

Vliv kvality řezného povrchu nástroje na proces obrábění

Bc. Jan Zlámal

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jan Zlámal
Osobní číslo: T22395
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Vliv kvality řezného povrchu nástroje na proces obrábění

Zásady pro vypracování

Diplomová práce je vědecké analýzou problematiky vlivu jakosti řezné plochy nástroje na parametry procesu obrábění. V rámci experimentu budou na břitové destičce upraveny povrchy řezného nástroje rozdílnou technologií: MRF, mechanické leštění, otryskávání, atd. Při obrábění na T&M CNC NTX 1000 budou sledovány při zvolených podmínkách chlazení změny v opotřebení nástroje, povrchové změny, jakost obrobené plochy, tříska a další parametry. Cílem je určit optimální jakost povrchu nástroje při zachování ekonomických a výkonnostních parametrů procesu obrábění.

- Literární rešerše na téma vlivu mikrogeometrie nástroje na řezný proces
- Příprava VBD s různou povrchovou jakostí
- Obrábění s upravenými VBD na soustružnicko-frézovacím centru NTX 1000
- Hodnocení a analýza řezného procesu
- Doporučení optimální úpravy povrchu

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- ZHUANG, Kejia, Changni FU, Jian WENG a Cheng HU. Cutting edge microgeometries in metal cutting: a review [online]. B.m.: Springer Science and Business Media LLC. 2021. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-07558-6
- BONNY, K., P. DE BAETS, J. QUINTELIER, J. VLEUGELS, D. JIANG, O. VAN DER BIEST, B. LAUWERS a W. LIU. Surface finishing: Impact on tribological characteristics of WC-Co hardmetals [online]. B.m.: Elsevier BV. 2010. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2009.04.029
- PRAMANIK, Alokesh. Machining and tribology: processes, surfaces, coolants, and modeling. Amsterdam: Elsevier, 2021, 1 online resource (282 pages). Elsevier series on tribology and surface engineering. ISBN 0128198907. Dostupné z: <https://proxy.k.utb.cz/login?url=https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128198896>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- **že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.**

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zkoumáním a měřením vlivů rozdílné drsnosti vyměnitelných břitových destiček určených pro soustružení kovových materiálů. Hlavním cílem práce je změnit jakost vyměnitelných břitových destiček a následně změřit vliv rozdílné drsnosti na vybrané parametry soustružení. Práce prokazuje, že drsnost vyměnitelných břitů má vliv na řezný proces.

Klíčová slova: Tribologie, Soustružení, Řezné síly, Drsnost povrchu, Dynamometr

ABSTRACT

The thesis deals with the investigation and measurement of the effects of different roughness of replaceable cutting edges for turning metal materials. The main objective of the thesis is to change the quality of the replaceable cutting edges and then to measure the effect of different roughness on selected turning parameters. The work shows that the roughness of the replaceable cutting edges has an effect on the cutting process.

Keywords: Tribology, Turning, Cutting forces, Surface Roughness, Dynamometer

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D., za jeho velmi cenné připomínky, rady a vedení při práci, Taktéž bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu v rámci celého studia, bez ní bych se nedostal k psaní těchto řádků.

„Vzdělanost je to, co nám dává svobodu.“ – Václav Havel

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SOUSTRUŽENÍ	12
1.1 TVORBA TRÍSKY	13
1.1.1 Řezné úhly.....	13
1.2 VLIV MAZÁNÍ U SOUSTRUŽENÍ.....	15
1.3 SOUSTRUŽNICKÉ NOŽE	17
1.3.1 Materiály	17
1.3.2 Požadavky na nože	19
1.3.3 Produkce karbidů.....	20
1.3.4 Povlaky.....	20
1.3.5 CVD Povlaky	21
1.3.6 PVD Povlaky.....	21
1.3.7 Metoda Sol-gel.....	21
1.3.8 Elektrolycké nanášení	22
1.3.9 Metoda Slurry.....	22
2 DOKONČOVACÍ METODY.....	23
2.1 HONOVÁNÍ	23
2.2 SUPERFINIŠOVÁNÍ	24
2.3 LAPOVÁNÍ	24
2.4 PÍSKOVÁNÍ POVRCHU	25
2.5 MAGNETOREOLOGICKÉ DOKONČOVÁNÍ POVRCHŮ.....	26
2.5.1 Princip technologie.....	26
2.6 TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ POMOCÍ MAGNETICKÉHO POLE	27
2.7 ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (ECM)	27
3 TRIBOLOGIE	28
3.1 POŠKOZENÍ POVLAKU V TRIBOLOGII.....	28
3.2 POŠKOZENÍ BEZ VÝMĚNY MATERIÁLU	29
3.3 OPOTŘEBENÍ (POŠKOZENÍ S ÚBYTKEM MATERIÁLU)	29
3.4 STRUKTURA POVRCHU NA NÁSTROJI	29
3.5 ŽIVOTNOST NÁSTROJE.....	30
4 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	31
4.1 TRENDY VE VÝZKUMU TCM	31
4.2 MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE.....	32
4.3 SLEDOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	32
4.3.1 Rentgenová difrakce.....	34

4.3.2	Ramanova spektroskopie.....	34
4.4	ZKOUŠKY POVLAKŮ	35
4.5	MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A TLOUŠŤKY TRÍSEK.....	36
5	TRENDY V NÁSTROJÍCH	38
5.1	ZLEPŠENÍ OCHRANY PROTI OPOTŘEBENÍ A SNÍŽENÍ TŘENÍ PRO POVLAKY	38
5.2	GRAFEN.....	38
5.3	NANO VZORY	39
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	40
6	CÍLE PRÁCE	41
7	ZKUŠEBNÍ VZORKY	42
7.1	PŘÍPRAVNÉ UPÍNKY	43
8	JAKOST POVRCHU DESTIČEK	44
8.1	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ	44
8.2	DRSNOST POVRCHU DESTIČEK.....	44
8.2.1	Destičky bez úprav	45
8.2.2	Pískování destiček	48
8.2.3	Zlepšení drsnosti destiček	51
9	PODMÍNKY EXPERIMENTU	57
9.1	PŘÍSTROJE	57
9.1.1	CNC.....	57
9.1.2	Měřicí dynamometr Kistler	59
9.1.3	Zesilovač Kistler 5167A.....	60
9.1.4	Soustružnický nůž	61
9.1.5	Upínací mechanismus pro upnutí nožů	61
9.1.6	Upínací mechanismus pro dynamometr	62
9.2	KOMPLETACE NÁSTROJŮ	63
9.2.1	Koeficient pěchování třísky k_s	66
9.2.2	Úhel roviny stříhu ϕ	66
10	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	67
10.1	TESTOVÁNÍ REFERENČNÍ VYMĚNITELNÉ BŘITOVÉ DESTIČKY	67
10.1.1	Naměřené řezné síly	69
10.1.2	Naměřená drsnost.....	72
10.1.3	Koeficient pěchování třísky a úhel střížné roviny.....	72
10.2	TESTOVÁNÍ PÍSKOVANÉ VYMĚNITELNÉ DESTIČKY	75
10.2.1	Naměřené řezné síly	77
10.2.2	Naměřená drsnost.....	78
10.2.3	Koeficient pěchování třísky a úhel střížné roviny.....	79
10.3	TESTOVÁNÍ MRF VYMĚNITELNÉ DESTIČKY	80
10.3.1	Naměřené řezné síly	82

10.3.2	Naměřená drsnost.....	83
10.3.3	Koeficient přechování třísky a úhel střížné roviny.....	84
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	87
11.1	POROVNÁNÍ DRSNOSTÍ.....	87
11.1.1	Porovnání destiček	87
11.1.2	Porovnání drsnosti na obrobku.....	89
11.2	POROVNÁNÍ DLE TLOUŠTKY TRÍSEK	90
11.3	POROVNÁNÍ SIL	92
	ZÁVĚR	95
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	96
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK.....	104

ÚVOD

Stále vyšší nároky na efektivitu a spolehlivost obráběcích procesů jsou kladeny dnešním konkurenceschopným prostředím ve strojírenském průmyslu. Soustružení se stává klíčovým hráčem v oblasti výroby přesných součástek a tato diplomová práce si klade za cíl podrobně prostudovat různé aspekty soustružení a jeho vliv na nástroje a povrchovou úpravu.

V průběhu následujících kapitol budou systematicky prostudovány jednotlivé fáze soustružení, od tvorby třísky přes vliv mazání až po problematiku soustružnických nožů, produkci karbidů a povlaky nástrojů. Toto zkoumání bude tematicky rozděleno do kapitol zabývajících se dokončovacími metodami, tribologií a opotřebením nástrojů, přičemž se zaměří na aktuální trendy a moderní metody analýzy.

V praktické části diplomové práce bude proveden experimentální výzkum vlivu drsnosti na čelní ploše vyměnitelných břitových destiček (VBD) při soustružení. Cílem bylo zjistit, zda má drsnost vliv na velikost řezných sil a jakost obráběného povrchu.

Byla sestavena měřicí sestava, která zahrnovala adaptační prvek, měřicí dynamometr, VBD, soustružnický nůž a jeho upínač. Různé drsnosti na čelní ploše VBD byly vytvořeny pomocí ručního pískovacího zařízení a MRF zařízení.

Po sestavení měřicí sestavy VBD proběhne měření a vyhodnocení vybraných parametrů:

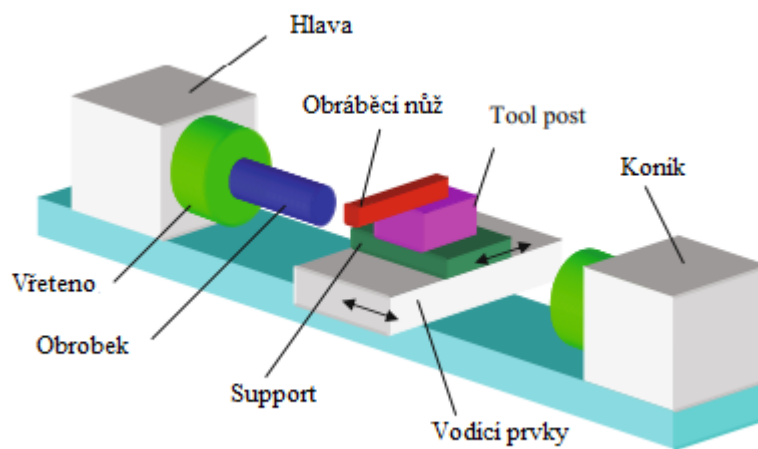
- Velikost řezných sil
- Jakost povrchu obráběného materiálu
- Parametry odebírané třísky

Výsledky experimentu budou shrnuty a analyzovány s cílem potvrdit či vyvrátit vliv drsnosti vyměnitelné břitové destičky na sledované parametry a posoudit případné benefity v praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SOUSTRUŽENÍ

Soustružení se obvykle provádí na soustruhu, kde se obrobek otáčí ve vřetenu kolem nástroje upevněného na dvouosém suportu, aby obrobek mohl dosáhnout požadovaného tvaru osově souměrné součásti; viz Obrázek 1. Konečný tvar může obsahovat vnitřní i vnější prvky. Soustružení může být z hlediska řízení ruční, kdy obráběč ovládá polohu suportu během odebrání materiálu nebo počítačem číslicově řízený (CNC). V tomto případě se používá automatické řízení, které dává povely polohám suportů, aby sledovaly dráhu popsanou programem součásti. Na adrese je program obrobku založen na požadovaných rozměrech obrobku a je typicky vytváří pomocí počítačem podporovaného konstrukčního návrhu/počítačem podporované výroby (CAD/CAM). Při soustružení se ostrý břit používá k odebrání materiálu ve formě třísky. [1]



Obrázek 1 Schéma ručního soustruhu [1]

Soustružení je nadále největším segmentem obráběcího průmyslu, což zdůrazňuje pokračující poptávku po soustružených dílech a celkové zlepšení tohoto procesu. Soustružení prošel značným vývojem, od základních soustruhů s pevnými nástroji až po složité CNC (Computer Numerical Control) víceprocesních strojů, které z velké části používají povlakované destičky a povlakované nástroje. Tyto povlaky se ukázaly být významným krokem ve výrobě vysoce kvalitních dílů a vyšší životnosti nástrojů, které zaujaly celý průmysl. Neustálé zlepšování soustružnických povlakovaných nástrojů bylo provedeno mnoho výzkumů zaměřených na optimalizaci procesů soustružení, při nichž se používá povlakovaných nástrojů. V poslední době byly nejvíce použity v obráběcích strojích soustružení, soustružení těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou titanové slitiny a Inconel, a

také na soustružení interakci těchto povlaků se soustruženými povrchy, způsoby opotřebení, které tyto povlaky během soustružení materiálů a vztah těchto mechanismů opotřebení k životnosti povlakovaného nástroje s očekávanou životností. Některé podmínky mazání představují udržitelnější alternativu k současným metodám používaným při soustružení, použití povlakovaných nástrojových destiček za těchto podmínek je v současné době populárním tématem výzkumu, protože se klade důraz na volbu ekologičtějších možností obrábění. [2]

1.1 Tvorba třísky

V procesu soustružení, který je jedním z nejrozšířenějších obráběcích postupů, vzniká tříška jako důsledek interakce mezi obráběcím nástrojem a obrobeným materiálem. Tento paradoxně komplexní proces vytváření třísky má významný dopad na celkovou efektivitu obrábění. Soustružení se vyznačuje vytvářením souvislé třísky, která se odtrhuje od obrobeného materiálu břitem nástroje. Oproti jiným obráběcím metodám, jako je frézování, kde se pracuje s krátkou řeznou vzdáleností, má soustružení charakteristickou velkou vzdálenost řezu na jeden záběr břitu. Tato specifika ovlivňují mechanismy tření a kontaktu mezi třískou a nástrojem. Kontaktní napětí, přítomné při každém obráběcím procesu, je v případě soustružení kombinováno s rozsáhlými vzdálenostmi souvislého posuvu. Tyto vzdálenosti jsou dostatečně velké k efektivnímu odstranění mazacích filmů z povrchu obrobeného materiálu a eliminaci iniciálních nečistot. Tím dochází k vytvoření nového povrchového rozhraní během kontaktu třísky s nástrojem. Výsledkem je, že směr posuvu nástroje je opačný než směr pohybu třísky. Tato specifika vedou k tvorbě třísky s optimálními vlastnostmi, zajišťujícími efektivní a přesné soustružení materiálů. Přes paradoxně jednoduchý vzhled soustružení s vytvářením souvislé třísky, je tento proces zásadním faktorem při dosahování kvalitního obrábění s minimálním třením a maximální účinností. [3]

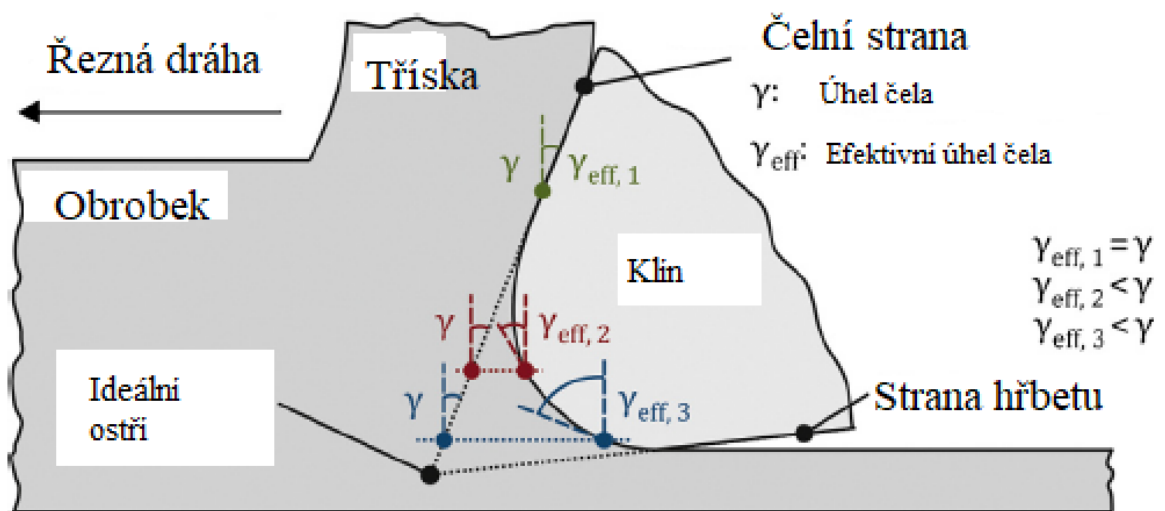
1.1.1 Řezné úhly

Tvar břitu a stav břitu mají následující vlastnosti zásadní význam pro obrábění. Během řezání procesu působí vysoké tepelné a mechanické zatížení na břity, které vede k opotřebení. Kromě toho se kvalita obrobeného povrchu ovlivňuje tvar řezné hrany. Požadavky na moderní výrobu je vysoká produktivita a vysoká procesní spolehlivost. Jedním z míst, kde lze tyto požadavky splnit, je řezná hrana. Geometrie řezného nástroje a parametry popisující makroskopický a mikroskopický tvar nástroje jsou znázorněny na

