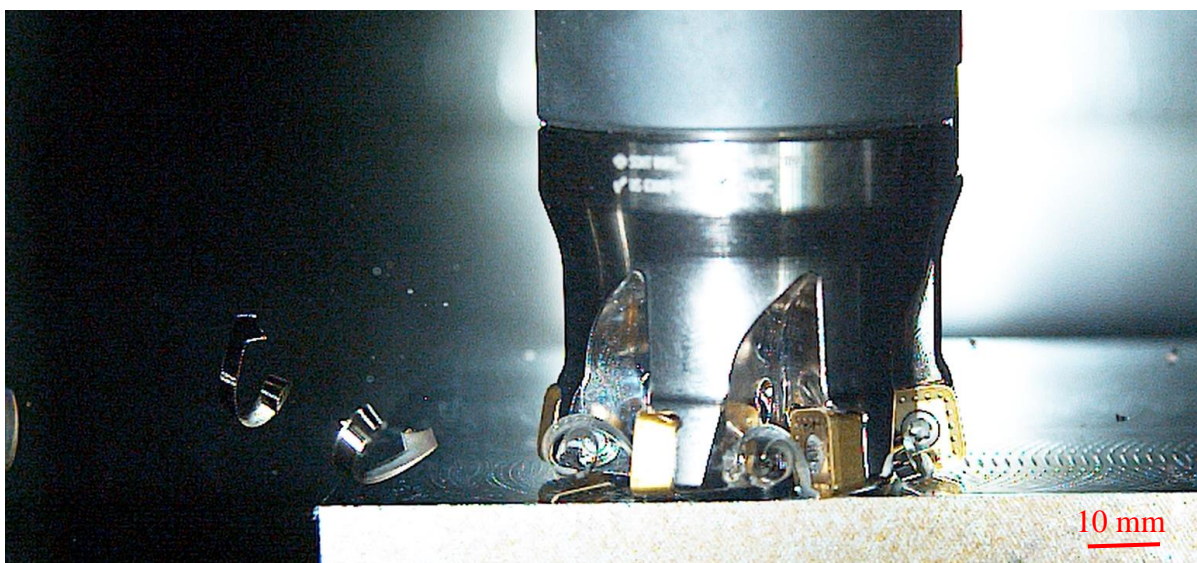
Fréza	Fotografie	Naměřené hodnoty výšky
Fréza: SZD09 VBD: ZDCW 09T304 Materiál VBD: M8325		Nejmenší: 75,319 mm Největší: 75,354 mm Rozdíl: 0,035 mm
Fréza: SZD09 VBD: ZDCW 09T304 Materiál VBD: M8310		Nejmenší: 75,329 mm Největší: 75,361 mm Rozdíl: 0,032 mm
Fréza: SSO09 VBD: SOHT 090414SR Materiál VBD: M8330		Nejmenší: 75,371 mm Největší: 75,394 mm Rozdíl: 0,023 mm
Fréza: SSO09 VBD: SOHT 090414SR Materiál VBD: 8215		Nejmenší: 75,379 mm Největší: 75,398 mm Rozdíl: 0,019 mm

4.3 Vyhodnocení záznamu vysokorychlostní kamery

V první fázi řezných zkoušek při obrábění bez použití procesní kapaliny byl proveden záznam řezného procesu pomocí vysokorychlostní kamery za účelem zjištění způsobu utváření třísek a jejich odchodu z místa řezu u obou testovaných nástrojů při obrábění oceli X37CrMoV5-1 ve stavu žíhaném na měkko. Záznamy byly pořízeny se snímkovou frekvencí 20 000 fps a následně zpomaleny na 60 fps pro možnost detailního pozorování.

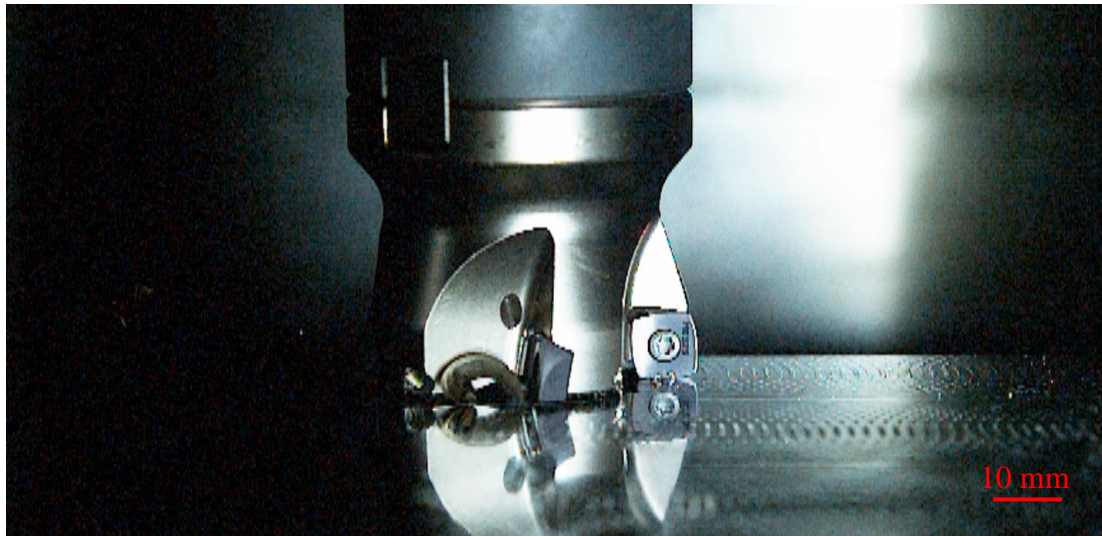


Obr. 32 Fréza SSO09 při řezném procesu.

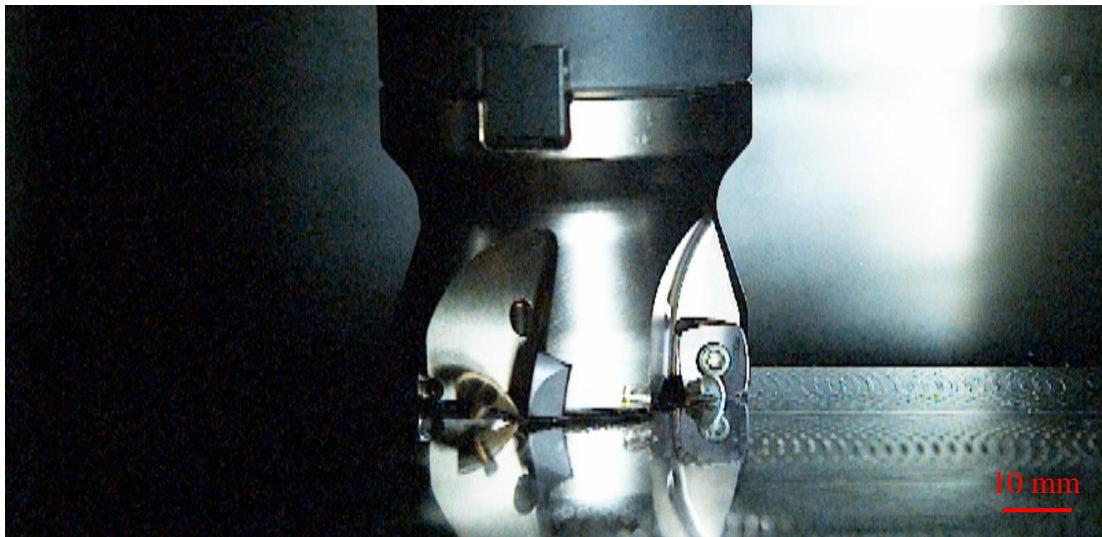


Obr. 33 Fréza SSO09 při řezném procesu.

Při obrábění frézou SSO09 (obr. 32 a obr. 33) bylo zjištěno, že všechny její zuby zabírají rovnoměrně a vznikají stejné třísky při každém řezu. Třísky se postupně na čele břitových destiček svinují do spirály a drží se až do konce řezu v zubové mezeře, ze které odchází vždy stejným směrem. Zároveň jsou třísky sbalovány do spirály spíše na vnitřní straně zubové mezery, což je výhodné zejména při obrábění osazení, jelikož je omezeno jejich drcení mezi osazením a vedlejším břitem vyměnitelných destiček, které má za následek snížení kvality už obrobeného povrchu osazení. Proces utváření třísky je tedy dle záznamu vysokorychlostní kamery správný a geometrii nástroje, zejména axiální a radiální úhel čela, není nutné dále upravovat.



Obr. 34 Fréza SZD09 při řezném procesu.



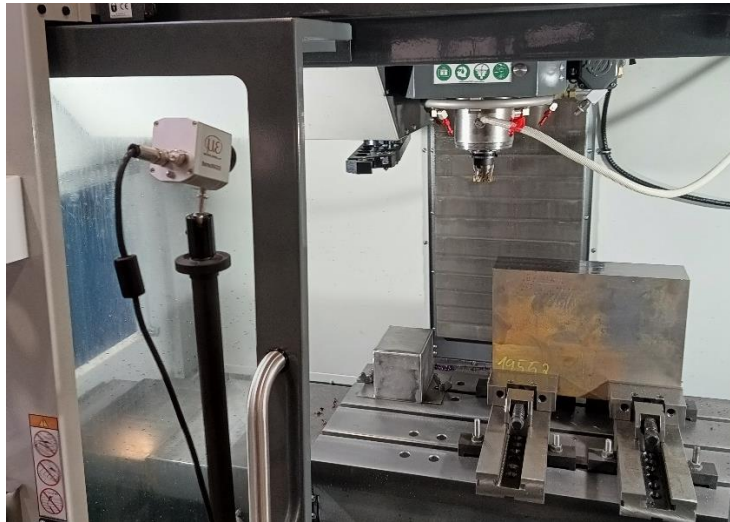
Obr. 35 Fréza SZD09 při řezném procesu.

Při obrábění frézou SZD09 (obr. 34 a obr. 35) bylo zjištěno, že některé břity neodebírají správně třísku a proces řezání je tedy nerovnoměrný. Dle záznamu vždy druhý a pátý zub neodebírá třísku. K tomuto jevu docházelo i přes to, že byla naměřena hodnota axiálního házení max 0,035 mm. Díky nerovnoměrnému úběru materiálu docházelo k velmi vysokým vibracím a nestabilnímu řeznému procesu, proto nebylo možné s tímto tělesem frézy nadále provádět řezné zkoušky. Bylo proto požádáno o dodávku nového tělesa, s nímž byl řezný proces již značně stabilnější.

Třísky se postupně na čele břitových destiček taktéž svinují do spirály, ale v některých případech se ještě před odchodem ze zubové mezery rozpadnou na menší kousky, které zasahují i za vnější stranu zubové mezery a potenciálně by tedy mohlo docházet k jejich drcení vedlejšími břity vyměnitelné destičky. To má za následek jeho nežádoucí opotřebení či snížení kvality obrobeneho povrchu osazení vlivem otěru. Proces utváření třísky je tedy dle záznamu vysokorychlostní kamery taktéž téměř správný, ale je zde větší riziko nadměrného opotřebení vedlejšího břitu VBD.

4.4 Vyhodnocení záznamu termokamery

Oblast řezu byla při obrábění bez použití procesní kapaliny zaznamenávána pomocí termokamery (obr. 32) od výrobce Micro-Epsilon, a to při různých kombinacích šířek záběru ostří a posuvů. Hlavním sledovaným kritériem byl ohřev obráběného materiálu v důsledku řezného procesu. Vzhledem k obráběnému povrchu materiálu byla také nastavena jeho emisivita. Vedlejším sledovaným kritériem byl ohřev řezné části nástroje a porovnání hodnot pro jednotlivé frézy.



Obr. 36 Nastavená termokamera.

Při obrábění byly vytvořeny záznamy, se kterými lze dále pracovat ve specializovaném programu TIM Connect. Lze provádět inspekci teplot v libovolném místě záznamu, čehož bylo využito pro porovnání teplot obrobenej plochy těsně za vycházejícím nástrojem od obráběného materiálu a pro porovnání teploty v nejteplejším místě vycházejícího nástroje. Ukázka záznamu je na obr. 37.

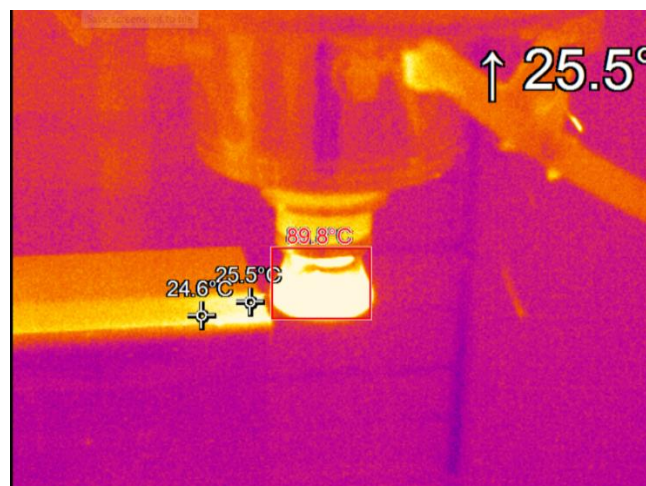


Obr. 37 Teploty při obrábění zušlechtné oceli.

Tab. 6 Měření teploty.

Obráběný materiál:		X37CrMoV5-1, 300 HB			
Použitá fréza:		SSO09 + VBD SOHT09, M8330		SZD09 + VBD ZDCW09, M8325	
a_p	f_z	Teplota obrobku	Teplota frézy	Teplota obrobku	Teplota frézy
[mm]	[mm]	T_o [°C]	T_{nmax} [°C]	T_o [°C]	T_{nmax} [°C]
0,3	0,5	29,3	71,6	24	82,90
0,3	1	28,1	68,3	28,6	77,80
0,3	1,5	26,4	65,2	27	76,00
0,3	1,8	26,1	61,8	26,8	71,70
0,4	0,5	29,6	70,90	26,1	77,00
0,4	1	26,9	58,40	26	93,70
0,4	1,5	26,5	54,60	25,7	79,80
0,4	1,8	26,1	54,20	24,9	80,00
0,5	0,5	30,5	68,80	25,6	87,40
0,5	1	29,5	64,50	26,6	97,50
0,5	1,5	28	60,40	25,4	86,70
0,5	1,8	27,9	61,60	25,1	98,70
0,6	0,5	31,5	74,60	26,2	89,80
0,6	1	31	72,60	26,1	93,60
0,6	1,5	29,9	65,90	25,7	101,20
0,6	1,8	28,7	68,20	25,5	108,40

V tab. 6 jsou přehledně sepsané měřené hodnoty teplot pro obrobek i frézu přiřazené konkrétním rezným podmínkám při obrábění měkké oceli. Jak je patrné, tak velikost posuvu a hloubky záběru ostří nemá téměř žádný efekt na průběh teplot měřených na povrchu obrobku, rozdíly jsou v tomto případě jen velmi malé, řádově jednotky °C. Rozdíly mezi ohřevem povrchu obrobku při obrábění frézou SSO09 a SZD09 jsou taktéž zanedbatelné. U frézy SSO09 je patrné, že se zvyšujícím se posuvem klesá její teplota. To by mělo být způsobeno kratším časem stráveným v řezu. U frézy SZD09 není tento trend úplně jednoznačný a dochází spíše k navyšování teploty. Dále lze pozorovat, že teploty naměřené na fréze SZD09 jsou až o cca 40 °C vyšší, než u SSO09. Ukázka záznamu z obrábění měkké oceli je na obr. 38.



Obr. 38 Teploty při obrábění měkké oceli.

Tab. 7 Měřené teploty.

Obráběný materiál:		X37CrMoV5-1, 54 HRC			
Použitá fréza:		SSO09 + VBD SOHT09, M8215	SZD09 + VBD ZDCW09, M8310		
a_p	f_z	Teplota obrobku	Teplota frézy	Teplota obrobku	Teplota frézy
[mm]	[mm]	T_o [°C]	T_{nmax} [°C]	T_o [°C]	T_{nmax} [°C]
0,3	0,3	24,3	73,80	23,1	54,10
0,3	0,5	26	85,60	24,6	78,90
0,3	1	25,2	84,00	25,1	97,20
0,3	1,4	25,8	85,60	25,7	101,10
0,4	0,3	29,2	103,30	27,1	72,40
0,4	0,5	27,1	90,40	29,6	88,40
0,4	1	26,8	92,80	26,9	103,40
0,4	1,4	Z důvodu výkonového omezení stroje neproběhlo měření			
0,5	0,3	29,4	101,60	27,7	83,00
0,5	0,5	29,6	104,20	28,3	102,90
0,5	1	27,8	105,80	27,6	114,90
0,5	1,4	Z důvodu výkonového omezení stroje neproběhlo měření			
0,6	0,3	31,4	119,20	29,2	77,20
0,6	0,5	31,5	119,80	29	110,20
0,6	1	Z důvodu výkonového omezení stroje neproběhlo měření			
0,6	1,4				

V tab. 7 jsou přehledně sepsané měřené hodnoty teplot pro obrobek i frézu přiřazené konkrétním řezným podmínkám při obrábění zušlechtné oceli. Při některých řezných podmínkách již nebylo možné provést řezné zkoušky, a proto jsou tyto hodnoty vynechány. I v tomto případě nemá velikost posuvu a hloubky záběru ostří výrazný vliv na ohřev obrobeného povrchu. Rozdíly jsou také jen řádově v jednotkách °C. Z hlediska ohřevu obráběného povrchu ani zde u obrábění tvrdšího materiálu nevznikají rozdíly mezi frézou SSO09 a SZD09. Rozdíly mezi ohřevem fréz jsou v tomto případě menší, nižších hodnot však dosáhla taktéž fréza SSO09.

