



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NÁVRH RACIONALIZACE ŘEZNÉHO PROCESU PŘI VYSOKOPOSUVOVÉM FRÉZOVÁNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

PROPOSAL FOR RATIONALIZATION OF THE CUTTING PROCESS IN HIGH FEED MILLING OF HARD MATERIALS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Čmakal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2025

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **František Čmakal**  
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh racionalizace řezného procesu při vysokoposuvovém frézování tvrdých materiálů**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Bakalářská práce se bude zabývat porovnáním vybraných typů fréz a vyměnitelných břitových destiček (VBD) 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 bakalářské práce:**

Teoretický a technologický rozbor řešené problematiky.

Analýza vybraných typů řezných nástrojů a vyměnitelných břitových destiček (Dormer Pramet, s.r.o. vs. konkurence).

Experimentální část – návrh metodiky a provedení experimentů (obráběcí stroj, materiál obrobku, řezné podmínky, řezné prostředí, provedení vlastních řezných zkoušek).

Technicko–ekonomické zhodnocení dosažených výsledků.

#### **Seznam doporučené literatury:**

HUMÁR, Anton a PÍŠKA, Miroslav. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. 2. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2005, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

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

PÍŠKA, Miroslav, BUMBÁLEK, Bohumil, HUMÁR, Anton, POLZER, Aleš, PROKOP, Jaroslav, SEDLÁK, Josef, SLANÝ, Martin a ZEMČÍK, Oskar. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

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

Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, Miroslav. SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, 1997, 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972-2994-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh, vývoj a testování nových prototypů vyměnitelných břitových destiček (VBD) určených pro vysokoposuvové frézování tvrdých materiálů. V softwaru AdvantEdge byly porovnány pomocí 2D a 3D simulací tři návrhy modelů a na základě výsledků vybrány dva prototypy k výrobě a následnému testování. Do praktických testů byly kromě nových prototypů zařazeny také nástroje vybraných konkurenčních výrobců a aktuálně používané řešení společnosti Dormer Pramet s.r.o. Před zahájením obráběcích zkoušek proběhla kontrolní měření házení fréz a tvrdosti obráběného materiálu. Zkoušky obrábění se zaměřily na sledování zatížení stroje, drsnost obrobenej plochy a tvar vzniklých třísek. Následovaly zkoušky trvanlivosti, při kterých byl zaznamenáván čas do výskytu kritického opotřebení a zkoumány dominantní mechanismy opotřebení jednotlivých VBD. Prototyp P1 dosáhl nejdělsí životnosti, nejlepší kvality obrobenej plochy a nejnižšího zatížení stroje. Překonal tak vybrané konkurenční nástroje i aktuální řešení společnosti Dormer Pramet s.r.o. Součástí práce je také teoretický úvod do řešené problematiky a analýza testovaných nástrojů. Všechny dosažené výsledky jsou shrnuty a zhodnoceny v technicko-ekonomickém zhodnocení.

### Klíčová slova

Vysokoposuvové frézování, tvrdé materiály, vyměnitelná břitová destička, Dormer Pramet

## ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is the design, development, and testing of new prototypes of indexable cutting inserts (ICIs) intended for high-feed milling of hard materials. Three prototype models were evaluated using 2D and 3D simulations in AdvantEdge software, and based on the results, two prototypes were selected for production and subsequent testing. In addition to the new prototypes, the practical tests also included tools from selected competitors and the currently used solution from Dormer Pramet s.r.o. Before the machining trials, runout of the milling cutters and the hardness of the machined material were measured. The cutting tests focused on monitoring machine load, surface roughness, and chip formation. This was followed by durability tests, during which the time to critical wear was recorded and the dominant wear mechanisms of each insert were analyzed. Prototype P1 achieved the longest tool life, the best surface quality, and the lowest machine load, outperforming both the selected competing tools and the current solution by Dormer Pramet s.r.o. The thesis also includes a theoretical introduction to the topic and an analysis of the tested tools. All results are summarized and evaluated from a technical and economic perspective.

### Keywords

High feed cutting, hard materials, indexable cutting insert, Dormer Pramet

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČMAKAL, František. *Návrh racionalizace řezného procesu při vysokoposuvovém frézování tvrdých materiálů*. Online, bakalářská práce. Josef SEDLÁK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165757>. [cit. 2025-05-23].

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh racionalizace řezného procesu při vysokoposuvovém frézování tvrdých materiálů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 23.5.2025

---

Místo, datum

---

František Čmakal

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Josefu Sedlákoví Ph.D. za poskytnuté odborné vedení a vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat za konzultace a cenné rady z oblasti vývoje vyměnitelných břitových destiček konstruktérům Dormer Pramet s.r.o. Ing. Pavlu Smyčkovi a Ing. Michalu Gargulákovi.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	10
1.1 Vysokoposuvové frézování .....	10
1.2 Povlakované slinuté karbidy .....	11
1.3 Mechanismy opotřebení .....	12
1.4 Společnost Dormer Pramet s.r.o. ....	13
1.5 Vývojový software .....	14
2 Analýza vybraných typů rezných nástrojů .....	15
2.1 Nástroje Dormer Pramet s.r.o. ....	15
2.2 Nástroje Tungaloy Czech s.r.o. ....	17
2.3 Nástroje Kyocera Precision Tools Inc. ....	18
2.4 Produkty dalších společností .....	19
3 Stanovení rezných podmínek a prostředí .....	20
3.1 Materiál obrobku .....	20
3.2 Obráběcí stroj .....	21
3.3 Návrh typu experimentu .....	22
4 Vývoj prototypů .....	25
4.1 Návrh geometrií utvařeče .....	25
4.2 Stanovení rezného prostředí a podmínek pro AdvantEdge .....	29
4.3 AdvantEdge 2D simulace .....	31
4.4 AdvantEdge 3D simulace .....	32
5 Výroba prototypů .....	35
6 Provedení vlastních zkoušek a výsledky měření .....	39
6.1 Kontrola házení osazených fréz .....	39
6.2 Kontrolní měření tvrdosti obráběného materiálu .....	40
6.3 Řezné zkoušky .....	41
6.4 Rozbor třísek testovaných prototypů .....	47
6.5 Zkoušky trvanlivosti .....	47
7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	53
ZÁVĚR .....	56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	59
SEZNAM PŘÍLOH .....	60

## ÚVOD

V současné době roste tlak na vyšší produktivitu, zkracování výrobních časů a snižování nákladů ve strojírenské výrobě. V důsledku toho jsou kladeny stále větší nároky na výkon a spolehlivost obráběcích nástrojů. Jednou z technologií, která na tyto požadavky reaguje, je vysokoposuvové frézování. Klíčovým prvkem této technologie jsou vyměnitelné břitové destičky, jejichž geometrie, materiál a konstrukce zásadně ovlivňují výkonnost a životnost celého nástroje.

Společnost Dormer Pramet s.r.o. se dlouhodobě věnuje vývoji a výrobě rezných nástrojů pro široké spektrum průmyslových aplikací. V rámci této bakalářské práce je cílem navrhnout a otestovat konkurenceschopné řešení pro vysokoposuvové frézování tvrdých materiálů. V ideálním případě bude navržený prototyp po dalších testech zařazen do portfolia produktů společnosti Dormer Pramet s.r.o. a v budoucnu nahradí současné řešení dané problematiky. Práce se tak zaměřuje nejen na technický vývoj, ale i na praktickou aplikaci a přímý přínos pro výrobní praxi.

Pro ověření návrhových geometrií budou všechny prototypy nejprve podrobeny simulacím v softwaru AdvantEdge, který umožňuje detailní analýzu rezného procesu bez nutnosti fyzického obrábění. Na základě výsledků simulací budou vybrány dva nejvhodnější návrhy, které se po vyrobení experimentálně otestují. Součástí praktických zkoušek bude měření zatížení stroje, kontrola kvality povrchu, analýza třísek, provedení zkoušek trvanlivosti a analýza mechanismů opotřebení. Výsledky těchto testů poskytnou cenné podklady pro zhodnocení vhodnosti navržených geometrií z hlediska technických i provozních parametrů.

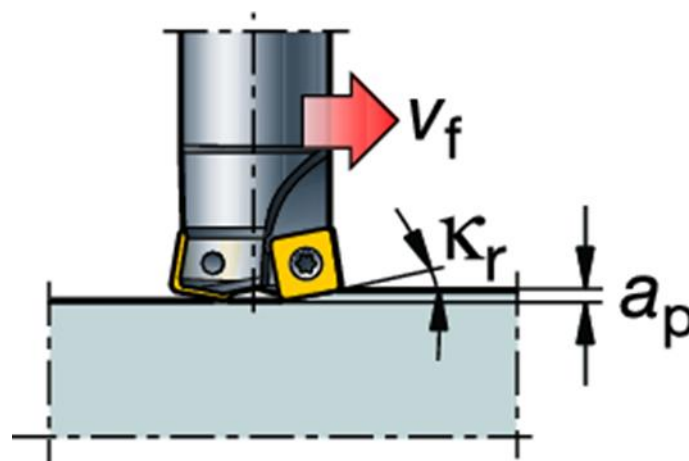
## 1 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tato kapitola se bude věnovat vysvětlení klíčových pojmů souvisejících s řešenou problematikou. Zároveň zde budou popsány metody, nástroje a programy, které budou v této práci použity. Cílem této části je poskytnout teoretický základ, který pomůže lépe pochopit praktické aspekty zpracovávaného tématu.

### 1.1 Vysokoposuvové frézování

Zkratka HFC (*High Feed Cutting*) označuje moderní metodu frézování, která zásadním způsobem změnila přístup k efektivnímu odebrání materiálu. Oproti konvenčnímu frézování se HFC vyznačuje nízkou axiální hloubkou řezu, vysokými posuvy na zub a zvýšenými řeznými rychlostmi. Tento přístup umožňuje výrazně zvýšit objem odebraného materiálu za jednotku času, což vede ke zvýšení produktivity, snížení specifického opotřebení nástroje (vztaženého na odebraný objem materiálu) a ke snížení celkových nákladů na obrábění. [1]

Jedním z nejvýznamnějších parametrů, který má přímý vliv na efektivitu HFC obrábění, je úhel nastavení nástroje  $K_r$ . Tento úhel je definován jako úhel mezi hlavním břitem VBD a povrchem obrobku (obr. 1) a je určen především geometrií nástroje a použitou frézou. Úhel  $K_r$  přímo ovlivňuje délku aktivního řezného břitu, a tím i schopnost nástroje odvádět teplo a rozkládat řezné síly. Delší aktivní řezná hrana přispívá k rovnoměrnějšímu zatížení břitu, vyšší odolnosti proti opotřebení a umožňuje použití vyšších posuvů, čímž se zvyšuje produktivita obrábění. [2; 3]



Obr. 1 Úhel nastavení  $K_r$  [3].

V oblasti čelního frézování lze rozlišit tři nejčastěji používané skupiny nástrojů na základě hodnoty úhlu nastavení  $K_r$ , přičemž každá skupina nabízí specifické výhody a omezení [2; 3; 4]:

- **Frézy s úhlem nastavení  $90^\circ$**  představují univerzální řešení, které umožňuje více druhů operací. Díky působení nízkých axiálních sil jsou vhodné zejména pro obrábění tenkostěnných součástí, u kterých je nutné minimalizovat deformace.
- **Frézy s úhlem nastavení  $45^\circ$**  (do této skupiny spadají nástroje s  $K_r$  v rozmezí přibližně  $25^\circ$  až  $65^\circ$ ) umožňují vysokou produktivitu při středních až nižších hloubkách řezu. Tyto nástroje představují kompromis mezi univerzálností a výkonem.
- **Frézy s úhlem nastavení  $10^\circ$** , do kterých spadají také testované a vyvíjené VBD, jsou určeny pro extrémně vysoké posuvy. Malý úhel nastavení generuje převážně axiální řezné síly, které napomáhají stabilizaci vřetena. Nevýhodou je malá maximální hloubka řezu, což je však kompenzováno vysokou produktivitou.

Metoda vysokoposuvového frézování typicky pracuje s hloubkou řezu do 2 mm a posuvy na zub až kolem 4 mm. Klíčovým požadavkem pro efektivní aplikaci HFC je použití nástrojů s malým úhlem nastavení Kr, případně kruhových VBD, které umožňují tvorbu tenké třísky i při vysokých posuvech. Tím se zajišťuje stabilní rezný proces s minimálním zatížením nástroje a stroje. [3; 4]

## 1.2 Povlakované slinuté karbidy

Díky svojí houževnatosti a odolnosti proti opotřebení jsou v dnešní době povlakované slinuté karbidy v naprosté většině využívány pro VBD do obráběcích nástrojů. Slinuté karbidy (obr. 2) se vyrábějí metodou práškové metalurgie, která je založena na spojení velmi tvrdých částic karbidů (nejčastěji wolframu) kovovým pojivem, nejčastěji na bázi kobaltu. Tvrdé částice tvoří většinu objemu materiálu, zatímco pojivo zajišťuje jeho soudržnost a houževnatost. Klíčovým parametrem pro dosažení optimálních vlastností VBD je volba správné velikosti zrna karbidu a poměru i chemického složení pojiva. Tím lze efektivně řídit výslednou tvrdost, houževnatost a odolnost proti plastické deformaci. Výlisek se vytváří lisováním za pomoci lisovacích nástrojů. Alternativně může být tvarování realizováno metodou vstříkávání do formy. Po lisování následuje slinování, během kterého dochází k natavení pojiva a pevnému spojení karbidů. Současně dochází ke smrštění výlisku. Podle konstrukčního řešení a požadované přesnosti může být slinutý výlisek dále upravován broušením. Nedílnou součástí výrobního procesu je také nanesení povlaku, který významně ovlivňuje vlastnosti nástroje. [5; 6]



Obr. 2 Slinuté karbidy: vlevo nepovlakovaný, uprostřed s CVD, vpravo s PVD [5].

### Typy povlaků pro slinuté karbidy

Na povrch slinutého karbidu se nanášejí tenké vrstvy povlaků, které zvyšují odolnost nástroje proti opotřebení, teplotnímu namáhání a oxidaci. Nejčastěji se používají technologie CVD (*Chemical Vapour Deposition*) a PVD (*Physical Vapour Deposition*) [5; 7]:

- **CVD** – chemické napařování z plynné fáze. Tato metoda poskytuje velmi dobrou přilnavost povlaku ke karbidovému podkladu a vysokou odolnost proti abrazi. Je preferovanou volbou například při obrábění, kde hrozí vznik žlábkového opotřebení.
- **PVD** – fyzikální napařování z pevné fáze. PVD povlaky se nanášejí při nižších teplotách, což minimalizuje riziko teplotních trhlin a zajišťuje vyšší houževnatost ostří. Jsou vhodné zejména pro dokončovací operace, kde je požadována vysoká ostrost a přesnost rezné hrany.

Moderní CVD povlaky prošly vývojem směrem k optimalizaci mikrostruktury a povrchového napětí, čímž se dále zvýšila jejich životnost. PVD technologie dnes umožňuje nanášet povlaky tvořené více extrémně tenkými vrstvami v řádu nanometrů, což výrazně zvyšuje jejich tvrdost a odolnost proti opotřebení. [5]

### 1.3 Mechanismy opotřebení

Opotřebení nástroje je časově proměnný proces. Dochází v něm ke kombinaci fyzikálně-chemických jevů. Základní mechanismy opotřebení jsou [3; 7]:

- **Abraze** – je způsobována uvolněnými tvrdými částicemi, které nejsou odstraněny z místa řezu a způsobují otěr mezi obrobkem a nástrojem.
- **Adheze** – v důsledku vysokých teplot a tlaků vznikají mikrosvary na vrcholcích a následně jsou porušovány.
- **Difúze** – je to chemický tepelně aktivovaný děj, při kterém dochází k migraci atomů, což může být nežádoucí například kvůli vzniku chemických sloučenin.
- **Oxidace** – vznik povlaku na povrchu z důvodu přítomnosti kyslíku v atmosféře, který vytváří chemické sloučeniny.
- **Plastická deformace** – je způsobena velkým mechanickým zatížením a teplotním ovlivněním.
- **Křehký lom** – může nastat kvůli velkému mechanickému zatížení.

Všechny tyto mechanismy se kombinují až do selhání nástroje. Podle podílu na celkovém poškození se pak dělí opotřebení nástroje nejčastěji na [7; 8]:

- **Abrazivní opotřebení na hřbetu** (obr. 3) – je způsobováno tvrdými částicemi. Jedná se o preferovaný způsob opotřebení, protože je dostatečně předvídatelný a k poškození dochází postupně. Může způsobovat špatnou kvalitu obrobené plochy.
- **Opotřebení ve tvaru žlábků** – toto opotřebení vzniká na čele v důsledku chemických reakcí, které probíhají při kontaktu obrobku s nástrojem za zvýšené teploty. Velké opotřebení může výrazně napomoci celkovému lomu. Účinek zvyšuje rostoucí rezná rychlost.
- **Vytváření nárůstku na břitě** – převládajícím mechanismem je zde adheze. Opakované vznikání a zanikání mikrosvarů se časem hromadí a vzniká nárůstek, který může výrazně změnit geometrii nástroje. Týká se to především materiálů lehce ulpívajících na břitě jako jsou například hliníkové slitiny. Účinek zvyšují nižší rezné rychlosti.
- **Opotřebení ve tvaru vrubu** – vzniká kvůli adhezi a deformačnímu zpevnění povrchu. Je vidět výrazně jak na čele i hřbetu na úrovni hloubky řezu.
- **Plastická deformace** – nastává v okamžiku, kdy je teplota v místě řezu příliš vysoká a dojde ke změknutí nástroje. Jejím následkem je horší kvalita obrobené plochy a v extrémním případě může pomoci k celkovému lomu.
- **Tepelné trhliny** – projevují se jako vícečetné trhliny kolmé na břit. Vznikají kvůli tepelným šokům, především při přerušovaných řezech s použitím rezné kapaliny.
- **Vylamování břítu nebo celkový lom** – jsou způsobeny přetížením nástroje, například kvůli zasekávání třísek, vysokým hodnotám posuvu nebo hloubky řezu.



Obr. 3 Abrasivní opotřevení na hřbetu [8].

#### 1.4 Společnost Dormer Pramet s.r.o.

Firma Dormer Pramet s.r.o. je globální firma, která již přes 100 let vyrábí obráběcí nástroje k soustružení, frézování, závitování a výrobu otvorů. Má 3 globální výrobní centra. Jedno v Sao Paulo, druhé v Ankleshwaru a třetí v Šumperku v České republice. Šumperská pobočka (obr. 4) byla původně firmou Pramet, která se zabývala výrobou slinutého karbidu. Ta se v roce 1999 připojila do skupiny Sandvik. Následně došlo ke spojení společností Dormer a Pramet do společnosti Dormer Pramet s.r.o. v roce 2014. [9]



Obr. 4 Šumperská výrobní jednotka Dormer Pramet [10].

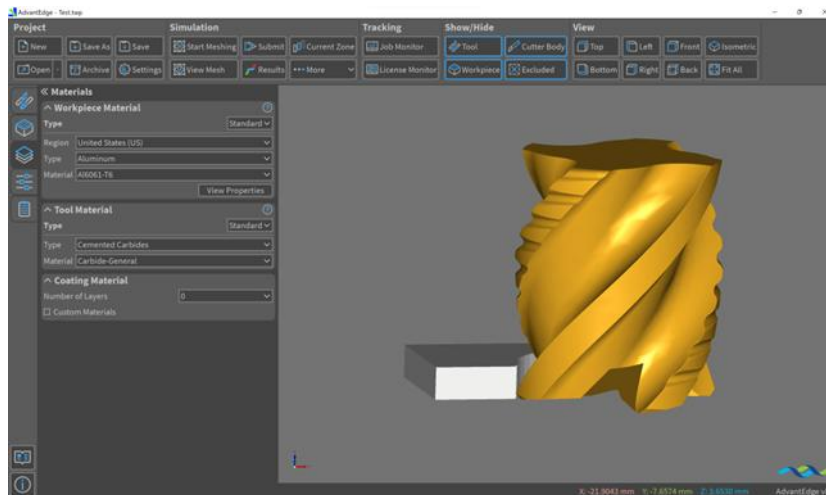
## 1.5 Vývojový software

### Program Siemens NX

NX je CAD/CAM software od společnosti Siemens, s.r.o. NX mimo jiné umožňuje tvorbu 3D modelů a 2D výkresové dokumentace s možností využití všech nejnovějších metod. K dispozici jsou také moderní možnosti jako automatizace a virtuální realita. Svoji oblíbenost si získal mimo jiné díky skvělé schopnosti pracovat s různými datovými formáty, softwaru a bezproblémové integraci s dalšími nástroji. Podařilo se mu také získat několik ocenění v roce 2024 jako například: Nejlepší software MCAD nebo Nejvyšší hodnocení pro CAD a 3D modelování. [11]

### Program AdvantEdge

AdvantEdge (obr. 5) je program od firmy Third Wave Systems, který slouží k simulování odstraňování materiálu. Program umožňuje vytváření simulací ve 2D i ve 3D. Jeho využívání vede k několika výhodám. Výsledky simulací slouží k vyladění modelů ještě před jejich výrobou a reálném testováním. Díky tomu je možné ušetřit značné finanční prostředky a zrychlit celý proces vývoje. [12]



Obr. 5 Návrhové prostředí AdvantEdge [13].