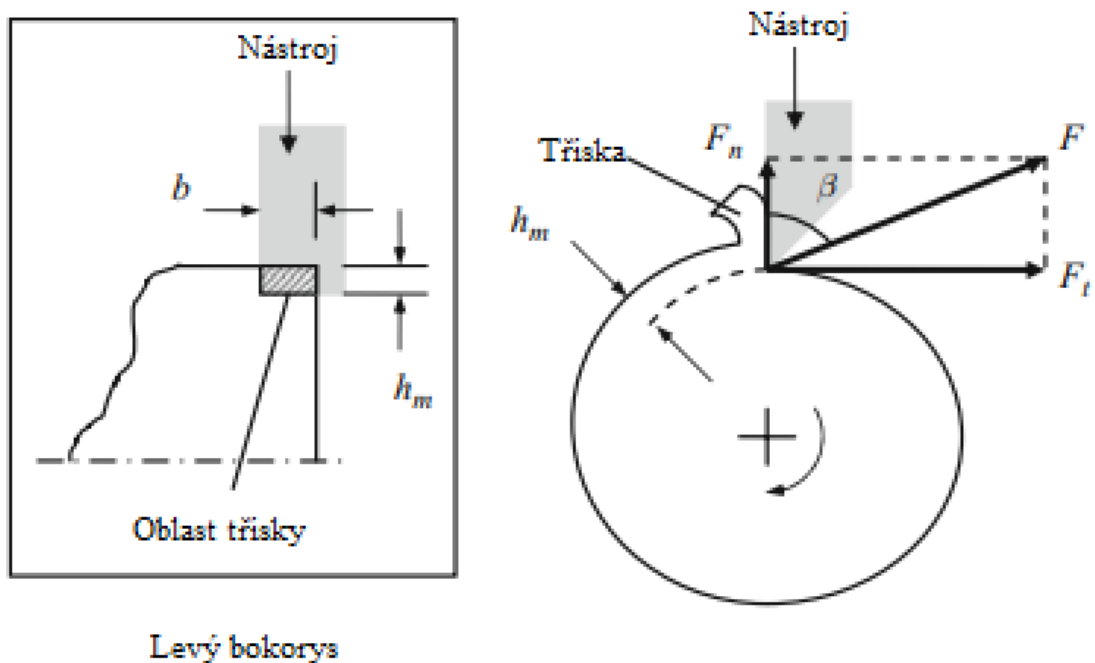
obrázku 2 a označují se jako makrogeometrie řezného nástroje. Naproti tomu mikrogeometrie popisuje geometrické detaily nástroje aktivní části řezného nástroje pod makrogeometrií definujícími veličinami. Mikrogeometrie tedy definuje tvar řezné hrany, která je přechodem mezi plochou hřbetu a plochou řezné hrany a boční plochou řezného nástroje. Charakteristika tvaru řezné hrany (mikrogeometrie) je možné provést pomocí profilu řezů nástroje. Proto je vhodné rozlišovat mezi mikrogeometrií a makrogeometrií. Úhel sklonu je předurčen pomocí makroskopie nástroje. Efektivní úhel sklonu je určen skutečným existujícím sklonem řezného nástroje v určitém místě styku obrobku s povrchem a řezného nástroje během řezného procesu. Průřez řezného nástroje, kde se efektivní úhel sklonu začíná lišit od (jmenovitého) úhlu sklonu nástroje definuje přechod mezi makro a makro úhlem náklonu nástroje mikrogeometrií.

Pro průsečík úběrové a boční plochy platí tři základní pravidla tvarů řezné hrany. Tyto tvary jsou kombinace ostré, zaoblený a zkosený. Ostrý řezný tvar hrana znamená, že přechod mezi hřbetem a čelní plochou není ani zaoblený, ani zkosený. V praxi není možné vytvořit ideální ostrý tvar břitu. Vzhledem ke skutečnosti, že "ostré" břity nejsou neomezeně ostré a mají spíše nepravidelný a odštipnutý profil, neexistuje žádný specifický parametr pro jejich popis. Kromě toho, ostré tvary řezných hran, tj. řezné hrany bez měřitelnou velikostí zaoblení anebo zkosení řezné hrany, nejsou vhodné pro mnoho obráběcích úloh, protože mají nižší stabilitu vůči mechanickému zatížení ve srovnání se zaoblenými nebo zkosenými hranami.

Jak již bylo uvedeno, příprava řezné hrany je používá s ostrými nástroji k vytvoření vhodnější řezné tvaru. Zejména konstrukce břitu, které jsou přizpůsobeny pro specifickým obráběcím úkolům, vykazují vysoký potenciál pro zlepšení kvality nástroje. K přesnému vytváření těchto specifických návrhů je zapotřebí tzv. podrobná charakterizace tvaru přechodu mezi úhlem záběru a úhlovým řezem a boční plochou. Za tímto účelem se používají různé charakterizační a měřicí metody. [4]



Obrázek 2 Přejít od makroskopického k mikroskopickému tvaru nástroje s ohledem na řezné podmínky. [4]



Obrázek 3 Makroskopický pohled nástroje [1]

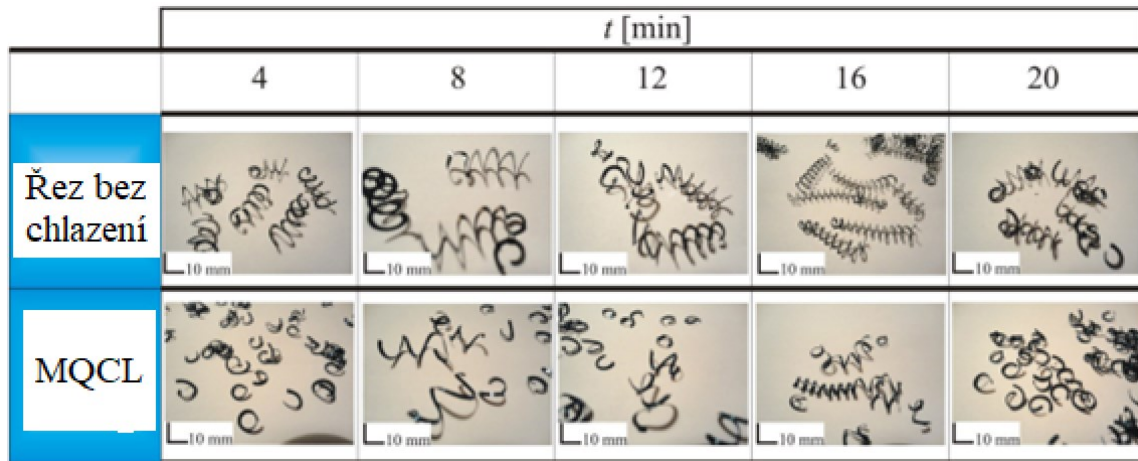
1.2 Vliv mazání u soustružení

Při řezných operacích se kapaliny hrají důležitou roli. Musí zaručit především mazání a chlazení a za druhé chránit obrobek a nástroj před poškozením korozí a podporovat odvod třísek. Co se týče mazání, je třeba zohlednit působící zatížení a pracovní podmínky, které charakterizují řez, naznačují, že třeba není možné trvale mazat řeznou plochu pomocí mazání kapalným proudem. Pro zajištění mazání je tedy nutné použít mazivo s přísadami, které

chemicky reagují s okolním prostředím a s obrobkem a materiálem nástroje za účelem vytvoření chemického sloučeniny, které umožňují mazání řezné plochy. Chlazení obrobku je navíc nezbytné pro odstranění tepla vznikajícího při tvorbě třísek a třením mezi nástrojem a obrobkem. Dosažení kapaliny k řezné plochy není snadné, ve skutečnosti je vysoký řezný tlak ve styčné ploše a malý prostor mezi třískou a nástrojem neumožňují, aby se nástroj dostal do kontaktu s třískou. Aby se dosáhlo dobrého chladicího účinku je řezná oblast obvykle zaplavena mazivem. V neposlední řadě lze využít proudění řezné kapaliny, aby se zabránilo tříске, která by zůstávala v řezné zóně, čímž se snižuje možnost poškození obrobku. Lze použít mnoho metod. Každá metoda aplikace se volí v závislosti na výhod, které může poskytnout.

Hlavní typy aplikace jsou:

- Ruční aplikace: tento typ aplikace se používá pouze při v malosériové výrobě, protože při použití tohoto mazání není snadné kontinuálně aplikovat řeznou látku a dostatečně ochlazovat obrobek. Podstaty metody je nízká úroveň mazání, chlazení a odvodu třísek.
- Zaplavení: Tato aplikace je nejběžnější. Zaručuje velmi dobrou úroveň mazání, chlazení a odvodu nečistot a odstraňování třísek. Při použití tohoto způsobu mazání je třeba možné také orientovat trysku na vrub nástroje.
- Mazání v minimálním množství (MQCL): při mazání v minimálním množství se používá velmi malé množství maziva. Průtok maziva (ml/h místo l/min). V tomto případě, je mazivo rozprašováno přímo na řeznou plochu. To zaručuje dobrou úroveň mazání, ale chladicí účinek je velmi malý a mechanismus odvádění třísek je získán proudem vzduchu, který se používá k nanášení maziva. [5]



Obrázek 4 Vývoj tvaru třísky s postupným opotřebením nástroje v závislosti na způsobu chlazení při obrábění oceli AISI 1045 pro $v_c = 250$ m/min. [6]

1.3 Soustružnické nože

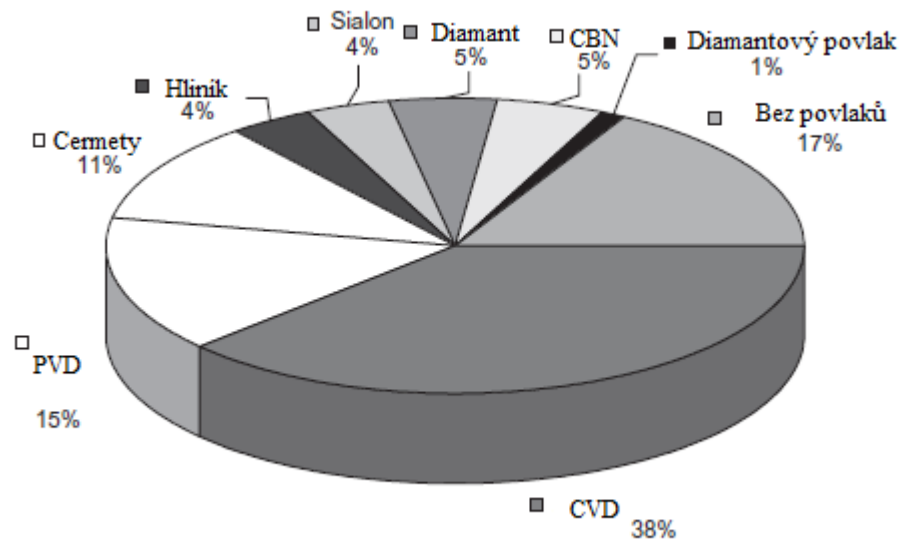
Řezné nástroje musí současně odolávat velkému mechanickému zatížení a vysokým teplotám. Teplota na rozhraní třísky a nástroje dosahuje v některých případech více než 700 °C. Kromě toho se na jedné straně projevuje tření mezi nástrojem a odebíranou třískou a na druhé straně tření mezi nástrojem a odebíranou třískou. [7]

1.3.1 Materiály

- Rychlořezné oceli (HSS), včetně nových práškově slinutých jakostí. Nicméně, tato skupina materiálů nemá dostatečnou tvrdost pro tvrdé obrábění. HSS jsou silně legované, železné, konvenčně odlévané nástrojové materiály, které mohou být rozdělit do čtyř hlavních kategorií: wolframové, molybdenové, molybden-kobaltové a molybden-vanadové. Mohou být povlakovány metodou PVD. Kromě toho se používají HSS materiály vyrobené metodou práškové metalurgie. Vliv legujících složek je následující:
 - Wolfram: zvyšuje odolnost vůči teplotě a opotřebení.
 - Molybden: zvyšuje houževnatost.
 - Vanad: zvyšuje odolnost dokončovacích nástrojů proti opotřebení.
 - Kobalt: umožňuje zvýšení kalicích teplot a zlepšuje tepelnou odolnost.

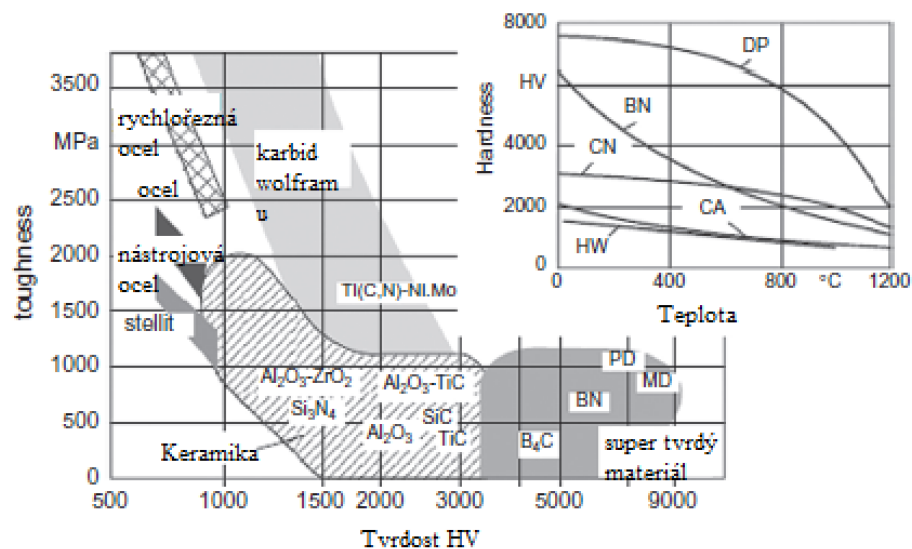
Všechny typy HSS obsahují značné množství uhlíku, který reaguje s žáruvzdornými kovy za vzniku tvrdých karbidů, které zvyšují odolnost proti opotřebení a tvrdost za tepla.