Na základě naměřených hodnot ohřevu obrobeného povrchu, lze konstatovat, že se při frézování vysokými posuvy dle předpokladů dobře projevuje efekt maximalizace odvodu tepla z místa řezu pomocí třísky a k ohřevu povrchu obrobku dochází jen velmi málo. Z čehož také plyne, že použití procesní kapaliny za účelem chlazení obrobku či nástroje nemá velký význam a z ekologického hlediska je lepší provádět obrábění bez procesní kapaliny.

4.5 Měření zatížení vřetene a drsnosti povrchu

Měření zatížení vřetene stroje a drsnosti obrobené plochy bylo rozděleno do několika bloků, vždy pro určitou kombinaci řezných podmínek. Zvolené řezné podmínky jsou vždy uvedeny u příslušných výsledků měření, a to pro obrábění při použití procesní kapaliny a bez ní. Z důvodu velkého množství tabulek se záznamem naměřených výsledků, jsou uvedeny vždy jen tabulky s výsledky z měření při první hloubce řezu a další výsledky jsou uvedeny v příloze 1.

4.5.1 Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,3$ mm

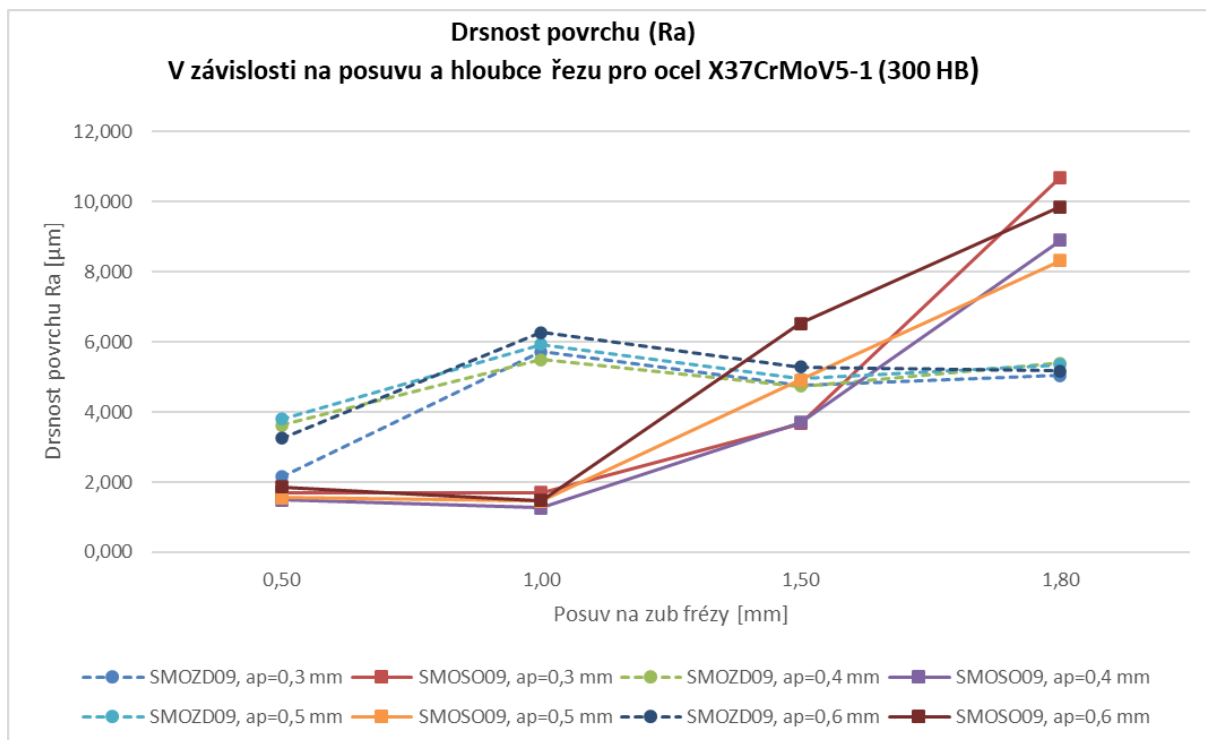
Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 8 a naměřené hodnoty v tab. 9.

Tab. 8 Jednotné řezné podmínky.

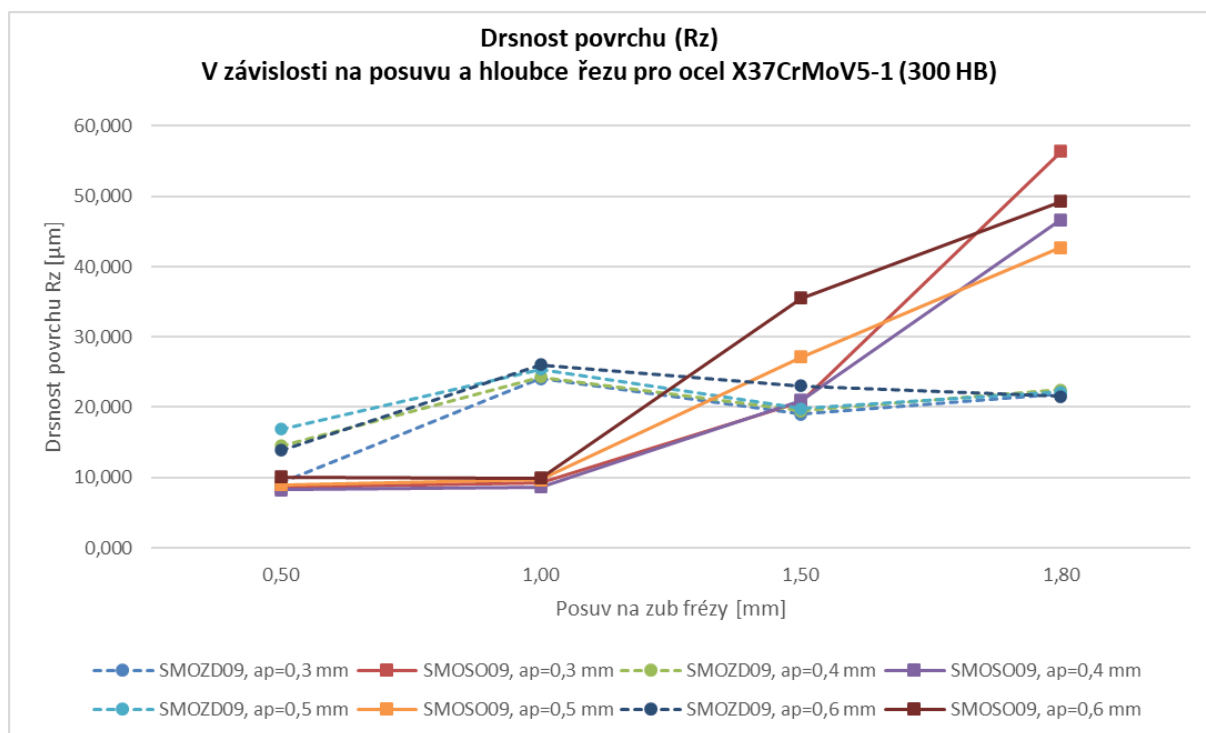
Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,3	250	0,5 až 1,8	35	Bez chlazení

Tab. 9 Naměřené parametry.

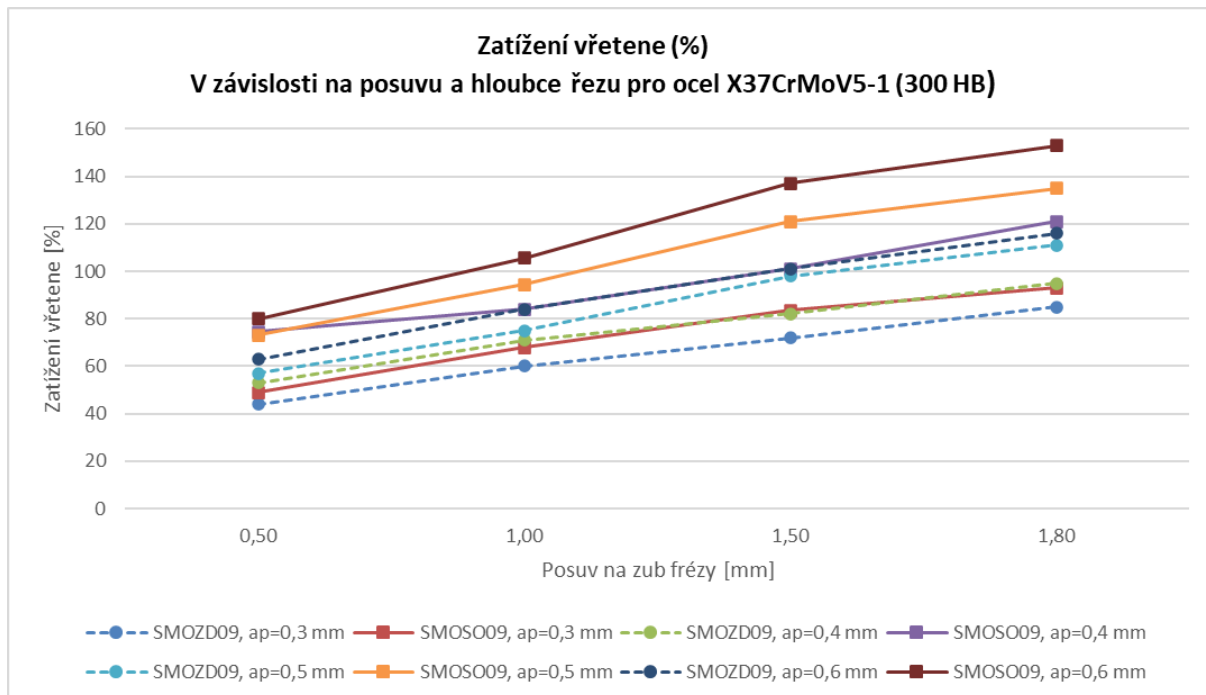
Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	39,00	60,00	72,00	85	
\bar{R}_a (μm)	2,15	5,72	4,78	5,04	
\bar{R}_z (μm)	9,25	24,09	18,98	21,90	
R_a (μm)	2,42	5,04	4,53	5,01	
R_z (μm)	10,28	23,89	17,03	21,32	
R_a (μm)	2,17	6,29	5,13	5,12	
R_z (μm)	8,63	26,22	21,23	21,62	
R_a (μm)	1,86	5,84	4,67	4,98	
R_z (μm)	8,83	22,17	18,67	22,76	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	49	68	83,5	93	
\bar{R}_a (μm)	1,71	1,71	3,66	10,70	
\bar{R}_z (μm)	8,58	9,28	20,82	56,38	
R_a (μm)	1,27	1,62	2,78	10,82	
R_z (μm)	6,43	8,17	12,99	57,63	
R_a (μm)	1,69	1,77	5,00	14,57	
R_z (μm)	9,27	9,77	29,79	71,42	
R_a (μm)	2,16	1,73	3,21	6,72	
R_z (μm)	10,05	9,88	19,67	40,09	



Obr. 39 Drsnost povrchu Ra.



Obr. 40 Drsnost povrchu Rz.



Obr. 41 Zatížení vřetene stroje.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_a (obr. 39) vyplývá, že jeho průběh je pro každou hloubku záběru ostří stejný. U frézy SSO09 je při nejvyšší hodnotě posuvu patrné, že větší hloubka záběru ostří působí na mírné snížení drsnosti povrchu. Do hodnoty posuvu 1,5 mm na zub vykazuje výrazně lepší výsledky fréza SSO09 než fréza SZD09, která má naopak průběh vyrovnanější, což je dáno její geometrií.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_z (obr. 40) vyplývá, že jeho průběh je taktéž pro každou hloubku záběru ostří stejný a příliš se neliší od průběhu parametru R_a . Naměřené hodnoty pro frézu SZD09 jsou pro parametr R_z vyrovnanější než pro parametr R_a .

Hodnoty zatížení vřetene jsou zobrazeny na obr. 41. Je patrné, že fréza SSO09 dosahuje vyšších hodnot zatížení vřetene než fréza SZD09. To je dáno rozdílným počtem břitů, fréza SSO09 má 7 břitů, fréza SZD09 má 5 břitů. Při přepočtu hodnot zatížení například pro nejvyšší rezné podmínky, a to hloubku záběru ostří 0,6 mm a posuv na zub 1,8 mm, na jeden břit, tak pro frézu SZD09 vychází zatížení jednoho břitu na hodnotu 23,2 % a pro frézu SSO09 je hodnota 21,9 %, z čehož plyne, že zatížení vřetene je mírně nižší pro frézu SSO09.

Naměřené hodnoty pro hloubky záběru ostří 0,4 mm; 0,5 mm a 0,6 mm jsou uvedeny v příloze 1, listy 1 až 3.

4.5.2 Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,3$ mm

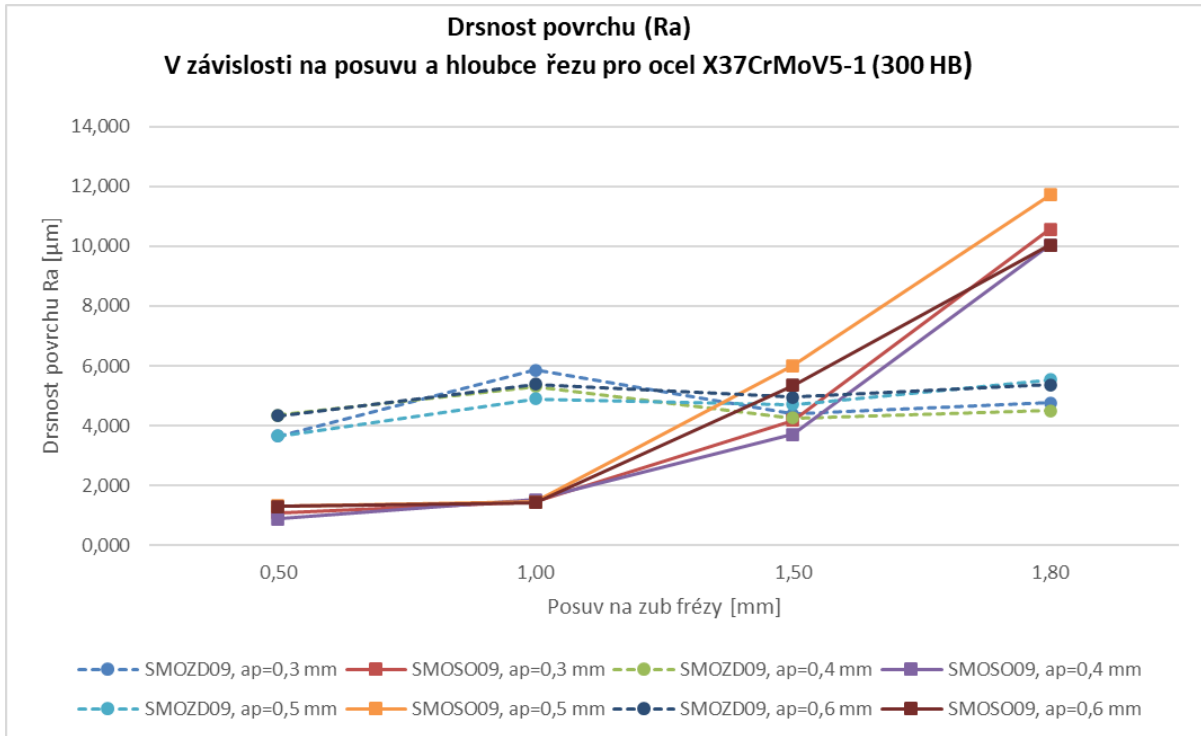
Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 10 a naměřené hodnoty v tab. 11.

Tab. 10 Jednotné řezné podmínky.