### Program Tecplot360

Software Tecplot 360 od firmy Tecplot Inc. slouží k následnému vyhodnocení dosažených výsledků. Umožňuje vizualizaci více simulací zároveň, zobrazování 2D i 3D grafů a animací. Následně lze jednoduše nastavit pohledy, upravit stupnice a jednoduše vyexportovat výsledky pro prezentování. [14]

## 2 ANALÝZA VYBRANÝCH TYPŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Tato kapitola se zaměřuje na analýzu konkurenčních řešení v oblasti řezných nástrojů a vyměnitelných břitových destiček pro vysokoposuvové frézování. Hlavní důraz je kladen na geometrii, technické parametry a celkovou efektivitu jednotlivých nástrojů. Referenčním bodem je současné řešení společnosti Dormer Pramet s.r.o., které je porovnáváno s produkty dalších výrobců. Klíčová pozornost je věnována nástrojům firem Tungaloy Czech s.r.o. a Kyocera Precision Tools Inc., které budou rovněž prakticky testovány. Získané poznatky poslouží jako podklad pro návrh a vývoj nového prototypu.

### 2.1 Nástroje Dormer Pramet s.r.o.

Aktuální vysokoposuvová VBD v odpovídající velikosti pro řešenou problematiku je ZDCW09T304. Bude testována na fréze 50A05R-SMOZD09-C. Pro zkoušky obrábění bude použita VBD v materiálu M8325 a pro zkoušky trvanlivosti v materiálu M8310.

#### Fréza 50A05R-SMOZD09-C

50A05R-SMOZD09-C (obr. 6) je pětibřitá nástrčná fréza s nerovnoměrnou zubovou roztečí pro vysoké posuvy. Má řezný průměr  $D_c = 36,7$  mm a maximální řezný průměr  $D_{cx} = 50$  mm. Má pozitivně negativní geometrii pro jednostranné destičky a nabízí vnitřní chlazení. Je vhodná jak pro hrubovací operace, tak i pro střední obrábění s dobrou kvalitou povrchu. Připojovací otvor odpovídá normě ISO 6462 (DIN 8030-A). [15]



Obr. 6 Fréza 50A05R-SMOZD09-C.

**VBD ZDCW09T304:M8325**

ZDCW09T304:M8325 (obr. 7) je jednostranná vysokoposuvová frézovací VBD. Je speciálně konstruovaná bez utvařeče třísky s maximální hloubkou řezu  $a_p = 1$  mm a délkou řezné hrany 9,53 mm. VBD má menší fazetku, úhel hřbetu  $\alpha = 15^\circ$ , rádius rohu 0,4 mm, průměr upevňovacího otvoru 3,4 mm a tloušťka destičky je 3,97 mm. Materiál M8325 je složen z karbidů wolframu, titanu, tantalu a niobu s kobaltem opatřený PVD povlakem. [16]



Obr. 7 VBD ZDCW09T304:M8325.

**VBD ZDCW09T304:M8310**

ZDCW09T304:M8310 (obr. 8) má shodnou geometrii jako předchozí varianta, liší se však materiálem. M8310 je jemnozrný slinutý karbid na bázi wolframu a kobaltu, určený pro obrábění tvrdých materiálů a litin. PVD povlak je optimalizován pro materiálové skupiny ISO K01–K10 a H05–H15. [17]



Obr. 8 VBD ZDCW09T304:M8310.

## 2.2 Nástroje Tungaloy Czech s.r.o.

Pro VBD s velikostí řezné hrany 9 mm společnost Tungaloy Czech s.r.o. nabízí destičky SWMT0904ZER-MM a SWMT0904UER-MM. Liší se především úhlem nastavení. K testování byla vybrána SWMT0904ZER-MM v materiálu AH8015, protože pro podmínky ke srovnání více vyhovuje  $K_r = 12^\circ$ . Jako odpovídající vhodná fréza byla vybrána TXSW09M050B22.0R05. [18]

### Fréza TXSW09M050B22.0R05

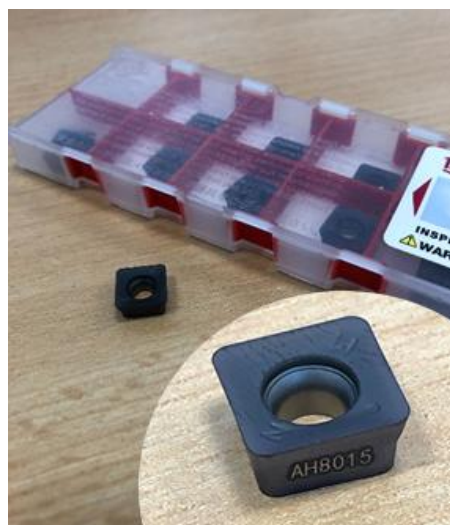
TXSW09M050B22.0R05 (obr. 9) je pětizubá fréza určena pro vysokoposuvové frézování. Umožňuje maximální hloubku řezu  $a_p = 1,5$  mm a má úhel nastavení  $K_r = 12^\circ$ . Řezný průměr  $D_c = 35$  mm a maximální řezný průměr  $D_{cx} = 50$  mm. [19]



Obr. 9 Fréza TXSW09M050B22.0R05.

### VBD SWMT0904ZER-MM:AH8015

SWMT0904ZER-MM:AH8015 (obr. 10) je čtvercová, jednostranná VBD s utvařečem typu MM. Tato geometrie je určena pro obecné použití, ale je také uvedena jako první volba pro obrábění žáruvzdorných slitin a tvrdých materiálů. Maximální hloubka řezu  $a_p = 1,5$  mm a délka řezné hrany 8,61 mm. Průměr vepsané kružnice je 8,605 mm, zaoblení rohů 1 mm a celková tloušťka 4 mm. Materiál AH8015 patří do skupin ISO K10–K25 a H10–H20, je opatřen PVD povlakem. [20]



Obr. 10 VBD SWMT0904ZER-MM:AH8015.

Pro získání přesné geometrie bylo provedeno na pěti VBD měření pomocí penthometru a úchylkoměru. Zaoblení řezné hrany se pohybuje v rozmezí 0,06 mm až 0,07 mm. Na řeznou hranu se napojuje fazetka o délce v rozmezí 0,15 mm až 0,18 mm pod úhlem  $0^\circ$ , ze které pak klesá plocha pod úhlem čela  $\gamma = 15^\circ$ . Od řezné hrany plocha klesá po hloubku 1,6 mm až 1,62 mm pod úhlem hřbetu  $14^\circ$ . Na tuto plochu se následně napojuje další plocha klesající pod úhlem  $6^\circ 30'$  po hloubku v rozmezí 2,4 mm až 2,45 mm.

### 2.3 Nástroje Kyocera Precision Tools Inc.

Společnost Kyocera Precision Tools Inc. nabízí tři základní typy VBD. Typ GM je vhodný pro obecné použití. Typ LD slouží k velkému odběru materiálu. Typ FL může být použit pro hrubování i pro dokončování a má speciální geometrii VIPER vhodnou pro menší obráběcí centra. Úhel nastavení  $K_r$  je pro typ GM  $10^\circ$  a u typů LD a FL  $14^\circ$ . Tyto typy destiček jsou podle výrobce určeny jako první volba pro hrubovací frézování uhlíkových a legovaných ocelí spadajících do skupiny P. Také mohou být využity jako druhá možnost pro hrubování austenitických korozivzdorných ocelí (SUS304) spadajících do skupiny M nebo pro dokončování tvrdých materiálů skupiny H. K testování byla vybrána SOMT100420ER-GM:PR1525 s frézou MFH050R-10-5T-M. [21]

#### Fréza MFH050R-10-5T-M

MFH050R-10-5T-M (obr. 11) je pětibřítá fréza určena pro vysokoposuvové frézování. Má řezný průměr  $D_c = 33$  mm pro GM geometrii, maximální řezný průměr  $D_{cx} = 50$  mm a úhel nastavení  $K_r = 10^\circ$ . Fréza je vybavena otvory pro vnitřní chlazení a umožňuje maximální hloubku řezu  $a_p = 1,5$  mm. [21; 22]



Obr. 11 Fréza MFH050R-10-5T-M.

## VBD SOMT100420ER-GM:PR1525

SOMT100420ER-GM (obr. 12) je univerzální VBD pro obecné použití se speciálním utvařečem typu GM v materiálu PR1525. Vhodná pro čelní frézování, vytváření kapes i šroubovitě frézování. Úhel nastavení  $K_r = 10^\circ$ , délka řezné hrany 10,3 mm. Hlavní rozměry jsou tloušťka 4,58 mm, průměr upínacího otvoru 4,6 mm, zaoblení rohu 2 mm a úhel hřbetu  $\alpha = 16^\circ$ . [21; 23]



Obr. 12 VBD SOMT100420ER-GM.

Materiál PR1525 je vhodný pro obrábění slitin titanu a tvrzené oceli. Díky technologii povlakování Megacoat Nano dosahuje vysoké odolnosti a dlouhé životnosti. Povlak je tvořen vícenásobnými PVD vrstvami. [21]

K získání přesné geometrie bylo provedeno na pěti VBD měření pomocí penthometru a úchylkoměru. Při řezu kolmém k hlavnímu ostří bylo naměřeno, že zaoblení řezné hrany se pohybuje v rozmezí 0,05 mm až 0,06 mm. Na řeznou hranu se napojuje fazetka o délce v rozmezí 0,22 mm až 0,25 mm pod úhlem  $0^\circ$  a následně plocha klesá pod  $5^\circ$ . Naměřený úhel hřbetu  $\alpha = 15^\circ$ .

## 2.4 Produkty dalších společností

### Nástroje Dijet Industrial Co. Ltd.

Odpovídající VBD od společnosti Dijet Industrial Co. Ltd. je SPNW100415ZTR. Geometrií se podobá ZDCW09T304. Délka řezné hrany je 7,6 mm, zaoblení rohu 1,5 mm, tloušťka VBD je 4,46 mm a velikost upínacího otvoru 4 mm. Úhel hřbetu  $\alpha = 11^\circ$ . Na řeznou hranu se napojuje fazetka s pozitivním úhlem a nemá utvařeč. Dovoluje maximální hloubku řezu  $a_p = 1,5$  mm. Vyrábí se ve dvou materiálech JC8050 a JC8118 s PVD povlakem. JC8118 je vhodný pro obrábění tvrzených ocelí do 50 HRC a litin nad 38HRC. Vhodná fréza by byla SKG-5050R-10-22. [24]

### Nástroje Boehlerit GmbH & Co. KG

Společnost Boehlerit GmbH & Co. KG představila nový typ VBD dané velikosti SDMT100415SR-MHH s frézami typu DELTatec 90P Feed. Konkrétní odpovídající fréza je BF90SD10.050Z05, která má podobné parametry jako ostatní konkurence s hloubkou řezu  $a_p = 1,5$  mm. Parametry VBD jsou průměr vepsané kružnice 10,2 mm, tloušťka 4,86 mm, velikost upínacího otvoru 3,5 mm a zaoblení rohu 1,5 mm. [25]

### 3 STANOVENÍ ŘEZNÝCH PODMÍNEK A PROSTŘEDÍ

V této kapitole jsou definovány řezné podmínky, které budou použity při testování prototypů VBD. Aby bylo možné výsledky objektivně porovnávat, je nutné dodržet předem definované podmínky, které budou rovněž zohledněny při simulačním vývoji prototypů v softwaru AdvantEdge.

#### 3.1 Materiál obrobku

Testování bude probíhat na nástrojové oceli (obr. 13) označení X37CrMoV5-1 podle normy EN ISO 4957, což odpovídá českému ekvivalentu ČSN 19552. Zkoušky budou provedeny na oceli ve dvou stavech. Měkkém (normalizačně žíhaném) a tepelně zušlechtěném (kaleném). Pro účely této práce budou prezentovány pouze výsledky z obrábění tepelně zušlechtěné oceli. Rozměry obrobku jsou 300 x 100 x 250 mm, u zkoušek trvanlivosti bude délka 400 mm. Výchozí tvrdost obrobků byla stanovena na 53 HRC (řezné zkoušky) a 55 HRC (zkoušky trvanlivosti). Před samotnými zkouškami bude provedeno kontrolní měření tvrdosti. [26]



Obr. 13 Obrobek: zušlechtěná ocel X37CrMoV5-1.

Přesné chemické složení pro srovnání s AdvantEdge je uvedeno v tab. 1. Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních % dle normy DIN 17 350. [26]

Tab. 1 Chemické složení X37CrMoV5-1 [26].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
Hmotnostní %	0,33 - 0,41	0,80 - 1,20	0,25 - 0,50	4,80 - 5,50	1,10 - 1,50	-	0,30 - 0,50
Tolerance	± 0,02	± 0,05	± 0,04	± 0,10	± 0,05	-	± 0,04

### 3.2 Obráběcí stroj

Experimenty budou realizovány ve zkušebně společnosti Dormer Pramet s.r.o. v Šumperku, konkrétně na frézovacím centru MCV 1270 Power (obr. 14) od firmy Kovosvit MAS Machine Tools, a.s. Základní technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 14 Frézovací centrum MCV 1270 Power.

Tab.2 Základní parametry MCV 1270 Power [27].

Technická data	Hodnota [jednotka]
Upínací plocha stolu	1500 x 670 [mm]
Pracovní rozsah X, Y, Z	1270 x 610 x 720 [mm]
Maximální zatížení stroje	1200 [kg]
Maximální otáčky	8000 [min <sup>-1</sup> ]
Pracovní posuv X, Y, Z	1–40000 [mm.min <sup>-1</sup> ]
Rychloposuv X, Y, Z	40 [mm.min <sup>-1</sup> ]
Maximální délka nástroje	400 [mm]
Maximální průměr nástroje	125 [mm]
Rozměry (délka x šířka x výška)	5000 x 3600 x 3330 [mm]
Hmotnost stroje	11800 [kg]

### 3.3 Návrh typu experimentu

Před realizací řezných experimentů budou provedena kontrolní měření s cílem ověřit geometrické parametry nástrojů a mechanické vlastnosti obráběného materiálu.

#### Měřicí systém SmartCheck 450

Radiální a axiální házení fréz bude měřeno pomocí měřicího systému SmartCheck 450 (obr. 15) od společnosti ZOLLER CZECH s.r.o., dostupného ve zkušebním centru Dormer Pramet s.r.o.



Obr. 15 SmartCheck 450 ve zkušebním centru Dormer Pramet s.r.o.

Tento univerzální měřicí stroj umožňuje přesné stanovení parametrů nástrojů s upínacím otvorem do 35 mm a celkovým průměrem až do 350 mm. Výška měřicí sondy je nastavitelná v rozsahu 450, 600 nebo 800 mm. Přístroj disponuje intuitivním uživatelským rozhraním, které nevyžaduje speciální zaškolení obsluhy. [28]

#### Měřič tvrdosti Proceq Equotip 550 Leeb

Pro stanovení mechanických vlastností obráběného materiálu bude použito přenosné měřicí zařízení Proceq Equotip 550 Leeb, jehož funkce je založena na Leebově metodě testování tvrdosti, vyvinuté společností Proceq SA v roce 1975. [29]

Tato normalizovaná dynamická zkušební metoda je realizována následujícím způsobem: nárazové těleso je urychleno pružinovým mechanismem směrem do zkušebního vzorku, přičemž bezkontaktní měření indukovaného napětí umožňuje stanovení rychlostí před nárazem a po odrazu. Z poměru těchto rychlostí je následně vypočtena hodnota dynamické tvrdosti. [29; 30]

Měřicí systém Equotip 550 bude využíván díky svým uživatelským výhodám, které zahrnují: velký displej pro zobrazování výsledků, výkonný hardwarový systém umístěný do robustního krytu s vysokou odolností a dlouhou provozní výdrží díky vysokokapacitní baterii. Přístroj garantuje vysokou přesnost měření a umožňuje kombinované využití s dalšími typy kompaktních přenosných tvrdoměrů. [29]

## Řezné zkoušky

Pro účely výzkumu bude realizována série obráběcích testů za různých technologických podmínek. Každý testovaný nástroj podstoupí dvě samostatné měřicí série, které se budou lišit nastavenými parametry, konkrétně otáčkami a hloubkou řezu. V rámci každé série budou postupně modifikovány hodnoty posuvu, celkem čtyři různé hodnoty posuvu.

Pro experimenty bude použit obrobek o rozměrech 300 x 100 mm. Z důvodu optimalizace měření bude každý frézovací záběr rozdělen na dvě měřicí sekvence, každý na ploše 150 x 100 mm. Během obráběcího procesu bude průběžně monitorováno a zaznamenáváno procentuální zatížení stroje.

### Měřič drsnosti Hommel etamic W5

Po dokončení každé frézovací série bude následně provedena analýza kvality obrobeného povrchu pomocí přenosného měřiče drsnosti Hommel etamic W5 (obr. 16). Toto zařízení, které splňuje požadavky třídy přesnosti 1 dle normy DIN 4772, umožňuje rychlé a přesné měření povrchových parametrů s okamžitou digitalizovanou vizualizací výsledků na vestavěném displeji. Měřicí zařízení je vybaveno výkonnou baterií s kapacitou minimálně 800 měřicích cyklů na jedno nabití, přičemž doba kompletního nabití činí 4 hodiny. [31]



Obr. 16 Hommel etamic w5.

Měřicí protokol bude pro každou testovanou plochu zahrnovat tři nezávislá měření parametrů  $R_a$  a  $R_z$ , z nichž bude následně vypočítána reprezentativní průměrná hodnota.

### Zkoušky trvanlivosti

Následně budou provedeny zkoušky trvanlivosti pro minimálně dvě VBD od každého typu za identických řezných podmínek uvedených v tab. 3. Bude měřena doba obrábění do okamžiku kritického poškození VBD, přičemž bude stanoven konkrétní druh poruchy a provedena jeho fotografická dokumentace. Všechny testované VBD budou hodnoceny podle stejných kritérií, včetně sledování změn rozměrové přesnosti, aby bylo možné objektivně porovnat jejich životnost a poruchové mechanismy. Tento standardizovaný přístup umožní získat reprodukovatelné výsledky pro následnou analýzu vlivu materiálu a geometrie VBD na jejich trvanlivost.

Tab. 3 Řezné podmínky pro zkoušky trvanlivosti.

Typ zkratka	Hodnota [jednotky]
Řezná rychlost $v_c$	80 [m.min <sup>-1</sup> ]
Otáčky $n$	688 [min <sup>-1</sup> ]
Posuv na zub $f_z$	0,40 [mm]
Posuv za minutu $f$	275 [mm.min <sup>-1</sup> ]
Hloubka řezu $a_p$	0,50 [mm]
Šířka frézované plochy $a_e$	32,00 [mm]
Délka záběru $l$	400 [mm]
Chladičí kapalina	Stlačený vzduch
Čas jednoho záběru	4,4 [min]

## 4 VÝVOJ PROTOTYPŮ

Na základě požadavků společnosti Dormer Pramet s.r.o. byl zadán vývoj nové geometrie řezné destičky pro vysokoposuvové frézování tvrdých materiálů, pro stávající frézu 50A06R-SMOSO09-C-P1. Výchozím bodem pro vývoj se stal existující model SOHT090414SR-MM-P01, u kterého bylo nutné modifikovat především geometrii utvařeče a řezné hrany. Tento přístup umožnil využít stávající komponenty včetně matrice, spodního razníku a trnu, zatímco vývoj se soustředil na návrh a výkresovou dokumentaci nového horního razníku.