- Slinuté karbidy se jedná o sloučeninu zrn karbidu wolframu s pojivem (obvykle kobaltem, 6-12 %) Tento druh materiálu se dnes nejvíce používá pro tvrdé obrábění a vysokorychlostní obrábění. Slinuté karbidy jsou nejběžnějšími materiály řezných nástrojů, které se v současné době používají. Zhruba 40 % tvoří HSS, zbývajících přibližně 10 % tvoří všechny druhy materiálů. Slinuté karbidy se vyrábějí metodami práškové metalurgie s použitím řady různých karbidů a houževnatých kovů ze skupiny železa jako pojiva. Hlavní karbidů jsou karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a karbid niobu (NbC). Pojivem je většinou kobalt (Co). Nicméně jsou karbidy rozpustné i v sobě navzájem a mohou tvořit cementovaný karbid bez samostatného kovového pojiva. Podíl tvrdých částic v nástrojových materiálech z karbidů se může pohybovat od přibližně 60 % až 90 %. Úpravou druhu, velikosti a koncentrace částic mohou výrobci přizpůsobit vlastnosti těchto nástrojových materiálů tak, aby splňovaly nejrůznější požadavky na použití.
- Keramika na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo nitridu křemíku (Si_3N_4). Obecně lze říct, že keramické nástroje nacházejí uplatnění především při soustružení a výrobě frézování litin a super slitin a při dokončování kalených materiálů. Pro řezání nástroje se používají dva druhy keramických kompozitních materiálů, které lze rozlišit podle materiálů matrice. Existují keramické materiály na bázi oxidu hlinitého. (Al_2O_3) a nitridu křemíku (Si_3N_4). Klíčem k úspěšnému použití keramických řezných materiálů nástrojů je uvědomit si, že mohou přijímat mnohem více tepla než karbidy, protože měknou v rozmezí 2200 °C oproti přibližně 870 °C u karbidových nástrojů. Keramické nástroje se nesmí chladit, vlivem vysokých teplot a možného prasknutí.
- Mimořádně tvrdé materiály, tj. polykrystalický diamant (PCD) a polykrystalický kubického nitridu bóru (PCBN). Vývoj supertvrdých řezných materiálů začal na počátku 70. let 20. století. zavedením materiálů pro řezné nástroje PCD. Dosud byly vyvinuty dva polykrystalické materiály: PCBN a PCD. Přestože jejich současný podíl na trhu, na úrovni 1 %, je v porovnání s konvenčními materiály téměř zanedbatelný, trend je zřetelný směrem k rostoucímu používání PCD i PCBN. Oba supertvrde materiály se vyrábějí pomocí vysokoteplotního a vysokotlakého procesu. [7,8]



Obrázek 5 Odhadované celosvětové použití hlavních řezných materiálů [8]

Jiný zdroj uvádí, že cementované karbidy tvoří 50 % z celkového objemu světovém trhu; vysokorychlostní oceli tvoří 40 %, keramika asi 4 % a polykrystalické oceli asi 3 % diamantu (PCD) a kubického nitridu bóru (CBN) 1 %. [9]



Obrázek 6 Houževnatost a tvrdost materiálů řezných nástrojů [9]

1.3.2 Požadavky na nože

- Vysoká tvrdost při zvýšených teplotách (tvrdost za tepla), aby odolávaly abrazivnímu opotřebení

- Vysoká odolnost proti deformaci (tlaku), aby se zabránilo plastickému opotřebení bříty.
- Vysoká lomová houževnatost, která odolává mikrotrhlinám a lámání bříty, zejména při přerušovaném řezání.
- Chemická inertnost (nízká chemická afinita nebo vysoká chemická stabilita) s ohledem vůči materiálu obrobku pro ochranu před tepelně ovlivněnými typy opotřebení (tj. difuzí a chemické a oxidační opotřebení).
- Vysoká tepelná vodivost pro snížení teplot v blízkosti řezné hrany (k zabránění ochlazování hrany nástroje).
- Vysoká odolnost proti únavě u nástrojů trpících maximální mechanickou zátěží.
- Vysoká odolnost proti tepelnému rázu, který přirozeně následuje po mechanickém rázu.
- Vysoká tuhost potřebná k zachování přesnosti [8]

1.3.3 Produkce karbidů

Celosvětová výroba cementovaných karbidů v posledních 30 letech rychle rostla. Celková výroba cementovaných karbidů v roce 1993 činila přibližně 20 000 tun a zvýšila se z 30 000 tun (v roce 2000) na téměř 60 000 tun v roce 2008, zejména díky vstupu nových výrobců na čínský trh. Od roku 2000 až do současnosti se výroba karbidu cementu v Číně zvýšila ze 7 000 tun (2001) na 20 000 tun (2011) a 28 000 tun (2017). V roce 2017 spotřeba wolframu v Číně dosáhla 55 000 tun, což představuje téměř 60 % spotřeby wolframu celkové světové spotřeby. Odhaduje se, že v současné době se na světové produkci podílí přibližně 35 % wolframu recykluje. [9]

1.3.4 Povlaky

Vývoj povlaků se od počátku soustředil na ochranu proti opotřebení, otěru a adhezi. Vyšší řezné teploty, tím více se výzkum a vývoj zaměřují na vysokoteplotní vlastnosti povlaků. Vedle důležitého požadavku, aby povlaky nástrojů fungovaly jako difúzní bariéra mezi nástrojem a obrobkem, aby poskytovaly dostatečnou ochranu proti otěru i při vysokých teplotách, musí povlakový materiál dostatečnou pevnost. Směs nástroje a povlaku musí odolávat mechanickému a tepelnému zatížení. Požadavky na směs se zvyšují zejména v

důsledku cyklického zatížení, které se vyskytuje při přerušovaných řezech, protože to může vést k tepelně anebo mechanicky vyvolaným trhlinám.

Zavedení prvního povlaku CVD na nástrojích z cementovaného karbidu TiC v roce 1969. Jeho rychlý úspěch vedl k dynamickému vývoji CVD procesů a také k rozvoji povlakovacích materiálů TiCN, TiN a Al₂O₃. V roce 1980 se TiN stal prvním PVD povlakem, který se začal používat v průmyslu. [10]

1.3.5 CVD Pvlaky

Chemická depozice z par (CVD) je široce používaná metoda technologie zpracování materiálů, při níž se tenké vrstvy se vytvářejí na zahřátém podkladu. Na rozdíl od fyzikální depozice z plynné fáze, jako je odpařování a rozprašování, nabízí CVD jasnou výhodu, protože se spoléhá na technologii chemických reakcích, které umožňují nastavitelnou rychlost proudění vzduchu a tím pádem i na větší zájem o tenké polovodičové vrstvy která začala po druhé světové válce, byla prvotní hnací silou pro rychlý rozvoj technologie CVD. Obvykle metoda CVD nevyžaduje vysoko vakuové pracovní prostředí. [11]

1.3.6 PVD Pvlaky

V procesech fyzikálního nanášení z plynné fáze (PVD) se povlak nanáší ve vakuu kondenzací z plynné fáze neutrálních nebo ionizovaných atomů kovů. Několik PVD technik je vhodných pro nanášení tvrdých povlaků. Mezi ně patří katodické obloukové napařování (plazmové nebo obloukové, iontové napařování, pokovování). Tyto PVD procesy se liší typem povlaku, odpařování kovových složek a způsobu použití plazmovými podmínkami používanými při depozici procesu. Přejít kovové složky (z pevné fáze do fáze par ve které se nachází) jsou atomy kovu ionizovány různými způsoby, může být zahříváním zdroje odpařování. Proces odpařování PVD obloukem využívá vyšší příkon energie než PVD napařování. [11]

1.3.7 Metoda Sol-gel

Při sol-gel metodě se nejprve připraví sol (disperze pevné látky v kapalině) rozpuštěním solí kovů nebo jiných látek nebo jiného vhodného prekurzoru (např. alkoxidů) kovu ve vhodném rozpouštědle. Roztok může být nastříkán na povrch. Při namáčení se rozpouštědlo (nátěrový materiál) se vloží do nádoby a povrch nástroje se do něj ponoří a poté se velmi pomalou rychlostí vytáhne. Alternativně se při vířivém nanášení rozpouštědlo nanáší po kapkách na podklad, který je držen ve vakuovém držáku, který se pak otáčí vysokou rychlostí. Vlivem

odstředivé síly se rozpouštědlo rovnoměrně rozprostře. V obou případech určuje tloušťku povlaku rychlost substrátu. Tyto stránky částice nanometrové velikosti suspendované v kapalině a rovnoměrně rozptýlené na substrátech mají tendenci vysychat na povrchu a vytvářejí složitou síť solvatovaných polymerizovaných makromolekul, která se nazývá gel. Vrstvy se nakonec vytvrzují při různých teplotách pro příslušné aplikace. Sol-gelova metoda se používá především pro porézní oxidovou keramiku. [12]

1.3.8 Elektrolycké nanášení

Bez elektrické nanášení roztokovou cestou probíhá buď přímou chemickou reakcí mezi činidly, jako je redukce kovových iontů pomocí vhodného redukčního činidla, nebo reakcí se substrátem za vzniku jeho sloučeniny nebo reakcemi podporovanými katalytickými povrchy. Vrstvy zlata, stříbra nebo mědi mohou nanášet na kovové nebo plastové substráty redukcí příslušných kovových iontů. To je také možné touto technikou nanášet kompozitní vrstvy. Korozivzdorné oxidové povlaky jsou často získávají na kovových površích tím, že je nechají reagovat s fosforečnou, chromovou nebo jinou minerální sloučeninou kyselinami fosforečnan/chromanové vrstvy na ocelových nebo hliníkových površích zlepšují mazání mezi pohyblivými částmi a jako primární povlak zlepšují spojení s nátěrem naneseným na něj. [12]

1.3.9 Metoda Slurry

Při slurry metodě se připraví stabilní disperze materiálu, který má být potažen, za použití vhodných prostředků a přísad a rozpouštědla a poté se nanese štětcem a/nebo nastříká na podklad, který se následně tepelně zpracuje při teplotě při vhodné teplotě pro sušení. Někdy se suspenze rozetře ve formě rovnoměrného tenkého filmu pomocí kovové lopatky a tato technika je známá jako technika lékařské lopatky. Mezera mezi zametací lopatkou a substrátem určuje tloušťku filmu. [12]

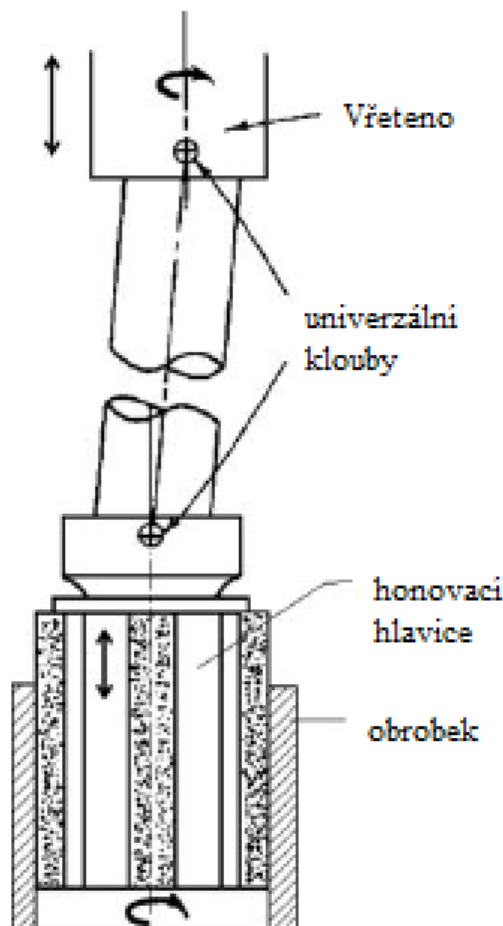
2 DOKONČOVACÍ METODY

Jedná se o operace, kterými se výrobek dostává do finální fáze obrábění, která se vztahuje na požadavek, pro kterou je určen. Při nich se odstraňuje velmi malé množství materiálu, a tedy i povrchu. [13]

2.1 Honování

Honování je řízený proces nízko rychlostního obrábění a dokončování povrchu, při němž je materiál obušován pomocí brusných honovacích tyčí s lepeným střížným účinkem. Tento postup zahrnuje souběžné rotační a vratné působení brusné tyče.

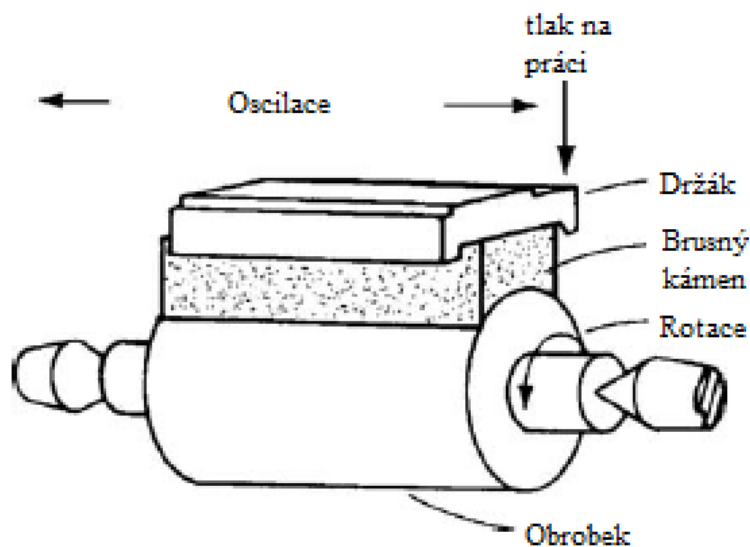
Díky nízkým otáčkám, při nichž probíhá honování, nedochází k výraznému zahřívání materiálu, což minimalizuje riziko tepelně ovlivněné zóny a předejde tak poškození povrchu způsobenému teplem, které by mohlo vést k broušení. [13]



Obrázek 7 Pohyblivý honovací nástroj se dvěma univerzálními klouby, které umožňují vyrovnání otvoru a nástroje. [13]

2.2 Superfinašování

Superfinašování je brusný proces, který se používá k vnějšmu zdokonalení povrchu. Nejedná se o proces, který by měnil rozměry, ale je hlavně používá k výrobě hotových povrchů super jemné kvality. Odstraňuje se pouze malé množství materiálu (2-30 μm). Proces honování zahrnuje dva hlavní pohyby, zatímco superfinašování vyžaduje tři nebo více pohybů. V důsledku těchto pohybů je dráha brusiva náhodná a nikdy se neopakuje. Hlavní rozdíl mezi honováním a superfinašováním spočívá v tom, že při honování se nástroj otáčí, zatímco při superfinašování se obrobek a nástroj otáčí vždy. Princip fungování procesu superfinašování je znázorněn na obrázku 8.[13]



Obrázek 8 Princip superfinašování [13]

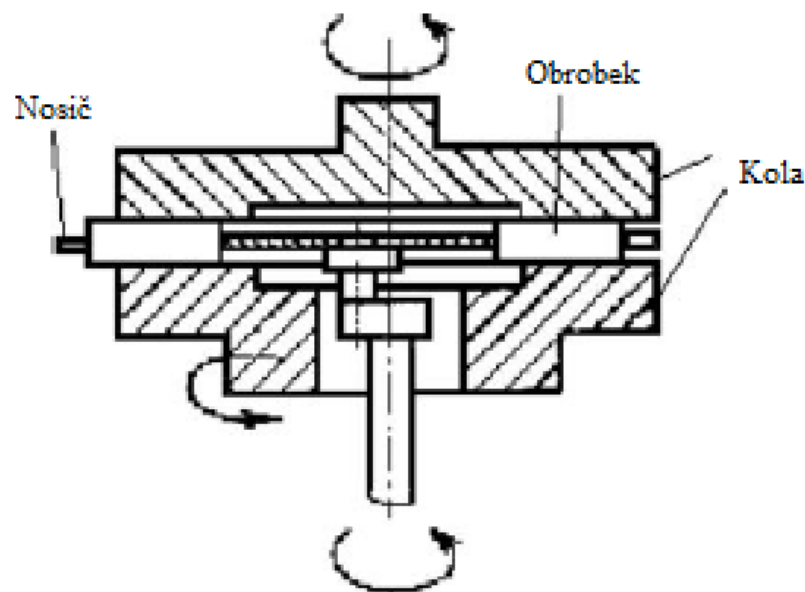
2.3 Lapování

Obvyklá definice lapování je náhodné tření obrobku o lapovací desku pomocí volných brusných materiálů ve vhodném prostředí (oleji) za účelem zlepšení kvality. Jedná se o nízko otáčkový, nízkotlaký brusný proces. Obecně platí, že kvalita povrchu, které lze dosáhnout lapováním nelze snadno nebo hospodárně dosáhnout jinými postupy. Lapování je finální obráběcí operace, která realizuje následující hlavní cíle:

- Extrémní rozměrová přesnost
- Zrcadlová kvalita povrchu
- Korekce drobných tvarových nedokonalostí

- Těsné spojení mezi styčnými plochami

Nevyžaduje přidržovací zařízení, a proto nedochází k deformaci obrobku. Také se méně zahřívá než při většině jiných dokončovacích operací. Zvýšení teploty povrchu je pouze 1-2 °C nad okolní teplotu. [13,14]



Obrázek 9 Princip lapování [13]

2.4 Pískování povrchu

Pískování oceli, často nazývané otryskávání, představuje efektivní techniku povrchové úpravy kovů, která nachází široké využití v průmyslových odvětvích. Tato metoda hraje klíčovou roli v odstraňování nečistot, rezavých vrstev a povrchových nedokonalostí, což vede ke zlepšení mechanických vlastností a estetického vzhledu oceli. Při pískování ocele se využívá vysokotlaký proud abrazivního materiálu, obvykle písku, který je směřován na povrch kovového materiálu. Hlavním principem této metody je mechanická eroze, kdy abrazivní materiál proniká do povrchových vrstev oceli a odstraňuje nežádoucí materiály. Klíčovým prvkem úspěchu je správná volba abrazivního materiálu, tlaku a rychlosti proudu. Abrazivní materiál hraje klíčovou roli při pískování oceli. Tvrdý písek, křemenný písek nebo granulovaná ocelová střela jsou často preferované volby. Tento materiál musí být dostatečně tvrdý a odolný, aby efektivně odstranil povrchové vrstvy oceli. Při nastavování parametrů pískovacího procesu je nezbytné správně kombinovat tlak a rychlost proudu. Vysokotlaký proud abrazivního materiálu umožňuje rychlé a efektivní odstranění nečistot. Nízký tlak

může způsobit nedostatečné odstranění nečistot, zatímco příliš vysoký tlak může poškodit povrch oceli. Pískování ocele nejen čistí povrch, ale také vytváří mikrotexturu, která může pozitivně ovlivnit adhezi nátěrů a povrchovou ochranu. Tato mikrotextura může zvýšit odolnost oceli vůči korozivním procesům a zlepšit estetický vzhled povrchu. [14]

2.5 Magnetoreologické dokončování povrchů

Magnetoreologické dokončování povrchů (MRF) je inovativní technologie, která využívá magnetoreologických materiálů k úpravě a zdokonalení povrchů různých materiálů. Tato technologie se ukázala být velmi užitečnou v oblasti průmyslového inženýrství a výroby, a to především díky své schopnosti poskytovat precizní a řízenou úpravu povrchu.