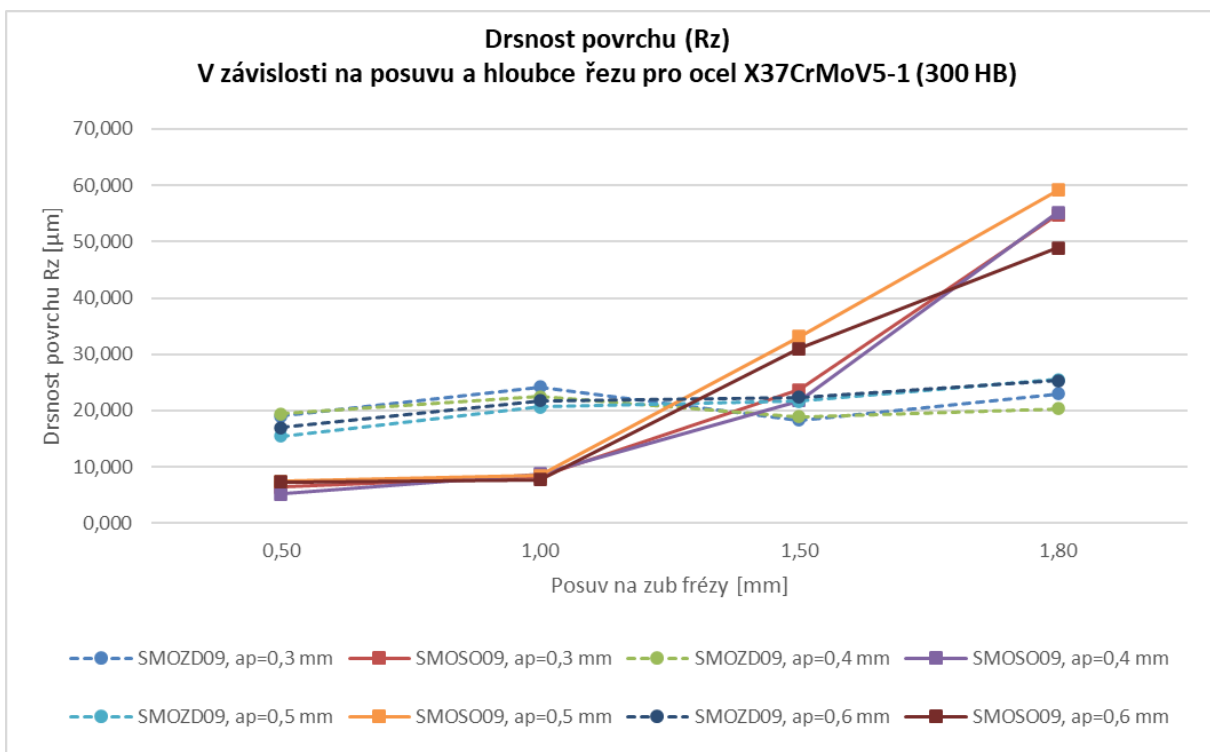
Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,3	250	0,5 až 1,8	35	Emulze

Tab. 11 Naměřené parametry.

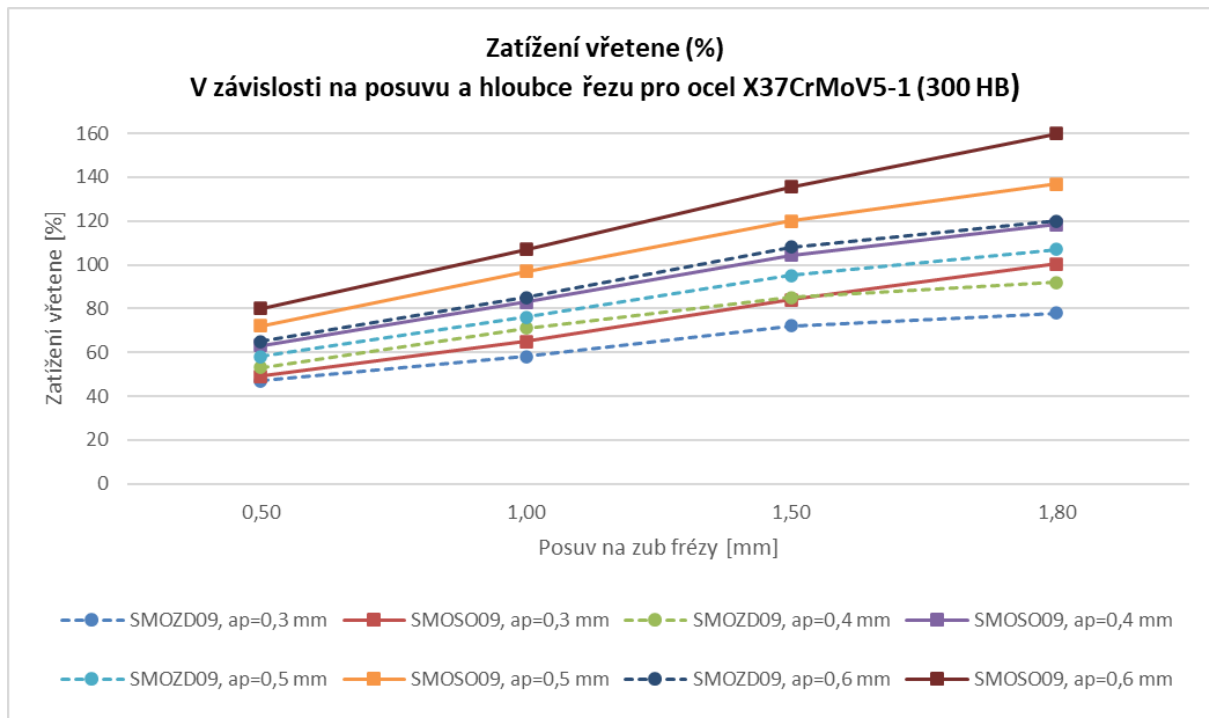
Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	47,00	58,00	72,00	78,00	
\bar{R}_a (μm)	3,65	5,86	4,39	4,77	
\bar{R}_z (μm)	19,05	24,21	18,27	22,98	
R_a (μm)	3,73	5,94	4,34	4,29	
R_z (μm)	18,08	27,16	19,64	19,94	
R_a (μm)	3,73	6,50	4,52	5,00	
R_z (μm)	20,08	26,11	18,13	24,52	
R_a (μm)	3,48	5,14	4,31	5,02	
R_z (μm)	18,97	19,37	17,05	24,47	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	49,00	65,00	84,00	100,50	
\bar{R}_a (μm)	1,09	1,47	4,19	10,56	
\bar{R}_z (μm)	6,40	8,35	23,72	54,78	
R_a (μm)	0,95	1,43	2,31	14,06	
R_z (μm)	5,62	8,36	11,36	70,06	
R_a (μm)	1,06	1,46	7,37	11,06	
R_z (μm)	7,27	8,46	42,07	56,16	
R_a (μm)	1,27	1,53	2,89	6,56	
R_z (μm)	6,31	8,22	17,72	38,12	



Obr. 42 Drsnost povrchu Ra.



Obr. 43 Drsnost povrchu Rz.



Obr. 44 Zatížení vřetene stroje.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_a (obr. 42) vyplývá, že jeho průběh je pro každou hloubku záběru ostří stejný. Do hodnoty posuvu 1,5 mm na zub vykazuje výrazně lepší výsledky fréza SSO09 než fréza SZD09, která má naopak průběh vyrovnanější, což je dáno její geometrií. Na parametr drsnosti povrchu R_a , jak je patrné z naměřených hodnot při obrábění s použitím procesní kapaliny a bez ní, nemá její využití téměř žádný vliv.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_z (obr. 43) vyplývá, že jeho průběh je taktéž pro každou hloubku záběru ostří stejný a příliš se neliší od průběhu parametru R_a . Naměřené hodnoty pro frézu SZD09 jsou pro parametr R_z vyrovnanější než pro parametr R_a . Na parametr R_z taktéž nemá použití procesní kapaliny téměř žádný vliv.

Hodnoty zatížení vřetene jsou zobrazeny na obr. 44. Je patrné, že fréza SSO09 dosahuje vyšších hodnot zatížení vřetene než fréza SZD09. To je dáno rozdílným počtem břitů, fréza SSO09 má 7 břitů, fréza SZD09 má 5 břitů. Při přepočtu hodnot zatížení například pro nejvyšší rezné podmínky, a to hloubku záběru ostří 0,6 mm a posuv na zub 1,8 mm, na jeden břit, tak pro frézu SZD09 vychází zatížení jednoho břitu na hodnotu 24 % a pro frézu SSO09 je hodnota 22,9 %, z čehož plyne, že zatížení vřetene je mírně nižší pro frézu SSO09.

Naměřené hodnoty pro hloubky záběru ostří 0,4 mm; 0,5 mm a 0,6 mm jsou uvedeny v příloze 1, listy 4 až 6.

4.5.3 Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,3$ mm

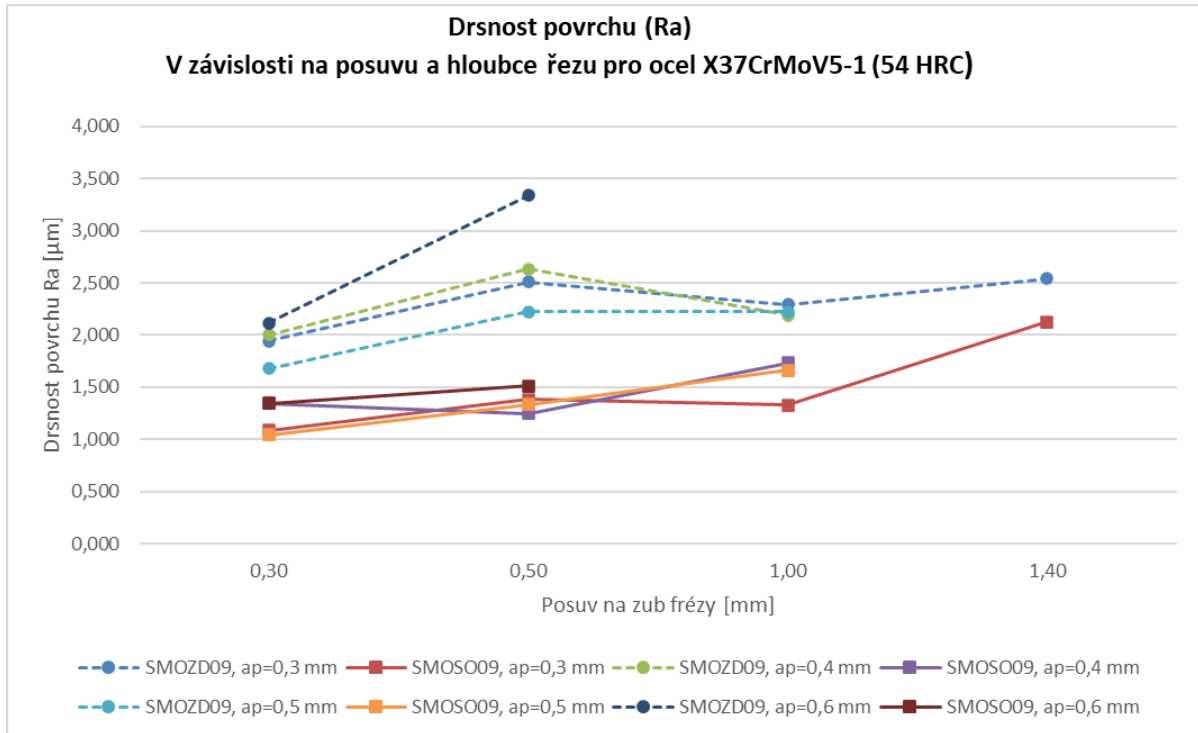
Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 12 a naměřené hodnoty v tab. 13.

Tab. 12 Jednotné řezné podmínky.

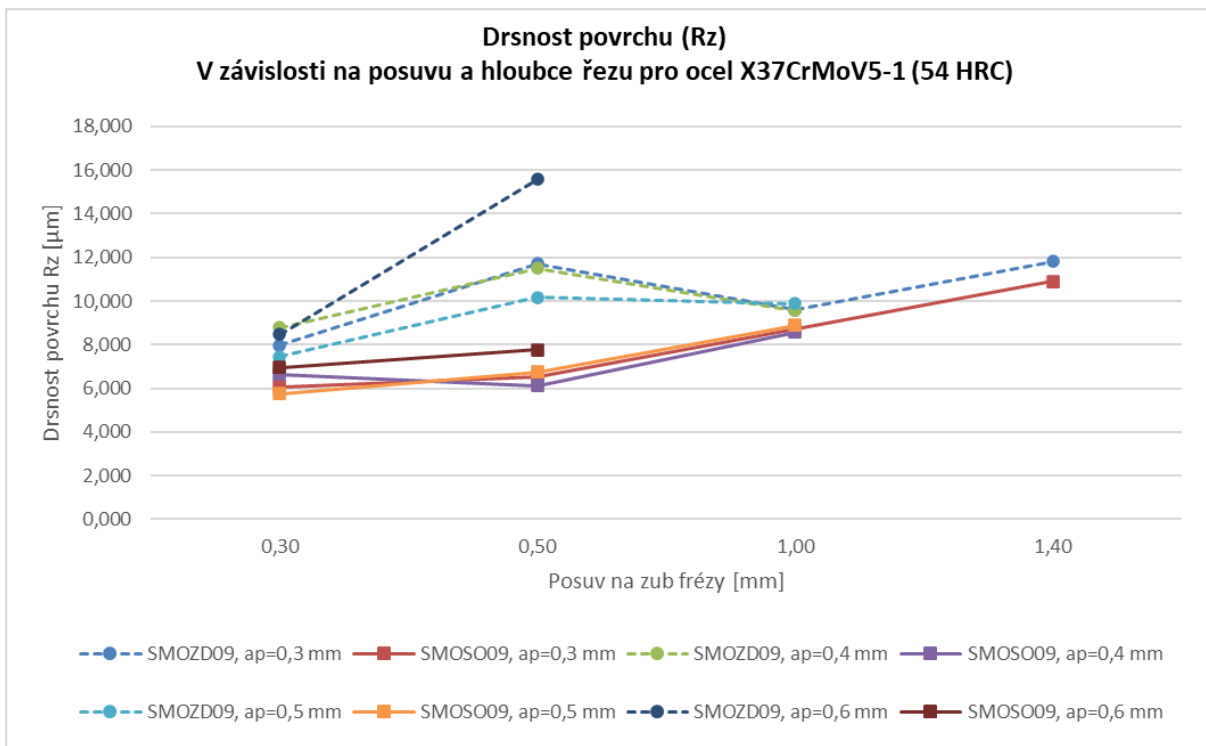
Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,3	60	0,3 až 1,4	35	Bez chlazení

Tab. 13 Naměřené parametry.

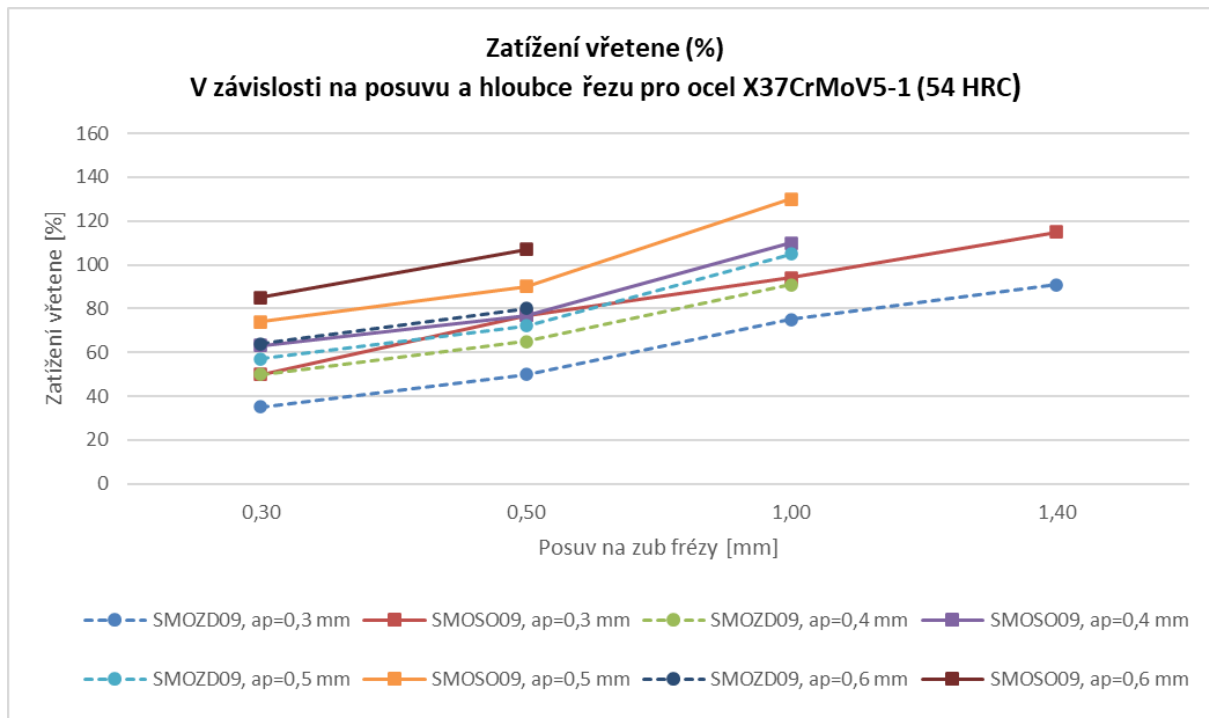
Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	35,00	50,00	75,00	91,00
\bar{R}_a (μm)	1,94	2,50	2,29	2,54
\bar{R}_z (μm)	7,98	11,71	9,59	11,81
R_a (μm)	1,98	2,76	2,22	2,44
R_z (μm)	7,90	12,78	10,22	12,14
R_a (μm)	1,88	2,60	2,05	2,63
R_z (μm)	7,95	12,38	7,87	11,46
R_a (μm)	1,95	2,15	2,60	2,54
R_z (μm)	8,08	9,99	10,67	11,83
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	50,00	77,00	94,00	115,00
\bar{R}_a (μm)	1,08	1,38	1,33	2,12
\bar{R}_z (μm)	6,06	6,49	8,70	10,90
R_a (μm)	1,41	0,97	1,49	2,40
R_z (μm)	6,48	5,71	9,20	11,30
R_a (μm)	1,17	2,29	1,26	1,66
R_z (μm)	6,10	9,31	8,50	9,17
R_a (μm)	0,67	0,88	1,22	2,31
R_z (μm)	5,61	4,46	8,40	12,24



Obr. 45 Drsnost povrchu Ra.