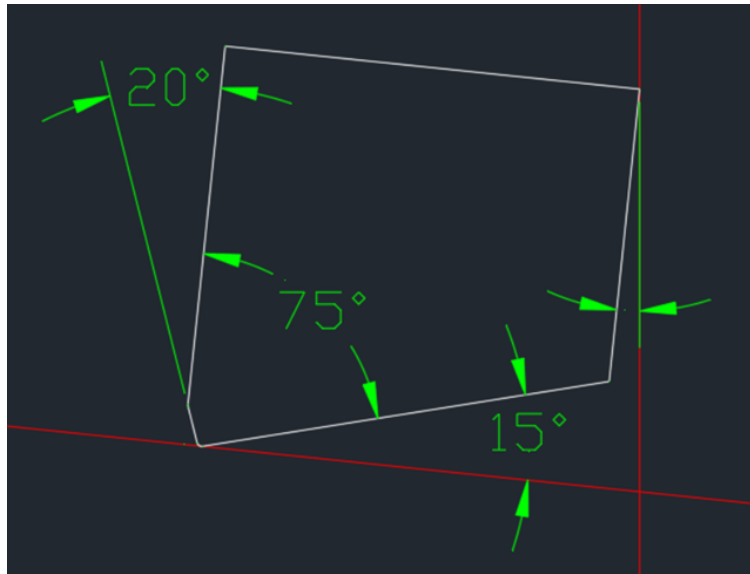
Pro účely optimalizace budou navrženy tři varianty prototypů, které budou nejprve testovány pomocí 2D simulací v programu AdvantEdge. Tato metoda byla zvolena pro svou časovou a výpočetní efektivitu, neboť umožňuje snížit nároky na počet simulací a využití výpočetních jader. Na základě výsledků 2D simulací bude vyřazena nejméně perspektivní varianta a zbylé dva návrhy budou podrobeny detailní 3D simulaci. Průběžné výsledky simulací budou využity pro iterativní vylepšování geometrie řezné destičky. Po dokončení návrhů budou, s ohledem na dostupné zdroje, vyrobeny dva typy fyzických prototypů pro praktické testování.

### 4.1 Návrh geometrií utvařeče

Z firemní databáze modelů a výkresů ECTR byl nakopírován model destičky ZDCW09, z něhož byla analyzována geometrie utvařeče a řezné hrany. Při návrhu prototypů byla čerpána inspirace jak z používaných řešení společnosti Dormer Pramet s.r.o., tak z konkurenčních produktů, které byly podrobně popsány v 2 Analýza vybraných typů řezných nástrojů. Konkrétně byly zkoumány nejen řešení typu ZDCW09, ale i další VBD různých velikostí a provedení, jako například SOHT12050412SR-MM nebo SNGX110416SR-M, zejména s ohledem na profil řezné hrany. Na základě získaných poznatků byly připraveny návrhy, které se následným testováním postupně upravovaly.

#### Současná VBD ZDCW09

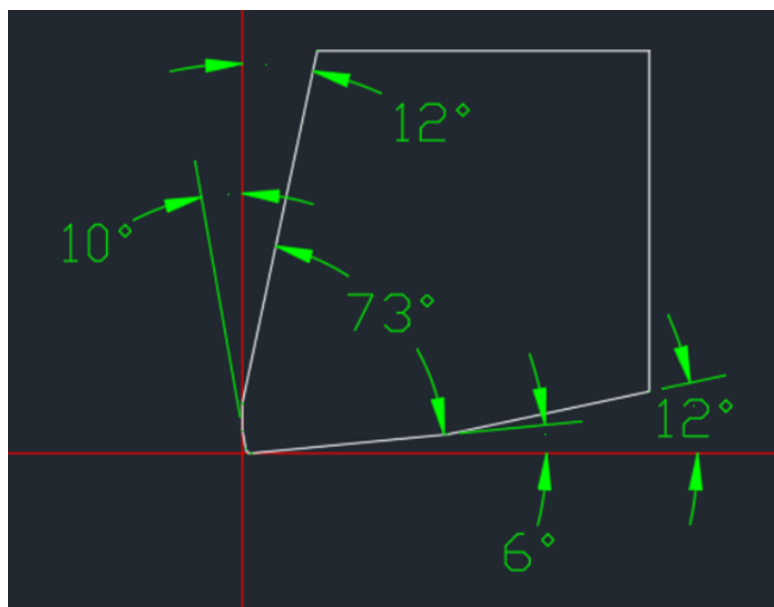
Pro vytvoření referenční křivky (obr. 17) byl využit digitální model VBD exportovaný z databáze ECTR. Specifikace X udává speciální geometrii destičky, která je navíc osazena v pootočeném lůžku. Tato skutečnost vyžaduje dodatečné úhlové pootočení křivky kolmé k řezné hraně. Přesná hodnota tohoto úhlu byla určena ze sestavy frézy a VBD. Tato hodnota byla následně aplikována na DXF křivku, čímž je zajištěna shoda mezi simulačními a reálnými podmínkami obrábění. Konkrétní hodnota zaoblení řezné hrany byla převzata z výrobní dokumentace, aby DXF křivka přesně odpovídala skutečnému profilu nástroje používaného v obráběcím procesu.



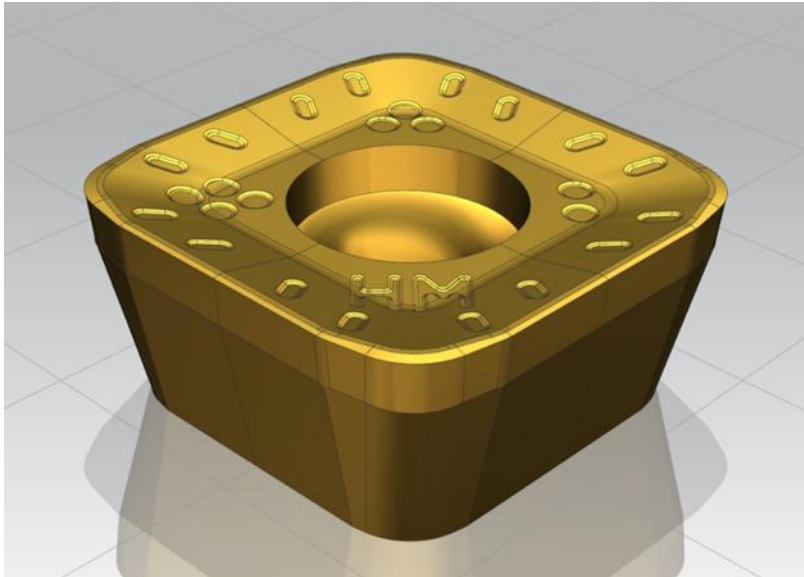
Obr. 17 Křivka ZDCW09.

### Prototyp P01

Hlavním cílem návrhu tohoto prototypu bylo zvýšení objemu materiálu v oblasti hlavního břitu za účelem dosažení vyšší odolnosti a zlepšení řezných vlastností. Geometrie břitu (obr. 18) je tvořena dvěma navazujícími fazetkami. První pod kladným úhlem 10°, druhá s nulovým sklonem. Na tyto fazetky navazuje čelní plocha se sklonem 12°. Úhel hřbetu začíná na 6° a dále plynule přechází na 12°, což odpovídá geometrii lůžka frézy. Zaoblení řezné hrany bylo zvoleno větší než u destičky ZDCW09 a následně upraveno na základě výsledků simulací. Na 3D model (obr. 19) byly doplněny odlehčovací prvky a oficiální označení v souladu s normami společnosti Dormer Pramet s.r.o.



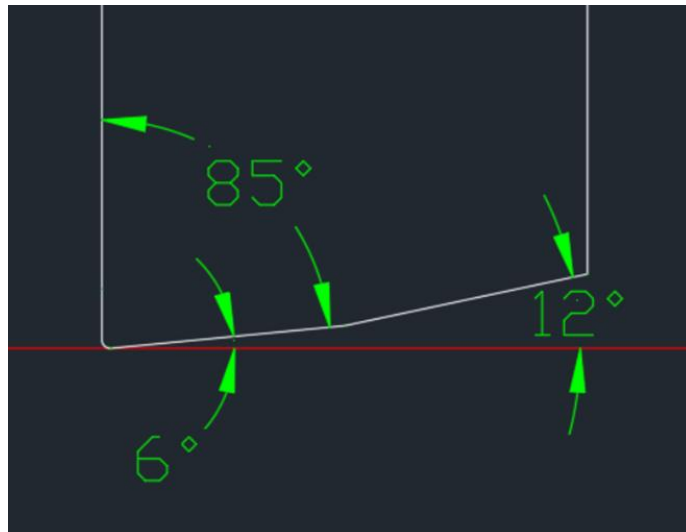
Obr. 18 Křivka SOHT09-HM-P01.



Obr. 19 3D vizualizace SOHT09-HM-P01.

### Prototyp P02

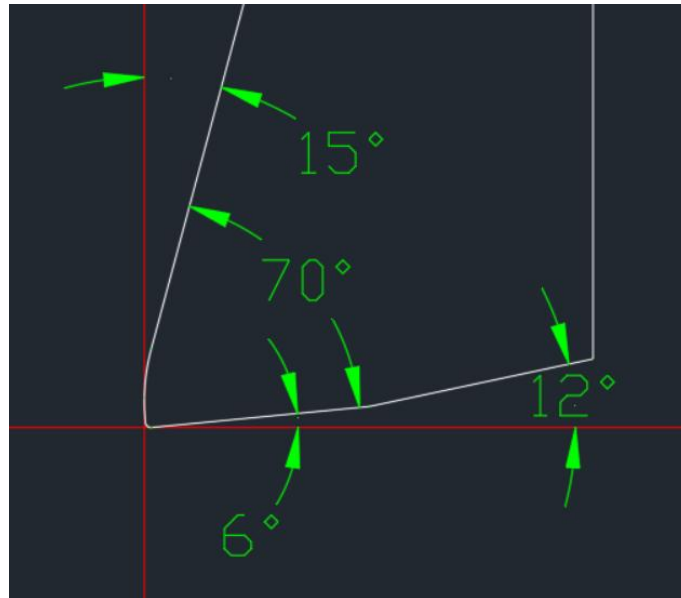
Tento návrh byl koncipován jako ekonomicky výhodná alternativa s cílem minimalizovat výrobní náklady na úkor částečného snížení výkonnostních parametrů. Konstrukční řešení (obr. 20) eliminuje fazetku i utvařecí třísky, což výrazně zjednodušuje výrobní proces. Zvýšené zaoblení řezné hrany bylo zvoleno jako kompenzační prvek pro zlepšení odolnosti proti tepelnému opotřebení. Geometrie hřbetu a dosedací plochy je identická s prototypem P01 a odpovídá lůžku frézy.



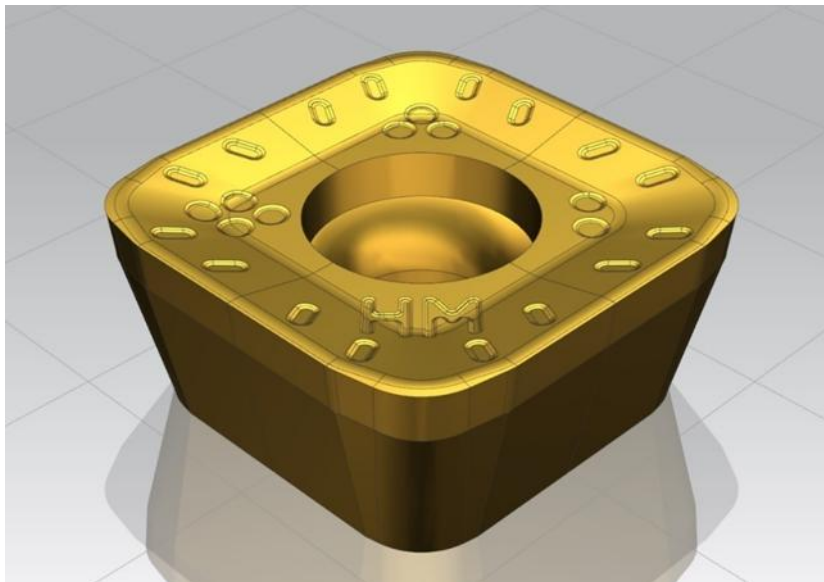
Obr. 20 Křivka SOHT09-HM-P02.

### Prototyp P03

U třetího prototypu (obr. 21) byla navržena jednoduchá fazetka pod mírným pozitivním úhlem, na kterou navazuje plocha klesající směrem k čelu pod úhlem  $15^\circ$ . Mezi těmito dvěma plochami je navržen větší rádius zaoblení. Zaoblení řezné hrany bylo obdobné jako u referenční VBD ZDCW09 a upravováno během simulací. Geometrie hřbetu a dosedací plochy je shodná s prototypem P01. 3D model (obr. 22) byl doplněn o odlehčovací prvky a opatřen oficiálním označením dle standardů společnosti Dormer Pramet s.r.o.



Obr. 21 Křivka SOHT09-HM-P03.



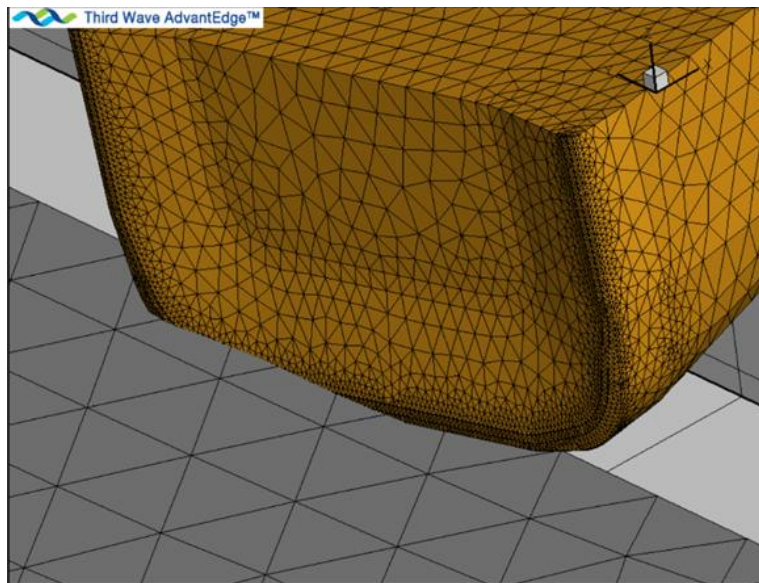
Obr. 22 Vizualizace SOHT09-HM-P03.

## 4.2 Stanovení řezného prostředí a podmínek pro AdvantEdge

Pro zajištění maximální možné přesnosti výsledků simulací bylo nutné definovat podmínky co nejvíce odpovídající reálnému obrábění, jak bylo uvedeno v kapitole 3 Stanovení řezných podmínek a prostředí. V případech, kdy nelze některé parametry přesně zadat, nevzniká zásadní problém. Výsledná chyba v porovnání simulací s experimentálními testy je zanedbatelná a neměla by významně ovlivnit celkové hodnocení. Simulace byly prováděny výhradně pro tepelně zušlechťenou nástrojovou ocel.

V rámci výpočetní přípravy byly do softwaru AdvantEdge importovány 2D křivky (DXF) a 3D modely (STEP) navržených prototypů. Na základě geometrie frézy byly stanoveny následující parametry: úhel náběhu  $K_r = 10^\circ$ , průměr nástroje  $D_c = 50$  mm, počet zubů  $z_n = 5$  a materiál obrobku kalená nástrojová ocel třídy H s tvrdostí v rozmezí 51 až 55 HRC. Řezné podmínky byly stanoveny následovně: hloubka řezu  $a_p = 0,5$  mm, řezná rychlost  $v_c = 60$  m.min<sup>-1</sup>, posuv na zub  $f_z = 1$  mm. Z těchto hodnot byly s využitím mobilní aplikace „kalkulátor pro výpočet parametrů obrábění“ od společnosti Dormer Pramet s.r.o. vypočteny otáčky vřetene  $n = 382$  min<sup>-1</sup>, posuv na otáčku  $f_n = 5$  mm a lineární posuv  $v_f = 1909,86$  mm.min<sup>-1</sup>.

Program AdvantEdge pro nástroj vyžadoval zadání průměru  $D_c$ , počtu zubů  $z_n$  a importovaný model VBD. Pro numerické výpočty bylo nezbytné nastavit také síť (mesh), která tvoří výpočetní základnu rozdělením geometrie nástroje a obrobku na trojúhelníkové elementy (obr. 23). Jemnost této sítě přímo ovlivňuje přesnost simulace i výpočetní náročnost. Z těchto důvodů byla zvolena kompromisní hodnota: maximální velikost elementu 0,1 mm, minimální 0,01 mm a hodnota mesh grading = 0,2.



Obr. 23 Mesh síť.

Tloušťka obrobku byla nastavena na 1 mm, což je dostatečné vzhledem k axiální hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm. Parametry sítě v oblasti obrobku byly nastaveny na maximální velikost elementu 0,1 mm a minimální 0,05 mm.

Jako materiál obrobku byl v databázi vybrán typ ocel H13 z evropského regionu se stanovenou tvrdostí 52 HRC. Rozdíl v tvrdosti byl akceptován a bude zohledněn při vyhodnocení. Program přiřadil oceli následující mechanické a chemické vlastnosti: mez pevnosti v tahu 1882 MPa, chemické složení: 0,38 % C, 5,02 % Cr, 0,33 % Mn, 1,35 % Mo, 0,12 % Ni, 0,94 % Si a 0,12 % V. Oproti reálné oceli X37CrMoV5-1 jsou rozdíly pouze v obsahu niklu a vanadu. Niklu by mělo být o 0,12 % méně a vanadu naopak alespoň o 0,14 % více.

Pro nástroj byl v softwaru zvolen materiál slinutý karbid v kategorii jakost P. Do nastavení procesu byly zadány konkrétní hodnoty:  $n = 382 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_n = 1 \text{ mm}$ , šířka záběru  $a_e = 28,5 \text{ mm}$ , délka řezu  $7 \text{ mm}$ , hloubka řezu  $0,5 \text{ mm}$ . Dále byla nastavena okolní teplota  $20 \text{ °C}$ , koeficient tření normální a chlazení deaktivováno. Funkce adaptivního remeshingu byla ponechána na výchozích hodnotách: zjemnění s faktorem 2, zhrubnutí s faktorem 6. V případě nadměrné výpočetní náročnosti nebo ztráty přesnosti by tyto hodnoty mohly být upraveny.