Magnetoreologické materiály byly poprvé objeveny v 40. letech 20. století, ale teprve v 90. letech byly začleněny do průmyslových aplikací. V průběhu let byly výzkumy a experimenty s MRF zaměřeny na zlepšení jejich vlastností a širší využití v průmyslových odvětvích [15]

2.5.1 Princip technologie

MRF využívá specifických vlastností magnetoreologických materiálů, jejichž mikroskopické částice reagují na externí magnetické pole. Tím dochází k řízené změně fyzikálních vlastností materiálu, což umožňuje přesné tvarování a dokončování povrchů. Klíčovým prvkem je schopnost orientace částic pod vlivem magnetického pole.

- Magnetoreologické materiály:

Magnetoreologické materiály jsou látky, které mění své mechanické vlastnosti pod vlivem magnetického pole. Tyto materiály obsahují mikroskopické částice (obvykle feromagnetické), které se mohou orientovat pod vlivem externího magnetického pole. Tato vlastnost je klíčová pro řízení vlastností MRF.

- Magnetické pole:

Pro aktivaci magnetoreologického efektu se vytváří externí magnetické pole, které ovlivňuje orientaci částic v magnetoreologickém materiálu. Tím dochází ke změnám v jeho fyzikálních vlastnostech, což může být využito k úpravě povrchů.

- Úprava povrchu:

Magnetoreologické dokončování povrchů spočívá ve využití magnetického pole k řízené manipulaci s povrchovými vrstvami materiálů. To umožňuje dosažení přesného tvarování, hladkosti nebo jiných specifických vlastností povrchu.

Magnetoreologické dokončování povrchů (MRF) představuje revoluční metodu v materiálovém inženýrství s aplikacemi napříč průmyslovými odvětvími. Využívá princip magnetoreologických materiálů, které pod vlivem magnetického pole mění své vlastnosti, umožňující precizní úpravu povrchů. V automobilovém průmyslu se MRF uplatňuje při úpravě tlumičů, což vede k dynamickému řízení tlumení a zlepšení jízdního komfortu a stability vozidel. V leteckém průmyslu se MRF využítí při úpravě aerodynamických povrchů letadel, zvyšující efektivitu a řízení letu. V oblasti výroby nástrojů MRF poskytuje jemné broušení a dokončování povrchů, zlepšující výkon a prodlužující životnost nástrojů. [15,16]

2.6 Technologie dokončování pomocí magnetického pole

Technologie dokončování pomocí magnetického pole (MFAF) je široce rozšířená uznávána a používána jak v akademickém, tak v průmyslovém prostředí. Vykazuje vynikající výkon při dokončování ultrapřesné optiky mikrostruktur a obtížně přístupných povrchů. Technologie MFAF zahrnuje magnetoreologické dokončování (MRF), magnetické abrazivní dokončování (MAF).

Využívá magnetoreologickou kapalinu, která současně tuhne pod magnetickým polem a přizpůsobuje se lokálnímu tvaru povrchu obrobku. Nejtypičtější aplikací MAF je leštění vnitřních povrchů, jako jsou jehly, sanitární trubky, rozvody motorů a letecké trubky. [17]

2.7 Elektrochemické obrábění (ECM)

Elektrochemické obrábění (ECM) je opakem galvanického pokovování a odstraňování materiálu probíhá anodickým rozpouštěním povlaku obrobku. Je založeno na elektrolýze, při níž se z kovů uvolňuje atom z obrobku. Faradayův zákon elektrolýzy je řídicím principem mikro ECM a tvar obrobku je přibližně zrcadlovým obrazem mikronástroje s mezi elektrodovým rozhraním mezerou přibližně 10-30 μm . V mikro ECM se k obrábění obrobků používají ultrakrátká pulzní napětí, ale pro zlepšení rozlišovací schopnosti obrábění je třeba zajistit vhodné podmínky obrábění je třeba zvolit vhodné podmínky, jako je doba zapnutí pulzu a elektrolytu. Mikro ECM je lepší ve srovnání s jinými procesy, protože nevytváří žádné tepelné ani mechanické poškození, nedochází při něm k žádnému otřepu a nečistoty, protože při této metodě se kovy rozpouštějí elektrochemicky, v důsledku čehož je kvalita povrchu vynikající. [18]

3 TRIBOLOGIE

Tribologie je běžný termín používaný pro charakterizaci skutečných povrchů z hlediska mazání, tření a opotřebení. Obecně se rozlišují tři mechanismy, které jsou zodpovědné za tření mezi dotýkajícími se tělesy při posuvu.

- Adheze, zahrnující smykové spoje tvořené kontaktními povrchovými plochami při vysokém tlaku a teplotě. Intenzivní adheze se objevuje, když dvě plochy v kontaktu spolu navzájem svařují.
- Plastická deformace ploch, která způsobuje materiálový tok, když se těleso posouvá po druhém, což je příčinou statického koeficientu tření.
- Rozrážení zaoblených řezných hran, když jsou velmi malé vrstvy z materiálu obrodku odstraňovány. Účinek je iniciován, když je tvrdý výstupek nebo tvrdá částice proniká do měkčího materiálu a vytváří drážku (bez úběru materiálu).

Účast těchto tří třecích mechanismů závisí na tribologickém podmínkách kontaktu. Například speciální povlaky s nízkým třením a kapalná maziva výrazně snižují interakci mezi plochami a tím i tření. Dominantní mechanismus tření v kluzných kontaktech bývá adhezní interakce mezi povrchy zejména u neelastických materiálů. Nicméně plastická deformace ploch se stává intenzivnější, protože styčné povrchy jsou drsnější a kontaktní zatížení je relativně vysoké. Tření má tendenci se zvyšovat s extrémně hladkými povrchy v důsledku nárůstu skutečné kontaktní plochy. [17]

3.1 Poškození povlaku v tribologii

Je důležité si uvědomit, že mechanický kontakt mezi pevnými tělesy je lokalizován do kontaktních míst v mikroměřítku, která dohromady tvoří skutečnou kontaktní plochu. Bez ohledu na nominální (nebo geometrickou) kontaktní plochu. Kontaktní plocha v těchto malých plochách je řádově stejná jako jejich tvrdost bez ohledu na jmenovitý přitlak. S ohledem na tuto skutečnost ve zjevně velmi mírně zatížených tribologických kontaktech. Jedním takovým příkladem je poškození, ke kterému dochází na keramických těsněních navzdory tomu, že jmenovitý kontaktní tlak je na úrovni stotisíckrát nižší než jejich tvrdost. Tribologický povlak může předčasně selhat v důsledku odtržení, delaminace, praskání anebo odlupování povlaku. Podobné mechanismy poškození se u homogenních materiálů vyskytují jen zřídka. Na druhé straně jsou pro povlaky typické stejné mechanismy postupného opotřebení jako u homogenních materiálů. Povlak musí být vybrán tak, aby odpovídal

tribologickému situaci a mechanismům poškození povrchu, které omezují životnost zamýšlené aplikace. Vhodná je klasifikace těchto mechanismů do tří kategorií.

- Poškození bez výměny materiálu.
- Poškození s úbytkem materiálu, tj. opotřebením.
- Poškození s nabráním materiálu. [19]

3.2 Poškození bez výměny materiálu

Tato oblast v podstatě zahrnuje trvalé změny v geometrie anebo topografie povrchu. Rozhodující parametry pro změnu geometrie jsou Youngův modul a tvrdost povlaku. Drobné škrábance nebo trhliny mohou diskvalifikovat tvářecí nástroj používaný např. k lisování. Tvrdost povlaku je rozhodujícím parametrem pro odolnost proti poškrábání a houževnatost povlaku je důležitá proti tvorbě škrábanců. [20]

3.3 Opotřebením (poškození s úbytkem materiálu)

Odolnost povlakované součásti proti opotřebením je dána především povlakem, pokud pokrývá kontaktní plochu. Jakmile je povlak částečně opotřeben nebo je podklad v důsledku selhání adheze nebo prasklin a odlupování, začne být důležitá odolnost materiálu podkladu proti opotřebením. Lze však rozlišit dvě hlavní kategorie: opotřebením, kterému dominuje odtržení povlaku, a opotřebením způsobeným postupným odstraňováním povlakového materiálu. Druhé jmenované často zahrnuje mírné opotřebením způsobené otěrem, erozí, chemickým rozpouštěním atd. a neodchyluje se od mechanismů způsobujících opotřebením homogenních materiálů. Obecně platí, že tribologické aplikace kladou vyšší nároky na přilnavost povlaku než v jiných oblastech použití, ačkoli se tyto požadavky mohou v jednotlivých situacích značně lišit. Je vhodné rozlišovat mezi skutečnými adhezními silami (pevnost fyzikální adheze nebo atomární vazby, která působí mezi povlakem a povrchem) a praktickou adhezí. Praktická přilnavost je schopnost povlakového kompozitu odolávat mezifázovému působení při praktickém použití. Přirozeně je horní hranice praktické přilnavosti souvisí s pevností atomární vazby, ale tento parametr nelze přímo měřit. [20]

3.4 Struktura povrchu na nástroji

Strukturování povrchu nebo texturování povrchu řezného nástroje je další nová technika, která přináší udržitelnost při řezání kovů. Tato strategie je jedinečným přístupem používaným ke zlepšení tribologických podmínek na styčných plochách. Texturovaný povrch

nástroje zlepšuje koeficient tření, řezné síly. Takovéto texturování povrchu na řezných nástrojích může umožnit ekologicky šetrné řezné operace, jako je řezání za sucha, při kterém je možnost opotřebení nástroje v důsledku adheze a tření. Za tímto účelem se používají různé typy povrchových textur byly různými výzkumníky vyryty na nástrojových destičkách použili laser k vytvoření struktury na WC nástrojích. Podle směru toku třísky se používají tři různé typy vzorků, a to kolmých, rovnoběžných a křížových. [21]

3.5 Životnost nástroje

Únavová životnost obráběného dílu silně závisí na stavu jeho povrchu. Již dlouho je známo, že únavové trhliny obvykle vznikají na volných plochách. To je dáno tím, že v povrchových vrstvách dochází k největším trhlínám vlivem zatížení a jsou vystaveny vlivům prostředí. Koncentrace napětí, oxidace a vyhoření prvků slitiny (při vysokých provozních teplotách) jsou faktory, které působí na povrchové vrstvy, které přispívají k iniciaci trhlín. Iniciaci a šíření trhlín lze ve většině případů přičítat celistvosti povrchu způsobené obráběním. Povrch součásti má dva důležité aspekty, které je třeba definovat a kontrolovat. Prvním aspektem jsou geometrické nepravidelnosti na povrchu a druhým metalurgické změny povrchu a povrchové vrstvy. Tento druhý aspekt byl označen jako integrita povrchu. Integrita povrchu je definována jako vztah mezi geometrickými parametry povrchu a fyzikálními vlastnostmi, jako je zbytkové napětí, tvrdost a odolnost povrchu. Integrita povrchu ovlivňuje kvalitu obrobeného povrchu a pod povrchů, což je velmi důležité při výrobě konstrukčních dílů, které musí odolávat vlivům okolního prostředí, vysokému statickému a dynamickému namáhání. Integrita povrchu byla navržena tak, aby označovala vlastnosti povrchu (mikrostruktura, tvrdost, povrchová, drsnost, zbytkové napětí), které ovlivňují funkčnost součásti. Zbytková napětí zanechaná soustružením závisí jak na typu materiálu, který je obráběného materiálu, tak na parametrech soustružení. Existují různé parametry, jako jsou řezná rychlost, posuv a nástroj, poloměr špičky, o nichž je známo, že mají velký vliv na kvalitu povrchu – Proto je důležité lépe porozumět tomu, jak proces dokončování ovlivňuje povrchovou úpravu. [22]

4 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE

Konvenční obráběcí operace, mezi které patří soustružení, frézování, broušení a vrtání, patří mezi nejběžnější činnosti ve výrobním průmyslu. S pomocí pokročilého počítačem podporovaného navrhování/počítačem podporované výroby (CAD/CAM) a řídicích systémů s otevřenou architekturou (OAC). Bohužel problém odstávek obráběcích strojů přetrvává i nadále trápí průmysl. Za prostoje lze považovat jakoukoli dobu, po kterou se na daném obrobku neprovádí žádná obráběcí operace. Jedním z problémů je, že k prostojům přispívá několik různých zdrojů, z nichž některé jsou nevyhnutelné. Často je nutné přenášet obrobky z jednoho obráběcího stroje na druhý, což vyžaduje demontáž a čas na seřízení. Kromě toho musí stroje procházet pravidelným údržbě, aby byla zajištěna jejich trvalá funkčnost za normálních podmínek. Existuje však i jiný typ prostojů kterému se lze vyhnout. Jde o prostoje způsobené nadměrným opotřebením a zlomením rezných nástrojů při obrábění. Lámání nástrojů je hlavní příčinou neplánovaných odstávek při a jsou nákladné nejen z hlediska času, ale také z hlediska zničeného kapitálu. Některé odhady uvádějí, že množství prostojů způsobených zlomením frézy na průměrného obráběcího stroje se pohybuje v řádu 6,8 %, zatímco jiné uvádějí blíží k 20 %. I v případě, že se nástroj během obrábění nezlomí, může použití tupých nebo poškozených fréz způsobit další systém obráběcího stroje a způsobit ztrátu kvality při obrábění hotového obrobku. V plně automatizovaných obráběcích prostředích nebo v prostředích s malým počtem pracovníků je včasná detekce stavu opotřebením rezných nástrojů a rozpoznání jejich poškození je považováno za zásadní pro zvýšení produktivity a efektivity nákladů. To má bylo předpovězeno, že přesný a spolehlivý systém sledování stavu nástroje (TCM) by mohl vést ke zvýšení rezné rychlosti o 10-50 %, zkrácení prostojů tím, že je bude možné předem naplánovat, a celkové zvýšení úspor v rozmezí 10-50 %. [21,22]