Obr. 46 Drsnost povrchu Rz.



Obr. 47 Zatížení vřetene stroje.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti Ra (obr. 45) vyplývá, že jeho průběh je pro každou hloubku záběru ostří stejný. Dále z naměřených hodnot vyplývá, že při obrábění oceli v zušlechťeném stavu dosahují obě frézy lepších výsledků z hlediska parametru Ra. Při jejich porovnání však dosahuje fréza SSO09 výrazně lepších výsledků a hodnot kolísajících mezi 1 až 1,5 μm .

Z naměřených hodnot parametru drsnosti Rz (obr. 46) vyplývá, že jeho průběh je taktéž pro každou hloubku záběru ostří stejný, ale hodnoty mají větší rozptyl. U frézy SSO09 také dochází na rozdíl od parametru Ra k mírnému nárůstu se zvyšujícím se posuvem.

Hodnoty zatížení vřetene jsou zobrazeny na obr. 47. Je patrné, že fréza SSO09 dosahuje vyšších hodnot zatížení vřetene než fréza SZD09. To je dáno rozdílným počtem břitů, fréza SSO09 má 7 břitů, fréza SZD09 má 5 břitů. Při přepočtu hodnot zatížení například pro nejvyšší rezné podmínky, a to hloubku záběru ostří 0,6 mm a posuv na zub 1,8 mm, na jeden břit, tak pro frézu SZD09 vychází zatížení jednoho břitu na hodnotu 18,2 % a pro frézu SSO09 je hodnota 16,4 %, z čehož plyne, že zatížení vřetene je mírně nižší pro frézu SSO09.

Naměřené hodnoty pro hloubky záběru ostří 0,4 mm; 0,5 mm a 0,6 mm jsou uvedeny v příloze 1, listy 7 až 9.

4.5.4 Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,3$ mm

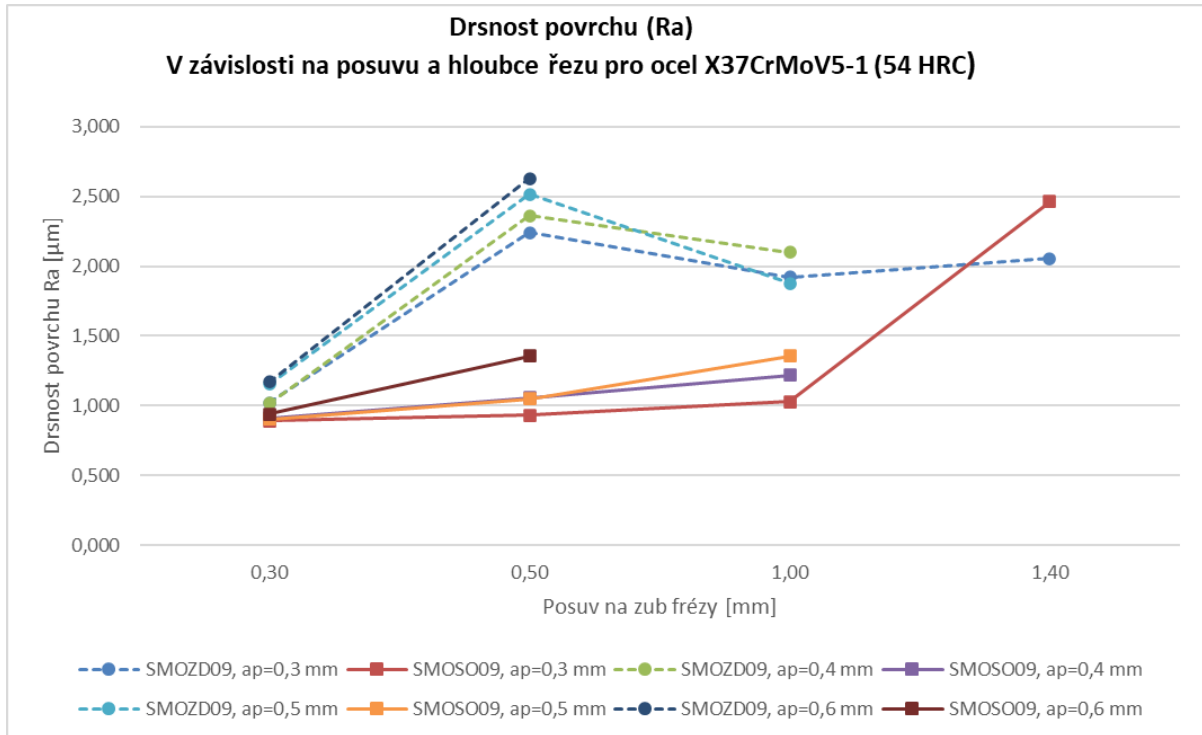
Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 14 a naměřené hodnoty v tab. 15.

Tab. 14 Jednotné řezné podmínky.

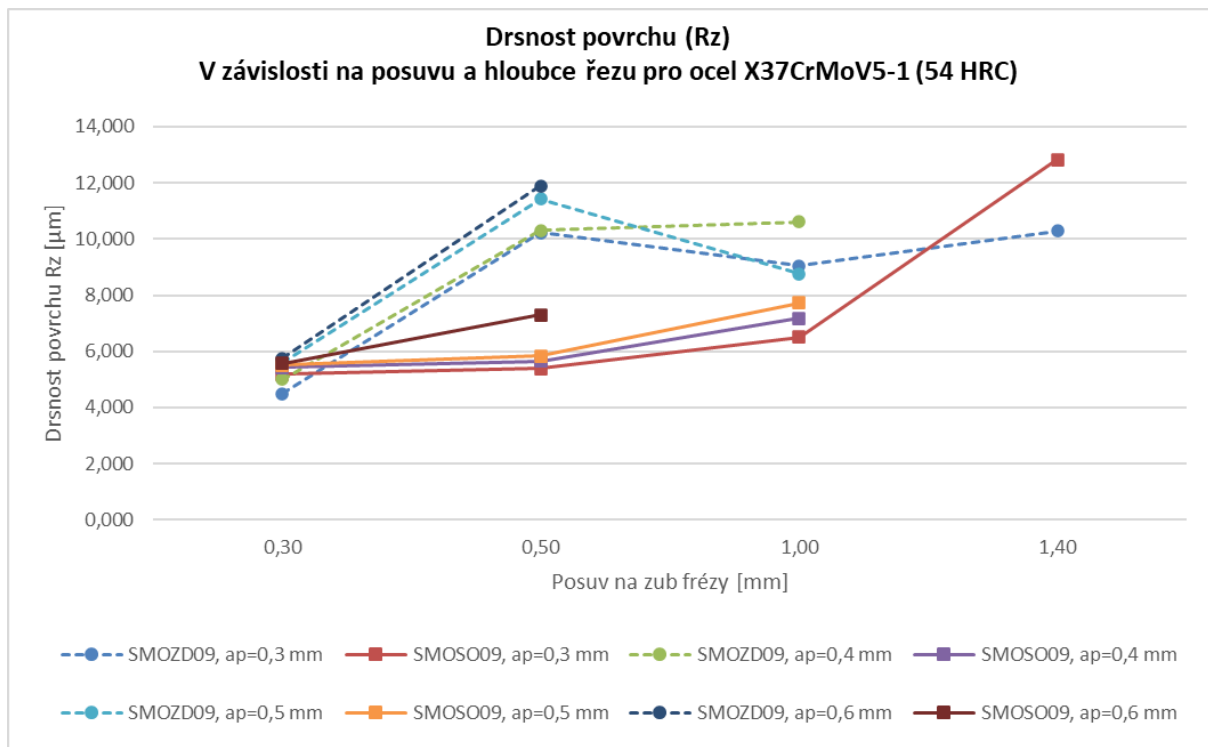
Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,3	60	0,3 až 1,4	35	Emulze

Tab. 15 Naměřené parametry.

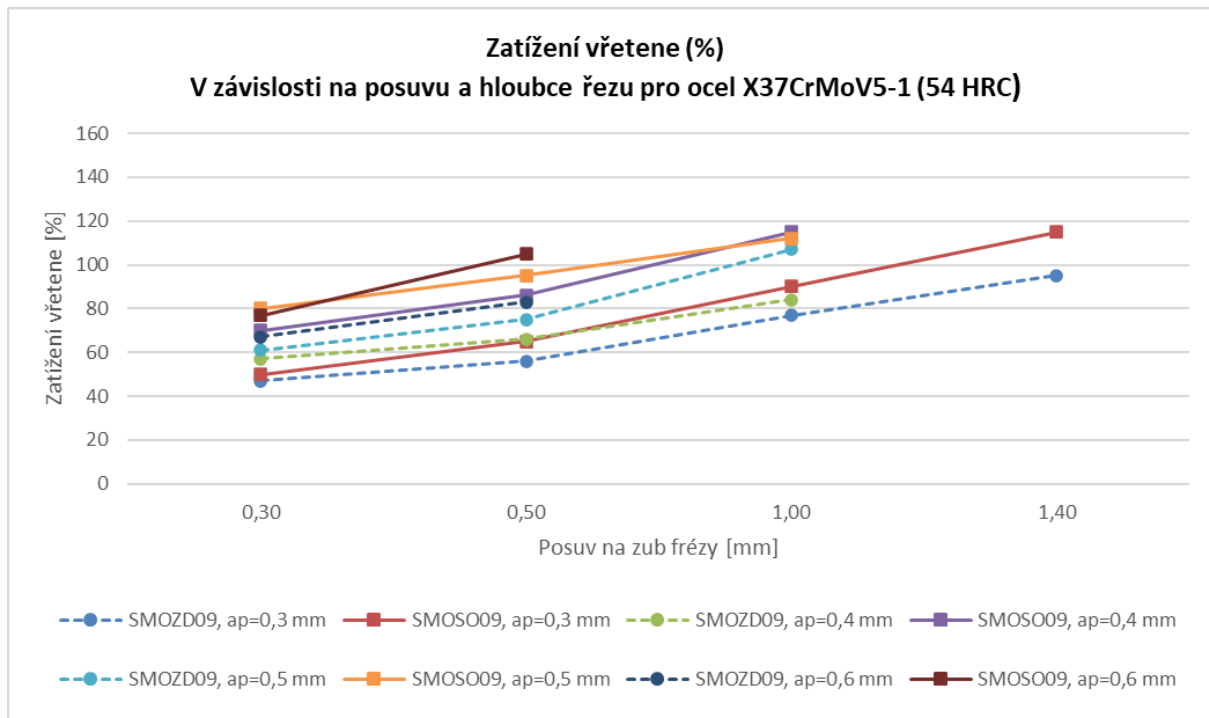
Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	47,00	56,00	77,00	95,00
\bar{R}_a (μm)	1,02	2,23	1,92	2,05
\bar{R}_z (μm)	4,49	10,23	9,04	10,29
R_a (μm)	1,24	2,14	1,72	2,02
R_z (μm)	4,95	9,17	7,37	9,67
R_a (μm)	0,91	2,69	1,90	1,77
R_z (μm)	4,29	11,67	9,99	9,73
R_a (μm)	0,91	1,87	2,13	2,36
R_z (μm)	4,24	9,85	9,76	11,47
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	50,00	65,00	90,00	115,00
\bar{R}_a (μm)	0,89	0,93	1,02	2,46
\bar{R}_z (μm)	5,19	5,39	6,50	12,82
R_a (μm)	1,08	0,77	1,37	3,23
R_z (μm)	5,59	4,43	7,74	14,30
R_a (μm)	0,97	1,07	0,65	2,67
R_z (μm)	5,81	6,99	4,91	16,48
R_a (μm)	0,61	0,94	1,05	1,49
R_z (μm)	4,18	4,74	6,84	7,70



Obr. 48 Drsnost povrchu Ra.



Obr. 49 Drsnost povrchu Rz.



Obr. 50 Zatížení vřetene stroje.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_a (obr. 48) vyplývá, že jeho průběh je pro každou hloubku záběru ostří stejný. U frézy SSO09 je zde při nejvyšší hodnotě posuvu výrazný nárůst hodnoty R_a . Na parametr drsnosti povrchu R_a , jak je patrné z naměřených hodnot při obrábění s použitím procesní kapaliny a bez ní, nemá její využití téměř žádný vliv.

Z naměřených hodnot parametru drsnosti R_z (obr. 49) vyplývá, že jeho průběh je taktéž pro každou hloubku záběru ostří stejný, a vývoj hodnot je velmi podobný parametru R_a . Na parametr R_z taktéž nemá využití procesní kapaliny výrazný vliv.

Hodnoty zatížení vřetene jsou zobrazeny na obr. 50. Je patrné, že fréza SSO09 dosahuje vyšších hodnot zatížení vřetene než fréza SZD09. To je dáno rozdílným počtem břitů, fréza SSO09 má 7 břitů, fréza SZD09 má 5 břitů. Při přepočtu hodnot zatížení, například pro nejvyšší rezné podmínky, a to hloubku záběru ostří 0,6 mm a posuv na zub 1,8 mm, na jeden břit, tak pro frézu SZD09 vychází zatížení jednoho břitu na hodnotu 19 % a pro frézu SSO09 je hodnota 16,4 %, z čehož plyne, že zatížení vřetene je mírně nižší pro frézu SSO09.

Naměřené hodnoty pro hloubky záběru ostří 0,4 mm; 0,5 mm a 0,6 mm jsou uvedeny v příloze 1, listy 10 až 12.

4.6 Opotřebení nástrojů po první části řezných zkoušek

Po provedení první části řezných zkoušek bylo pro porovnání změřeno opotřebení vyměnitelných břitových destiček na mikroskopu OLYMPUS. Měření proběhlo na dvou vzorcích pro každý typ destičky z materiálů pro obrábění oceli v měkkém i zušlechtěném stavu. Uvedeny jsou snímky destiček ze strany hlavního hřbetu a čela. U každého typu destiček je uveden čas, po který bylo s nástrojem obráběno a hodnota středního hřbetního opotřebení VB. Dosažení hodnoty trvanlivosti břitu se předpokládá při naplnění kritéria $VB_b = 0,3$ mm na hlavním hřbetě VBD.

- **VBD ZDCW09, M8325**

Pro obrábění destičkami ZDCW09 z materiálu M8325 osazených na fréze SZD09 bylo dosaženo opotřebení, které je uvedeno v tab. 16. Snímky břitové destičky se nachází na obr. 51.

Tab. 16 Opotřebení VBD ZDCW09, M8325.

Obráběný materiál:	Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)
Fréza:	SZD09
VBD:	ZDCW 09T304, M8325
Řezná rychlost:	250 m/min
Doba obrábění:	5,1 min
Vzorek:	Opotřebení VB:
M8325_1	0,114 mm
M8325_2	0,094 mm



Obr. 51 Opotřebení destičky ZDEW 09, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.

Ze snímku břitové destičky je patrné, že na hlavní řezné hraně došlo ke vzniku trhlin. Důsledkem vzniku trhlin může být částečné obrábění s použitím procesní kapaliny. Ač byla procesní kapalina vedena středem nástroje přímo na břit, za účelem minimalizování teplotních rázů, jeví se její použití jako nevhodné. Tyto trhliny mohou při dalším obrábění vést k vylomení části břitu. Pro eliminování tohoto jevu je možné také použití houževnatějšího typu řezného materiálu.

- **VBD SOHT09, M8330**

Pro obrábění destičkami SOHT09 z materiálu M8330 osazených na fréze SSO09 bylo dosaženo opotřebení, které je uvedeno v tab. 17. Snímky břitové destičky se nachází na obr. 52.

Tab. 17 Opotřebení VBD SOHT09, M8330.

Obráběný materiál:	Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)
Fréza:	SSO09
VBD:	SOHT 090414, M8330
Řezná rychlost:	250 m/min
Doba obrábění:	5,0 min
Vzorek:	Opotřebení VB:
M8330_1	0,067 mm
M8330_2	0,059 mm



Obr. 52 Opotřebení destičky SOHT 09, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.