### Možné principy k vyhodnocování v AdvantEdge

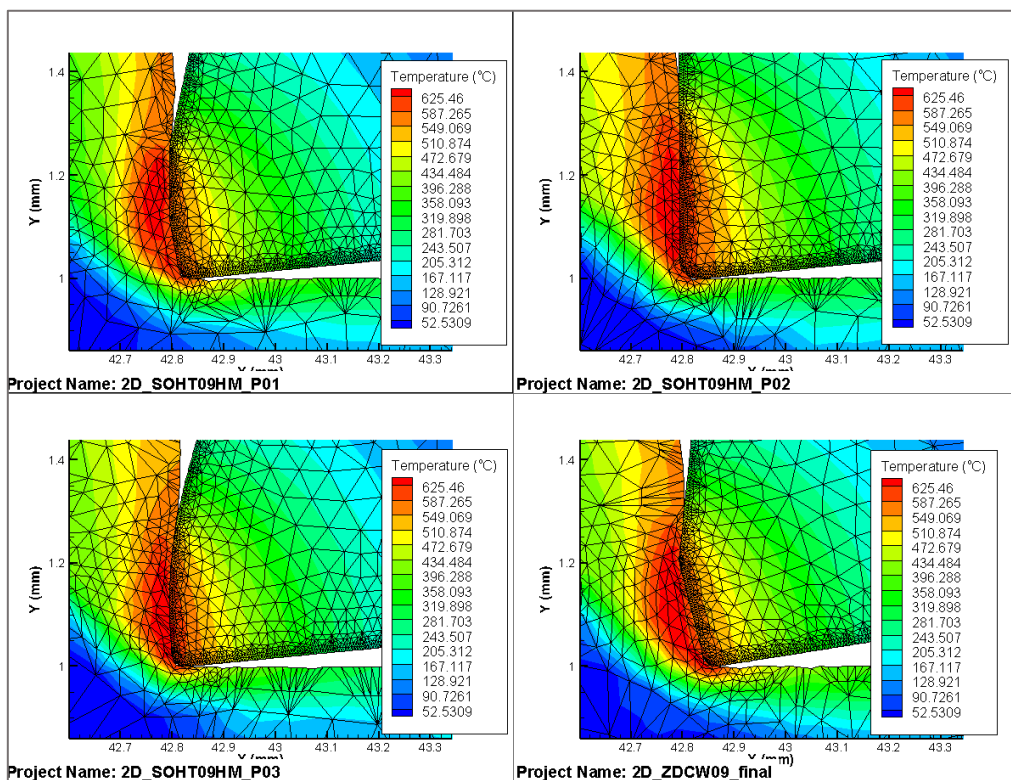
Jedním z nejlepších způsobů vyhodnocování je teplota, tlak, odchod třísek, Misesovo napětí a maximální hlavní napětí. Teplota se běžně využívá pro výpočet trvanlivosti nástroje. Zvyšující teplota na nástroji při řezu vede ke snižování pevnosti materiálu nástroje. Zvyšuje se tak rychlost opotřebení a urychluje vznik a rozšiřování mechanismů opotřebení. Další důležitý související faktor, který lze dobře sledovat a vyhodnocovat je časový průběh špičkové teploty na nástroji. Tu lze sledovat na grafu nebo na teplotním obrysu. Graf špičkové teploty je dobrým ukazatelem pro rychlé srovnání návrhů geometrií destiček fungujících za stejných podmínek, což je i tento případ. Nevýhodou grafu je, že není vidět přesné místo této špičkové teploty, což umožňuje teplotní obrys, kde lze přesně určit nebezpečné oblasti a sledovat průběh teploty v čase. Metodika 3D analýzy teplotního obrysu bude klíčová pro detailní vyhodnocení finálních prototypů. Tlak je další z metod, kterou lze sledovat jak na grafu, tak na obrysu. Jedná se o dobrý ukazatel, neboť kombinace zvýšeného tlaku a teploty vede k vyššímu opotřebení. Zvýšený tlak v řezné oblasti významně urychluje difúzní mechanismy opotřebení, zejména za podmínek vedoucích k charakteristickému žlábkovému opotřebení. Další možností je sledovat odchod třísek, kdy kontakt třísky a nástroje je nežádoucí. Von Misesovo napětí lze sledovat na obrysu geometrie. Ukazuje zvýšenou pravděpodobnost deformace nástroje, především je to důležité u rychlořezné oceli. Poslední významný faktor je maximální hlavní napětí, významné především pro křehké materiály. Pro tuto práci nemá tak velké využití. Využívá se hlavně pro předpověď odštípnutí nebo sledování trhlin uvnitř nástroje. Šíření trhlin souvisí s tahovým napětím. [32]

### 4.3 AdvantEdge 2D simulace

Dvourozměrná simulace v prostředí AdvantEdge je z hlediska výpočetní náročnosti výrazně méně zatěžující než simulace trojrozměrná. Tento přístup ovšem přináší i určitá omezení, zejména v oblasti přesnosti výsledků, která není srovnatelná s 3D analýzou. 2D simulace je proto vhodná zejména pro úvodní srovnání více návrhů geometrií břitových destiček, kde je cílem rychle identifikovat méně vhodné varianty. 3D simulace, které jsou časově i výpočetně náročnější, je pak účelné aplikovat pouze na perspektivní návrhy vybrané na základě výsledků 2D analýz.

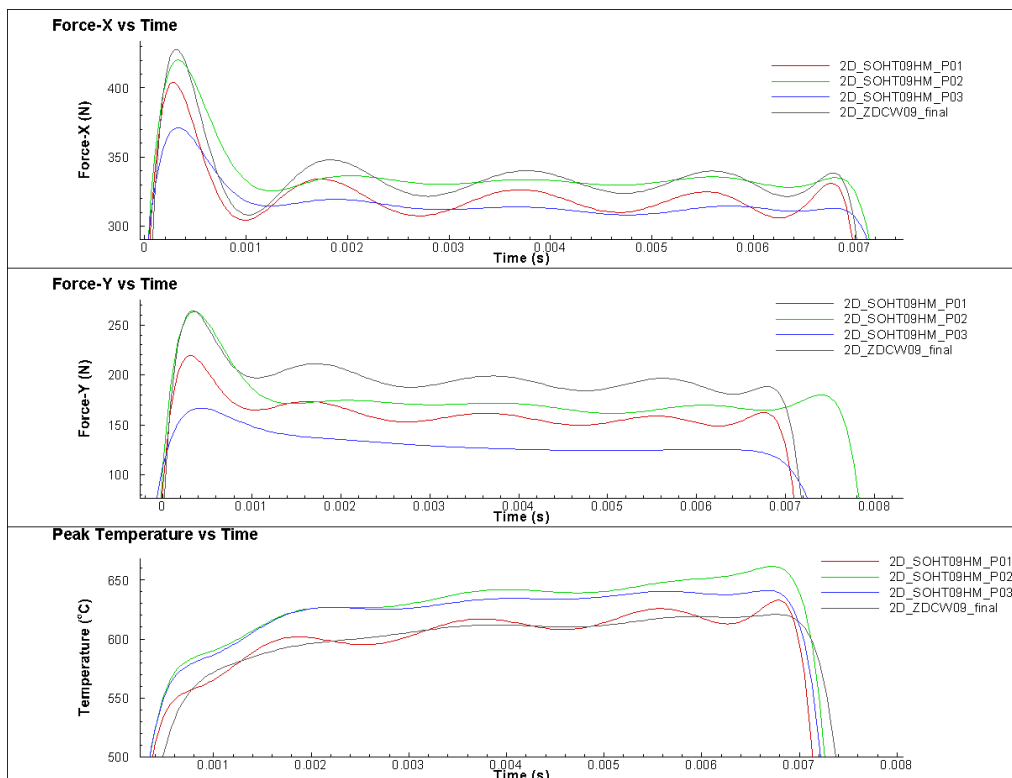
Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto provést 2D simulace pro tři nové návrhy prototypů a pro referenční geometrii ZDCW09, která představuje aktuálně používané řešení. Výstupy simulací byly označeny kódy přibližně odpovídajícími názvům jednotlivých projektů. Pro zjednodušení a přehlednost budou v dalším textu používány zkratky: P01, P02, P03 a ZDCW. Z nabídky výstupních parametrů byly zvoleny především časové průběhy maximální teploty a grafy působících sil ve směru X a Y. Tyto veličiny umožňují efektivní porovnání tepelného a mechanického zatížení jednotlivých geometrií při stejných rezných podmínkách.

Na grafu maximální teploty v čase (obr. 24) lze pozorovat velmi podobné chování u variant ZDCW a P01, které vykazují nejnižší tepelnou zátěž. Prototyp P03 dosahuje vyšší maximální teploty přibližně o +30 °C oproti P01. Nejslabší výsledek z hlediska tepelného namáhání vykazuje P02, který má v průběhu řezu mírně vyšší hodnoty než P03 a ke konci řezu dochází ke zvýšení teploty o dalších +25 °C. Navíc P02 vykazuje větší délku plochy ovlivněné teplem, přičemž schopnost rozptýlení tepla je nižší než u ostatních variant. Z hlediska optimalizace tepelného režimu při obrábění je klíčové maximalizovat podíl tepla odváděného odřezávanou třískou, čímž se minimalizuje tepelné zatížení rezné zóny a samotného nástroje. Tyto informace byly ještě potvrzeny detailním rozbořem teplotního pole v animaci, který byl vykreslován na každém snímku.



Obr. 24 Znárodnění maximální teploty v čase.

Další analyzované veličiny byly síly působící na nástroj ve směru osy X a Y. Výsledky jsou uvedeny v grafu (obr. 25). Nejnižší úroveň sil bylo možné pozorovat u varianty P03. V ose X se při náběhu nástroje síla vyšplhala na přibližně 370 N, následně poklesla a ustálila se kolem hodnoty 320 N. V ose Y došlo při vstupu do řezu k dosažení síly 168 N, která poté lineárně klesala od 148 N až na 132 N. Prototyp P01 vykazuje při náběhu do řezu vyšší síly v ose Y přibližně o 48 N a v průběhu řezu je tato odchylka maximálně +37 N. V ose X je síla mírně vyšší a zároveň vykazuje oscilace. Nejméně příznivé výsledky z hlediska silového zatížení vykazují varianty ZDCW a P02. U P02 je síla v ose X při vstupu do řezu vyšší o přibližně 50 N oproti P03 a v průběhu řezu je rozdíl přibližně 20 N. Hodnoty u ZDCW jsou srovnatelné s P02, avšak vykazují větší oscilace. V ose Y jsou na vstupu hodnoty u ZDCW a P02 totožné, avšak v průběhu řezu je zatížení u ZDCW vyšší.



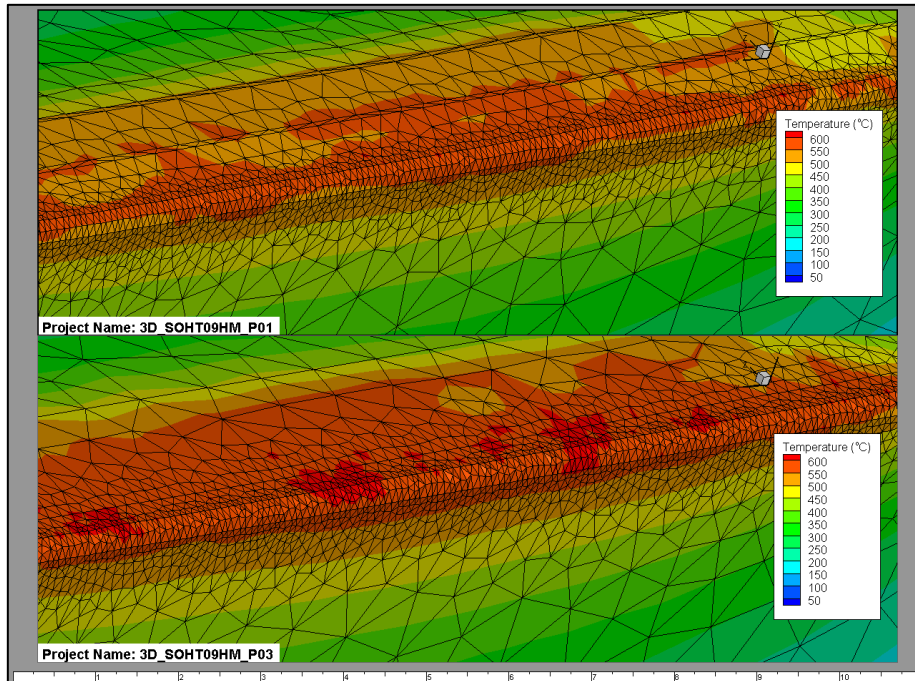
Obr. 25 Grafy působení sil v průběhu řezu.

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto o vyloučení varianty P02 z následných 3D simulací. Ačkoliv vykazovala určitý potenciál, její mechanické a tepelné zatížení bylo ve srovnání s ostatními variantami výrazně vyšší. Vzhledem k tomu, že případné ekonomické výhody této geometrie nevyvažují horší řezné vlastnosti, bylo její další testování vyhodnoceno jako nevhodné. Z hlediska celkového vyhodnocení se zatím jako nejperspektivnější jeví varianta P01, a to jak z pohledu teplotního namáhání, tak i působících řezných sil.

#### 4.4 AdvantEdge 3D simulace

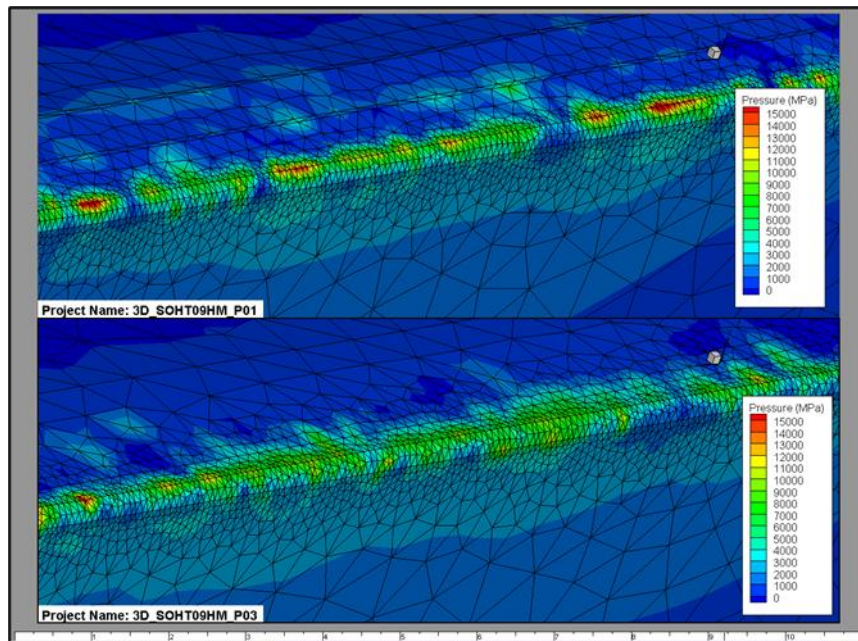
Na základě výsledků z 2D simulací byly pro prototypy P01 a P03 provedeny rovněž 3D simulace. Tyto simulace poskytují výrazně přesnější obraz o mechanickém a tepelném zatížení, neboť umožňují vyhodnocovat hodnoty na celém povrchu vyměnitelné břitové destičky. Pro referenční geometrii ZDCW09 nebyla 3D simulace provedena, neboť orientační výsledky z 2D simulace postačovaly k základnímu srovnání. Následná optimalizace se proto soustředí výhradně na návrhy, které vykazují potenciál pro sériovou výrobu.

Prvním krokem v rámci 3D analýzy byla kontrola teplotního pole v oblasti hlavního břítu (obr. 26). Snímek byl pořízen ze strany břítu, přičemž horní část zobrazuje oblast utvařeče třísky a spodní část hřbetní plochu. Zobrazení bylo přizpůsobeno tak, aby vystihovalo relevantní rozmezí teplot. U prototypu P01 dosahují maximální teploty hodnot mezi 550 °C až 600 °C, přičemž největší teplotní zatížení je soustředěno do oblasti přechodu mezi hlavním břitem a rádiusem fazety. Oproti tomu prototyp P03 vykazuje teploty ve stejném rozmezí na větší ploše, a to v celé délce hlavního břítu včetně přechodové oblasti mezi fazetou a utvařečem. Navíc se na jeho hlavním břítu lokálně vyskytují oblasti s teplotou až 650 °C.



Obr. 26 Teplotní obrys srovnání P01 a P03.

Dalším klíčovým parametrem pro hodnocení trvanlivosti VBD je tlakové zatížení (obr. 27), které ovlivňuje zejména vývoj mechanického opotřebení. I zde byl zvolen pohled na střední část hlavního břítu, přičemž vizualizace byla nastavena tak, aby umožnila detailní posouzení rozložení tlaků. Vzhledem k výskytu extrémních lokálních hodnot nebylo možné použít jednotnou stupnici pro celé rozmezí. Proto byla základní vizualizace nastavena v intervalu 0 MPa až 15 000 MPa a nejvyšší hodnoty byly odečítány samostatně. U obou prototypů byly na hřbetní ploše v blízkosti hlavního břítu naměřeny tlaky v rozmezí 2 000 MPa až 5 000 MPa. Na samotném hlavním břítu dosahují hodnoty na větší ploše 7 000 MPa až 11 000 MPa. U prototypu P03 dochází k rovnoměrnějšímu rozložení tlaku na větší ploše, přičemž maximální hodnota v nejméně zatíženém bodě činí 30 000 MPa. Oproti tomu P01 vykazuje vyšší špičkové hodnoty, dosahující až 42 000 MPa, a zároveň přítomnost několika kritických bodů s výrazným zatížením na malé ploše.



Obr. 27 Tlakový obraz srovnání P01 a P03.

Z výsledků 3D simulací vyplývá, že z hlediska tepelného zatížení je výhodnější varianta P01, která vykazuje nižší maximální teploty a menší ovlivněnou oblast. Z hlediska mechanického namáhání je naopak výhodnější P03, u něhož dochází k lepšímu rozložení tlaku a nižším maximálním hodnotám. Konečné opotřebení břitu je primárně výsledkem kombinovaného působení teploty a tlaku, a proto lze předpokládat, že celkové rozdíly v trvanlivosti obou prototypů nebudou výrazné.

Skutečné chování obou geometrií v praxi bude ověřeno až experimentálním testováním, při němž budou sledovány reálné formy opotřebení a doba trvanlivosti při zvolených řezných podmínkách.

## 5 VÝROBA PROTOTYPŮ

Na základě zkoušek v Advantedge byly vytvořeny 2 modely prototypů, které byly pojmenovány SOHT090414PR-HM-P1 a SOHT090414SR-HM-P2. Z modelů byly vytvořeny výrobní výkresy horních razníků a byly zadány k výrobě.

Vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu se vyrábějí technologií práškové metalurgie. Prvním krokem tohoto procesu je výroba lisovacího nástroje, jehož součástí jsou razníky a matrice. Razníky byly zhotoveny ve výrobním oddělení nástrojů společnosti Dormer Pramet s.r.o. pomocí elektroerozivního obrábění, konkrétně hloubením pomocí grafitové elektrody do předem připravených polotovarů ze slinutého karbidu. Takto byly vytvořeny horní razníky prototypů P1 (obr. 28) a P2 (obr. 29).



Obr. 28 Horní razník HR-SOHT090414PR-HM-P1.

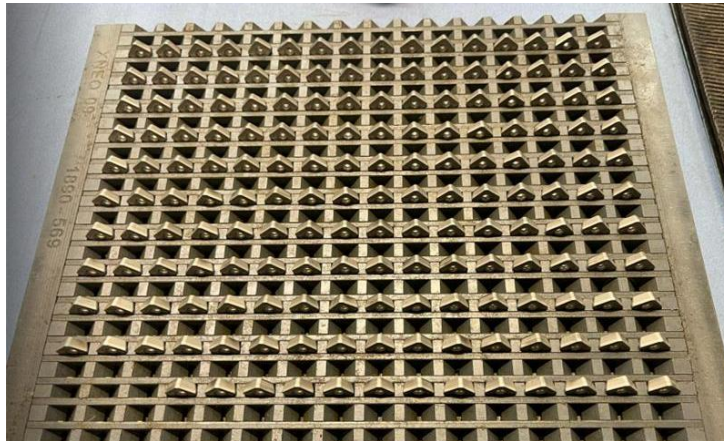


Obr. 29 Horní razník HR-SOHT090414SR-HM-P2.

Po dokončení výroby všech součástí lisovacího nástroje lze přistoupit k samotné výrobě prototypových výlisků. Spodní razník, matrice a trn se nejprve usadí do správné pracovní pozice. Horní razník s vodicím pinem je následně ustaven nad formu tak, aby mezi ním a matricí vznikl pracovní prostor. Touto mezerou se do dutiny formy nasype přesně odměřené množství směsi prášku. Lisovací prášek tvoří směs karbidů, zejména karbidu wolframu a pojivového kovu, kterým je kobalt. Dále směs obsahuje malé množství organického pojiva na bázi polyethylenu (PEK), který zajišťuje soudržnost výlisku v neslinutém stavu. Po naplnění dutiny formy se prášek slisuje za vysokého tlaku do požadovaného tvaru vyměnitelné břitové destičky.

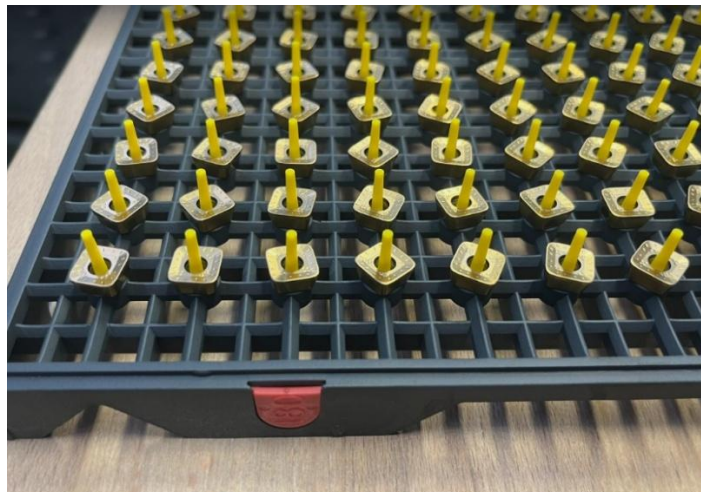
Výlisek drží svůj tvar díky přítomnosti PEKu, přestože ještě nedosahuje finální pevnosti ani tvrdosti. [33]

Výlisky se poté přesunou na grafitové podložky a vloží se do vysokoteplotní elektrické slinovací pece, kde probíhá vlastní slinování. Tento proces trvá přibližně 13 hodin při teplotách okolo 1500 °C. Během slinování dojde k natavení kobaltu, který se rozteče mezi částice tvrdých karbidů a vytvoří mezi nimi pevné kovové pojivo. Současně dochází k vypálení organického pojiva a výraznému smrštění výlisku. Objemová smrštivost může dosahovat až 50 %, v závislosti na typu a granulometrii použitého prášku. Po slinování následuje broušení VBD na finální rozměry a tvar. Tento krok není nutný u tzv. přímolisovaných destiček, jejichž tvar je dosažen již v lisovací formě. V případě těchto prototypů je však broušení nezbytné (obr. 30). [33]



Obr. 30 Prototypy po broušení.