4.1 Trendy ve výzkumu TCM

Soustružení se často používá jako základ pro výzkum TCM. Důvodů je několik. Zaprvé, proces soustružení je jedním ze dvou poměrně jednoduchých případů obrábění; v nejjednodušším případě se jedná o ortogonální řezání, i když obvykle jde o šikmé řezání. Tyto typy řezání lze na rozdíl od jiných operací popsat pouze ve dvou rozměrech a díky této jednoduchosti se mohou základem definice mechaniky obrábění. Při ortogonálním řezání je jediná rezná hrana orientována kolmo ke směru řezu, ale rovnoběžně s obrobkem, zatímco při šikmém řezání je rezná hrana orientována pod sklonem ke směru řezu. obrobku. Za druhé,

soustružnické frézy jsou jediné obráběcí frézy, které se neotáčejí. Ve všech ostatních formách obrábění, se fréza otáčí přes translační obrobek. Nejen že snímače jsou ušetřeny zneužívání při otáčení stovkami či otáček za minutu, ale lze je také přímo připojit k systému sběru dat nebo úpravě signálu. To znamená, že není potřeba žádné speciální komunikační zařízení pro získávání dat ze snímačů, což snižuje náklady a snižuje složitost. V důsledku jednoduchosti a zásadní povahy otáčení, byly předmětem rozsáhlých studií. Jednou z nejoblíbenějších metod detekce opotřebení a lomů při soustružení je využití řezných sil. V několika případech se tato měření provádějí pomocí stolních dynamometrů, zatímco v jiných případech se řezné síly určují z parametrů vřetena a pohonu, včetně napětí, proudu a otáček. [23]

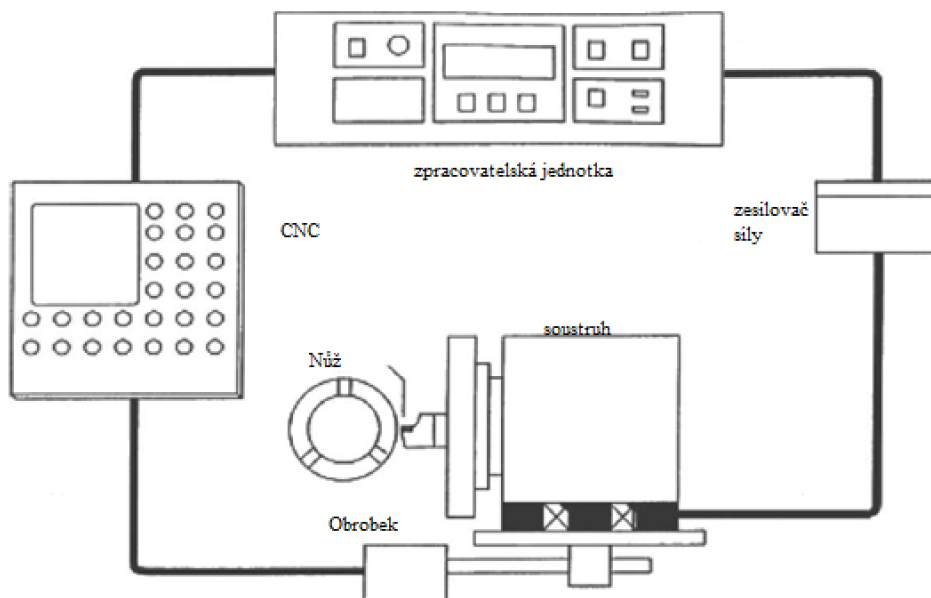
4.2 Měření opotřebení nástroje

Opotřebení boků a kráterů je nejdůležitější, a proto i nejčastěji měřenou formou opotřebení nástroje. Opotřebení boků se nejčastěji používá pro sledování opotřebení nástrojů, protože k němu dochází prakticky při všech obráběcích operacích. Opotřebení nástroje se nejčastěji měří zkoumáním stopy po opotřebení na nástroji pomocí mikroskopu nebo (méně často) pomocí měřicího nástroje. Ve dřívější praxi se hojně používaly nástrojářské mikroskopy s kalibrovanými okuláry nebo mikrometrické stupnice. V poslední době se pro rutinní měření staly standardem univerzální digitální mikroskopy. Nevýhodou těchto přístrojů však je, že obvykle poskytují pouze dvourozměrné informace. Pokročilejší mikroskopy využívající konfokální nebo okrajové projekční metody a také laserové interferometry byly vyvinuty pro univerzální trojrozměrné konturování nebo pro měření kvality povrchu nástrojů či přípravy hran. Dříve se pro 3D mapování stop po opotřebení používaly stylusové přístroje podobné profilometru. Vzhledem k tomu, že původně ostrá břitová hrana se zaobluje a původní hrana se ničí, je někdy nutné stanovit vztažnou čáru, od které lze měřit postup opotřebení boků. Video zobrazovací postupy poskytují prostředky pro porovnání ostrých a opotřebovaných hran, které stanoví a zachovají vztažnou čáru. Podobně lze k zaznamenání postupu opotřebení břitu použít fotografie břitu v určitých intervalech během životnosti nástroje. Lze použít i další techniky, jako je postupné obtahování nástroje od horní hrany a optické mapování obrysu. [23]

4.3 Sledování opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje je jedním z důležitých faktorů, které přispívají ke změnám řezných sil a jakosti povrchu. V aplikacích na přenosových linkách se opotřebované nástroje často vyměňují

na statistické bázi s rychlostí, kterou určuje podle nejkratší očekávané životnosti pro operace s více nástroji. V takových případech je významná životnost nástrojů může být promarněna a produktivita systému může být snížena. Alternativou je opotřebení nástrojů v procesu lze použít přístup sledování a řízení k předvídání opotřebení nástroje v procesu po celou dobu životnosti nástroje. Tento přístup je běžný při obrábění v leteckém průmyslu a při velkosériovém obrábění na CNC strojích. Opotřebení nástroje lze sledovat buď přímým, nebo nepřímým měřením. Přímé metody zahrnují měření opotřebení a vyhodnocení objemové ztráty nástroje v důsledku opotřebení nástroje pomocí optických, laserových skenovacích mikrometrů nebo elektrických odporových snímačů. Nepřímá měření opotřebení nástroje se provádí tak, že se opotřebení nástroje vztahuje k dalším řezným parametrům, jako je kvalita dílu, povrchová drsnost, řezná síla nebo krouticí moment, výkon motoru (nebo proud), akustické emise nebo vibrace. V oblasti monitorování a řízení obráběcích procesů bylo provedeno značné množství výzkumů. Výzkumné studie a několik výrobních aplikací ukázaly, že existuje dobrá korelace mezi mnoha měřitelnými veličinami a opotřebením boků. Všechny monitorovací systémy používají sofistikované techniky zpracování signálu nebo odhadu opotřebení. Výkonnost monitorovacího systému je vysoce závislý na kvalitě dostupných dat ze snímačů a na technice zpracování signálu. V mnoha případech se pro zvýšení spolehlivosti monitorovacího systému používá více snímačů. Pro ochranu obráběcího stroje před možným poškozením bylo vyvinuto několik monitorovacích nástrojů v důsledku kolize, chybějících nástrojů, zlomení nástroje nebo jeho opotřebení, jak je znázorněno na obrázku 10.



Obrázek 10 Systém sledování opotřebení nástrojů [23]

Monitory výkonu jsou nyní u současných obráběcích strojů běžné. Problémem může být citlivost, zejména u nástrojů s malým průměrem, a to z důvodu setrvačnosti a tření přítomného v systému. Deformace namontované v ložiskách vřetena a piezoelektrické snímače zatížení namontované pod nástrojem na citlivější na řezné síly. Novější technologie bezdrátových snímačů poskytují mnohem větší flexibilitu pro měření sil, vibrací atd., protože mohou být instalovány v rotačních součástech vřetena. [21]

4.3.1 Rentgenová difrakce

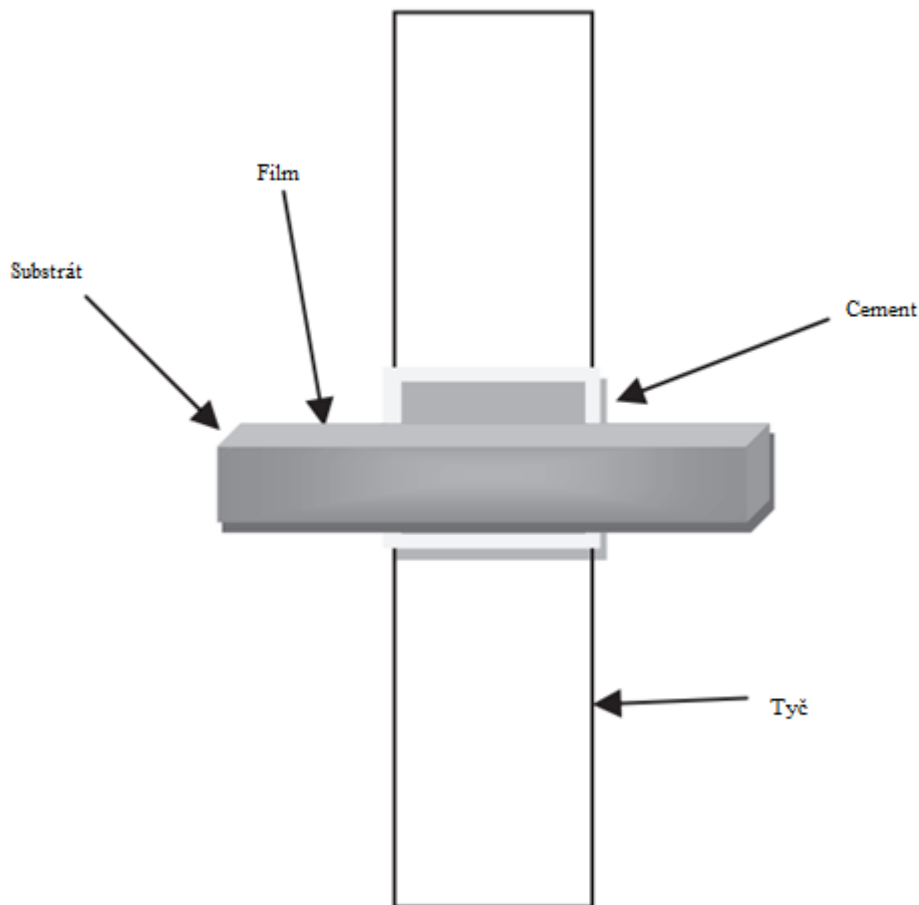
Rentgenová difrakce (XRD) je zdaleka nejvýkonnější technikou pro strukturní analýzu a fázovou analýzu. Když elektromagnetická vlna naráží na překážku nebo prochází štěrbinou (která je řádu její vlnové délky), má tendenci ke změně svých vlnových vlastností, např. má tendenci podléhat fázovému posunu, což vede ke konstruktivní nebo destruktivní interferenci. Všechny tyto jevy dohromady, které jsou výsledkem ohybu světla na okraji překážky, lze označit jako difrakci. Difrakce viditelného světla přes mřížku vytváří světlé a tmavé interferenční obrazce. Podobně může rentgenové záření difraktovat pomocí krystalické mřížky atomů s mezi rovinnými vzdálenostmi podobnými vzdálenostem rentgenového záření vlnové délky. Klasicky lze jev difrakce rentgenového záření atomovými rovinami popsat takto popsat podle difrakčního zákona. [12]

4.3.2 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie je nedestruktivní technika, díky níž lze vibrační přechody v látce. Různé sloučeniny existující v různých krystalografických modifikacích vykazují charakteristické Ramanovy pásy. Základem charakterizace materiálu pomocí Ramanovy spektroskopie je určení otisků těchto pásů. Ramanova spektroskopie poskytuje nejen informace o různých krystalografických fázích, ale také poskytuje informace o lokální vazbě kolem centrálního atomu. Je to zvláště užitečná při studiu oxidů kovů. Je to vynikající nástroj pro studium aniontových vakancí a strukturních defektů. Ramanova spektroskopie studuje nepružný rozptyl světla látkou. Když na vzorek dopadá laserové světlo, je nejen rozptýleno pružně podle klasických zákonů elektromagnetického záření, ale malá část je také rozptýlena nepružně, který je pak analyzován pomocí monochromátoru, a nakonec detekován pomocí fotonásobiče nebo zařízení s nábojovou vazbou. Proto se v Ramanově analýza změny vlnového čísla v rozptýleném záření poskytuje informace o tom, co se děje ve vibračních módech vzorku. [12]

4.4 Zkoušky povlaků

Kromě morfologie, struktury a složení jsou důležité také mechanické vlastnosti povlaků pro tribologické aplikace mimořádný význam. Prvním a nejdůležitějším kritériem dobrého povlaku je že by měl být přilnavý k podkladu. O povlaku se říká, že selhává, pokud se od podkladu odlupuje. S moderních technik nanášení, jako je fyzikální a chemické nanášení z par, nanášení pulzním laserem atd., se na různých substrátech vyrábí stále více přilnavých povlaků. Níže je uvedeno několik běžných metod zkoušení adheze tvrdých povlaků. Zkouška Scotch Tape je jednoduchý, ale velmi účinný test, při kterém se páska přiloží na povlaky a poté se rychle stáhne. Pokud se nátěr odstraní a odhalí podklad, říká se, že není k podkladu přilnavý. Zkouška Scotch Tape tedy poskytuje kvalitativní posouzení adhezních vlastností nátěru povlaků. Zkouška poškrábáním je důležitou technikou, která poskytuje kvantitativní měření přilnavosti. Při této technice se po povlaku škrábne indentorem pod vlivem rostoucím normálovým zatížením. Kritické zatížení se posuzuje podle poškození povlaku, které vzniká jako při pohledu pod mikroskopem a také z akustické emise. Historicky byla tato metoda používána ke zkoušení přilnavosti kovových povlaků na skle a oceli. Alternativně lze použít kovový válec pomocí epoxidového tmelu připevnit v pravém úhlu k povrchu povlaku a postupně jej přikládat k povrchu povlaku stupňovitě se zvyšující zatížení působí na dno válce rovnoběžně s povrchem povlaku. Zatížení, při kterém se přeruší spojení mezi válcem a povlakem a válec začne klouzat dolů, je následující mírou přilnavosti povlaku. Na obrázku 11 je znázorněno schéma zkoušky stržením pro adheze. Někdy se k tahu proti povlakům používá více než jedna tyč. Tyč může být také upevněna ve dvou různých polohách v povlacích. Zatížení tyče vnáší do povlaků buď tlakové, nebo tahové napětí, které je nutí v určitém bodě selhat. [12]



Obrázek 11 Schematické znázornění zkoušky přilnavosti tažením [25]

4.5 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL A TLOUŠŤKY TŘÍSEK

Řezné síly se často měří při zkouškách obrobitelnosti a výzkumu. Měření se obvykle provádí pomocí speciálně konstruovaných dynamometrů. K prvním výzkumům se používali různé hydraulické, pneumatické a tenzometrické přístroje. V poslední době se však používají piezoelektrické dynamometry využívající křemenné prvky pro měření zatížení se staly standardem pro rutinní měření. Ve srovnání s jinými konstrukcemi mají křemenné dynamometry vysokou tuhost a široký frekvenční rozsah v závislosti na způsobu montáže jsou běžné šířky pásma přes 1 kHz. Jsou také jsou velmi tepelně stabilní a vykazují malé statické křížové vazby mezi měřeními v různých směrech. Dynamometry se nejčastěji upevňují mezi nástroj nebo obrobek a nerotující zařízení konstrukce obráběcího stroje. Toto uspořádání zjednodušuje kabeláž potřebnou k směřování signálů k zesilovačům, jakož i interpretaci naměřených dat. Dynamometry tohoto typu se nazývají plošinové dynamometry. Tradičně se používají pouze k měření řezných ve třech směrech, ale v poslední době se používají čtyřsložkové frézovací dynamometry, které mohou měřit také

síly ve třech směrech, ale také krouticí moment na řezný nástroj. V některých aplikacích je však žádoucí namontovat dynamometr na vřeteno tak, aby měřil síly v rotujícím souřadném systému. To se nejčastěji týká zkoušek vyvrtávání a frézování, protože síly na jednotlivých břitových destičkách lze rozlišit bez geometrických transformací signálů, a při zkouškách na nepravidelných břitových destičkách, které se provádějí na dílech, které představují potíže s upevněním. [24]