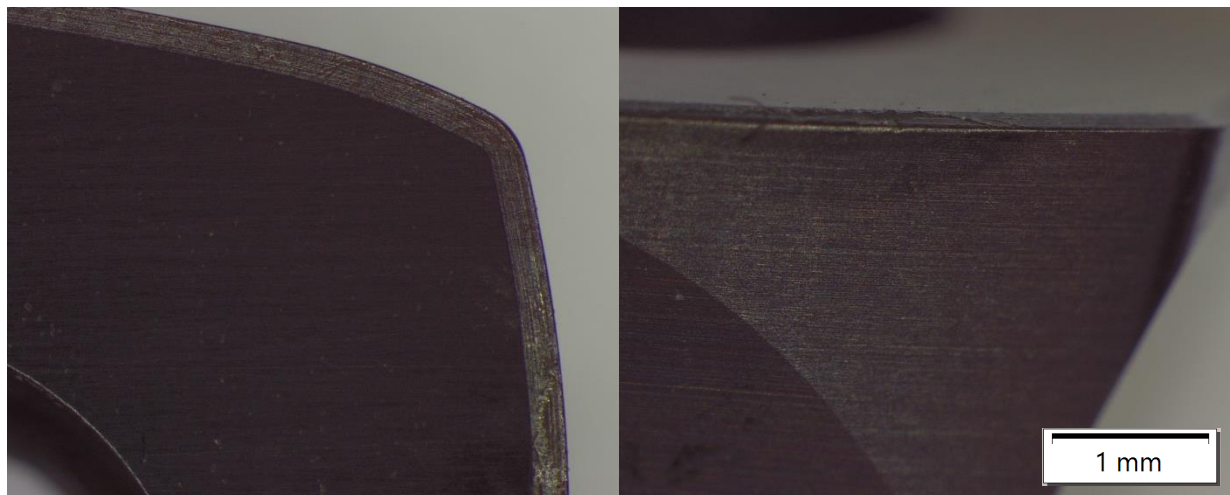
Ze snímku břitové destičky je patrné, že zde nedošlo k výraznému opotřebení na žádné z jejích částí. Lze tedy předpokládat, že břit bez větších problémů naplní svoji trvanlivost pro určené kritérium.

• **VBD ZDCW09, M8310**

Pro obrábění destičkami ZDCW09 z materiálu M8310 osazených na fréze SZD09 bylo dosaženo opotřebení, které je uvedeno v tabulce 18. Snímky břitové destičky se nachází na obrázku 53.

Tab. 18 Opotřebení VBD ZDCW09, M8310.

Obráběný materiál:	Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)
Fréza:	SZD09
VBD:	ZDCW 09T304, M8310
Řezná rychlost:	60 m/min
Doba obrábění:	19,9 min
Vzorek:	Opotřebení VB:
M8310_1	0,04 mm
M8310_2	0,02 mm



Obr. 53 Opotřebení destičky ZDEW 09, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.

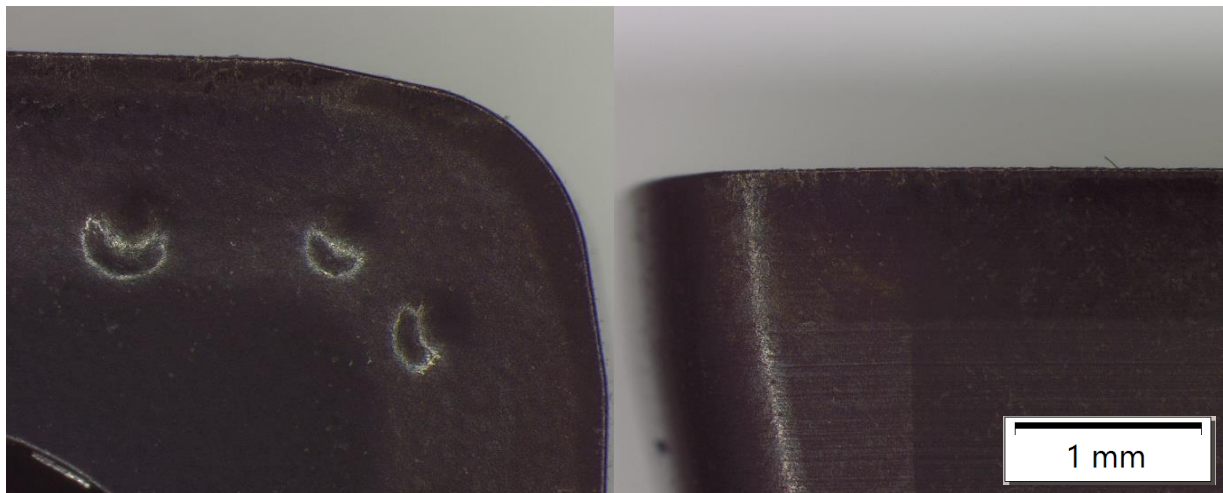
Ze snímku břitové destičky je patrné, že zde nedošlo k výraznému opotřebení na žádné z jejich částí. Pouze na hlavním břitu se nacházejí velmi malé stopy po úlomcích. Lze tedy předpokládat, že břit bez problémů naplní svoji trvanlivost pro určené kritérium.

- **VBD SOHT09, M8215**

Pro obrábění destičkami SOHT09 z materiálu M8215 osazených na fréze SSO09 bylo dosaženo opotřebení, které je uvedeno v tab. 19. Snímky břitové destičky se nachází na obr. 54.

Tab. 19 Opotřebení VBD SOHT09, M8215.

Obráběný materiál:	Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)
Fréza:	SSO09
VBD:	SOHT 090414, M8215
Řezná rychlost:	60 m/min
Doba obrábění:	15,8 min
Vzorek:	Opotřebení VB:
M8215_1	0,106 mm
M8215_2	0,120 mm



Obr. 54 Opotřebení destičky SOHT 09, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.

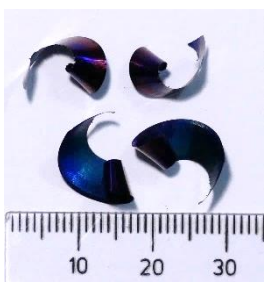
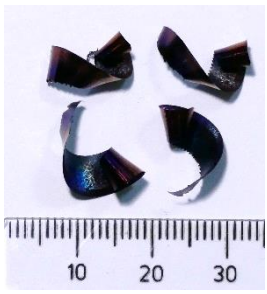
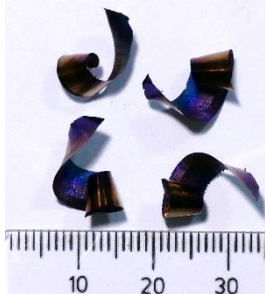
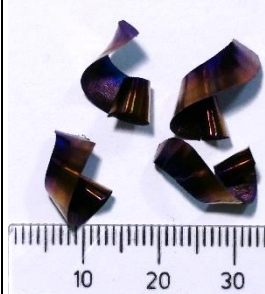
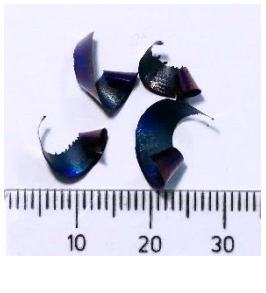
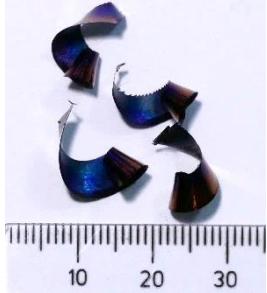
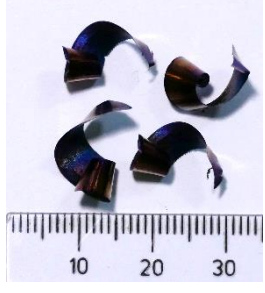





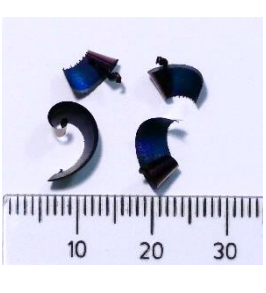



Ze snímku břitové destičky je patrné, že zde nedošlo k výraznému opotřebení na žádné z jejích částí. Dosažená hodnota opotřebení VB není příliš vysoká a trvanlivost břitu by tedy měla dosáhnout určeného kritéria. K vyššímu opotřebení těchto VBD SOHT09 oproti ZDCW09 došlo v důsledku odlišné geometrie břitu, která je u destiček ZDCW09 výhodnější. U SOHT09 bude geometrie pro obrábění tvrdých materiálů dále v rámci vývoje společnosti Dormer Pramet, s.r.o. upravena.

4.7 Vzniklé třísky a diagram utváření

Na základě sběru třísek za různých řezných podmínek, konkrétně pro různé hodnoty šířky záběru ostří a posuvů byly sestaveny diagramy utváření třísky. Diagramy utváření třísky jsou sestaveny zvlášť pro obě testované frézy i pro oba testované materiály:









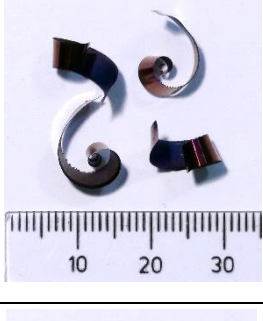







- Fréza SZD09, ocel X37CzMoV5-1 (300 HB)

Tab. 20 Diagram utváření třísky pro frézu SZD09 a materiál v měkkém stavu.

a_p [mm]	f_z [mm]			
	0,5	1	1,5	1,8
0,6				
0,5				
0,4				
0,3				

• Fréza SSO09, ocel X37CzMoV5-1 (300 HB)

Tab. 21 Diagram utváření třísky pro frézu SSO09 a materiál v měkkém stavu.

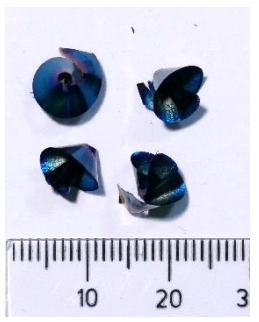
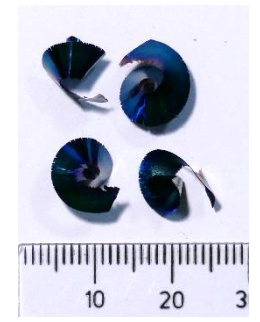
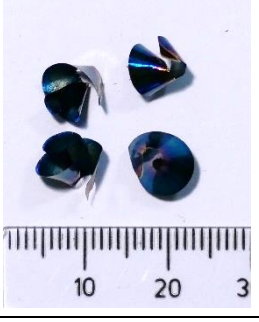
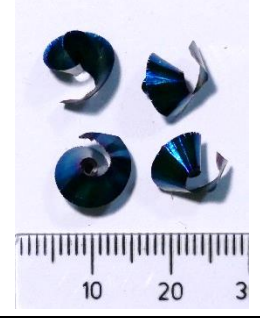

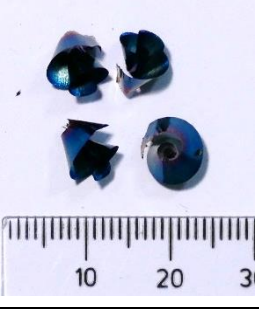
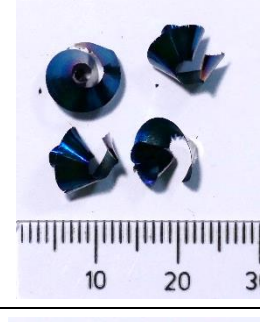
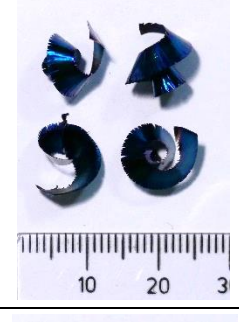
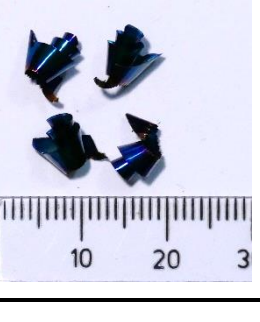
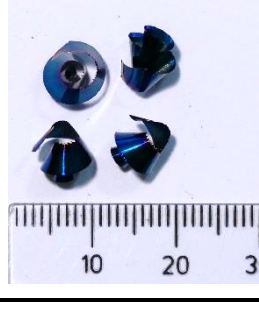
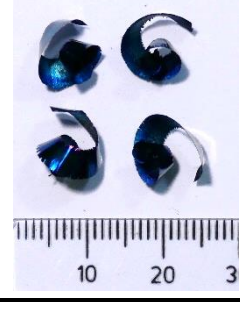

a_p [mm]	f_z [mm]			
	0,5	1	1,5	1,8
0,6				
0,5				
0,4				
0,3				

Při porovnání třísek vzniklých při obrábění materiálu v měkkém stavu frézou SSO09 (tab. 21) a SZD09 (tab. 20) lze konstatovat, že vznikající třísky jsou v obou případech krátké spirálovité, v případě frézy SZD09 ale s větší šířkou. Z hlediska odpadního hospodářství by však měly být výhodnější třísky vzniklé při obrábění frézou SSO09, jelikož bude snazší jejich zhutnění či lisování, a to díky menší šířce.

Jelikož velikost posuvů byla pro obě frézy rovnocenná, tak i tloušťka třísek, která se z této hodnoty odvíjí, bude velmi podobná. A proto je možné dle barvy, která vypovídá o teplotě, na kterou byly třísky ohřáty, konstatovat, že při obrábění frézou SZD09 vzniká více tepla, což může být dáno geometrií frézy a VBD, zejména úhlem čela. Zbarvení do modra odpovídá teplotám cca 300 °C, zbarvení do bronzova až fialova teplotám okolo 260 °C. [28; 29]

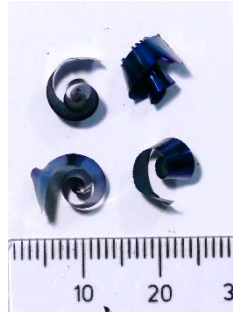
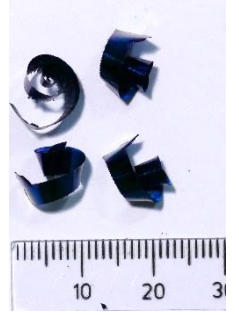
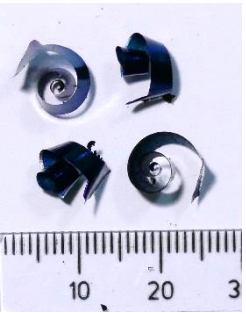
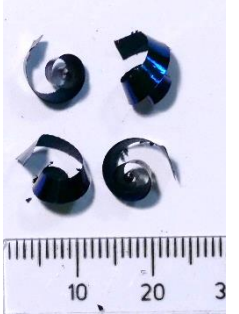
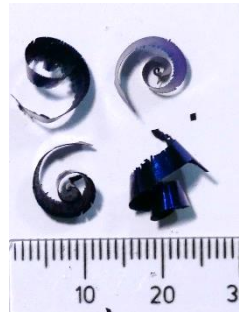

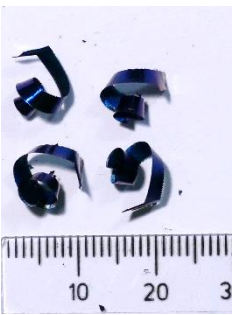
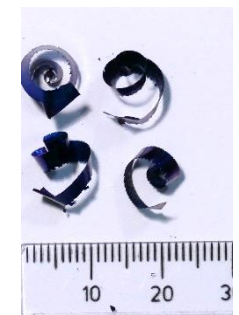
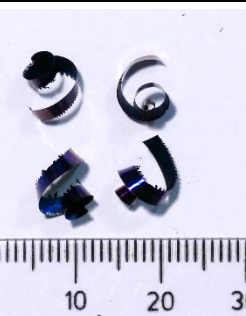

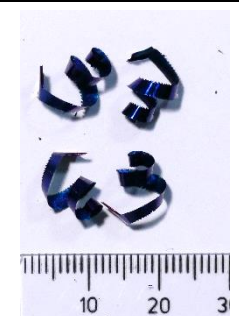
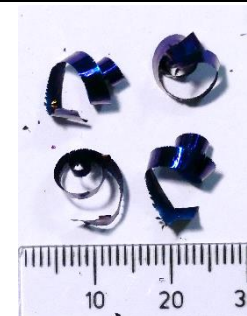
- **Fréza SZD09, ocel X37CzMoV5-1 (54 HRC)**

Tab. 22 Diagram utváření třísky pro frézu SZD09 a materiál v zušlechťeném stavu.

a_p [mm]	f_z [mm]			
	0,3	0,5	1	1,4
0,6			Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,5				Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,4				Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,3				

• Fréza SSO09, ocel X37CzMoV5-1 (54 HRC)

Tab. 23 Diagram utváření třísky pro frézu SSO09 a materiál v zušlechťeném stavu.