Posledním krokem ve výrobě je povlakování. Vyměnitelné břitové destičky jsou při této operaci navlečeny za upínací otvor na speciální jehly, které jsou dále osazeny distančními válečky pro zajištění rovnoměrných mezer mezi jednotlivými destičkami a pro dosažení kvalitního a homogenního povlaku na všech plochách. Jehly jsou následně upevněny do planetového nosného systému uvnitř povlakovací komory, jehož rotace během procesu zajišťuje rovnoměrné pokrytí všech stran destiček povlakem. Povlakování probíhá za definovaných podmínek, typicky při teplotě okolo 380 °C a tlaku v rozmezí 10 až 2 mBar. Trvá přibližně 4 až 8 hodin, v závislosti na typu aplikovaného povlaku a konkrétních parametrech procesu. Po dokončení povlakování jsou VBD zkontrolovány (obr. 31), následně zabaleny a připraveny k expedici koncovému zákazníkovi. [33]



Obr. 31 Vyrobené prototypy na paletce ke kontrole.

Pro experimentální testování v rámci bakalářské práce byly zvoleny pouze prototypy vyměnitelných břitových destiček SOHT090414PR-HM-P1:M8310 (obr. 32) a SOHT090414SR-HM-P2:M8310 (obr. 33). Oba typy destiček jsou vyrobeny z materiálu M8310, což je jemnozrnný slinutý karbid tvořený především karbidem wolframu a kobaltem jako pojivem. Destičky jsou opatřeny PVD povlakem, který je optimalizován pro obrábění v rozsahu materiálových skupin ISO K01–K10 a H05–H15. Tato povlaková kombinace je vhodná především pro vysokoposuvové frézování kalených ocelí a litin, kde zajišťuje vysokou odolnost proti opotřebení a tepelnému namáhání.



Obr. 32 SOHT090414PR-HM-P1:M8310.



Obr. 33 SOHT090414SR-HM-P2: M8310.

Destičky budou upnuty do speciálně navržené frézy 50A06R-SMOSO09-C-P1 (obr. 34), která je rovněž prototypem a v době psaní bakalářské práce je ve fázi zkušebního provozu. Tento nástroj je konstruován jako šestizubá fréza pro vysokoposuvové aplikace, přičemž její maximální hloubka řezu dosahuje 1,5 mm a úhel nastavení činí 12°. Fréza je navržena jako univerzální nástroj pro použití ve všech fázích obrábění, od hrubování po dokončovací operace. Je vybavena vnitřním chlazením a připojení k vřetenu je realizováno pomocí normalizovaného upínacího otvoru o průměru 22 mm dle normy DIN 8030-C.



Obr. 34 50A06R-SMOSO09-C-P1.

## 6 PROVEDENÍ VLASTNÍCH ZKOUŠEK A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

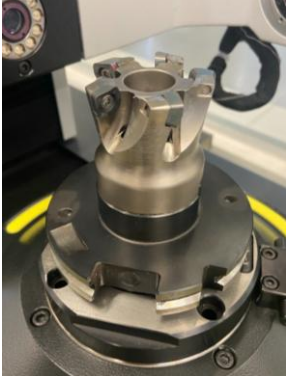

Zkoušky se budou skládat z ověřovacích měření před testy a následných řezných zkoušek a zkoušek trvanlivosti. Probíhat budou na zkušebně společnosti Dormer Pramet s.r.o. na výrobní pobočce v Šumperku. Stroje, přístroje a podmínky byly podrobně popsány v kapitole 3 Stanovení řezných podmínek a prostředí.

### 6.1 Kontrola házení osazených fréz

Naměřené hodnoty házení jsou vypsány v tab. 4. K měření byl použit SmartCheck450, který byl popsán v kapitole 3.3 Návrh typu experimentu. Házení frézy je důležitý faktor, který může mít při vyšších hodnotách, přibližně od 0,03 mm, značný vliv na frézovací proces. Dochází k nerovnoměrnému zatížení břitu a v důsledku dojde k rychlejšímu opotřebení VBD. Také se zhorší kvalita obrobeneho povrchu a zvyšují se vibrace a s tím související hluk.

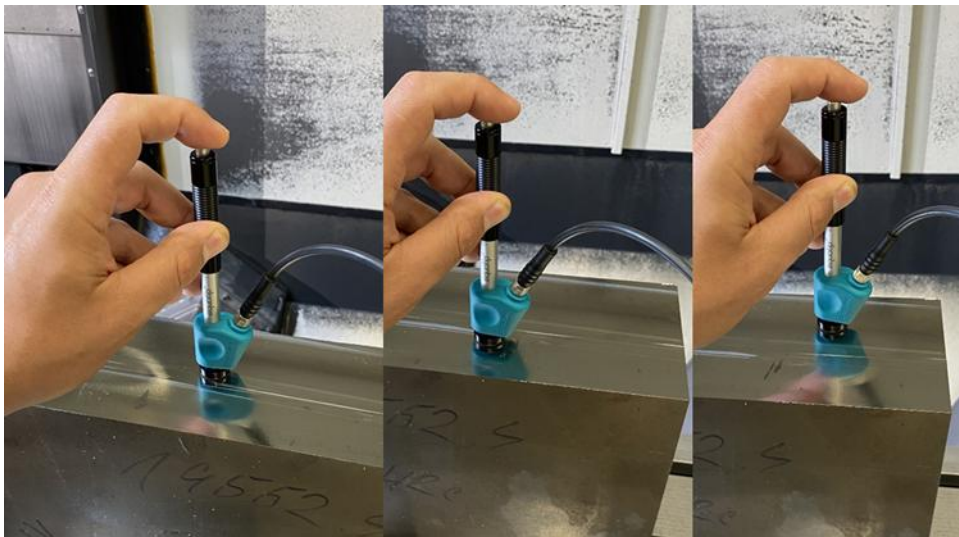
Tab. 4 Naměřené hodnoty házení.

<p>Dormer Pramet s.r.o. VBD: <b>SOHT090414PR-HM-P1:M8310</b> Fréza: <b>50A06R-SMOSO09-C-P1</b></p>		<p>Radiální házení: 0,017 mm Čelní házení: 0,010 mm</p>
<p>Dormer Pramet s.r.o. VBD: <b>SOHT090414SR-HM-P2:M8310</b> Fréza: <b>50A06R-SMOSO09-C-P1</b></p>		<p>Radiální házení: 0,009 mm Čelní házení: 0,006 mm</p>
<p>Dormer Pramet s.r.o. VBD: <b>ZDCW09T304:M8325</b> Fréza: <b>50A06R-SMOZD09-C</b></p>		<p>Radiální házení: 0,033 mm Čelní házení: 0,020 mm</p>

<p>Kyocera Unimerco Tooling s.r.o.  VBD:  <b>SOMT100420ER-GM:PR1525</b>  Fréza:  <b>MFH050R-10-5T-M</b></p>		<p>Radiální házení: 0,033 mm  Čelní házení: 0,033 mm</p>
<p>Tungaloy Czech s.r.o.  VBD:  <b>SWMT0904ZER-MM:AH8015</b>  Fréza:  <b>TXSW09M050B22.0R05</b></p>		<p>Radiální házení: 0,011 mm  Čelní házení: 0,020 mm</p>

## 6.2 Kontrolní měření tvrdosti obráběného materiálu

Pro měření tvrdosti byl využit přenosný tvrdoměr Proceq Equotip, více byl popsán v kapitole 3.3 Návrh typu experimentu. Na tepelně zušlechtěné oceli X37CrMoV5-1 pro zkoušky trvanlivosti bylo provedeno měření tvrdosti (obr. 35). Tvrdost udávaná výrobcem je 55 HRC. Kontrolní měření bylo provedeno na osmi místech. Z nich byla stanovena průměrná hodnota tvrdosti 55,7 HRC. Maximální naměřená tvrdost byla 57,7 HRC a minimální 53,9 HRC.



Obr. 35 Měření tvrdosti obráběného materiálu.

### 6.3 Řezné zkoušky

Řezné zkoušky budou probíhat na frézovacím centru MCV 1270 Power, které bylo více popsáno v kapitole 3.2 Obráběcí stroj. Měření bude probíhat ve dvou sériích, první pro hloubku řezu  $a_p = 0,2$  mm a druhá pro hloubku řezu  $a_p = 0,5$  mm. Postupně budou čtyřikrát upravovány hodnoty posuvu na zub a naměřeny hodnoty. Obrobek má šířku 100 mm a délku 300 mm. Pro jednu hodnotu posuvu bude stačit délka 150 mm, to znamená, že na jednu délku obrobku budou provedena dvě měření. Během obrábění (obr. 36) bude zaznamenáno rozpětí zatížení a pro každý posuv minimálně tři hodnoty Ra a minimálně tři hodnoty Rz.



Obr. 36 Frézování při řezných zkouškách

#### První série měření

První série bude probíhat pro hloubku řezu  $a_p = 0,2$  mm. Měření bude postupně probíhat pro všech pět testovaných VBD. Základní informace jsou v horní části tab. 10. Hodnoty tučně zvýrazněné jsou stanovené nebo dopočítané.

Tab. 5 Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM- P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>662</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>397</b>	<b>794</b>	<b>1588</b>	<b>2382</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	5-6	5-6	7-8	7-9	$D_C$ [mm]	<b>38,5</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,547	0,480	0,688	0,932	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,599	0,478	0,701	1,031	$z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,539	0,362	0,672	0,994		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,587	2,681	3,312	4,754		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,965	2,958	3,797	5,650		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	3,184	2,237	3,820	4,987		

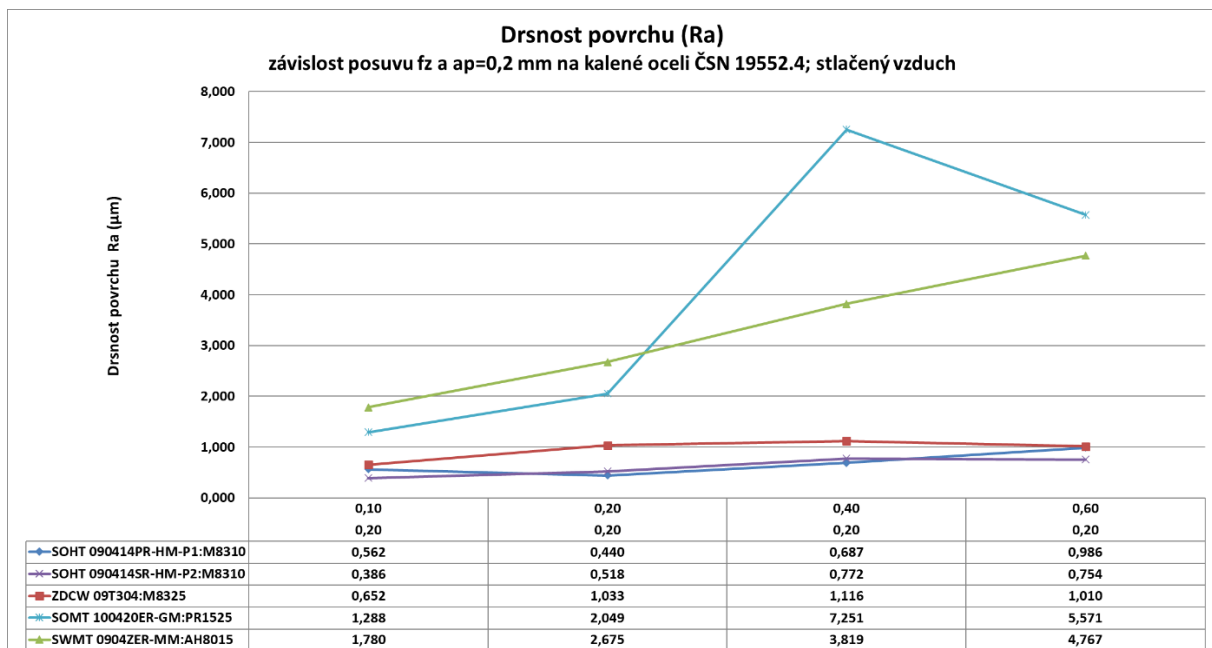
Ze tří naměřených hodnot Ra a Rz (tab. 5) byly dopočítány průměrné hodnoty Ra a Rz (tab. 6). Také byla z naměřeného rozptylu hodnot zatížení vypočtena průměrná hodnota. Vše je zapsáno v tab. 6.

Tab. 6 Vypočtené průměrné hodnoty.

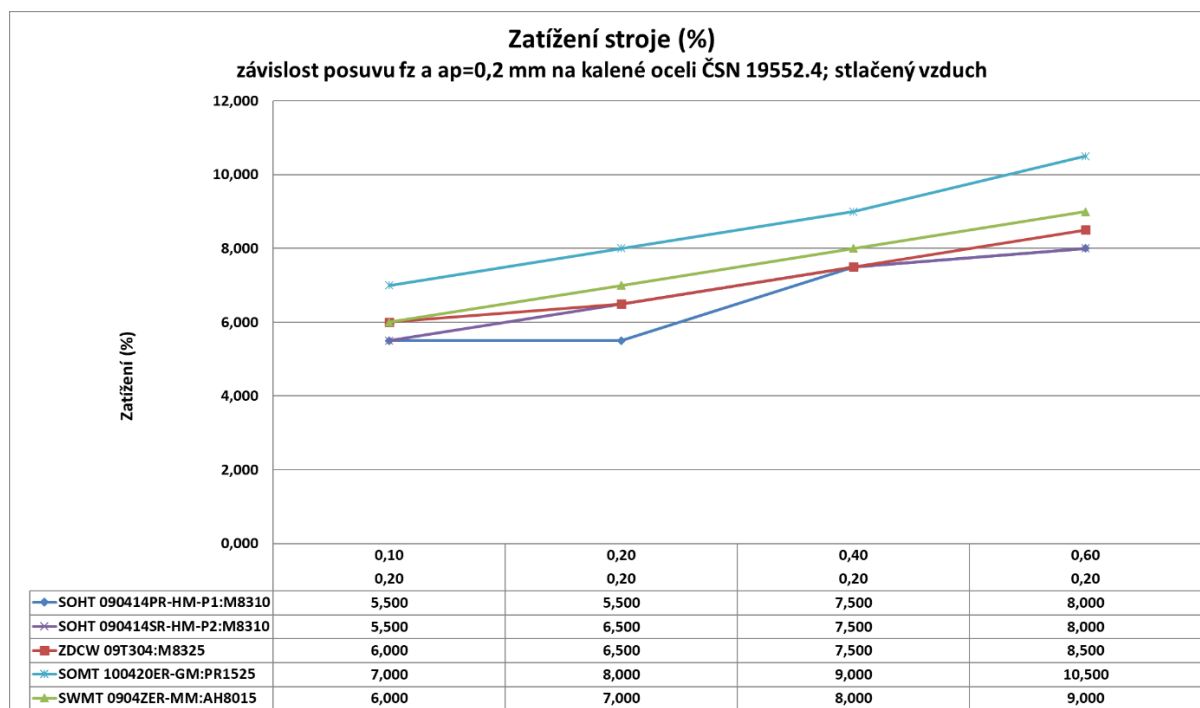
Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1		Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
	$a_p$ [mm]	$f_z$ [mm]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
	0,562	0,440	0,687	0,986
	2,912	2,625	3,643	5,130
Zatížení [%]	5,5	5,5	7,5	8

Naměřené i dopočítané hodnoty pro všechny VBD jsou uvedeny v příloze 1 na stranách 1 až 5. Z vypočtených průměrných hodnot (tab. 6) byly vytvořeny grafy průběhu  $R_a$  (obr. 37), průběhu zatížení stroje (obr. 38) a průběhu Rz (obr. 39).

Na grafu průběhu drsnosti povrchu  $R_a$  v závislosti na posuvu na zub  $f_z$  při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm (obr. 37) lze pozorovat obdobný trend u obou prototypů. Pro všechny posuvy  $f_z$  nebyla překročena hodnota  $R_a = 1 \mu\text{m}$ . Referenční ZDCW09 vykazuje mírně vyšší hodnoty drsnosti, ale pořád se hodnoty pohybují kolem  $R_a = 1 \mu\text{m}$ . U SOMT10 došlo mezi hodnotami posuvu 0,2 mm a 0,4 mm k výraznému nárůstu drsnosti povrchu z  $R_a = 2,049 \mu\text{m}$  na  $R_a = 7,251 \mu\text{m}$ . Tento nárůst není způsoben chybou při měření, protože výsledná hodnota vychází z průměru tří nezávislých měření, která vykazovala podobné výsledky. Při zvýšení posuvu na 0,6 mm dochází ke snížení  $R_a$ . V případě VBD SWMT09 se projevuje téměř lineární růst drsnosti  $R_a$  s rostoucím posuvem. Absolutní hodnoty  $R_a$  jsou však výrazně vyšší než u všech destiček společnosti Dormer Pramet s.r.o.

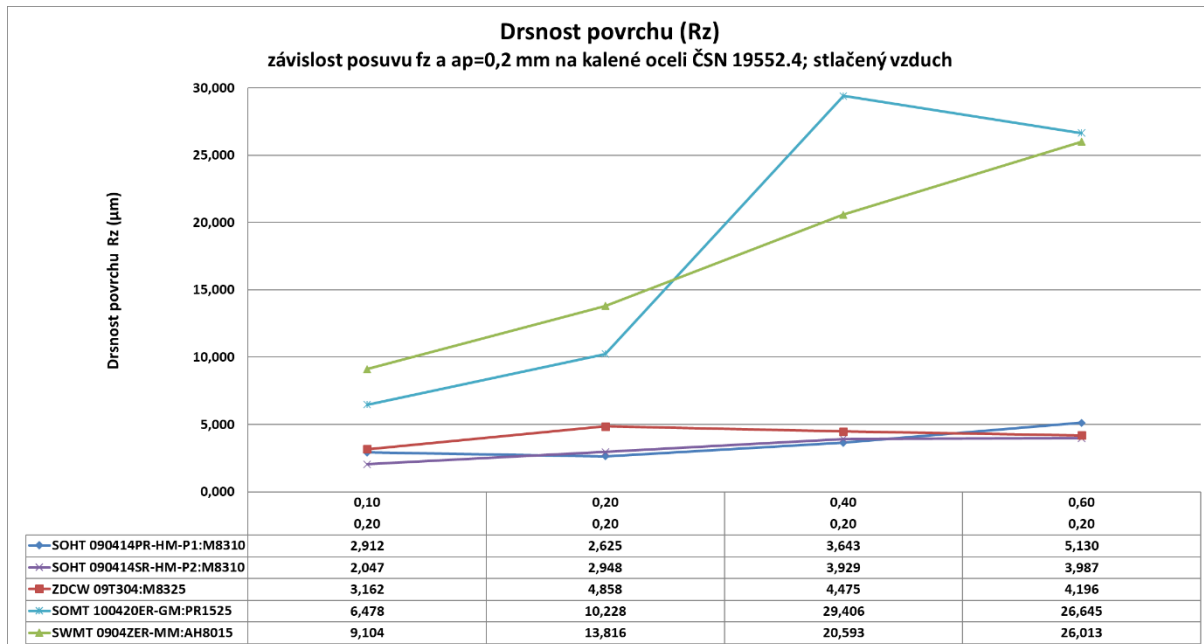

 Obr. 37 Graf průběhu  $R_a$  v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,2 mm.

Z grafu znázorňujícího zatížení stroje (obr. 38) je patrný u všech testovaných VBD mírný rostoucí trend. Nejnižších hodnot zatížení vykazuje prototyp SOHT09-P1, zatímco nejvyšší zatížení bylo zaznamenáno u SOMT10. Je důležité zohlednit, že fréza osazená prototypy byla šestibřitá. Pokud by se zatížení přepočítalo na jeden břit, prototypy by dosahovaly ještě výhodnějších hodnot. Tato skutečnost svědčí o jejich efektivnějším chování při obrábění z hlediska energetických nároků.