5 TRENDY V NÁSTROJÍCH

5.1 Zlepšení ochrany proti opotřebení a snížení tření pro povlaky

Tradiční povlaky byly důkladně studovány pro kontrolu tření a opotřebení a byly používány pro velká zařízení, která byla obvykle používány v provozních podmínkách, které trpěly závažnými opotřebení. Nedávná pozornost věnovaná miniaturizaci urychlila podněty pro aplikaci povlaků na MEMS a NEMS. Dva základními předpoklady pro konstrukci těchto povlaků jsou jejich nízké tření a vysoká odolnost proti opotřebení, jakož i dlouhotrvající vysoká vodivost při složitých kontaktech. Motivem je těmito problémy se výzkumy výrazně zaměřily na povlaky na bázi uhlíku, které vykazují vynikající vlastnosti odolnosti proti opotřebení, nízké tření, vysokou vodivost, vynikající mechanické a fyzikální vlastnosti. Mezi těmito materiály na bázi uhlíku jsou uhlíkové nanomateriály mají dobře organizovanou strukturu jak na atomární, tak na mezoskopické úrovni. měřítku, což jim propůjčuje dobrou vodivost. Vynikající mechanické a elektrické vlastnosti uhlíkových nanomateriálů oproti jiným materiálům tradičních povlakových materiálů je činí velmi atraktivními pro tribologické a elektromechanické aplikace jak v mikroměřítku, tak v makro měřítku. Povlaky z uhlíkových nanomateriálů skutečně zaznamenaly v posledních letech rychlý rozvoj. [25]

5.2 Grafen

Grafen, jedna vrstva uhlíkových atomů, přináší jedinečné vlastnosti, jako je vysoká pevnost, nízká hmotnost a vynikající tepelná vodivost. Přidání grafenu do materiálů nástrojů může zlepšit jejich mechanické vlastnosti a zároveň redukovat opotřebení. Je známo, že grafen má vysokou tuhost, pevnost, tepelnou vodivost a odolnost vůči vodě, nepropustnost pro kapaliny a plyny. Kromě toho se vyznačuje kombinací vynikajících fyzikálních a chemických vlastností spolu s nízkými výrobními náklady činí z grafenu vhodnějšího kandidáta na výběr v nano elektromechanických a miniaturizovaných zařízeních. Atomová tloušťka grafenu nehledě na to, že je jedním ze známých nejodolnějších materiálů s vnitřní pevností 130 GPa, grafenu nabízí velký potenciál pro použití jako ultratenký materiál, také jako ochranných povlaků pro několik přesných součástí vystavených kontaktnímu namáhání a slouží také jako ideálním kandidátem pro celou řadu MEMS a NEMS, kde se používají atomárně tenké pevné mazací látky a vynikající proti opotřebení. Kromě toho tyto vynikající vlastnosti grafenu umožňují jeho udržet trvalejší a vysoce účinný mazací výkon i při náročných tribologických podmínkách, jako je extrémní tlak, extrémní teplota a extrémní mechanické namáhání. [26]

5.3 Nano vzory

Je dobře známo, že topografie povrchu může ovlivňovat tření. Proto v okolí na světě se zkoumá vliv mikro/nano textur na tření a hledá optimální způsob, jakým by se daly ovlivnit textury pro různé aplikace. Mikro/nano textury jsou slibné při snižování tření především díky tomu, že díky následujícím mechanismům. Za prvé, mikro/nano vzory, jako jsou drážky, mohou poskytnout prostor pro nečistoty během tření, a proto snižují opotřebení způsobené nečistotami. Pevné úlomky, zejména ty, které jsou vyrobeny z tvrdých materiálů umístěných mezi dvěma třecími plochami mohou vést ke značnému mechanickému opotřebení. Za druhé, mikro/nano vzory mohou účinně zmenšit skutečnou kontaktní plochu, a tím také účinnost tření a rychlost opotřebení. Optimální geometrie textur, včetně velikostí, tvarů a výšek, závisí na mazání, podmínkách tribologických aplikací, jako jsou mechanické vlastnosti tribopáru, podmínky zatížení a parametrech prostředí. Proto optimalizace textur postrádá univerzální návod a závisí na experimentálních studiích pro každý jedinečný případ. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

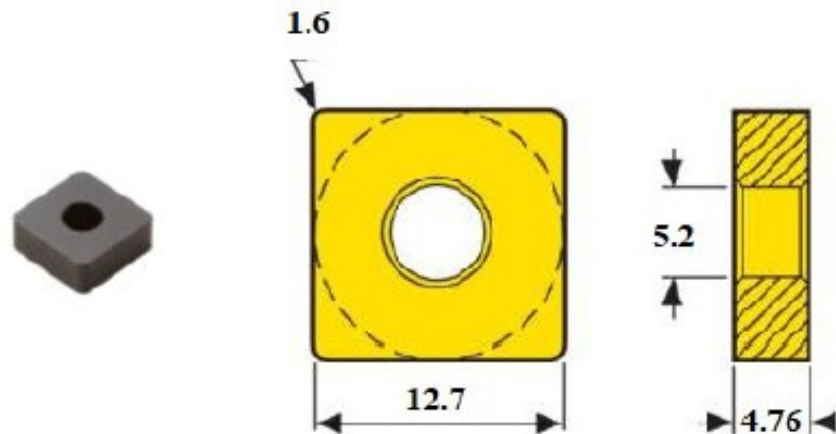
Vliv různých drsností nepovlakovaných vyměnitelných břitových destiček s rovnou čelní plochou bude experimentálně zkoumán při soustružení v praktické části této diplomové práce. Tato zkoumání budou zaměřena na analýzu vlivu rozdílné drsnosti na vybrané parametry, které jsou ovlivňovány procesem soustružení. Mezi sledované parametry budou zařazena opotřebení vyměnitelných břitových destiček, velikost složek řezných sil působících na řezný nástroj během obrábění, kvalita povrchu obráběné plochy, úhel střižné roviny a koeficient přechování vzniklé třísky.

Provedení experimentů bude prováděno na CNC soustružnicko-frézovacím centru NTX 1000, který poskytuje ideální podmínky pro systematické testování. K měření řezných sil bude použit měřicí piezoelektrický dynamometr Kistler 9129AA, který bude pečlivě upevněn na stroji. Pro připojení soustružnických nožů s texturovanými vyměnitelnými břitovými destičkami k druhé straně dynamometru bude využit adaptační prvek pro upevnění soustružnických nožů. Tento adaptér bude spojen s nožovou hlavou a následně připojen k zesilovači s integrovaným sběrem dat Kistler 5167A. Naměřená data budou dále přenesena do prostředí měřicího softwaru DynoWare, kde budou podrobně analyzována a interpretována. Tímto systematickým experimentálním přístupem bude možné získat důkladné poznatky o vlivu drsnosti břitových destiček na proces soustružení a jeho vlastnosti.

7 ZKUŠEBNÍ VZORKY

V oblasti obrábění kovů a dalších materiálů hrají klíčovou roli řezné destičky, jelikož umožňují provádět přesné a efektivní frézování, soustružení a další operace. Mezi významné výrobce řezných destiček patří společnost Seco Tools, která nabízí širokou škálu produktů pro různé aplikace. Jedním z nich je destička SNMA120416 TK0501.

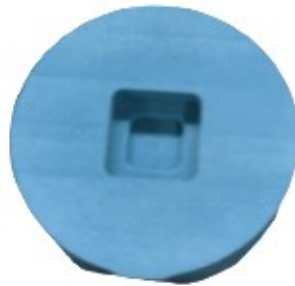
Destička SNMA120416 TK0501 je vyrobena z vysoce kvalitního karbidového materiálu, čímž se vyznačuje vysokou odolností proti opotřebení a dlouhou životností. Tato vlastnost je klíčová zejména při obrábění tvrdých materiálů, jako jsou oceli a slitiny. Destička disponuje geometrií označenou jako TK0501, která je optimalizována pro různé typy materiálů a obráběcích operací. Díky tomu je dosaženo maximální účinnosti řezu a minimalizace opotřebení. Destička SNMA120416 TK0501 je určena pro soustružení a vzhledem ke své univerzálnosti je oblíbenou volbou pro řadu průmyslových aplikací.



Obrázek 12 Řezná destička SNMA120416 TK0501

7.1 Přípravné upínky

Při vytváření přípravných modelů pro následné povrchové úpravy. Po analýze požadavků na finální povrch byly navrženy jednoduché modely, které splňují požadované standardy. Frézování těchto modelů na obráběcím centru DMU 50 bylo provedeno s důrazem na praktičnost a rychlost. Standardní nastavení stroje a volba vhodných fréz umožnila dosažení potřebných rozměrů a povrchové kvality. Po dokončení frézování byly modely připraveny k dalšímu zpracování. Upevnění pro pískování a magnetoreologické leštění bylo provedeno jednoduše a spolehlivě, aby byla zajištěna stabilita během těchto procesů.



Obrázek 13 Vyrobený přípravek

8 JAKOST POVRCHU DESTIČEK

V kapitole číslo 8 bude provedeno popsání drsnosti referenční, pískované a MRF vyměnitelných břitových destiček (VBD). Dále bude popsána metodika, která byla použita k dosažení drsnosti pískované a MRF VBD.

8.1 Měřicí přístroj

Mitutoyo Surftest SJ-410 přístroj pro měření povrchové drsnosti, který se v průmyslových aplikacích používá k zajištění kvality výroby a kontrolním procesům. Tento přenosný přístroj nabízí vysokou přesnost a spolehlivost při měření různých povrchových parametrů, což umožňuje uživatelům získat podrobné informace o textuře a hrubosti povrchu dílů. Jednou z klíčových vlastností Surftest SJ-410 je jeho univerzální schopnost měření, která zahrnuje širokou škálu parametrů, jako jsou Ra, Rz, Rq a Rt. Tato flexibilita umožňuje uživatelům přizpůsobit měření různým povrchům a aplikacím, což je zásadní pro různorodost výrobních prostředí. Díky uživatelsky přívětivému rozhraní a digitálnímu displeji je obsluha přístroje SJ-410 snadná a intuitivní, což zjednodušuje práci i pro uživatele s omezenými zkušenostmi v oblasti měření povrchové drsnosti. [27]



Obrázek 14 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-410 [27]

8.2 Drsnost povrchu destiček

V následujících podkapitolách se popisuje a vyhodnocuje drsnost VBD.

8.2.1 Destičky bez úprav

Měření probíhalo na drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-410 při stanovených podmínkách:

Tabulka 1 Podmínky vyhodnocení

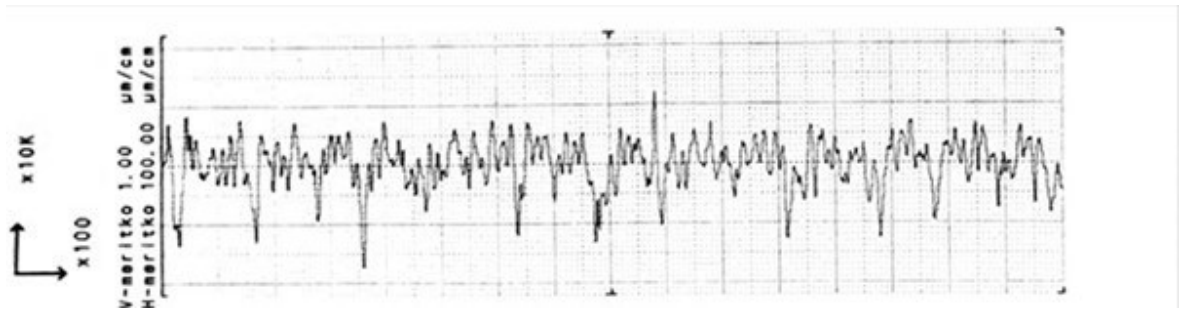
Podmínky vyhodnocení	
Norma	ISO1997
Profil	R
Filtr	GAUSS
λ_c	0,8 mm
λ_s	2,5 μm
N	3

- Referenční destička bez úprav

Tabulka 2 Výsledky referenční VBD

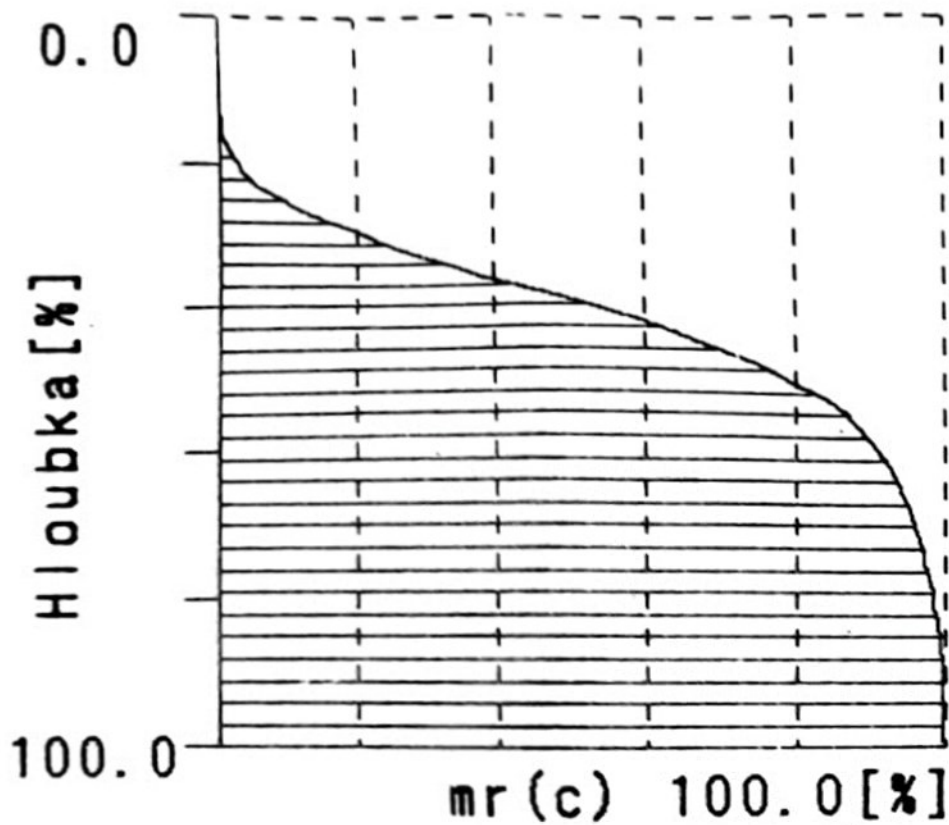
Výsledky drsnosti	
Ra	$0,308 \pm 0,021 \mu\text{m}$
Rq	$0,4 \pm 0,034 \mu\text{m}$
Rz	$2,528 \pm 0,289 \mu\text{m}$

Měřicím přístrojem Mitutoyo Surftest SJ-410 byl vyhodnocen taktéž R-profil drsnosti, který ukazuje grafické znázornění povrchové drsnosti materiálu, kde vertikální osa představuje hloubku drsnosti a horizontální osa představuje délku profilu. R-profil je typicky získán měřením povrchu materiálu. R-profil drsnosti se skládá z různých složek, jako je výška výstupků a hloubka prohlubní, které se vyskytují na povrchu materiálu.