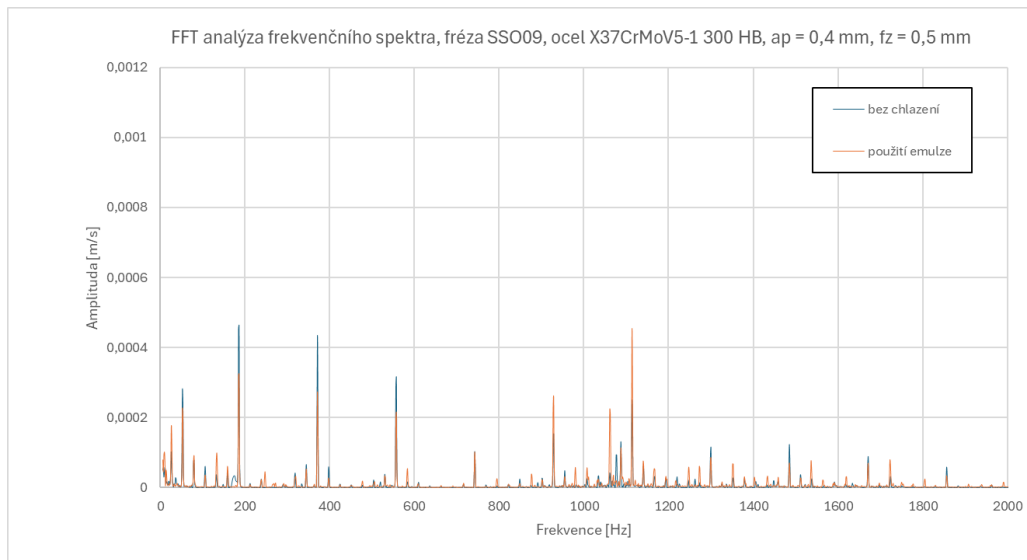
a_p [mm]	f_z [mm]			
	0,3	0,5	1	1,4
0,6			Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,5				Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,4				Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
0,3				

Při porovnání třísek vzniklých při obrábění materiálu v zušlechťeném stavu frézou SSO09 (tab. 23) a SZD09 (tab. 22) lze také konstatovat, že vznikající třísky jsou v obou případech krátké spirálovité, v případě frézy SZD09 ale s větší šířkou. Z hlediska výhodnosti jejich tvaru pro další odpadní zpracování se jeví oba typy velmi podobně a lze říci, že zpracování bude snadné. Třísky vzniklé při obrábění oceli v zušlechťeném stavu jsou také výhodnější v porovnání s třískami při obrábění oceli v měkkém stavu.

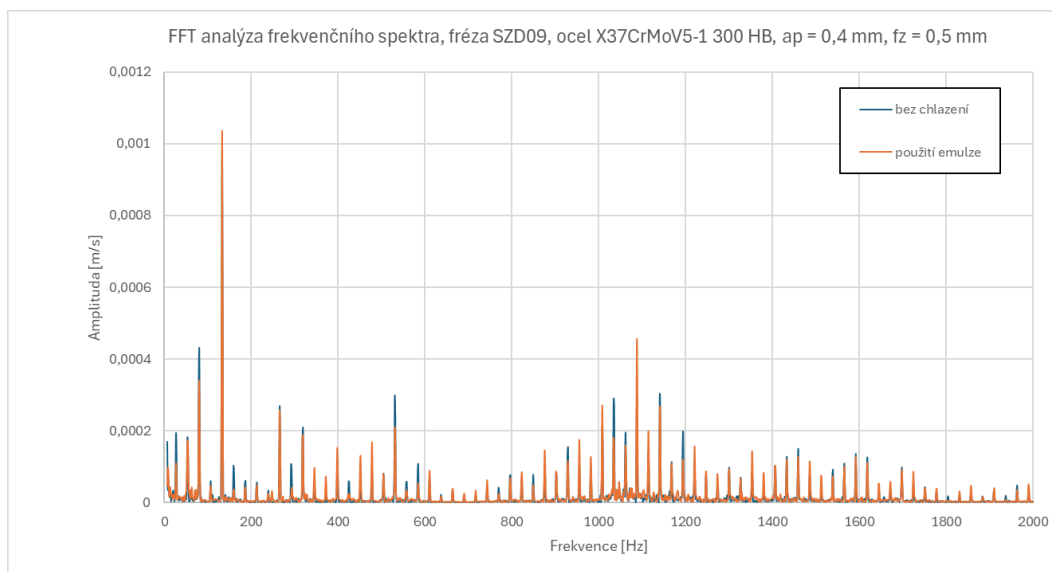
4.8 Analýza vibrací

Na základě měření vibrací pomocí akcelerometru na vřetení obráběcího stroje byly oba testované frézovací nástroje porovnány také z hlediska jejich vibračního chování a stability chodu. K záznamu vibrací sloužilo zařízení od společnosti Brüel & Kjær a osobní notebook. Měření proběhlo za různých řezných podmínek a také s použitím a bez použití procesní kapaliny.

Při porovnání FFT analýzy (*Fast Fourier Transformation*) (obr. 55 a 56) za stejných řezných podmínek pro frézu SSO09 a SZD09 je patrné, že amplituda vibrací je výrazně vyšší pro frézu SZD09. Nejvyšší píky se ve frekvenčním spektru nacházejí na zubových frekvencích a jejich násobcích. Pro první zubovou frekvenci obou frézovacích nástrojů má fréza SZD09 téměř dvojnásobnou amplitudu kmitů. Na velikost amplitudy kmitů má v tomto případě zřejmě největší vliv počet zubů frézovacích nástrojů a také geometrie břitů. Vyšší počet zubů frézy SSO09 způsobí plynulejší chod frézy, s menším kolísáním řezných sil na břitech a zároveň její pozitivnější geometrie zajistí lepší vníkaní břitů do obráběného materiálu.



Obr. 55 FFT analýza pro frézu SSO09.



Obr. 56 FFT analýza pro frézu SZD09.

V příloze 2 jsou přiloženy FFT analýzy pro další řezné podmínky a také pro obrábění zušlechtěné oceli. Záznamy také ukazují, že použití procesní kapaliny způsobuje spíše zvýšení amplitudy kmitů než jejich snížení, z čehož vyplývá, že jako vhodnější se jeví obrábění bez jejího použití.

Dalším ukazatelem je celkový úhrn vibrací (RMS), jehož zpracování bylo také provedeno pro různé řezné podmínky a obrábění bez použití řezné kapaliny a s jejím použitím. Úhrn vibrací je zpracován pro určitý stejně dlouhý úsek záznamu za daných řezných podmínek. Hodnoty RMS ukazují, že při obrábění frézou SZD09 i SSO09 nemá velký vliv na chování v řezu hloubka záběru ostří. Dále je patrné, že je celkový úhrn vibrací nižší při obrábění zušlechtěného materiálu. To může být dáno odlišnými rozměry měkkého a zušlechtěného obrobku a jejich upnutím. Celkové pořadí z hlediska RMS je uvedeno v pravé části tab. 24.

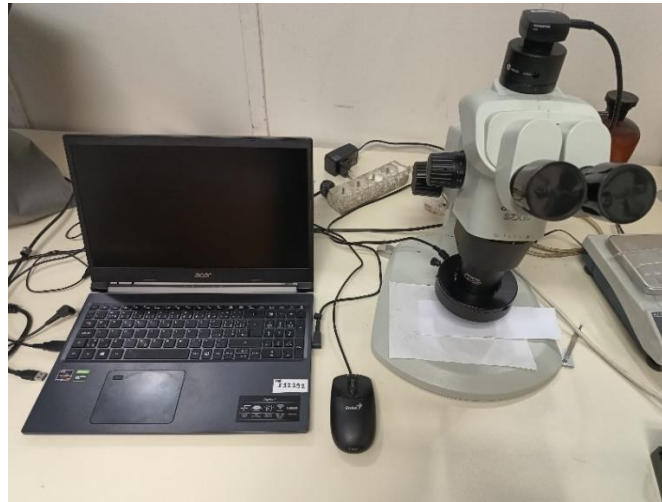
Celkově lze z pohledu měření vibrací konstatovat, že jako vhodnější se jeví nové řešení frézy se sedmi zuby, které má plynulejší záběr. Jako vhodné se jeví také použití pozitivnější geometrie břitů frézy, což má za následek lepší vnikání břitů do obrobku a snížení amplitudy kmitů. Využití procesní kapaliny při obrábění je méně vhodné než obrábění za sucha.

Tab. 24 Celkový úhrn vibrací.

Nástroj	Obráběný materiál	Chlazení	Šířka záběru ostří a_p [mm]	RMS vibrací [m/s]	Pořadí
SSO09 + VBD SOHT09, M8330	300 HB	bez chlazení	0,4	4,0174	5.
			0,5	4,5278	
			0,6	4,2371	
SSO09 + VBD SOHT09, M8330	300 HB	emulze	0,4	5,0574	6.
			0,5	4,2527	
			0,6	4,2443	
SSO09 + VBD SOHT09, M8215	54 HRC	bez chlazení	0,4	2,5998	3.
			0,5	3,0489	
			0,6	3,3962	
SSO09 + VBD SOHT09, M8215	54 HRC	emulze	0,4	2,5068	1.
			0,5	2,5344	
			0,6	2,8919	
SZD09 + VBD ZDCW09, M8325	300 HB	bez chlazení	0,4	7,0367	7.
			0,5	7,7259	
			0,6	8,9912	
SZD09 + VBD ZDCW09, M8325	300 HB	emulze	0,4	7,8605	8.
			0,5	9,5275	
			0,6	10,4579	
SZD09 + VBD ZDCW09, M8310	54 HRC	bez chlazení	0,4	2,4679	4.
			0,5	3,1757	
			0,6	3,9330	
SZD09 + VBD ZDCW09, M8310	54 HRC	emulze	0,4	2,2895	2.
			0,5	2,9147	
			0,6	3,5805	

4.9 Měření trvanlivosti břitů

Pro komplexní porovnání frézovacích nástrojů byly provedeny také testy trvanlivosti břitů VBD. Měření bylo provedeno za konstantních řezných podmínek uvedených v tab. 24 na měkké oceli. Nástroj byl osazen vždy pouze jednou VBD a měření proběhlo na dvou vzorcích. Snímky břitových destiček a měření opotřebení VB_b proběhlo za pomoci optického mikroskopu OLYMPUS (obr. 57). Kritérium opotřebení bylo stanoveno na $VB_b = 0,3$ mm. Délka jednoho cyklu, po kterém probíhalo měření opotřebení byla 4,7 minuty.

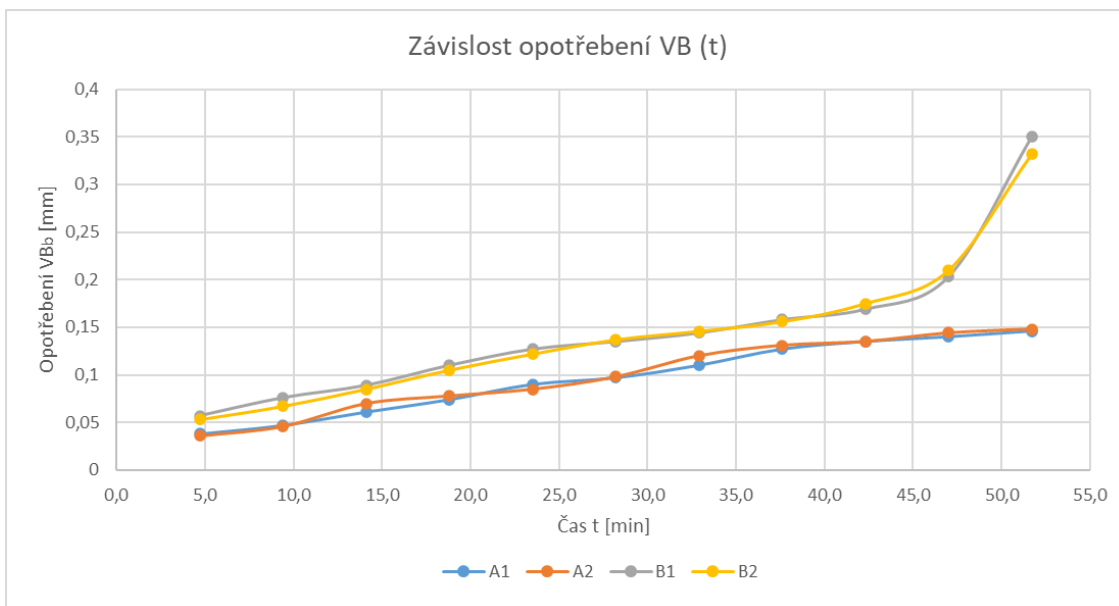


Obr. 57 Mikroskop OLYMPUS.

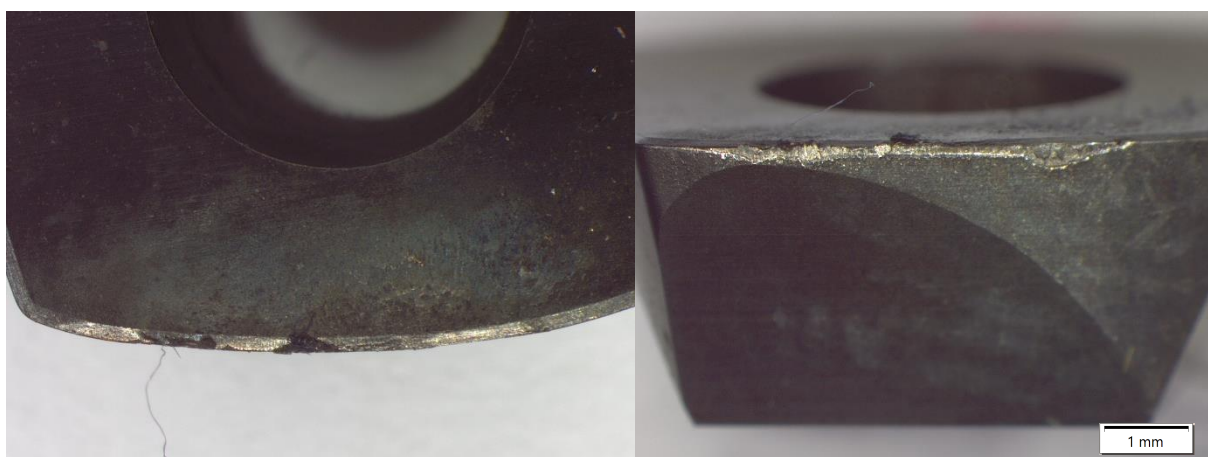
Tab. 25 Řezné podmínky pro testy trvanlivosti.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Posuv na zub f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,5	270	0,6	37	Bez chlazení
Nástroj:		VBD:		Označení:
SSO09		SOHT 090414, M8215		A1, A2
SZD09		ZDCW 09T304, M8310		B1, B2

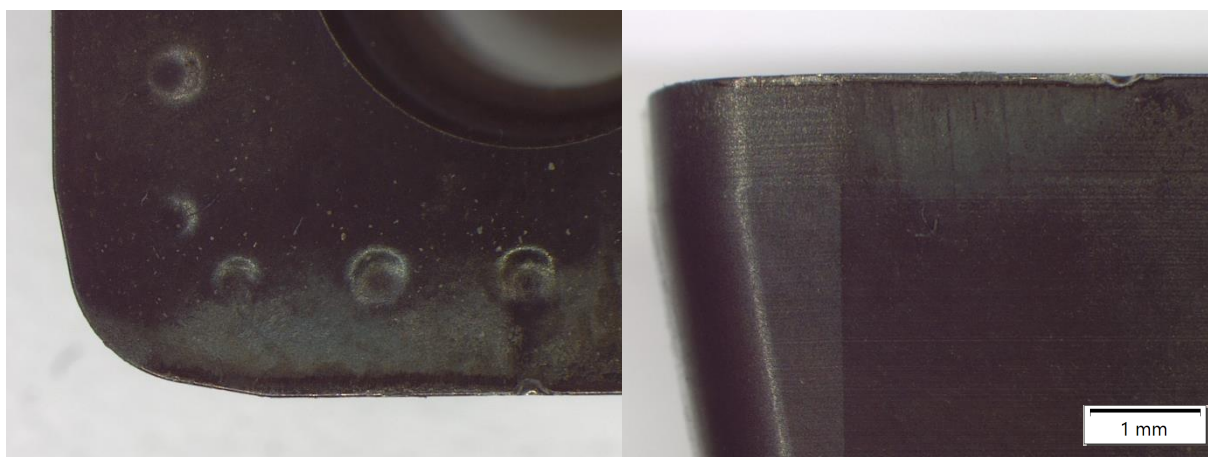
Během měření opotřebení byly vzorky VBD označeny kombinací písmen a čísel viz tab. 25. Testovací řezné podmínky byly zvoleny na základě již provedených testů, které společnost Dormer Pramet, s.r.o. provedla na podobných VBD. V průběhu testování se tyto řezné podmínky ukázaly jako příliš nízké a trvanlivost břitů VBD byla vyšší, než se předpokládalo. Z důvodu malého množství obráběného materiálu však bylo nutné řezné podmínky dále neupravovat a nezačínat nový test za zvýšených řezných podmínek. Pokračovalo se tedy s původně nastavenými řeznými podmínkami. Opotřebení na hřbetě břitových destiček SOHT09 narůstalo jen velmi pozvolna, v době dosažení kritéria opotřebení u destiček ZDCW09 se pohybovala hodnota opotřebení jen na hodnotě cca 0,15 mm, řezná hrana tedy byla schopna ještě po poměrně dlouhou dobu obrábět. Z důvodu již zmíněné úspory materiálu bylo měření v tuto chvíli ukončeno. U břitových destiček ZDCW09 došlo po cca 50 minutách k naplnění kritéria opotřebení a vylomení malých částí břitu. Od cca 40. minuty byl u frézy SZD09 řezný proces doprovázen výrazným navýšením vibrací a hladiny zvukového projevu.



Obr. 58 Průběh opotřebení VBD.



Obr. 59 Opotřebení destičky ZDCW09 (B1) po 52 minutách, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.