Obr. 38 Graf průběhu zatížení stroje v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,2 mm.

Na obr. 39 je znázorněn průběh drsnosti povrchu Rz. Nejlepších výsledků dosahují oba prototypy. Konkrétně u SOHT09-P01 se hodnoty Rz pohybují v rozmezí hodnot 2,5  $\mu\text{m}$  až 5  $\mu\text{m}$ , zatímco u SOHT09-P02 byly naměřeny mírně nižší hodnoty v intervalu od 2  $\mu\text{m}$  do 4  $\mu\text{m}$ . Destička ZDCW09 vykazuje srovnatelné výsledky, s hodnotami Rz pohybujícími se od 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$ . Naopak u destičky SOMT10 došlo mezi posuvy 0,2 mm a 0,4 mm k prudkému nárůstu drsnosti z  $Rz = 10,228 \mu\text{m}$  na  $Rz = 29,406 \mu\text{m}$ . Tento nárůst kopíruje trend pozorovaný u drsnosti Ra. Destička SWMT09 vykazuje přibližně lineární nárůst Rz s rostoucím posuvem a její hodnoty výrazně převyšují výsledky dosažené všemi destičkami společnosti Dormer Pramet s.r.o.


 Obr. 39 Graf průběhu Rz v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,2 mm.

### Druhá série měření

Druhá série bude probíhat pro hloubku řezu  $a_p = 0,5$  mm. Měření bude postupně probíhat pro všech pět VBD. Základní informace jsou v horní části tab. 12. Hodnoty tučně zvýrazněné jsou stanovené nebo dopočítané. Pro SOMT100420ER-GM nebyly naměřeny hodnoty pro posuvy 0,4 mm a 0,6 mm, protože byly již při posuvu 0,2 mm vznikaly nebezpečně vysoké vibrace.

Tab. 7 Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO9-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>608</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>365</b>	<b>730</b>	<b>1459</b>	<b>2189</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	7-8	8-9	11-12	12-13	$D_c$ [mm]	<b>41,9</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,454	0,756	0,603	1,004	$D_{cX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,468	0,937	0,525	1,088	$Z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,241	0,838	0,658	0,972		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,563	3,738	2,621	4,938		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,543	4,377	2,479	5,245		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,862	3,943	3,358	4,025		

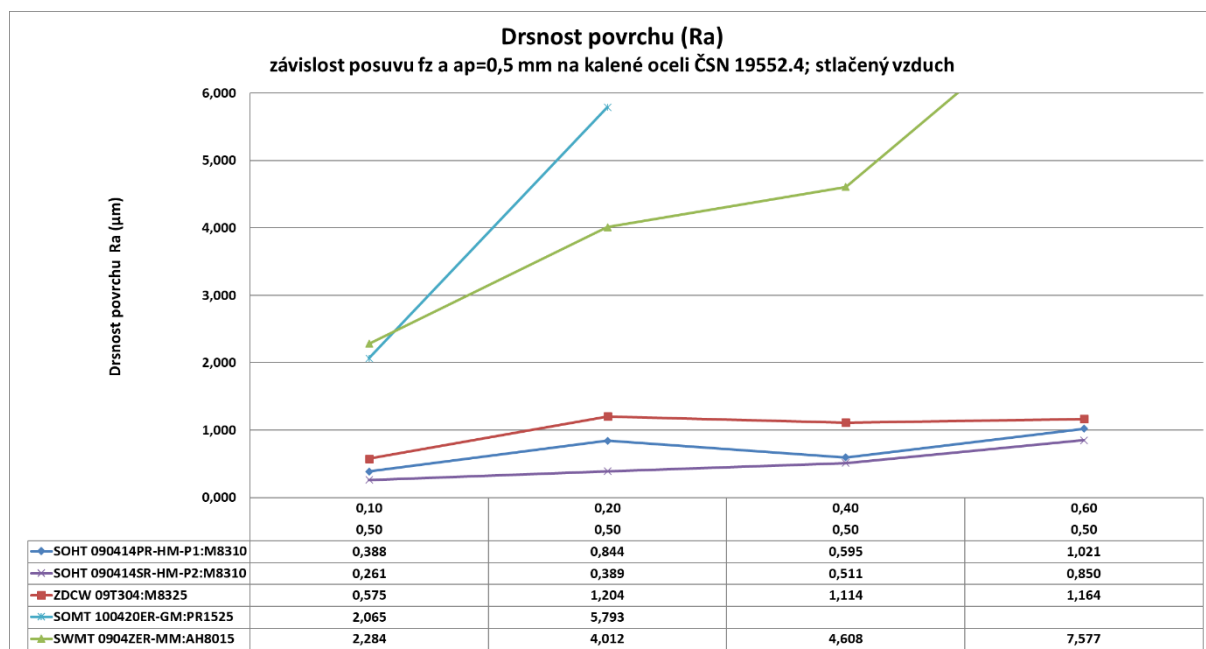
Ze tří naměřených hodnot Ra a Rz (tab. 7) byly dopočítány průměrné hodnoty Ra a Rz (tab. 8). Také byla z naměřeného rozptylu hodnot zatížení vypočtena průměrná hodnota. Vše je zapsáno v tab. 8.

Tab. 8 Vypočtené průměrné hodnoty.

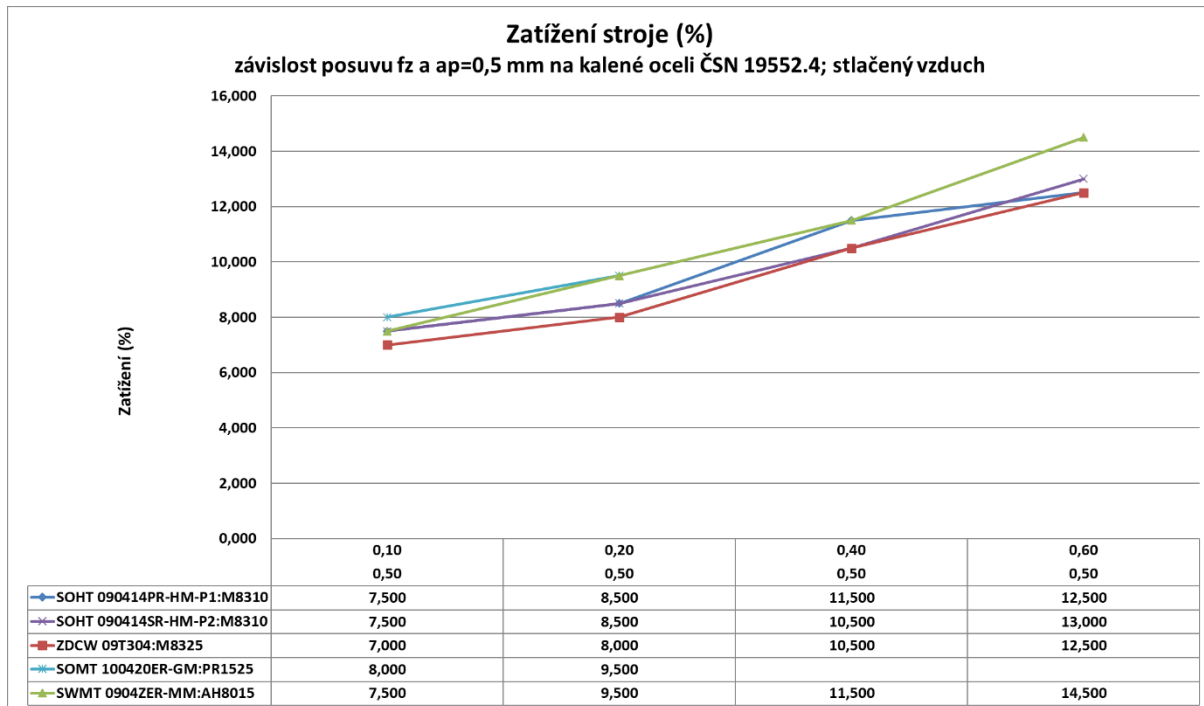
Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310		Materiál: 19552.4; 53 HRC	
	Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1		Rozměr: 300x100x250 [mm]	
			Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,388	0,844	0,595	1,021
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,323	4,019	2,819	4,736
Zatížení [%]	7,5	8,5	11,5	12,5

Naměřené i dopočítané hodnoty pro všechny VBD jsou uvedeny v příloze 1 na stranách 6 až 10. Z vypočtených průměrných hodnot (tab. 8) byly vytvořeny grafy průběhu Ra (obr. 40), průběhu zatížení stroje (obr. 41) a průběhu Rz (obr. 42).

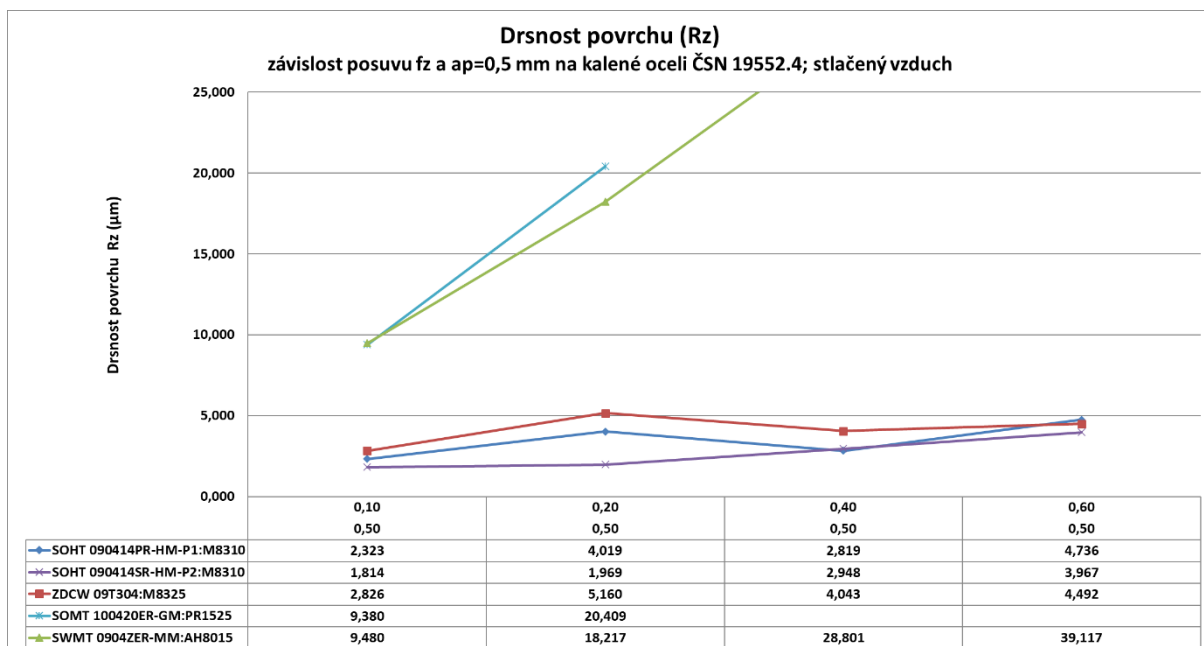
Na grafu průběhu drsnosti povrchu Ra (obr. 40) dosahuje jednoznačně nejlepších výsledků prototyp SOHT09-P2. Ve všech testovaných hodnotách posuvu nepřekročila drsnost Ra hodnotu 1  $\mu\text{m}$ . Mírně horší, avšak stále velmi příznivé výsledky vykazuje i prototyp SOHT09-P1, jehož hodnoty Ra se rovněž pohybují pod hranicí 1  $\mu\text{m}$ . Referenční ZDCW09 dosahuje podobných výsledků, kdy se Ra pohybuje v rozmezí 1,1  $\mu\text{m}$  až 1,2  $\mu\text{m}$  pro posuvy 0,2 mm až 0,6 mm. Oproti tomu obě konkurenční řešení vykazují výrazně horší hodnoty Ra a zřetelně rostoucí trend s narůstajícím posuvem. V kontrastu s tím si všechny VBD společnosti Dormer Pramet s.r.o. udržují stabilní a nízké hodnoty Ra napříč celým testovaným rozsahem posuvů.


 Obr. 40 Graf průběhu Rz v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,5 mm.

Na obr. 41 je zobrazeno zatížení stroje. U všech testovaných VBD je patrný mírně rostoucí trend. Naměřené hodnoty zatížení jsou si vzájemně velmi blízké, přičemž prototypy vykazují v průměru mírně nižší zatížení, pokud se vezme v úvahu oscilace v měření. Při porovnání s ohledem na konstrukci nástroje je nutné opět zohlednit vyšší počet zubů u frézy s prototypy, což po přepočtu na zatížení jednoho břitu posiluje pozitivní hodnocení obou prototypů.


 Obr. 41 Graf průběhu Rz v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,5 mm.

Na grafu průběhu drsnosti povrchu Rz (obr. 42) lze pozorovat obdobný trend jako v předchozím případě Ra. Nejlepších výsledků dosahuje prototyp SOHT09-P2, následovaný prototypem SOHT09-P1, zatímco ZDCW09 vykazuje o něco vyšší hodnoty. Všechny tři nástroje z produkce Dormer Pramet s.r.o. se však pohybují pod hranicí  $Rz = 5 \mu\text{m}$  a vykazují stabilní výsledky napříč měřeným rozsahem posuvů. Konkurenční VBD vykazují zcela odlišný trend, hodnoty Rz u nich s rostoucím posuvem výrazně narůstají. U obou těchto VBD byl zaznamenán růst z hodnot přibližně  $9 \mu\text{m}$  až na maximum kolem  $39 \mu\text{m}$ , což poukazuje na výrazně nižší kvalitu obrobenej plochy při vyšších posuvech.


 Obr. 42 Graf průběhu Rz v závislosti na  $f_z$  při  $a_p$  0,5 mm.

## 6.4 Rozbor třísek testovaných prototypů

U třísek vzniklých při zkouškách obrábění při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm (obr. 43) je vidět spirálovitý tvar, malá délka a tmavé fialovo modré zabarvení. Tvar je kompaktní a navinutí pevné. Díky tomu dochází k efektivnímu odvodu z místa řezu, nedochází k namotávání a je možný snadný sběr.



Obr. 43 Třísky vzniklé při hloubce řezu  $a_p$  0,2 mm.

Na obr. 44 jsou zobrazeny třísky vzniklé při hloubce řezu  $a_p = 0,5$  mm. Tvar je také spirálový, ale ve srovnání s třískami vzniklými při hloubce řezu  $a_p = 0,2$  mm je vinutí volnější a jsou delší. I tak nedochází k namotávání a třísky jsou dobře odváděny a nezpůsobují komplikace při řezu ani v pracovním prostoru. Barva je více tmavě modrá, což odpovídá vyššímu teplotnímu zatížení při odběru většího objemu materiálu.



Obr. 44 Třísky vzniklé při hloubce řezu  $a_p$  0,5 mm.

Lze říci, že třísky pro obě hodnoty posuvu mají vhodný tvar, velikost a nezpůsobují komplikace v místě řezu ani v pracovním prostoru. Také jsou vhodné pro uskladňování a likvidaci.

## 6.5 Zkoušky trvanlivosti

Zkoušky trvanlivosti budou probíhat na obráběcím stroji MCV 1270 o výkonu 28 kW ve 100 % technickém stavu. Obráběný materiál bude kalená ocel podle materiálové normy označená X37CrMoV5-1 skupiny H o tvrdosti 55 HRC. Testované VBD s nástroji byly popsány v kapitolách 2 Analýza vybraných typů rezných nástrojů a 5 Výroba prototypů. Rezné podmínky byly stanoveny pro všechny VBD stejné a jsou uvedeny v kapitole 3.3 Návrh typu experimentu. Kritéria opotřebení byla stanovena na  $VB_b = 0,3$  mm (opotřebení hlavního břitu),  $VB_c = 0,6$  mm (opotřebení špičky hlavního břitu) a  $VB_2 = 0,25$  mm (opotřebení vedlejšího břitu).

V rámci zjednodušení popisu bylo každé VBD přiděleno písmeno.

- ZDCW09T304:M8325 – označení A
- SOHT090414PR-HM-P1:M8310 – označení B
- SOHT090414SR-HM-P2:M8310 – označení C
- SOMT100420ER-GM:PR1525 – označení D
- SWMT 0904ZER-MM:AH8015 – označení E

Číslo za písmenem určuje číslo vzorku. Testováno bylo pět vzorků od každé VBD a pro srovnání byly vždy vybrány dva vzorky s dosaženými nejreprezentativnějšími hodnotami. V tab. 9 a tab. 10 jsou uvedeny naměřené hodnoty opotřebení VBb v mm pro vykreslení průběhů opotřebení.

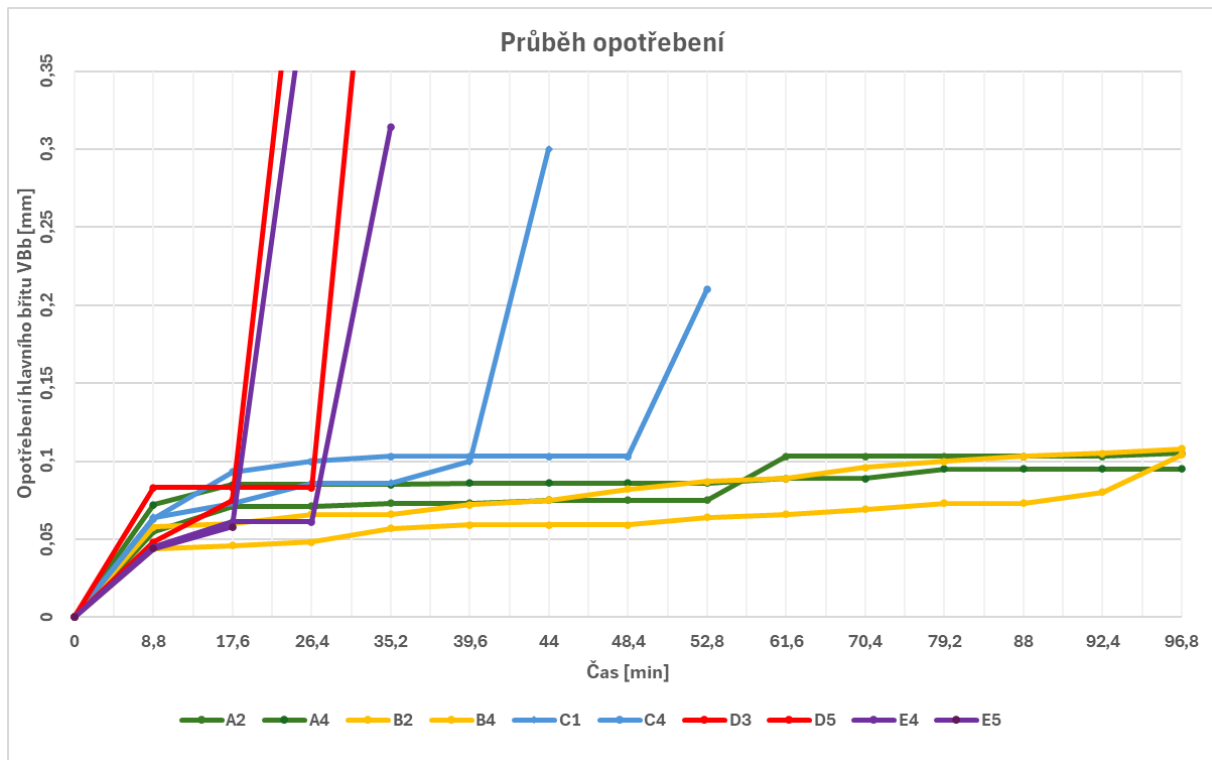
Tab. 9 Naměřené hodnoty opotřebení hlavního bříty.

Čas měření [min]		8,8	17,6	26,4	35,2	39,6	44,0	48,4
A2	VBb [mm]	0,055	0,071	0,071	0,073	0,073	0,075	0,075
A4	VBb [mm]	0,072	0,085	0,085	0,085	0,086	0,086	0,086
B2	VBb [mm]	0,044	0,046	0,048	0,057	0,059	0,059	0,059
B4	VBb [mm]	0,058	0,060	0,066	0,066	0,072	0,075	0,082
C1	VBb [mm]	0,064	0,073	0,086	0,086	0,100	0,300	-
C4	VBb [mm]	0,063	0,093	0,100	0,103	0,103	0,103	0,103
D3	VBb [mm]	0,048	0,075	0,524	-	-	-	-
D5	VBb [mm]	0,083	0,083	0,083	0,594	-	-	-
E4	VBb [mm]	0,045	0,061	0,061	0,314	-	-	-
E5	VBb [mm]	0,044	0,058	0,428	-	-	-	-

Tab. 10 Naměřené hodnoty opotřebení hlavního bříty.