Obrázek 15 R-profil referenční destičky

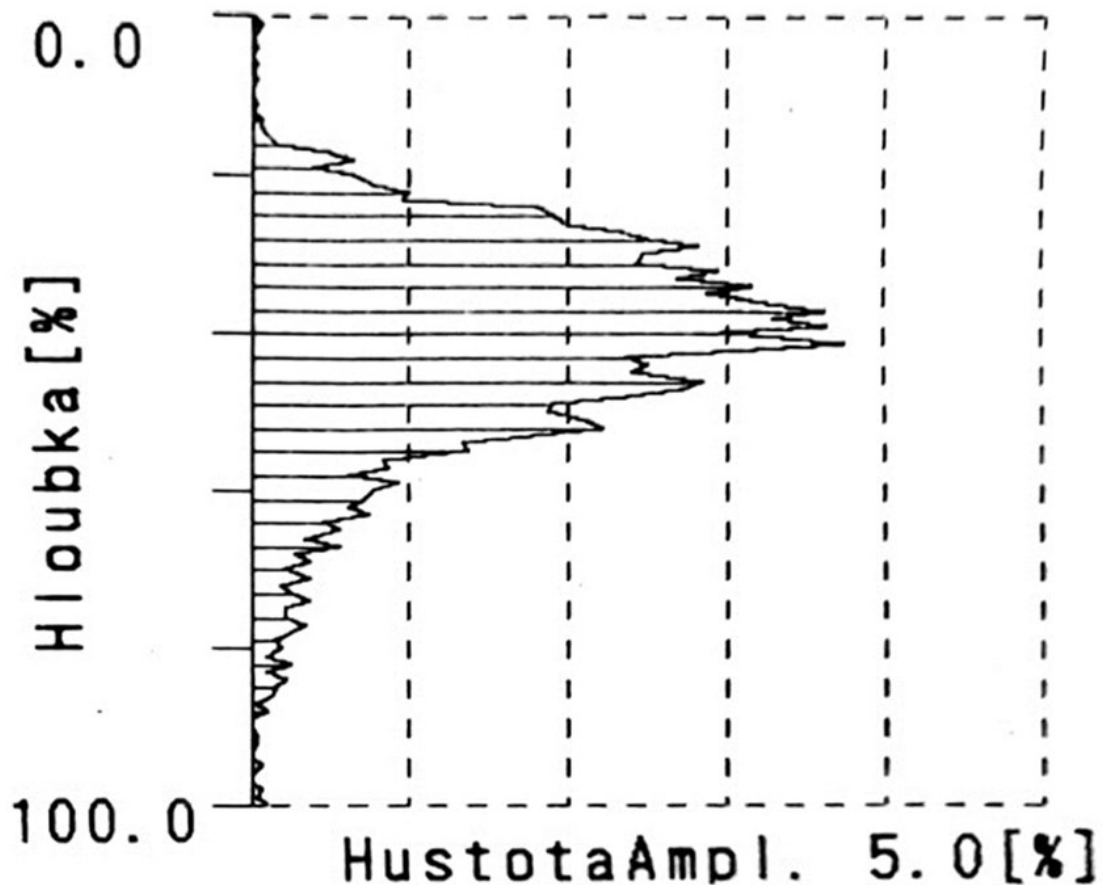
Na grafu jde vidět pravidelné uspořádání s pár vysokými peaky. Graf vyhodnotil přístroj, s nastavenými podmínkami v Tabulka 1 Podmínky vyhodnocení, délka měřené části na vzorku byla 6 mm.



Obrázek 16 Křivka materiálového poměru profilu referenční destičky

Nosná křivka, známá jako Abbott-Firestoneova křivka, je grafické zobrazení materiálového poměru profilu v závislosti na výšce úrovně řezů. Tento graf pomáhá při analýze povrchové hrubosti nebo textury materiálu. Ukazuje, jak se materiálový poměr profilu mění v různých úrovních řezů materiálu. Tato křivka je interpretována jako funkce kumulativní pravděpodobnosti hodnot pořadnic $Z(x)$ v určitém rozsahu délky. To znamená, že poskytuje

informace o rozložení výškových odchylek na povrchu materiálu vzhledem k určité referenční rovině. Tato analýza je důležitá pro hodnocení a charakterizaci povrchové drsnosti materiálu.



Obrázek 17 Amplitudové rozdělení referenční destičky

Nosná křivka, známá jako Abbott-Firestoneova křivka, zobrazuje posunutí maximální hodnoty hustoty pravděpodobnosti ve srovnání s Gaussovým rozdělením výškových odchylek vůči střední čáře. Tento tvar je klíčový při hodnocení struktury povrchu, zejména šikmosti a špičatosti, a pro klasifikaci asymetrických profilů. Pomáhá lépe porozumět chování a povaze povrchu, což má vliv na procesy zpracování a vlastnosti povrchu.

Šikmost profilu (R_{sk}), které je naměřeno záporné, vykazuje převahu dolních extrémů nad horními extrémy. Jinými slovy, tento parametr označuje, že povrch má tendenci mít výstupky (výškové odchylky) více směrem dolů než nahoru. Toto může naznačovat, že povrch je spíše skloněn dolů nebo má nějakou formu asymetrie, kde jsou větší výškové odchylky ve směru klesání než ve směru stoupání.

8.2.2 Pískování destiček

Vyměnitelná břitová destička byla umístěna do přípravku, kde byla schválně zhoršena drsnost povrchu pro porovnání a další měření. Pro tento proces bylo využito ruční tryskací zařízení Sinterit SANDBLASTER a abrazivní materiál korund hnědý zrnitosti 180 (označený jako K-H-F180).

Tabulka 3 Vlastnosti hnědého korundu zrnitosti 180

barva	hnědá
tvar zrna	ostrohranná
velikost zrna	90 – 75 μm
tvrdost	9 Mohs
typická tvrdost	2000kg/mm ² dle Knoopovy stupnice tvrdosti



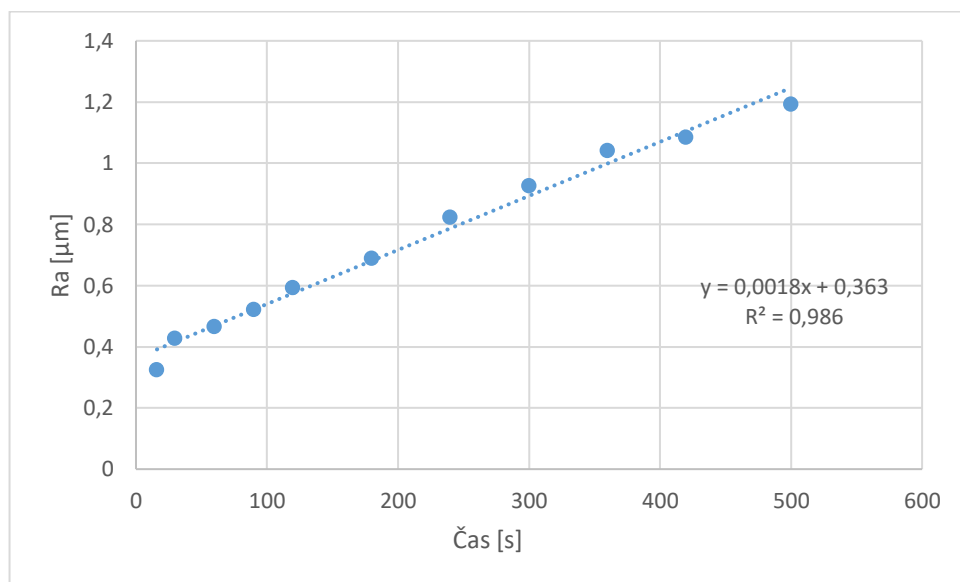
Obrázek 18 Ruční tryskací zařízení Sinterit SANDBLASTER [28]

Manipulace s ruční tryskací zařízením přinesla určité výzvy v dosažení rovnoměrné drsnosti na všech čtyřech destičkách. Nicméně, i přes tuto výzvu byla situace efektivně řešena a tato nedokonalost byla integrována do procesu. Různá míra drsnosti na destičkách byla kompenzována přizpůsobením následných procesů při další integraci. Volba korundu zrnitosti 180 byla vhodná, neboť umožnila dosáhnout ideální rovnováhy mezi účinností

abraze a ochranou povrchu destičky. Proces pískování byl prováděn s důrazem na preciznost a pečlivost, aby byla dosažena konzistence výsledného povrchu.

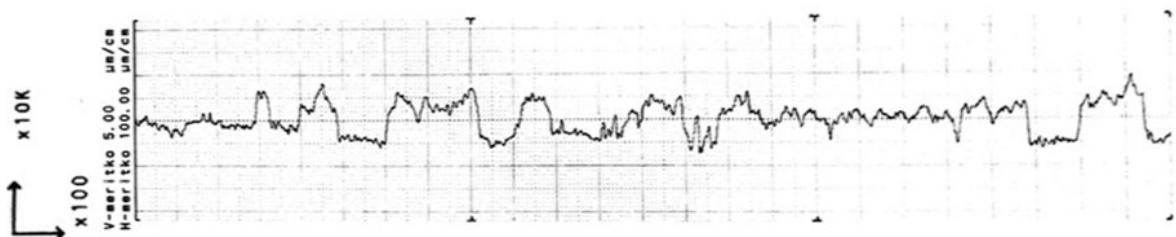
Tabulka 4 Jakost povrchu v závislosti na čase pískování

Čas (s)	16	30	60	90	120	180	240	300	360	420	500
Drnost (μm)	0,32	0,42	0,46	0,52	0,59	0,68	0,82	0,92	1,04	1,08	1,19
	5	7	2	1	3	8	3	6	0	4	3



Obrázek 19 Graf závislosti drsnosti na čase pískování

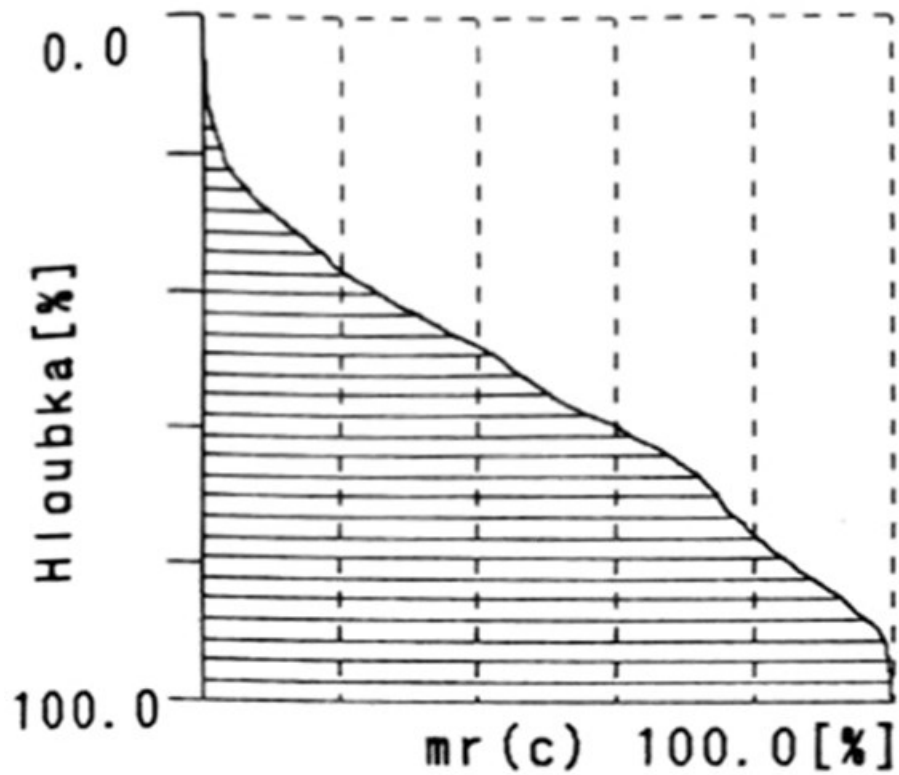
Na začátku procesu měla břitová destička průměrnou drsnost R_a kolem $0,3 \mu\text{m}$, avšak díky práci s ručním tryskacím zařízením byla tato hodnota zvýšena na $1-1,4 \mu\text{m}$. I přes neúplnou rovnoměrnost drsnosti na destičkách bylo dosaženo požadovaného zvýšení drsnosti a tím byly destičky připraveny pro další fáze procesu.



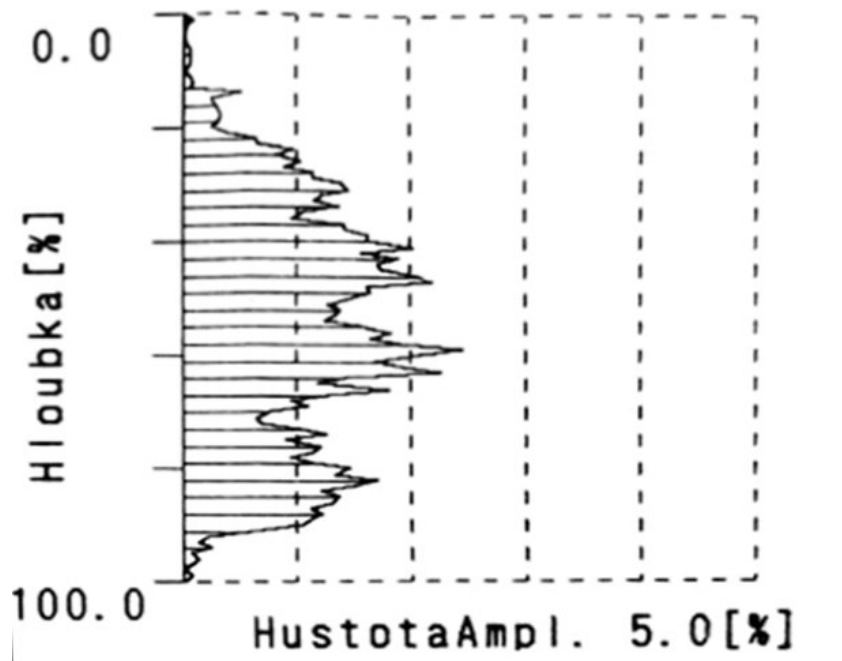
Obrázek 20 R-profil pískované VBD

Na grafu jsou interpretovány "peaky", které představují významné a dlouhotrvající extrémní hodnoty parametru R-profilu. Tyto "peaky" vykazují významné zvýšení hodnoty R-

profilu, které trvá po určitou dobu než následuje pokles zpět k nižším hodnotám. Tento jev signalizuje významné a dlouhodobé změny v nerovnostech povrchu, které mají potenciál výrazně ovlivnit jeho vlastnosti a chování. Jsou zapříčiněny ručním pískováním, kde se rovnoměrně nezdrsnila destička.



Obrázek 21 Křivka materiálového poměru profilu pískované destičky



Obrázek 22 Amplitudové rozdělení pískované destičky

Amplitudové rozdělení pískované destičky, který, má odlišné rozložení a charakteristiky. Graf nevykazuje tak výraznou tendenci k převaze dolních extrémů nad horními, místo toho má rozprostřenější rozložení výškových extrémů. Namísto jednoznačného převládajícího směru extrémů (dolů nebo nahoru) tento graf ukazuje více rovnoměrné rozložení výškových odchylek v různých směrech. To naznačuje, že povrch má rozmanitější rozložení nerovností, které se vyskytují v různých směrech, a zároveň má nižší průměrnou výšku extrémů, což může odrážet menší a méně výrazné nerovnosti.