Obr. 60 Opotřebení destičky SOHT09 (A1) po 52 minutách, vlevo čelo, vpravo hlavní hřbet.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V následující kapitole budou vybrané typy frézovacích nástrojů porovnány z pohledu všech zjištěných parametrů, naměřených hodnot a dostupných informací za účelem určení, zda nová koncepce frézovacího nástroje SSO09 dosahuje lepších výsledků než starší koncepce SZD09 a bude proto vhodnou náhradou v budoucím sortimentu společnosti Dormer Pramet, s.r.o.

Na nový typ frézovacího nástroje jsou kladeny vyšší požadavky na hodnoty axiálního házení a tato hodnota byla snížena oproti starší koncepci z hodnoty 0,03 mm na hodnotu 0,02 mm. Tato skutečnost byla ověřena na přístroji od společnosti Zoller a fréza SSO09 dosáhla požadované snížení axiálního házení proti fréze SZD09. Nižší hodnota axiálního házení má podstatný vliv na rovnoměrnost opotřebení jednotlivých břitů a drsnost obrobeného povrchu.

Dle záznamu řezného procesu pomocí vysokorychlostní kamery bylo zjištěno, že u frézy SZD09 docházelo k nerovnoměrnému záběru všech jejích břitů. Dva břity frézy neodebíraly téměř žádný materiál. Na základě této informace bylo požádáno o výměnu frézovacího nástroje za nový, který již pracoval správně. Výrazně se také snížila zvuková emise při obrábění. Z hlediska utváření třísky si oba frézovací nástroje stojí velmi podobně. Lepších výsledků však dosahuje fréza SSO09, která by dle záznamu nemusela mít sklony k drcení třísky o vedlejší břit při obrábění osazení a nezpůsobovat tak jeho nežádoucí opotřebení. Tato skutečnost bude ověřena v další fázi vývojového procesu přímo výrobcem nástrojů.

Z hlediska teplot měřených pomocí termokamery bylo zjištěno, že při obrábění těmito typy nástrojů nedochází k významnému ohřevu povrchu obráběného materiálu, hodnoty teplot povrchu se pohybovaly okolo hodnoty 30 °C. Tato skutečnost nasvědčuje tomu, že není nutné užití procesní kapaliny při obrábění, což je výhodné nejen z hlediska ekonomického, ale také ekologického. Dále byla jako druhotné měření snímána teplota řezné části nástroje, nicméně tato teplota je pouze orientační, jelikož parametr emisivity byl pro termokameru nastaven vzhledem k obrobenému povrchu. Z tohoto měření však vyplývá, že v případě frézy SZD09 docházelo k vyššímu ohřevu její řezné části, a to i o několik desítek °C. Z celkového pohledu i s uvažováním teplot, na které byly ohřáty vznikající třísky při obrábění měkké oceli lze zhruba říct, že distribuce tepla je u obrábění frézou SSO09 následující: tříska – 75 %, nástroj – 16,7 %, obrobek – 8,3 %. U obrábění frézou SZD09 je distribuce následující: tříska – 71,6 %, nástroj – 21,4 %, obrobek – 7 %. Zároveň z poměrů distribuce tepla vyplývá, že při obrábění frézou SSO09 vzniká o cca 8 % méně tepla, což je dáno její pozitivnější geometrií.

Při různých řezných podmínkách byla měřena také drsnost obrobených ploch, konkrétně parametry Ra a Rz. Při obrábění frézou SSO09 bylo dosaženo velmi dobrých výsledků při obrábění nižšími posuvy do hodnoty 1,5 mm na zub, poté drsnost významně stoupala. Toto souvisí s poloměrem zaoblení špičky VBD, které činí 1,4 mm. Do této hodnoty posuvu lze dosáhnout téměř drsnosti odpovídající dokončovacím operacím a zrcadlového lesku a zároveň drsností nižších než při obrábění frézou SZD09. Parametr drsnosti je sledován, přestože se jedná o hrubovací frézu, z toho důvodu, že přímo ovlivňuje podmínky následného dokončovacího procesu, nerovnoměrnost záběru dokončovací frézy a její opotřebení, což je kritérium vycházející z požadavků trhu, respektive zákazníků společnosti a následného ekonomického aspektu dokončovacích operací.

Jedním z důležitých sledovaných parametrů bylo zatížení vřetene stroje, které přímo ovlivňuje nejen spotřebu elektrické energie stroje, ale také jeho využitelnost pro hrubovací operace z hlediska výkonu. Jelikož testované typy frézovacích nástrojů mají rozdílné počty břitů, je zatížení u sedmizubé frézy SSO09 vyšší než u pětizubé frézy SZD09. K navýšení počtu břitů u nového řešení však došlo z důvodu zvýšení produktivity nástroje. Vyšší počet břitů umožní výrazné zvýšení posuvové rychlosti a tím i úběr materiálu za jednotku času, který vzroste až o 40 %. Díky tomu však naroste i zatížení vřetene stroje. U obrábění měkké oceli dochází

k navýšení zatížení taktéž téměř o 40 %, ale při obrábění zušlechtné oceli narostlo zatížení vřetene stroje pouze o cca 20 %. Jelikož je tento typ nástrojů určen taktéž pro obrábění forem a zápusťek již v zušlechtném stavu, je tento výsledek pozitivní.

Orientační měření opotřebením břitových destiček po provedení první části řezných zkoušek ukázalo, že při obrábění měkkého materiálu dosáhly odpovídající VBD pro frézu SZD09 výrazně vyššího opotřebením a trhlin na řezné hraně než u VBD pro frézu SSO 09 a to zhruba o 50 %. Při obrábění oceli zušlechtné je tato situace opačná a opotřebením VBD pro frézu SSO09 je až třikrát vyšší. To je dáno geometrií břitu VBD a jeho nižší pevností. Na úpravě geometrie bude výrobce v budoucnosti dále pracovat.

Vyhodnocení záznamů vibrací ukázalo, že fréza SSO09 dosahuje podstatně lepších výsledků a její chod je při obrábění stabilnější. Díky většímu počtu zubů má fréza plynulejší záběr a díky její pozitivnější geometrii lépe vnikají jednotlivé břity do obráběného materiálu. Amplitudy kmitů při obrábění frézou SSO09 jsou až o 50 % nižší než při obrábění frézou SZD09. Zvýšení počtu zubů u frézy SSO09 je tedy vhodnou úpravou oproti starší koncepci SZD09. Zároveň lze také konstatovat, že použití procesní kapaliny působí při obrábění těmito nástroji negativně.

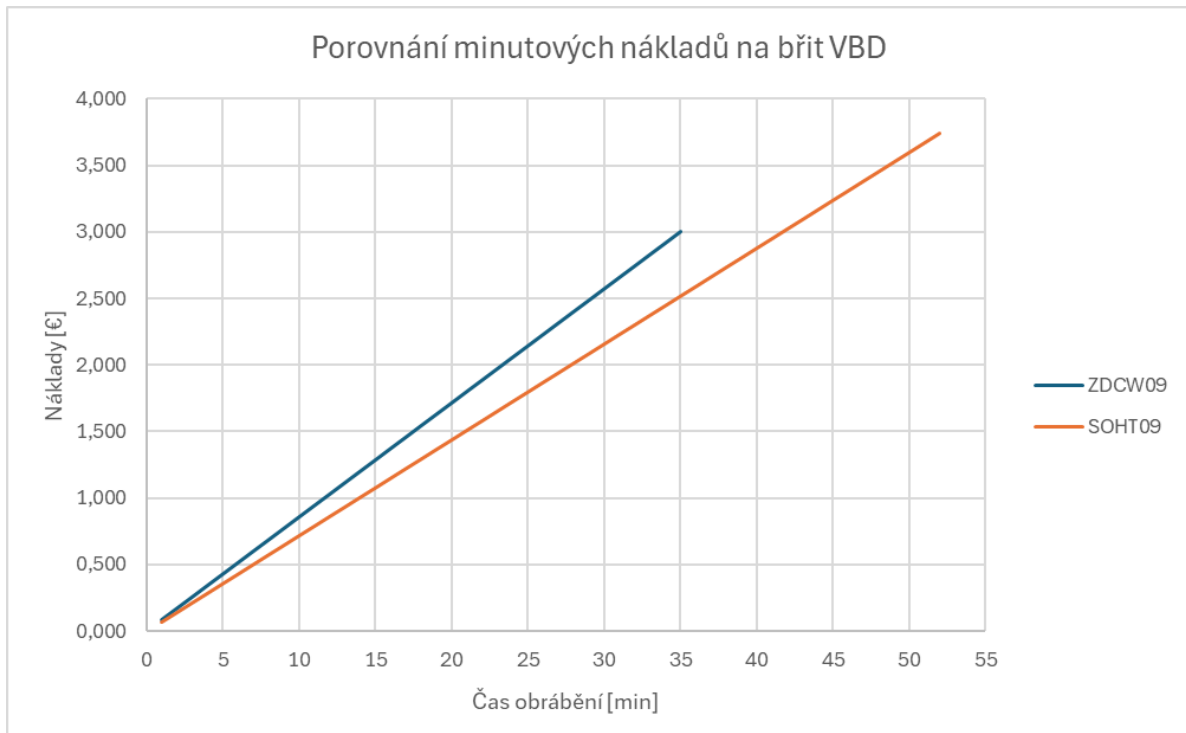
Testy trvanlivosti břitů VBD provedené na měkké oceli ukázaly, že geometrie břitových destiček pro frézu SSO09 dosahuje lepších výsledků z hlediska opotřebením a trvanlivosti břitu. Testy musely být provedeny v souladu s omezeným množstvím obráběného materiálu, a proto nebylo možné provést optimalizaci řezných podmínek a zároveň byla omezena doba obrábění. Testování tedy bylo ukončeno po naplnění kritéria opotřebením u VBD pro frézu SZD09. VBD pro frézu SSO09 vykazovaly stále dobrý stav a nízké opotřebením. Vhodné by tedy bylo v budoucnu tyto testy opakovat při vyšších řezných podmínkách.

Z hlediska nákladů na pořízení nástrojů jsou ceny srovnány v tab. 26. Pořizovací cenu těla frézy plánuje výrobce stejnou pro obě koncepcí nástrojů. Cena jednoho kusu VBD nové koncepcí mírně vzroste z důvodu zvýšení celkové produktivity nástroje a zvýšení trvanlivosti břitů. Její odhadovaná budoucí cena je taktéž uvedena v tab. 26. Údaje o cenách poskytla společnost Dormer Pramet, s.r.o. ze své vlastní databáze.

Tab. 26 Ceny nástrojů.

Fréza (1 ks)	
Označení	Pořizovací cena bez DPH
50A05R-SMOZD09-C	395 €
50A07R-SMOSO09-C	395 €
VBD (1 ks)	
Označení	Pořizovací cena bez DPH
ZDCW 09T304	12 €
SOHT 090414	15 €
Cena vztahující se na jeden břit VBD	
Označení	Pořizovací cena bez DPH
ZDCW 09T304	3 €
SOHT 090414	3,75 €
Procentuální porovnání nákladů na frézu a VBD	
Označení	Hodnota
ZDCW 09T304 + fréza	80 %
SOHT 090414 + fréza	100 %
Cena za 1 minutu obrábění	
ZDCW 09T304	0,086 €
SOHT 090414	0,072 €

Na obr. 61 je zobrazen průběh nákladů na jeden řezný břit v závislosti na času obrábění pro oba typy VBD. Ze závislosti je patrné, že ačkoliv jsou náklady na pořízení břitové destičky SOHT09 vyšší než na ZDCW09, tak minutové náklady na břit rostou pomaleji. To je dáno vyšší trvanlivostí břitů VBD SOHT09. Při snížení kritéria opotřebení VB na hodnotu 0,15 mm a porovnání trvanlivosti břitů dosahuje nová koncepce nástrojů prodloužení trvanlivosti o téměř 50 %.



Obr. 61 Minutové náklady na břit VBD.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnání různých frézovacích nástrojů a zjištění jejich funkčních parametrů při procesu obrábění. V první části práce byl popsán teoretický základ řešené problematiky, byl proveden popis testovaných i konkurenčních nástrojů a také použité techniky a měřicího vybavení. Nástroje byly testovány za různých řezných podmínek při obrábění oceli X37CrMoV5-1 ve dvou stavech, v měkkém stavu s tvrdostí cca 300 HB a v zušlechtném stavu s tvrdostí cca 54 HRC. Za účelem porovnání nástrojů byly provedeny různá měření zaměřená na jejich vlastnosti a chování při řezném procesu. Nástroje byly porovnány z hlediska jejich axiálního házení, způsobu utváření třísky a jejího odchodu z místa řezu, dosažené drsnosti obrobených povrchů, zatížení včetně stroje, teplot v oblasti řezu a distribuci vznikajícího tepla, vibračního chování nástrojů a trvanlivosti břitů VBD. Před zahájením řezných zkoušek byla ověřena tvrdost obráběných materiálů.

Testování prokázalo, že nová koncepce frézovacích nástrojů, respektive fréza SSO09 oproti nástroji SZD09 vykazuje lepší výsledky. Zejména bylo zjištěno:

- axiální házení frézy bylo sníženo z hodnot přesahující 0,03 mm na hodnoty okolo 0,02 mm,
- při obrábění vznikají vhodnější tvary třísek s lepším způsobem jejich odchodu z místa řezu,
- teplo vznikající při řezném procesu je nižší a více tepla odchází třískou,
- dosahované drsnosti obrobených ploch jsou nižší,
- zatížení včetně stroje v přepočtu na jeden zub frézy je nižší,
- díky zvýšení počtu zubů jsou posuvové rychlosti vyšší o 40 %,
- amplituda vibrací je o cca 50 % nižší,
- vhodnější je obrábění bez použití procesní kapaliny,
- trvanlivost břitů VBD je při obrábění měkké oceli vyšší.

Na základě dosažených výsledků lze společnosti Dormer Pramet, s.r.o. doporučit zamýšlené nahrazení staré koncepce frézovacího nástroje SZD09 novou koncepcí SSO09, která dosáhla v experimentálním testování lepších výsledků a pokračování ve vývojovém procesu rodiny frézovacích nástrojů SSO. Dále lze doporučit dodatečná provedení řezných zkoušek zaměřených na odchod třísek z místa řezu při frézování větších výšek osazení, provedení zkoušek trvanlivosti břitů za vyšších řezných podmínek a úpravu geometrie VBD pro frézování zušlechtných materiálů vysokých tvrdostí.

Závěrem lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle byly v diplomové práci splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FRANK, Ondřej. *Návrh metodiky testování řezných nástrojů ze slinutých karbidů při frézování vysokými posuvy* [online]. Brno, 2022 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140241>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.
 2. DORMER PRAMET, s.r.o. *O nás*. [online]. [cit. 2023-8-31]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/cs/about-us>
 3. *Dormer Pramet*. Wikipedia [online]. [cit. 2023-8-31]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dormer_Pramet
 4. LinkedIn. *O nás – Dormer Pramet*. [online]. [cit. 2023-8-31]. Dostupné z: <https://cz.linkedin.com/company/dormerpramet>
 5. INDUSTRYINDEPENDENT. *Profil společnosti – Dormer pramet*. [online]. [cit. 2023-8-31]. Dostupné z: <https://www.industryindependent.cz/vyrobaforem/dormer-pramet/>
 6. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
 7. PRACTICAL MACHINIST. *High Feed Milling Cutters: Why to Use Them and How to Choose Them*. [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [High Feed Milling Cutters: Why to Use Them and How to Choose Them - Practical Machinist : Practical Machinist](#)
 8. SECO TOOLS CZ. *Frézování vysokými posuvy*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-9-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-vysokymi-posuvy-2>
 9. TUNGALOY CORPORATION. *High feed milling solutions*. TUNGALOY CORPORATION, 2020.
 10. MOLDMAKING TECHNOLOGY. *Considerations for a High-Feed Milling Strategy*. [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [Considerations for a High-Feed Milling Strategy | MoldMaking Technology](#)
 11. SANDVIK COROMANT AB. *Face milling* [online]. [cit. 2023-9-15]. Dostupné z: [Face milling \(coromant.com\)](#)
 12. ISCAR LTD. *Fast feed milling. Quick tool selector guide*. ISCAR LTD., 2018.
 13. SANDVIK COROMANT AB. *Plunge milling* [online]. [cit. 2023-9-15]. Dostupné z: [Plunge milling \(coromant.com\)](#)
 14. DORMER PRAMET. *Milling: catalogue 2021-2022*. DORMER PRAMET, s. r. o., 2021.
 15. SANDVIK COROMANT AB. *Entering angle and chip thickness* [online]. [cit. 2023-9-15]. Dostupné z: [Entering angle and chip thickness in milling \(coromant.com\)](#)
 16. HUMÁR, Anton. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie"*. Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
 17. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 18. SANDVIK COROMANT AB. *Wear on cutting edges* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: [Wear on cutting edges \(coromant.com\)](#)
-