Čas měření [min]		52,8	61,6	70,4	79,2	88,0	92,4	96,8
A2	VBb [mm]	0,075	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,105
A4	VBb [mm]	0,086	0,089	0,089	0,095	0,095	0,095	0,095
B2	VBb [mm]	0,064	0,066	0,069	0,073	0,073	0,080	0,104
B4	VBb [mm]	0,087	0,089	0,096	0,100	0,103	0,105	0,108
C1	VBb [mm]	-	-	-	-	-	-	-
C4	VBb [mm]	0,210	-	-	-	-	-	-
D3	VBb [mm]	-	-	-	-	-	-	-
D5	VBb [mm]	-	-	-	-	-	-	-
E4	VBb [mm]	-	-	-	-	-	-	-
E5	VBb [mm]	-	-	-	-	-	-	-

Z naměřených hodnot z tab. 9 a tab. 10 byl vytvořen graf průběhu opotřebení (obr. 45). U vzorků D a E je vidět podobný průběh s mírně lepšími výsledky u E. Prototyp P2 (vzorek C) dosáhl lepších výsledků, než konkurenční řešení a došlo k dosažení maximální dovolené hodnoty VBb ve velkém rozmezí časů. Většina se pohybuje v rozmezí 40 až 55 minut, ale vzorek C2 vydržel až do 96,8 minut, kdy ale došlo k destrukci VBD. Nejlepších výsledků dosáhly vzorky A a B, které dosáhly hodnot opotřebení VBb okolo 0,1 mm po 96,8 minutách obrábění a zkoušky byly na této hodnotě ukončeny. V celém průběhu hodnot je vidět, že prototyp P1 dosahoval nižších hodnot opotřebení, ale konečné doby do kritického poškození nebyly zjištěny.



Obr. 45 Graf průběhu opotřebení.

Pro každý vzorek byly také naměřeny přesné časy trvanlivosti T (tab. 11), které říkají za kolik minut došlo u vzorku k překročení některé z kontrolovaných hodnot. Z naměřených časů minimálně dvou reprezentativních vzorků byl následně dopočítán průměrný čas trvanlivosti, řezivost nástroje a rozptyl hodnot.

Tab. 11 Naměřené a vypočtené hodnoty.

VBD:materiál	Vzorek	T [min]	Průměr [min]	Řezivost [%]	Rozptyl [%]
ZDCW09T304:M8310	A2	96,8	96,8	100	-
	A4	96,8			
SOHT090414PR-HM-P1:M8310	B2	96,8	96,8	100	-
	B4	96,8			
SOHT090414SR-HM-P2: M8310	C1	40,6	45,6	47	11
	C4	50,6			
SOMT100420ER-GM:PR1525	D3	11,9	14,2	15	15,5
	D5	16,4			
SWMT0904ZER-MM:AH8015	E4	16,4	14,2	15	15,5
	E5	11,9			

Nejlepších výsledků dosáhly vzorky A a B, které nedosáhly kritické hodnoty u žádného z měřených kritérií ani po 96,8 minutách frézování. Z toho důvodu byly u těchto vzorků zkoušky na tomto čase ukončeny. Prototyp P2 (vzorek C) vydržel průměrně 45,6 minut a obě konkurenční řešení dosáhly podobných výsledků v průměru 14,2 minut.

V tab. 12 jsou zobrazeny typy poškození vzorků, když dosáhly hranice trvanlivosti. Oba vzorky A a B byly ve všech případech při ukončení testu s funkční řeznou hranou a bylo by možné dále pokračovat v testech. Oba vzorky prototypu P2 skončily s vyštípnutou řeznou hranou.

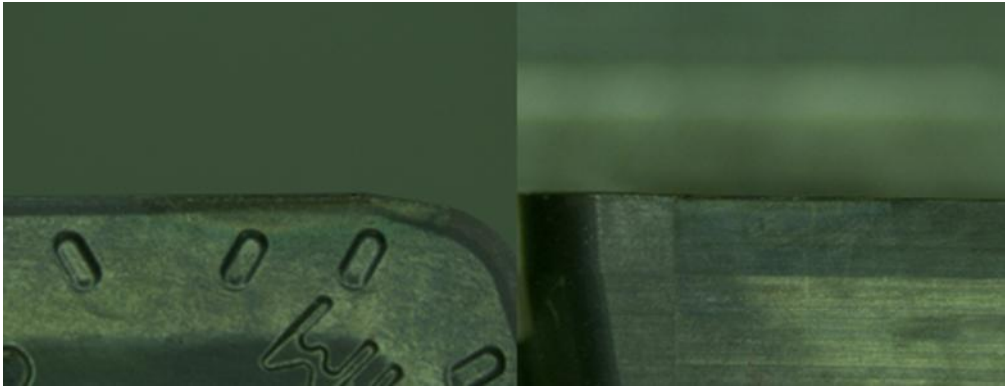
Tab. 12 Typy poškození vzorků.

Výrobce	VBD:materiál	Vzorek	Typ poškození
Dormer Pramet s.r.o.	ZDCW09T304:M8310	A2	Řezná hrana funkční
		A4	Řezná hrana funkční
Dormer Pramet s.r.o.	SOHT090414PR-HM-P1:M8310	B2	Řezná hrana funkční
		B4	Řezná hrana funkční
Dormer Pramet s.r.o.	SOHT090414SR-HM-P2: M8310	C1	Vyštípnutá řezná hrana
		C4	Vyštípnutá řezná hrana
Kyocera Unimerco Tooling s.r.o.	SOMT100420ER-GM:PR1525	D3	Vylomený hlavní břit
		D5	Vylomený hlavní břit
Tungaloy Czech s.r.o.	SWMT0904ZER-MM:AH8015	E4	Vylomený hlavní břit
		E5	Vylomený hlavní břit

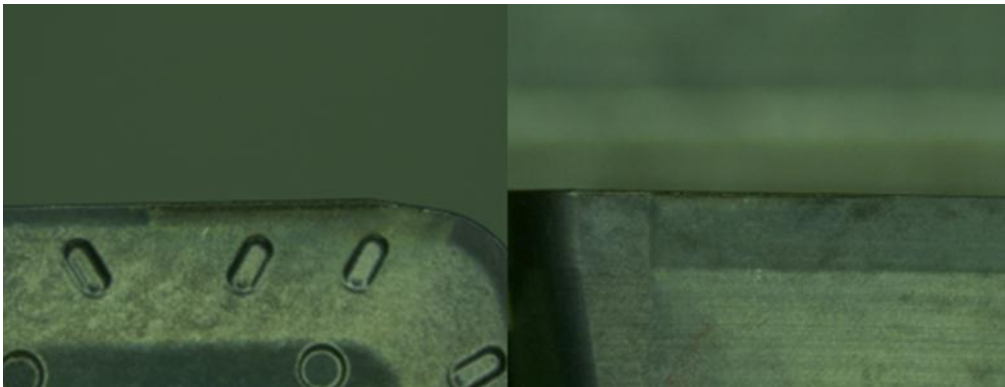
Pro srovnání byly vybrány fotky vzorků v přibližně podobných časech. Na obr. 46, obr. 47 a obr. 48 jsou zobrazeny vzorky A2, B2 a C2 v čase 13,2 min. U všech je vidět malé abrazivní opotřebení, které vede ke ztrátě ostrosti břitu. V oblasti řezné hrany jsou vidět tmavší stopy od teplotního ovlivnění povrchu. Celkové opotřebení je v současném stavu malé a VBD mohou bez problémů dále pokračovat v obrábění.



Obr. 46 Vzorek A2 ve 13,2 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.

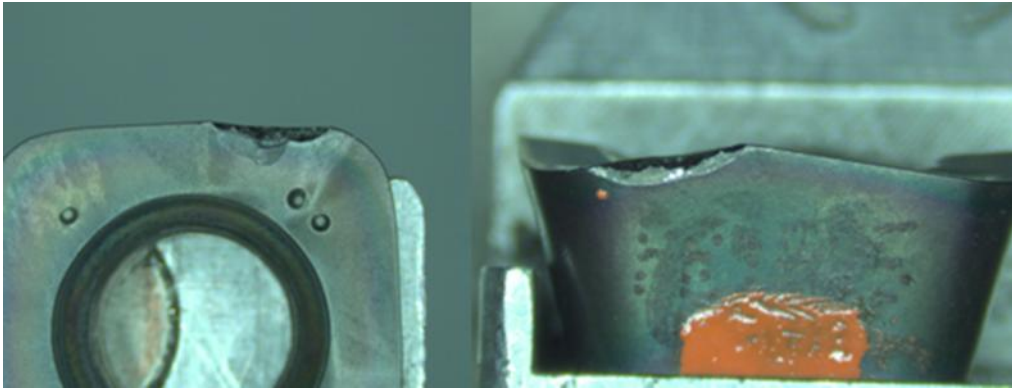


Obr. 47 Vzorek B2 ve 13,2 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.



Obr. 48 Vzorek C2 v 13,2 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.

Vzorky D a E dosáhly průměrně stejného času opotřebení 14,2 min. Konkrétně na obr. 49 je vidět vzorek D3, kde došlo k vylomení hlavního břitu v 11,9 min. Na obr. 50 je vzorek E4, kde také došlo k vylomení hlavního břitu, a to v čase 16,4 min. Pro oba případy lze konstatovat, že došlo ke kritickému poškození a již není možné pokračovat v obrábění.

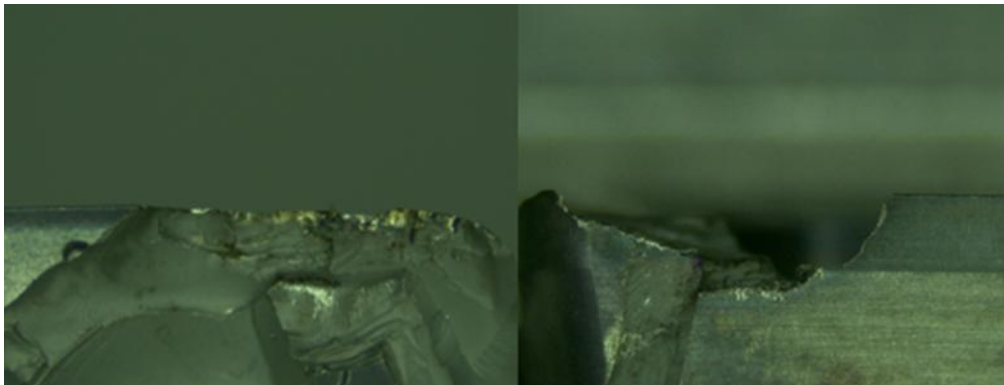


Obr. 49 vzorek D3 vylomený hlavní břit v 11,9 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.



Obr. 50 Vzorek E4 vylomený hlavní břit v 16,4 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.

Pro vzorek C2 bylo ještě provedeno kontrolní zrychlené měření trvanlivosti. V čase 96,8 min došlo k celkové destrukci VBD (obr. 51). V tomto stavu je celá VBD nepoužitelná a není možné ani přepnutí na nový břit. Toto měření bylo upřesňující pro srovnání výsledků obou prototypů.



Obr. 51 Vzorek C2 destrukce v 96,8 min, vlevo čelo, vpravo hřbet.

## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou zhodnoceny celkové dosažené výsledky v rámci celé bakalářské práce.

Byla testována stávající geometrie ZDCW09 a návrhy tří prototypů v prostředí AdvantEdge pro získání přibližných hodnot ještě před výrobou prototypů. Po 2D simulacích byla vyřazena navržená geometrie s nejhrošími výsledky a pro dvě lepší geometrie byly provedeny 3D simulace pro jejich vylepšení.

Z grafu maximální teploty v čase bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dosáhly ZDCW09 a P01. Největší teplotní ovlivnění břitu je vidět u P02, kdy dochází k ovlivnění na největší ploše, ale i do největší hloubky. Graf maximální teploty v čase toto ještě potvrzuje. Nejvyšší hodnoty má P02, P03 má ze začátku podobné hodnoty jako P02, ale ke konci tolik nerostou a nejnižší hodnoty má ZDCW09 a P01 s podobným průběhem.

Na grafech zobrazujících působení sil v průběhu řezu je vidět, že nejvyšší síly působí současně na ZDCW09 a P02, P01 je zatížena mírněji a nejnižší zatížení je na P03. Síly v ZDCW09 a P01 mírně oscilují, ale i tak lze říct, že v některých místech působí na ZDCW09 i o 80 N vyšší síly než na P03.

Z dosavadních výsledků bylo zjištěno, že z pohledu teplotního ovlivnění břitu dosáhl nejlepších výsledků prototyp P01, z pohledu silového zatížení má nejlepší výsledky P03. U prototypu P02 bylo rozhodnuto, že nižší výrobní náklady nepřevyšují horší odolnost a vlastnosti. Z tohoto důvodu byla vyřazena geometrie P02 z dalších testů.

Teplotní obrys ukazuje vyšší teplotní ovlivnění u P03 v některých místech i o 50 °C vyšší než u P01. Celkově je vidět větší souvislé plochy na P03 s vyšší teplotou. Z tlakového obrazu je zase patrné, že na větší ploše je více zatížen břit P03, ale na břitu P01 je více kritických míst s hodnotami tlaku až 42 000 MPa, zatímco u P03 jsou maximální tlaky přibližně 30 000 MPa. Výsledky ze 3D simulací v AdvantEdge byly ještě využity k úpravě zaoblení řezné hrany.

Podle výsledků zkoušek v AdvantEdge bylo rozhodnuto, že budou vyrobeny prototypy P01 a P03. Na základě geometrie byl prototyp P01 pojmenován SOHT090414PR-HM-P1 a prototyp P03 byl pojmenován SOHT090414SR-HM-P2.

Před zkouškami obrábění bylo mimo jiné naměřeno házení použitých fréz. Oba prototypy byly použity na nové fréze, která je v současné době ve stavu testování. V porovnání se současným řešením je vidět snížení radiálního házení o 51 % až 72 % a také snížení čelního házení o 50 % až 70 %. Nižší hodnoty házení znamenají rovnoměrnější zatížení všech břitů a nepřetěžování jedné VBD. Zároveň dochází ke snížení generovaných vibrací a hluku.

Během zkoušek obrábění byly měřeny hodnoty drsnosti povrchu Ra, Rz a zatížení stroje. Sledovány byly také vibrace, přičemž jejich hodnocení bylo prováděno pouze subjektivně. Kritických hodnot dosáhla jen VBD SOMT10 od Kyocery, kdy byly pro hloubku řezu ap 0,5 mm a hodnoty posuvů 0,4 mm a 0,6 mm zkoušky zastaveny.

Hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pro obě hloubky řezu prokazují, že obě konkurenční řešení dosahují výrazně horších hodnot než ZDCW09 i oba prototypy. Pro SOMT10 se při ap 0,2 mm hodnoty Ra pohybovaly pro vyšší posuvy okolo 7  $\mu\text{m}$  a Rz 29  $\mu\text{m}$  a pro vyšší hloubku řezu nebyly kvůli výrazně zvýšeným vibracím naměřeny. U SWMT09 byly hodnoty také vysoké, pouze průběh byl více lineární. ZDCW09 se pohybuje pro Ra okolo 1  $\mu\text{m}$  a pro Rz kolem 5  $\mu\text{m}$ . Oba prototypy dosahují dokonce ještě lepších výsledků.

Při srovnání zatížení stroje jsou vidět u všech lineární závislosti podobných hodnot. Pro obě hodnoty hloubky řezu mají ale vyšší zatížení konkurenční VBD, konkrétně o + 1 % zatížení.

Velikost, tvar a zabarvení třísek byly zkoumány pouze u prototypů. Pro obě hodnoty hloubek řezu mají třísky menší spirálovitý tvar a pevné navinutí, což je vhodné ke skladování

a recyklaci. Z fotek fréz v záběru je vidět, že nedochází k namotávání a třísky nezpůsobují komplikace v místě řezu.

Zkoušky trvanlivosti jsou jedním z nejdůležitějších faktorů. Čas, který VBD vydrží do kritického poškození při odebrání stejného množství materiálu určuje životnost, což je s cenou nejdůležitější faktor při volbě VBD. Obě konkurenční řešení dosáhly podobného průměrného času 14,2 minut. Prototyp P2 si vedl lépe s průměrným časem 45,6 minut. Prototyp P1 ani ZDCW09 nedosáhly sledované mezní hodnoty opotřebení hlavního břitu  $VBb = 0,3$  mm, a proto byly testy ukončeny při dosažení stanovené doby obrábění 96,8 min. Z grafu průběhu opotřebení je však patrné, že v celém průběhu měření dosahuje P1 nejnižších hodnot opotřebení ze všech sledovaných nástrojů.

Další způsob vyhodnocení je sledování typů opotřebení. U konkurenčních VBD došlo ve všech případech k vylomení hlavního břitu. Prototyp P1 i ZDCW09 nedosáhly kritického opotřebení, ale lze sledovat tmavší stopy na břitu od teplotního ovlivnění a mírné abrazivní opotřebení, což je optimální způsob opotřebení díky své předvídatelnosti.

Na základě všech získaných výsledků lze konstatovat, že nejlepší celkových výkonových parametrů dosáhl prototyp SOHT090414PR-HM-P1:M8310. Hodnoty drsnosti povrchu byly obdobné jako u varianty P2 v rámci akceptovatelného rozptylu, avšak z hlediska trvanlivosti a mechanismů opotřebení dosáhl výrazně lepších výsledků.

Tab. 13 Ekonomické zhodnocení VBD.

Ceny VBD za 1 ks	
Označení	Cena bez DPH
ZDCW09T304:M8310	324 CZK
SOHT090414PR-HM-P1:M8310	389 CZK
SOHT090414SR-HM-P2: M8310	389 CZK
SOMT100420ER-GM:PR1525	478 CZK
SWMT0904ZER-MM:AH8015	300 CZK
Cena odpovídající jednomu břitu VBD	
ZDCW09T304:M8310	81 CZK
SOHT090414PR-HM-P1:M8310	97,25 CZK
SOHT090414SR-HM-P2: M8310	97,25 CZK
SOMT100420ER-GM:PR1525	119,5 CZK
SWMT0904ZER-MM:AH8015	75 CZK
Průměrný čas do hodnoty $VBb = 0,1$ mm	
Označení	T [min]
ZDCW09T304:M8310	79,2 min
SOHT090414PR-HM-P1:M8310	88 min
SOHT090414SR-HM-P2: M8310	33 min
SOMT100420ER-GM:PR1525	30,8 min
SWMT0904ZER-MM:AH8015	30,8 min
Cena za 1 minutu obrábění na jeden břit	
ZDCW09T304:M8310	1,023 CZK
SOHT090414PR-HM-P1:M8310	1,105 CZK
SOHT090414SR-HM-P2: M8310	2,947 CZK
SOMT100420ER-GM:PR1525	3,880 CZK
SWMT0904ZER-MM:AH8015	2,435 CZK

Ekonomické zhodnocení (tab. 13) bylo realizováno na základě porovnání ceny za 1 minutu obrábění jednoho břitu, což je relevantní ukazatel pro vyhodnocení nákladové efektivity v průmyslové praxi. Tento parametr zohledňuje kombinaci pořizovací ceny VBD a její životnosti z naměřených hodnot opotřebení. Pro možnost srovnání všech VBD byl sledovaný parametr opotřebení VBb snížen na hodnotu 0,1 mm.

I když byly v testech použity různé frézy, jejich pořizovací cena byla v rámci tohoto srovnání zanedbána. Důvodem je skutečnost, že ekonomický model v oblasti vysokoposuvového frézování je založen především na základě ceny VBD, nikoli samotných frézových těles. Z tohoto důvodu byly do hodnocení zahrnuty výhradně ceny VBD.

Ceny použité pro výpočty i výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 13. U prototypů P1 a P2 byla cena odhadnuta zaměstnanci Dormer Pramet s.r.o. a ostatní informace byly získány z interní databáze společnosti Dormer Pramet s.r.o.

Z vypočtených hodnot cen za 1 minutu obrábění na jeden břit byl vytvořen sloupcový graf (obr. 52). Z výsledného grafu cenového srovnání je patrné, že nejnižší jednotkové náklady vykazuje referenční destička ZDCW09, následovaná prototypem P1, jehož navýšení ceny oproti referenci zůstává stále v ekonomicky přijatelném rozmezí. Tyto dvě varianty tak dosahují nejlepšího poměru ceny a výkonu. Naopak nejhůře z porovnávaných řešení dopadla VBD SOMT10, a to kvůli kombinaci nejvyšší jednotkové ceny a výrazně podprůměrné trvanlivosti břitu. Destička SWMT09 vykázala obdobně nepříznivou trvanlivost, avšak její výslednou ekonomickou efektivitu částečně zlepšuje nejnižší cena ze všech testovaných VBD.



Obr. 52 Graf srovnání cen 1 minutu obrábění na jeden břit.

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a otestovat novou vyměnitelnou břitovou destičku pro vysokoposuvové frézování tvrdých materiálů, která by byla v ideálním případě po dalších testech zařazena do portfolia produktů společnosti Dormer Pramet s.r.o. a v budoucnu nahradila současné řešení ZDCW09T304.

Úvodní část práce se věnovala teoretickému rozboru řešené problematiky, a to především principům vysokoposuvového frézování, vlastnostem nástrojových materiálů a mechanismům opotřebení. Následně byla provedena technická analýza a srovnání konkurenčních produktů se současným řešením společnosti Dormer Pramet s.r.o., která sloužila také jako podklad pro návrh vlastních řešení. V samostatné kapitole byly definovány podmínky testování a popsáno použité technologické vybavení včetně charakteristik obráběného materiálu.

V rámci vývoje byly navrženy tři odlišné prototypy s cílem najít optimální geometrii. Všechny návrhy byly podrobeny simulacím v softwaru AdvantEdge, které umožnily vyhodnotit především řezné síly, distribuci teplot a tlaku. Na základě výsledků simulací byly vybrány dva prototypy, které byly následně vyrobeny a otestovány v reálných podmínkách.

Součástí experimentální části bylo měření házení fréz, kontrola tvrdosti obráběného materiálu, sledování zatížení stroje, měření parametrů drsnosti Ra a Rz, analýza třísek a provedení trvanlivostních zkoušek. V rámci těchto zkoušek byly zaznamenány časy do kritického poškození břitu a zkoumány dominantní mechanismy opotřebení.

Současné řešení společnosti Dormer Pramet s.r.o. i oba vyrobené prototypy dosáhly v testech lepších výsledků než vybrané konkurenční nástroje, a to zejména z hlediska kvality obrobeného materiálu a životnosti břitu. Nejlepších celkových výsledků dosáhl prototyp P1 a to z následujících důvodů:

- Nejnižší opotřebení ze všech testovaných nástrojů – zkoušky trvanlivosti byly ukončeny po 96,8 minutách, přičemž opotřebení hlavního břitu dosáhlo pouze 0,106 mm (kritická hodnota 0,3 mm).
- Dominantní abrazivní mechanismus opotřebení – umožňuje dobrou předvídatelnost a stabilní chování nástroje během celého testu.
- Výborná kvalita obrobeného povrchu – dosažené hodnoty drsnosti byly stabilně pod hodnotami Ra = 1  $\mu$ m a Rz = 5  $\mu$ m.
- Vhodný tvar vznikajících třísek – spirálovitý a kompaktní tvar bez narušení oblasti řezu zajišťuje plynulý odvod třísky.
- Výrazné snížení házení při použití nové frézy – radiální házení bylo sníženo o 51 % až 72 %, čelní házení o 50 % až 70 %, což pozitivně ovlivnilo životnost nástroje.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že cíle bakalářské práce byly splněny. Byly navrženy a ověřeny nové konstrukční varianty VBD s potenciálem praktického využití a přímého přínosu pro sortiment společnosti Dormer Pramet s.r.o.

Po ukončení této práce bude vývoj dále pokračovat mimo akademický rámec. Plánováno je testování prototypů při obrábění oceli v měkkém stavu a litiny, a následně i ověřovací zkoušky u vybraných zákazníků. V případě potvrzení dosavadních výsledků a zájmu ze strany zákazníků může v budoucnu dojít k zařazení prototypu P1 do sériové výroby a postupnému nahrazení současného řešení.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TUNGALOY. *High-Feed milling solutions*. [online]. [cit. 2025-03-12]. 2020. Dostupné z: [https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/fl\\_highfeed.pdf](https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/fl_highfeed.pdf).
  2. DORMER PRAMET s.r.o. *Teorie obrábění odborník*. 2000. Šumperk. Dormer Pramet s.r.o.
  3. SANDVIK COROMANT. *Teorie pro frézování*. 2015. SANDVIK COROMANT
  4. SANDVIK:COROMANT. *Face milling*. [online]. Sandvik Coromant. C2000-2012. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/facemilling>. [cit. 2025-04-13].
  5. SANDVIK:COROMANT. *Cutting tool materials*. [online]. Sandvik Coromant. C2000-2012. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/materials/cutting-tool-materials>. [cit. 2025-02-07].
  6. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje, Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI*. [online]. Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf). [cit. 2025-02-07].
  7. HUMÁR, Anton. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie"*. [online]. Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). [cit. 2025-02-07].
  8. *Tool wear: Wear on cutting edges*. [online]. Sandvik Coromant. C2000-2012. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/engb/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. [cit. 2025-04-13].
  9. DORMER PRAMET s.r.o. *About us*. [online]. Dormer Pramet s.r.o. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/about-us>. [cit. 2025-04-13].
  10. DORMER PRAMET s.r.o. *Our productions*. [online]. Dormer Pramet s.r.o. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/our-productions>. [cit. 2025-04-13].
  11. SIEMENS *Software NX CAD*. [online]. Siemens. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/cad-online/>. [cit. 2025-04-14].
  12. ADVANTEDGE. *ThirdWave*. [online]. ADVANTEDGE Dostupné z: <https://thirdwavesys.com/machining-modeling/advancedge/>. [cit. 2025-04-15].
  13. ADVANTEDGE *v8.0 release*. [online]. ADVANTEDGE. Dostupné z: <https://thirdwavesys.com/advancedge-v8-0-release/>. [cit. 2025-04-15].
  14. TECPLOT. *Tecplot 360*. [online]. TECPLOT. Dostupné z: <https://tecplot.com/products/tecplot-360/>. [cit. 2025-04-15].
  15. DORMER PRAMET s.r.o. *50A05R-SMOZD09-C*. [online]. Dormer Pramet. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/7049098>. [cit. 2025-04-15].
  16. DORMER PRAMET s.r.o. *ZDCW 09T304:M8325*. [online]. Dormer Pramet. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/6756015>. [cit. 2025-04-15].
  17. DORMER PRAMET s.r.o. *ZDCW 09T304:M8310*. [online]. Dormer Pramet. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/6756270>. [cit. 2025-04-15].
  18. TUNGALOY. *MILLQFEED*. [online]. TUNGALOY. 2024. Dostupné z: [https://catalog.tungaloy.com/TungaloyDXF/datafile/PDF\\_Files\\_M\\_EN/TR502.pdf](https://catalog.tungaloy.com/TungaloyDXF/datafile/PDF_Files_M_EN/TR502.pdf). [cit. 2025-04-17].
-

- 
19. TUNGALOY. *TXSW09*. [online]. TUNGALOY. Dostupné z: <https://catalog.tungaloy.com/Family.aspx?fnum=2261&mapp=ML&app=553&GFSTYP=m>. [cit. 2025-04-15].
  20. TUNGALOY. *SWMT0904ZER-MM*. [online]. TUNGALOY. 2025. Dostupné z: <https://catalog.tungaloy.com/Item.aspx?cat=6797091&fnum=2262&mapp=ML&GFSTYP=M&srch=1>. [cit. 2025-04-15].
  21. KYOCERA. *MFH - High Efficiency and High Feed Cutter*. [online]. KYOCERA. 2015. Dostupné z: <https://asia.kyocera.com/products/cuttingtools/wpcontent/uploads/2015/03/CP321-2EN-MFH.pdf>. [cit. 2025-04-18].
  22. KYOCERA. *MFH050R-10-5T-M*. [online]. KYOCERA. 2022. Dostupné z: <https://www.kyoceraunimerco.com/en-global/tools/metal/milling/indexable-mills/high-feedmills/mfh-mini/M51450A55-THN07671>. [cit. 2025-04-18].
  23. KYOCERA. *SOMT100420ER-GM PR1525*. [online]. KYOCERA. 2022. Dostupné z: <https://www.kyocera-unimerco.com/en-global/M410450J-TLB05607>. [cit. 2025-04-18].
  24. DIJET. *Indexable tools*. [online]. DIJET. 2018. Dostupné z: [https://dijet.de/download/P19591-1\\_C\\_Indexable%20Tools.pdf](https://dijet.de/download/P19591-1_C_Indexable%20Tools.pdf). [cit. 2025-04-18].
  25. BOEHLERIT. *Fraeskatalog Milling catalogue*. [online]. BOEHLERIT. Dostupné z: [https://www.boehlerit.com/fileadmin/user\\_upload/PDF/Fraeskatalog\\_Milling\\_catalogue.pdf](https://www.boehlerit.com/fileadmin/user_upload/PDF/Fraeskatalog_Milling_catalogue.pdf). [cit. 2025-04-19].
  26. BOLZANO. *Materiálový list oceli X37CrMoV5-1*. [online]. Bolzano. 2020. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojoveoceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-tepla/materialove-listy/materialovy-listoceli-x37crmov5-1>. [cit. 2025-04-19].
  27. MOUČKA, Jan. *HFC frézování kalených ocelí*. Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2023. Dostupné také z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/150832/MOU0035\\_FS\\_B0715A270011\\_S09\\_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/150832/MOU0035_FS_B0715A270011_S09_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
  28. ZOLLER. *SmartCheck*. [online]. ZOLLER. Dostupné z: <https://www.zoller.info/us/products/inspection-measuring/universalmeasuring-machines/smartcheck>. [cit. 2025-04-19].
  29. SCREENING EAGLE. *Equotip*. [online]. Screening eagle. 2024. Dostupné z: <https://www.screeningeagle.com/en/product/metal/equotip>. [cit. 2025-05-16].
  30. ZWICK ROELL. *Stanovení tvrdosti Leeb podle ISO 16859, ASTM A965*. [online]. Zwick Roell. 2024. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/cs/oblasti-pouziti/kovovematerialy/normy-pro-zkousky-kovovych-materialu/stanoveni-tvrdosti-leebpodle-iso-16859-astm-a965/>. [cit. 2025-05-16].
  31. JENOPTIK. *Waveline W5*. [online]. Jenoptik. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/produkty/mereni-drsnosti-kontury/waveline-w5/>. [cit. 2025-04-19].
  32. ADVANTEDGE *ThirdWave simulation report*. 2025. ADVANTEDGE
  33. *Jak se vyrábí vyměnitelné břitové destičky (video)*. [online]. Konstrukter.cz. 2019. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-se-vyrabi-vymenitelne-britovedesticky-video/>. [cit. 2025-05-17].
-

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
$a_e$	radiální hloubka řezu	[mm]
$a_p$	axiální hloubka řezu	[mm]
$D_C$	řezný průměr	[mm]
$D_{CX}$	maximální řezný průměr	[mm]
$f$	posuv za minutu	[mm.min <sup>-1</sup> ]
$f_n$	posuv na otáčku	[mm]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
$n$	otáčky vřetena	[min <sup>-1</sup> ]
$R_a$	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
$R_z$	největší výška profilu	[μm]
$u$	rozteč	[mm]
$v_c$	řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
VB2	opotřebení vedlejšího břitu	[mm]
VBb	opotřebení hlavního břitu	[mm]
VBc	opotřebení špičky hlavního břitu	[mm]
$z_n$	celkový počet břitů nástroje	[-]
$\alpha$	úhel hřbetu	[°]
$\beta$	úhel břitu	[°]
$\gamma$	úhel čela	[°]
$K_r$	úhel nastavení hlavního ostří	[°]

### Zkratky

Označení	Legenda
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAD	Computer Aided Desing
CVD	Chemical Vapour Deposition
HRC	Tvrlost dle Rockwella
MCAD	Mechanical Computer Aided Design
PEK	PolyEtherKetone
PVD	Physical Vapour Deposition
VBD	Vyměnitelná Břítová Destička

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výsledky měření zatížení a drsnosti povrchu

---

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>662</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>397</b>	<b>794</b>	<b>1588</b>	<b>2382</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	5-6	5-6	7-8	7-9	$D_C$ [mm]	<b>38,5</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,547	0,480	0,688	0,932	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,599	0,478	0,701	1,031	$z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,539	0,362	0,672	0,994		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,587	2,681	3,312	4,754		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,965	2,958	3,797	5,650		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	3,184	2,237	3,820	4,987		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,562	0,440	0,687	0,986		
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,912	2,625	3,643	5,130		
Zatížení [%]	5,5	5,5	7,5	8		

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414SR-HM-P2:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>662</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>397</b>	<b>794</b>	<b>1588</b>	<b>2382</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	5-6	6-7	7-8	8	$D_C$ [mm]	<b>38,5</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,259	0,624	0,756	0,774	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,454	0,461	0,746	0,782	$z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,445	0,468	0,815	0,706		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,645	3,289	4,008	3,815		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,359	2,659	3,607	4,517		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,137	2,897	4,171	3,628		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414SR-HM-P2:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,386	0,518	0,772	0,754		
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,047	2,948	3,929	3,987		
Zatížení [%]	5,5	6,5	7,5	8		

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: ZDCW09T304:M8325 Fréza: 50A06R-SMOZD09-C				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>618</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>309</b>	<b>618</b>	<b>1237</b>	<b>1855</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	5-7	6-7	7-8	8-9	$D_C$ [mm]	<b>41,2</b>
1 $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,663	1,102	1,156	1,061	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,705	1,026	1,114	0,947	$z_n$ [-]	<b>5</b>
3 $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,589	0,971	1,078	1,023		
1 $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,571	5,163	4,815	4,311		
2 $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,196	4,709	4,192	3,879		
3 $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,719	4,702	4,419	4,397		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: ZDCW09T304:M8325 Fréza: 50A06R-SMOZD09-C				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,652	1,033	1,116	1,116	1,010	
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,162	4,858	4,475	4,475	4,196	
Zatížení [%]	6	6,5	7,5	7,5	8,5	

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Kyocera Precision Tools Inc.	VBD: SOMT100420ER-GM:PR1525 Fréza: MFH050R-10-5T-M				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>722</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>361</b>	<b>722</b>	<b>1443</b>	<b>2165</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	7	8	9	10-11	$D_C$ [mm]	<b>35,3</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,438	2,224	6,942	6,109	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,134	1,928	7,098	5,431	$Z_n$ [-]	<b>5</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,293	1,996	7,714	5,173		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	6,941	10,863	28,698	26,059		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	5,891	10,546	28,699	28,423		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	6,602	9,275	30,821	25,453		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Kyocera Precision Tools Inc.	VBD: SOMT100420ER-GM:PR1525 Fréza: MFH050R-10-5T-M			Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,288	2,049	7,251	5,571	
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	6,478	10,228	29,406	26,645	
Zatížení [%]	7	8	9	10,5	

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Tungaloy Czech s.r.o.	VBD: SWMT0904ZER-MM:AH8015 Fréza: TXSW09M050B22.0R05				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>690</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>345</b>	<b>690</b>	<b>1381</b>	<b>2071</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	6	7	8	9	$D_C$ [mm]	<b>36,9</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,854	2,294	4,439	4,993	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,675	2,936	3,846	4,980	$z_n$ [-]	<b>5</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,812	2,796	3,171	4,327		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	10,943	12,999	22,493	25,390		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	7,864	15,686	20,845	28,602		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	8,506	12,763	18,441	24,046		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Tungaloy Czech s.r.o.	VBD: SWMT0904ZER-MM:AH8015 Fréza: TXSW09M050B22.0R05			Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,780	2,675	3,819	4,767	
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	9,104	13,816	20,593	26,013	
Zatížení [%]	6	7	8	9	

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>608</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>365</b>	<b>730</b>	<b>1459</b>	<b>2189</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	7-8	8-9	11-12	12-13	$D_C$ [mm]	<b>41,9</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,454	0,756	0,603	1,004	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,468	0,937	0,525	1,088	$Z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,241	0,838	0,658	0,972		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,563	3,738	2,621	4,938		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,543	4,377	2,479	5,245		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,862	3,943	3,358	4,025		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414PR-HM-P1:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,388	0,844	0,595	1,021		
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,323	4,019	2,819	4,736		
Zatížení [%]	7,5	8,5	11,5	12,5		

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414SR-HM-P2:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>608</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>365</b>	<b>730</b>	<b>1459</b>	<b>2189</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	7-8	8-9	10-11	12-14	$D_C$ [mm]	<b>41,9</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,235	0,339	0,484	0,847	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,294	0,383	0,584	0,800	$z_n$ [-]	<b>6</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,253	0,444	0,464	0,904		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,708	1,739	2,866	3,811		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,873	1,918	3,309	3,945		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,862	2,249	2,668	4,144		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: SOHT090414SR-HM-P2:M8310 Fréza: 50A06R-SMOSO09-C-P1			Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,261	0,389	0,511	0,850	0,850
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1,814	1,969	2,948	3,967	3,967
Zatížení [%]	7,5	8,5	10,5	13	13

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: ZDCW09T304:M8325 Fréza: 50A06R-SMOZD09-C				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>582</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>291</b>	<b>582</b>	<b>1163</b>	<b>1745</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	6-8	7-9	10-11	12-13	$D_C$ [mm]	<b>43,8</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,621	1,235	1,113	0,957	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,579	1,161	1,031	1,134	$z_n$ [-]	<b>5</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,524	1,216	1,197	1,402		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	3,163	5,186	4,423	3,773		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,817	5,132	3,898	4,504		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,499	5,162	3,808	5,198		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Dormer Pramet s.r.o.	VBD: ZDCW09T304:M8325 Fréza: 50A06R-SMOZD09-C				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>		
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>		
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,575	1,204	1,114	1,164		
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	2,826	5,160	4,043	4,492		
Zatížení [%]	7	8	10,5	12,5		

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Kyocera Precision Tools Inc.	VBD: SOMT100420ER-GM:PR1525 Fréza: MFH050R-10-5T-M				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>658</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>329</b>	<b>658</b>	<b>1317</b>	<b>1975</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	6-10	9-10	-	-	$D_C$ [mm]	<b>38,7</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,397	4,983	-	-	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	3,523	6,962	-	-	$Z_n$ [-]	<b>5</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,274	5,433	-	-		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	6,867	18,485	-	-		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	15,480	22,653	-	-		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	5,792	20,090	-	-		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Kyocera Precision Tools Inc.	VBD: SOMT100420ER-GM:PR1525 Fréza: MFH050R-10-5T-M		Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	2,065	5,793	-	-
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	9,380	20,409	-	-
Zatížení [%]	8	9,5	-	-

## Výsledek měření zatížení a drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty.

Tungaloy Czech s.r.o.	VBD: SWMT0904ZER-MM:AH8015 Fréza: TXSW09M050B22.0R05				Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	<b>642</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	$a_e$ [mm]	<b>33</b>
$f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>321</b>	<b>642</b>	<b>1284</b>	<b>1925</b>	$v_c$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	<b>80</b>
Zatížení [%]	7-8	9-10	11-12	14-15	$D_C$ [mm]	<b>39,7</b>
1 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,579	4,414	5,008	5,981	$D_{CX}$ [mm]	<b>50</b>
2 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	3,484	4,605	5,979	10,706	$z_n$ [-]	<b>5</b>
3 Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1,790	3,018	2,838	6,044		
1 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	7,427	18,267	29,695	26,972		
2 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	13,204	22,544	38,463	54,703		
3 Rz [ $\mu\text{m}$ ]	7,810	13,841	18,246	35,676		

Vypočtené průměrné hodnoty.

Tungaloy Czech s.r.o.	VBD: SWMT0904ZER-MM:AH8015 Fréza: TXSW09M050B22.0R05			Materiál: 19552.4; 53 HRC Rozměr: 300x100x250 [mm] Chlazení: stlačený vzduch	
$a_p$ [mm]	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
$f_z$ [mm]	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	2,284	4,012	4,608	7,577	
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	9,480	18,217	28,801	39,117	
Zatížení [%]	7,5	9,5	11,5	14,5	