19. FOREJT, Milan; HUMÁR, Anton; PÍŠKA, Miroslav a JANÍČEK Libor. *Experimentální metody – sylabus*. Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003.
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Exp_metody_he2.pdf
 20. TUNGALOY CORPORATION. *MillQuadFeed – Tungaloy Report No. 502-G*. TUNGALOY CORPORATION, 2020. Dostupné z: <https://tungaloy.com/themencode-pdf-viewer/?file=https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/502.pdf>
 21. KYOCERA CORPORATION. *MFH-RAPTOR High Feed Milling Series*. KYOCERA CORPORATION, 2023. Dostupné z: https://www.kyoceraprecisiontools.com/indexable/pdf/MFH-Raptor_W.pdf
 22. ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ. ČSN 41 9552, *Ocel 19 552*. Online. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1969. dostupné z: ČAS, [ČSN online pro jednotlivě registrované uživatele \(agentura-cas.cz\)](https://cas.cas.cz/registrovane-uzivatele-agentura-cas.cz). [cit. 2024-02-13].
 23. BOGNER EDELSTAHL CZECH REPUBLIC, s.r.o. *1-2343*. [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.bogner.cz/files/lists/1-2343.pdf>
 24. HAAS AUTOMATION, Inc. *VF-2SSYT* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: [VF-2SSYT | 40-Taper Mill | Super Speed | Vertical Mills – Haas CNC Machines](https://www.haas-cnc.com/en/vertical-mills/vf-2ssyt)
 25. ZOLLER GMBH. *Smile - The Must-Have for Professional Tool Presetting and Measuring*. ZOLLER GMBH, 2020. Dostupné z: <https://www.zoller.info/us/products/presetting-measuring/vertical-devices/smile>
 26. HOMMEL CS. *HOMMEL ETAMIC W5 The benchmark in mobile roughness measurement*. HOMMEL CS., 2011.
 27. PROINEX INSTRUMENTS. *Přenosný tvrdoměr DHT-100*. PROINEX INSTRUMENTS., 2020. Dostupné z: [Přenosný tvrdoměr DHT-100 \(merenitvrdosti.cz\)](https://www.proinex.cz/mereni-tvrdosti)
 28. MACHINE MFG. *Steel Temperature Color Chart: A Complete Comparison*. [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: [Steel Temperature Color Chart: A Complete Comparison | MachineMFG](https://www.machine-mfg.com/steel-temperature-color-chart)
 29. SHEFFIELD GAUGE PLATE. *Steel Temper Colour Chart*. [online]. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: [Steel Temper Colour Chart - 2024 Temperature Guide \(sheffieldgaugeplate.co.uk\)](https://www.sheffieldgaugeplate.co.uk/steel-temper-colour-chart)
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_5	tažnost	[%]
a_e	radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
C_T	trvanlivost	[min]
C_V	řezná rychlost	[m/min]
D	průměr frézy	[mm]
f_z	posuv na zub	[mm]
KT	opotřebení čela nástroje	[mm]
KV_y	radiální opotřebení špičky nástroje	[mm]
R_a	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μ m]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_p	největší výška výstupku nad střední čarou	[μ m]
R_q	průměrná kvadratická úchylka profilu	[μ m]
R_z	největší výška profilu	[μ m]
T_{nmax}	teplota nástroje	[°C]
T_o	teplota obrobku	[°C]
VB	opotřebení hřbetu nástroje	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
v_f	posuvová rychlost	[mm/min]
γ_f	radiální úhel čela nástroje	[°]
γ_p	axiální úhel čela nástroje	[°]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
Φ_1	úhel kluzné roviny	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
CVD	Chemical Vapour Deposition
FFT	Fast Fourier Transformation
fps	frames per second
HB	tvrdost dle Brinella
HFM	High Feed Milling
HL	tvrdost dle Leeba
HRC	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
PVD	Physical Vapour Deposition
SK	Slinutý Karbid
VBD	Vyměnitelná Břitová Destička

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výsledky měření zatížení vřetene a drsnosti povrchu
Příloha 2 FFT analýzy vibrací

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,4$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,4	250	0,5 až 1,8	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	53,00	71,00	82,00	95,00	
\overline{Ra} (μm)	3,62	5,50	4,74	5,40	
\overline{Rz} (μm)	14,52	24,33	19,52	22,46	
Ra (μm)	3,58	5,44	4,92	5,09	
Rz (μm)	12,85	26,82	19,71	21,13	
Ra (μm)	3,60	5,36	4,97	5,23	
Rz (μm)	16,46	23,47	19,42	20,03	
Ra (μm)	3,67	5,70	4,34	5,88	
Rz (μm)	14,25	22,70	19,44	26,23	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	74,50	84,00	101,00	121,00	
\overline{Ra} (μm)	1,50	1,26	2,79	7,31	
\overline{Rz} (μm)	8,25	8,66	19,20	46,68	
Ra (μm)	1,24	1,22	2,43	7,41	
Rz (μm)	8,03	9,45	10,78	40,43	
Ra (μm)	1,48	1,28	3,02	9,15	
Rz (μm)	7,00	8,60	32,62	68,13	
Ra (μm)	1,76	1,29	2,93	5,36	
Rz (μm)	9,71	7,93	14,21	31,48	

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,5	250	0,5 až 1,8	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325		
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80
Zatížení vřetene (%)	57,00	75,00	98,00	111,00
\overline{Ra} (μm)	3,80	5,93	4,96	5,36
\overline{Rz} (μm)	16,91	25,43	19,81	22,21
Ra (μm)	3,53	5,40	4,98	5,31
Rz (μm)	12,90	25,42	19,64	21,59
Ra (μm)	4,28	6,34	5,28	5,60
Rz (μm)	22,64	25,50	20,39	21,57
Ra (μm)	3,59	6,05	4,60	5,16
Rz (μm)	15,20	25,37	19,41	23,46
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330		
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80
Zatížení vřetene (%)	73,00	94,50	121,00	135,00
\overline{Ra} (μm)	1,56	1,46	4,46	8,33
\overline{Rz} (μm)	9,01	9,71	25,59	42,72
Ra (μm)	1,39	1,25	1,81	3,04
Rz (μm)	8,60	9,23	8,60	11,82
Ra (μm)	1,42	1,16	6,32	14,31
Rz (μm)	8,92	7,79	36,85	74,25
Ra (μm)	1,86	1,97	5,24	7,63
Rz (μm)	9,50	12,11	31,31	42,10

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,6$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,6	250	0,5 až 1,8	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	63,00	84,00	101,00	116,00	
\overline{Ra} (μm)	3,25	6,28	5,29	5,18	
\overline{Rz} (μm)	13,84	26,03	23,02	21,53	
Ra (μm)	3,28	5,37	4,53	5,56	
Rz (μm)	14,35	25,32	17,47	23,40	
Ra (μm)	3,03	7,28	5,21	5,53	
Rz (μm)	12,64	27,54	26,32	18,37	
Ra (μm)	3,43	6,19	6,13	4,44	
Rz (μm)	14,53	25,23	25,25	22,82	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	80,00	105,50	137,00	153,00	
\overline{Ra} (μm)	1,87	1,47	6,53	9,86	
\overline{Rz} (μm)	10,07	9,90	35,51	49,32	
Ra (μm)	1,81	1,17	2,86	7,51	
Rz (μm)	10,64	9,46	14,90	34,50	
Ra (μm)	1,72	1,42	8,16	8,67	
Rz (μm)	8,99	10,43	45,20	49,07	
Ra (μm)	2,08	1,83	8,57	13,41	
Rz (μm)	10,59	9,81	46,45	64,38	

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,4$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,4	250	0,5 až 1,8	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	53,00	71,00	85,00	92,00	
\overline{Ra} (μm)	4,34	5,30	4,26	4,50	
\overline{Rz} (μm)	19,47	22,48	18,93	20,29	
Ra (μm)	4,46	4,58	3,72	4,42	
Rz (μm)	21,46	23,46	18,64	20,81	
Ra (μm)	4,52	6,31	4,61	4,21	
Rz (μm)	21,18	24,05	18,74	20,37	
Ra (μm)	4,05	5,02	4,45	4,88	
Rz (μm)	15,75	19,92	19,40	19,70	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	63,00	83,00	104,50	118,50	
\overline{Ra} (μm)	0,89	1,52	3,71	10,04	
\overline{Rz} (μm)	5,23	8,74	21,73	55,16	
Ra (μm)	0,71	1,50	2,63	11,86	
Rz (μm)	4,51	9,27	15,64	67,46	
Ra (μm)	0,93	1,48	1,33	11,75	
Rz (μm)	5,92	8,95	5,66	58,75	
Ra (μm)	1,03	1,59	7,17	6,51	
Rz (μm)	5,27	8,00	43,89	39,27	

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,5	250	0,5 až 1,8	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325		
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80
Zatížení vřetene (%)	58,00	76,00	95,00	107,00
\overline{Ra} (μm)	3,66	4,90	4,70	5,54
\overline{Rz} (μm)	15,42	20,69	21,62	25,56
Ra (μm)	3,27	4,50	4,34	6,00
Rz (μm)	14,14	22,19	20,46	28,15
Ra (μm)	4,53	5,15	5,11	5,88
Rz (μm)	20,88	20,40	22,36	27,32
Ra (μm)	3,18	5,04	4,64	4,73
Rz (μm)	11,23	19,48	22,02	21,22
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330		
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80
Zatížení vřetene (%)	72,00	97,00	120,00	137,00
\overline{Ra} (μm)	1,32	1,44	6,01	11,73
\overline{Rz} (μm)	7,44	8,47	33,10	59,21
Ra (μm)	0,97	1,46	1,59	8,89
Rz (μm)	6,15	8,57	8,25	50,98
Ra (μm)	1,18	1,27	8,50	13,81
Rz (μm)	7,39	7,78	46,17	65,91
Ra (μm)	1,80	1,61	7,94	12,48
Rz (μm)	8,77	9,06	44,89	60,75

Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,6$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (300 HB)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,6	250	0,5 až 1,8	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8325			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	65,00	85,00	108,00	120,00	
\overline{Ra} (μm)	4,33	5,39	4,95	5,36	
\overline{Rz} (μm)	17,03	21,75	22,39	25,31	
Ra (μm)	3,80	4,22	4,29	5,45	
Rz (μm)	17,09	20,53	21,28	24,94	
Ra (μm)	4,38	6,03	5,36	5,27	
Rz (μm)	17,00	22,70	22,64	23,94	
Ra (μm)	4,80	5,91	5,21	5,36	
Rz (μm)	17,00	22,03	23,24	27,04	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8330			
Posuv na zub f_z (mm)	0,50	1,00	1,50	1,80	
Zatížení vřetene (%)	80,00	107,00	135,50	160,00	
\overline{Ra} (μm)	1,29	1,43	5,35	10,04	
\overline{Rz} (μm)	7,29	7,77	31,03	48,87	
Ra (μm)	1,48	1,44	1,18	2,61	
Rz (μm)	8,48	8,32	5,63	12,72	
Ra (μm)	1,32	1,51	7,81	13,81	
Rz (μm)	7,60	9,13	47,33	66,21	
Ra (μm)	1,09	1,34	7,08	13,69	
Rz (μm)	5,79	5,84	40,13	67,68	

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,4$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,4	60	0,3 až 1	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	50,00	65,0	91,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	2,00	2,63	2,19	
\bar{R}_z (μm)	8,78	11,50	9,55	
R_a (μm)	1,60	3,04	2,15	
R_z (μm)	7,56	12,76	9,62	
R_a (μm)	2,24	2,14	2,19	
R_z (μm)	9,84	10,07	8,80	
R_a (μm)	2,15	2,70	2,22	
R_z (μm)	8,94	11,67	10,23	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	63,00	77,00	110,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	1,34	1,25	1,73	
\bar{R}_z (μm)	6,65	6,12	8,58	
R_a (μm)	1,57	1,87	1,79	
R_z (μm)	7,52	8,85	9,30	
R_a (μm)	1,36	0,64	1,52	
R_z (μm)	5,77	3,80	8,27	
R_a (μm)	1,10	1,23	1,88	
R_z (μm)	6,65	5,72	8,16	

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,5	60	0,3 až 1	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	57,00	72,00	105,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\overline{Ra} (μm)	1,68	2,22	2,22	
\overline{Rz} (μm)	7,46	10,16	9,89	
Ra (μm)	2,17	2,38	2,09	
Rz (μm)	9,37	11,23	8,46	
Ra (μm)	0,78	2,23	2,23	
Rz (μm)	4,32	10,77	10,53	
Ra (μm)	2,08	2,04	2,34	
Rz (μm)	8,69	8,47	10,67	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	74,00	90,00	130,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\overline{Ra} (μm)	1,04	1,33	1,66	
\overline{Rz} (μm)	5,76	6,73	8,89	
Ra (μm)	1,01	1,36	1,79	
Rz (μm)	6,27	7,39	9,28	
Ra (μm)	1,26	1,07	1,65	
Rz (μm)	5,26	5,85	9,19	
Ra (μm)	0,83	1,55	1,53	
Rz (μm)	5,75	6,96	8,22	

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), bez procesní kapaliny

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,6$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,6	60	0,3 až 0,5	35	Bez chlazení

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	64,00	80,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	
\overline{Ra} (μm)	2,11	3,33		
\overline{Rz} (μm)	8,47	15,58		
Ra (μm)	2,26	3,65		
Rz (μm)	8,65	16,22		
Ra (μm)	2,05	3,47		
Rz (μm)	8,50	16,23		
Ra (μm)	2,01	2,88		
Rz (μm)	8,28	14,29		
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	85,00	107,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	
\overline{Ra} (μm)	1,34	1,51		
\overline{Rz} (μm)	6,96	7,75		
Ra (μm)	1,61	1,65		
Rz (μm)	8,12	8,93		
Ra (μm)	1,17	1,26		
Rz (μm)	6,55	7,14		
Ra (μm)	1,24	1,61		
Rz (μm)	6,20	7,19		

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,4 \text{ mm}$

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,4	60	0,3 až 1	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	57,00	66,00	84,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	1,01	2,36	2,09	
\bar{R}_Z (μm)	5,00	10,31	10,62	
R_a (μm)	0,88	2,94	2,09	
R_z (μm)	4,29	12,89	11,19	
R_a (μm)	0,96	2,03	2,10	
R_z (μm)	4,99	9,44	10,02	
R_a (μm)	1,20	2,09	2,10	
R_z (μm)	5,73	8,61	10,65	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	70,00	86,00	115,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	0,91	1,05	1,21	
\bar{R}_Z (μm)	5,42	5,65	7,18	
R_a (μm)	0,87	1,24	1,31	
R_z (μm)	5,40	6,49	7,83	
R_a (μm)	1,11	0,94	1,16	
R_z (μm)	6,17	4,86	6,90	
R_a (μm)	0,74	0,98	1,18	
R_z (μm)	4,69	5,60	6,81	

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,5	60	0,3 až 1	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	61,00	75,00	107,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	1,15	2,51	1,87	
\bar{R}_Z (μm)	5,59	11,42	8,76	
R_a (μm)	1,59	2,23	1,58	
R_z (μm)	6,72	8,94	6,34	
R_a (μm)	1,04	2,23	1,97	
R_z (μm)	5,40	11,32	9,76	
R_a (μm)	0,81	3,07	2,06	
R_z (μm)	4,64	13,99	10,17	
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	80,00	95,00	112,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření
\bar{R}_a (μm)	0,90	1,05	1,35	
\bar{R}_Z (μm)	5,51	5,83	7,72	
R_a (μm)	1,00	1,15	1,41	
R_z (μm)	5,60	6,62	8,07	
R_a (μm)	0,90	1,05	1,29	
R_z (μm)	5,21	5,38	7,71	
R_a (μm)	0,79	0,93	1,36	
R_z (μm)	5,72	5,49	7,38	

Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC), s procesní kapalinou

- Šířka záběru ostří $a_p = 0,6 \text{ mm}$

Jednotné řezné podmínky.

Obráběný materiál:		Ocel X37CrMoV5-1 (54 HRC)		
Axiální hloubka řezu a_p	Řezná rychlost v_c	Rozsah posuvů f_z	Radiální hloubka řezu a_e	Řezné prostředí
[mm]	[m/min]	[mm/zub]	[mm]	[-]
0,6	60	0,3 až 0,5	35	Emulze

Naměřené parametry.

Fréza: SMOZD09		VBD: ZDCW09T304, M8310		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	67,00	83,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	
\bar{R}_a (μm)	1,16	2,62		
\bar{R}_Z (μm)	5,75	11,88		
R_a (μm)	1,65	2,27		
R_z (μm)	7,23	9,95		
R_a (μm)	0,83	3,26		
R_z (μm)	4,69	14,10		
R_a (μm)	1,02	2,34		
R_z (μm)	5,33	11,59		
Fréza: SMOSO09		VBD: SOHT 090414SR, M8315		
Posuv na zub f_z (mm)	0,30	0,50	1,00	1,40
Zatížení vřetene (%)	77,00	105,00	Z důvodu výkonového omezení stroje nebylo možné provést měření	
\bar{R}_a (μm)	0,94	1,35		
\bar{R}_Z (μm)	5,57	7,30		
R_a (μm)	0,96	1,79		
R_z (μm)	5,74	8,81		
R_a (μm)	1,04	1,40		
R_z (μm)	5,80	8,35		
R_a (μm)	0,81	0,85		
R_z (μm)	5,18	4,74		