8.2.3 Zlepšení drsnosti destiček

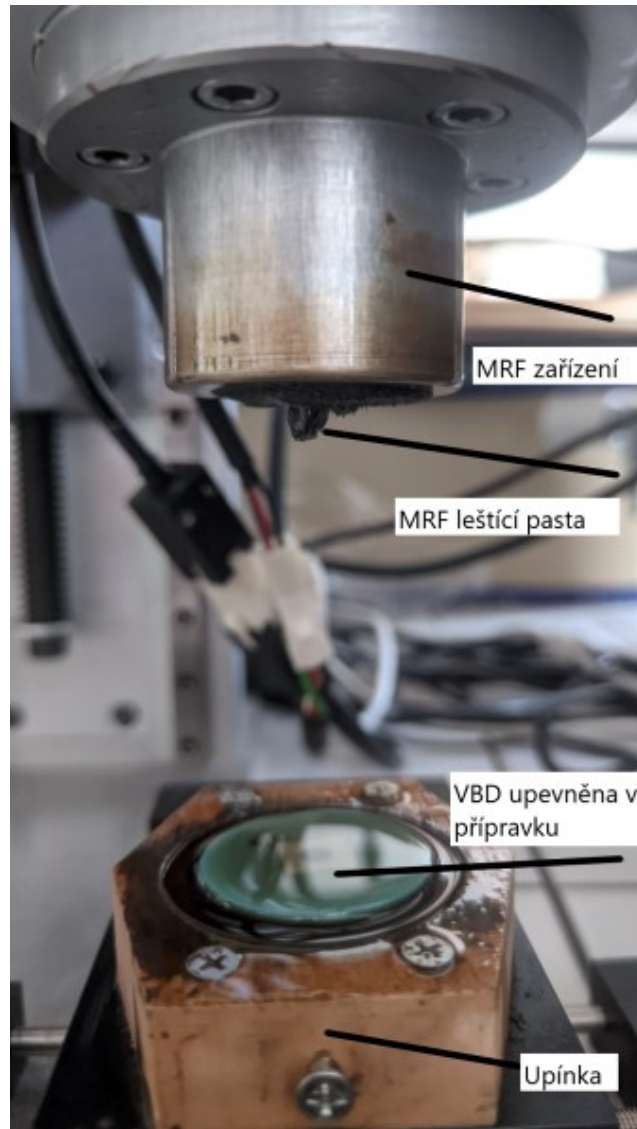
Zlepšení bylo prováděno na zařízení, které bylo využíváno k magnetoreologickému obrábění. Toto zařízení se nachází na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně (UTB).



Obrázek 23 Zařízení pro MRF leštění

Samotné zařízení je navrženo pro zpracování vzorků kruhového průřezu o průměru 20 mm nebo vzorků čtvercového průřezu o délce strany 20 mm. Maximální otáčky hřídele s magnetem dosahují 3 000 otáček za minutu. Destička, na které probíhaly zkoušky, byla upevněna do vyfrézovaného přípravku, který byl připraven. Přípravek s destičkou byl umístěn do MRF přístroje a něj byla použita mou připravené směs pro leštění

Při přípravě směsi pro MRF leštění byla zvolena příměs 6% AL_2O_3 zrnitosti K 180. Tato příměs byla důležitá pro dosažení požadované hrubosti povrchu, neboť byla již dříve úspěšně využita k pískování a zdrsňení povrchu. Pro magnetickou fixaci a manipulaci byly přidány magnetické částice ve složení CICN, které tvořily 36% celkové hmotnosti směsi. Tato složka byla důležitá pro správnou distribuci abrazivních částic na povrchu břitové destičky. Jako nosná kapalina byl vybrán olej WD-40, který poskytoval potřebnou lubrikaci a zároveň chránil povrch destičky před nadměrným opotřebením. Celková hmotnost směsi dosáhla 10 g, která byla pečlivě aplikována do přístroje na MRF. Destička byla pevně umístěna v přípravku, aby bylo zajištěno přesné a konzistentní leštění.



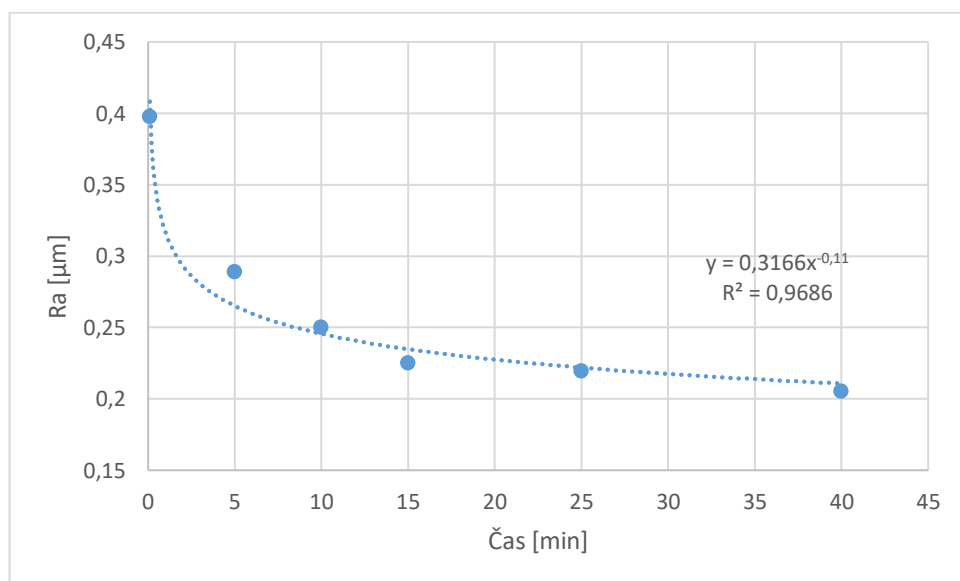
Obrázek 24 Destička v přípravku zalitá směsí v MRF zařízení

Zvoleny byly podmínky procesu s mezerou o velikosti 1 mm a rychlostí 5 ot/s, při kterých byla intenzita magnetického pole udržována na úrovni 420 kA m^{-1} . Tato kombinace faktorů umožnila zkoumání daného jevu nebo procesu v optimálním prostředí. Velikost mezer byla důležitá pro dosažení požadovaných výsledků, zatímco rychlost 5 ot/s a intenzita magnetického pole 420 kA m^{-1} byly klíčové parametry pro dosažení požadovaného chování materiálu nebo interakce mezi materiály. Následné měření probíhalo na přístroji Mitutoyo Surftest SJ-410 a průběh drsnosti byl zaznačen do grafu.

Tabulka 5 Průběh drsností při MRF

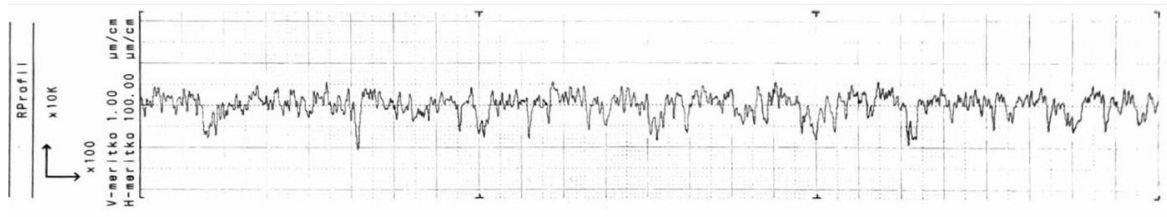
Čas [min]	0	5	10	15	20	40
Drnost [μm]	0,411	0,355	0,255	0,224	0,211	0,185
	0,386	0,38	0,248	0,214	0,211	0,189
	0,391	0,257	0,222	0,222	0,235	0,222
	0,379	0,227	0,254	0,241	0,226	0,215
	0,421	0,226	0,272	0,224	0,235	0,216
Průměr [μm]	0,398	0,289	0,251	0,225	0,224	0,205
Směrodatná odchylka [μm]	0,015	0,065	0,016	0,008	0,011	0,016

Leštění destiček, které probíhalo, bylo zjištěno být procesem s exponenciální závislostí až díky provedeným měřením. Původní průměrná drsnost destiček, které byly zakoupeny (bez jakýchkoli úprav), činila 0,4 μm . Nicméně, díky leštění metodou MRF, došlo k výraznému zlepšení povrchové kvality. Průměrná drsnost byla snížena na 0,2 μm a v některých lokálních oblastech dokonce na 0,18 μm . Tím nejen byla překonána původní drsnost, ale také byl dosažen bod, kde se blížíme k limitu exponenciální závislosti.

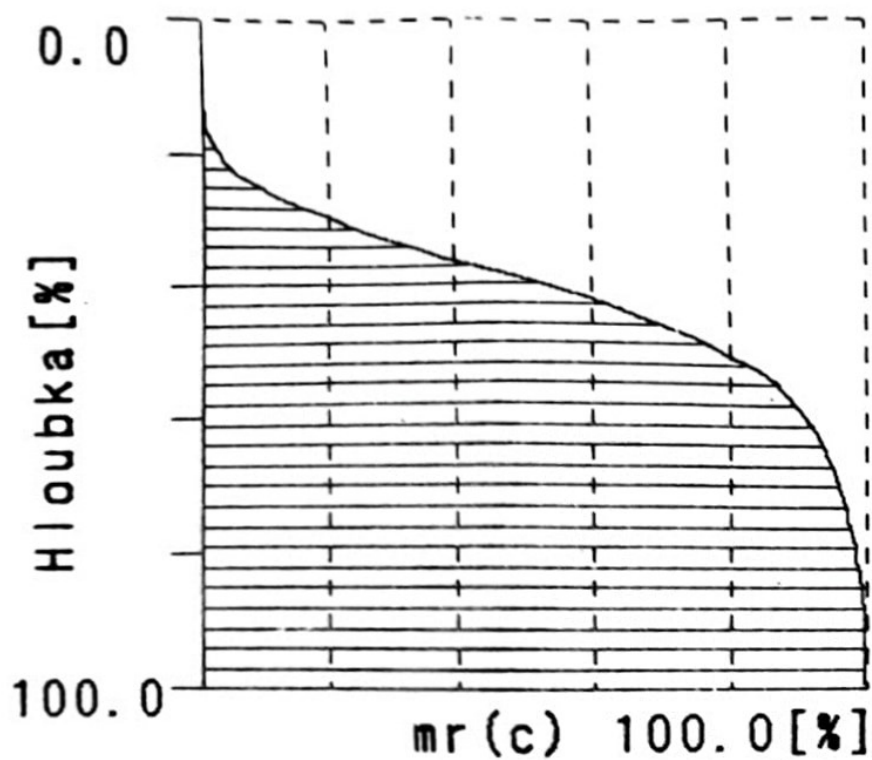


Obrázek 25 Závislost drsnosti leštěného povrchu na čase

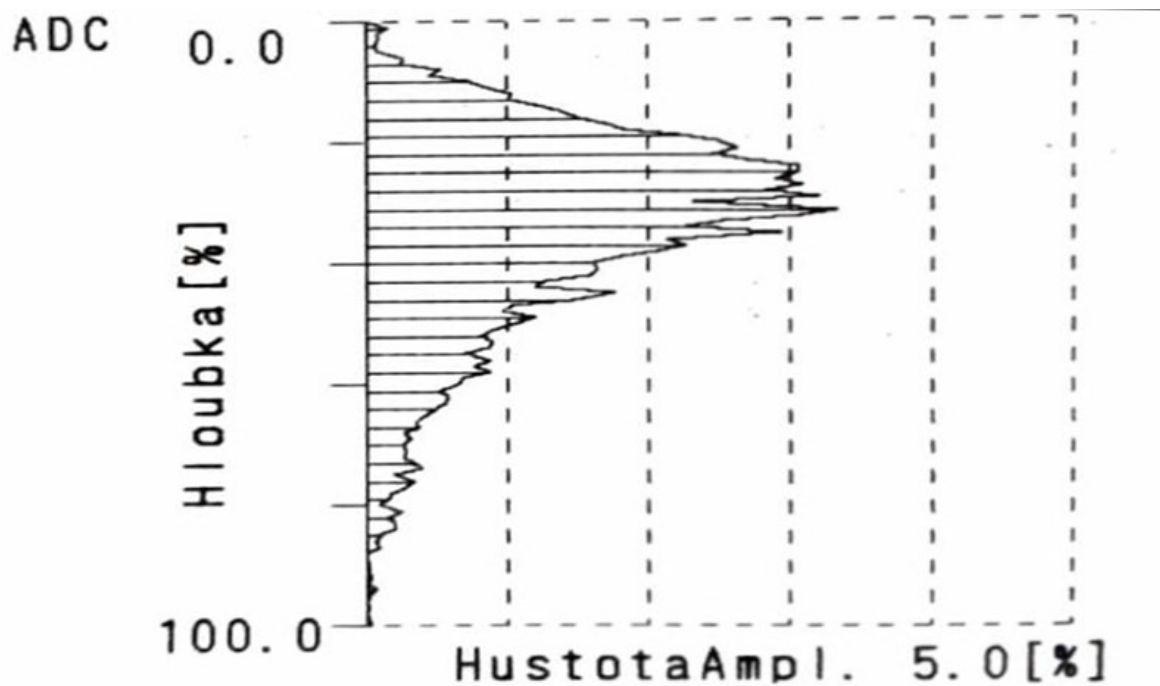
Na grafu jde vidět pravidelné uspořádání s pár vysokými peaky. Graf vyhodnotil přístroj, s nastavenými podmínkami v tabulce 1, délka měřené části na vzorku byla 6 mm



Obrázek 26 R-profil MRF VBD



Obrázek 27 Křivka materiálového poměru profilu MRF destičky



Obrázek 28 Amplitudové rozdělení MRF destičky

Šikmost profilu (Rsk), které je naměřeno záporné, vykazuje převahu dolních extrémů nad horními extrémů. Jinými slovy, tento parametr označuje, že povrch má tendenci mít výstupy (výškové odchylky) více směrem dolů než nahoru. Toto může naznačovat, že povrch je spíše skloněn dolů nebo má nějakou formu asymetrie, kde jsou větší výškové odchylky ve směru klesání než ve směru stoupání.

9 PODMÍNKY EXPERIMENTU

Pro úspěšné provedení experimentu bylo nezbytné sestavit měřící sestavu. Nejprve byly k dynamometru KISTLER 9129AA připevněny adaptační prvky pro upnutí do nožové hlavy a adaptér pro uchycení soustružnického nože. Dynamometr KISTLER 9129AA je vysoce přesným zařízením určeným pro měření síly působící na nástroj během soustružení. Adaptační prvky umožňují stabilní a bezpečné uchycení nástroje.

V adaptéru pro uchycení soustružnického nože byl umístěn soustružnický nůž společně s destičkami různých drsností. Tato připravená sestava byla dále propojena se sběračem a zesilovačem Kistler 5167A. Zesilovač Kistler 5167A slouží k zesílení signálu měřené síly a jeho převodu do digitální podoby. To umožňuje přesné a spolehlivé zachycení síly působící na soustružnický nůž a destičky během experimentu.

Zesilovač byl následně připojen k počítači pomocí síťového kabelu, na kterém běžel měřící software Dynoware. Tato sofistikovaná softwarová platforma umožnila sledování a analýzu naměřených dat v reálném čase, což bylo klíčové pro efektivní provedení experimentu a získání relevantních výsledků. Takto zajištěné propojení umožnilo spolehlivé a přesné měření v průběhu celého procesu.

Experiment probíhal na soustružnicko-frézovacím centru NTX1000, vysoce výkonném a precizním zařízení určeném pro obrábění kovů. Do sklíčidla byla upnuta zkušební tyč $\varnothing 50$ ČSN 425510.12 - 11600 o délce 500 mm. Tato zkušební tyč poskytovala stabilní a spolehlivou platformu pro provádění měření.

Před samotným měřením proběhla příprava polotovaru na centru NTX1000, během níž bylo odstraněno čelo a obvod. Tím bylo zajištěno, aby na polotovaru nebyly přítomny okraje, které by mohly ovlivnit přesnost měření.

9.1 Přístroje

V následujících podkapitolách budou popsány přístroje a nástroje, které byly použity k experimentu

9.1.1 CNC

NTX 1000 DMG MORI je univerzální pětiosé obráběcí centrum, které kombinuje funkce soustruhu a frézky v jednom robustním a kompaktním stroji. Nabízí vysokou přesnost,

produktivitu a flexibilitu pro výrobu složitých součástí v široké škále průmyslových odvětví.

Klíčové vlastnosti:

- Pětiosé simultánní obrábění: Umožňuje obrábění složitých tvarů s maximální přesností a efektivitou.
- Vysoká tuhost konstrukce: Zaručuje stabilitu a tlumení vibrací pro dosažení nejvyšší kvality obrábění.
- Výkonné vřeteno: Hlavní vřeteno s otáčkami až 20 000 ot/min a proti vřeteno s otáčkami až 4 000 ot/min pro širokou škálu obráběcích operací.
- Velký zásobník nástrojů: Až 120 nástrojů s automatickou výměnou nástrojů (ATC) pro rychlé a flexibilní obrábění.
- Moderní řídicí systém: Snadné ovládání a programování s intuitivním rozhraním.
- Široká škála volitelných doplňků: Pro přizpůsobení stroje specifickým potřebám.

Výhody:

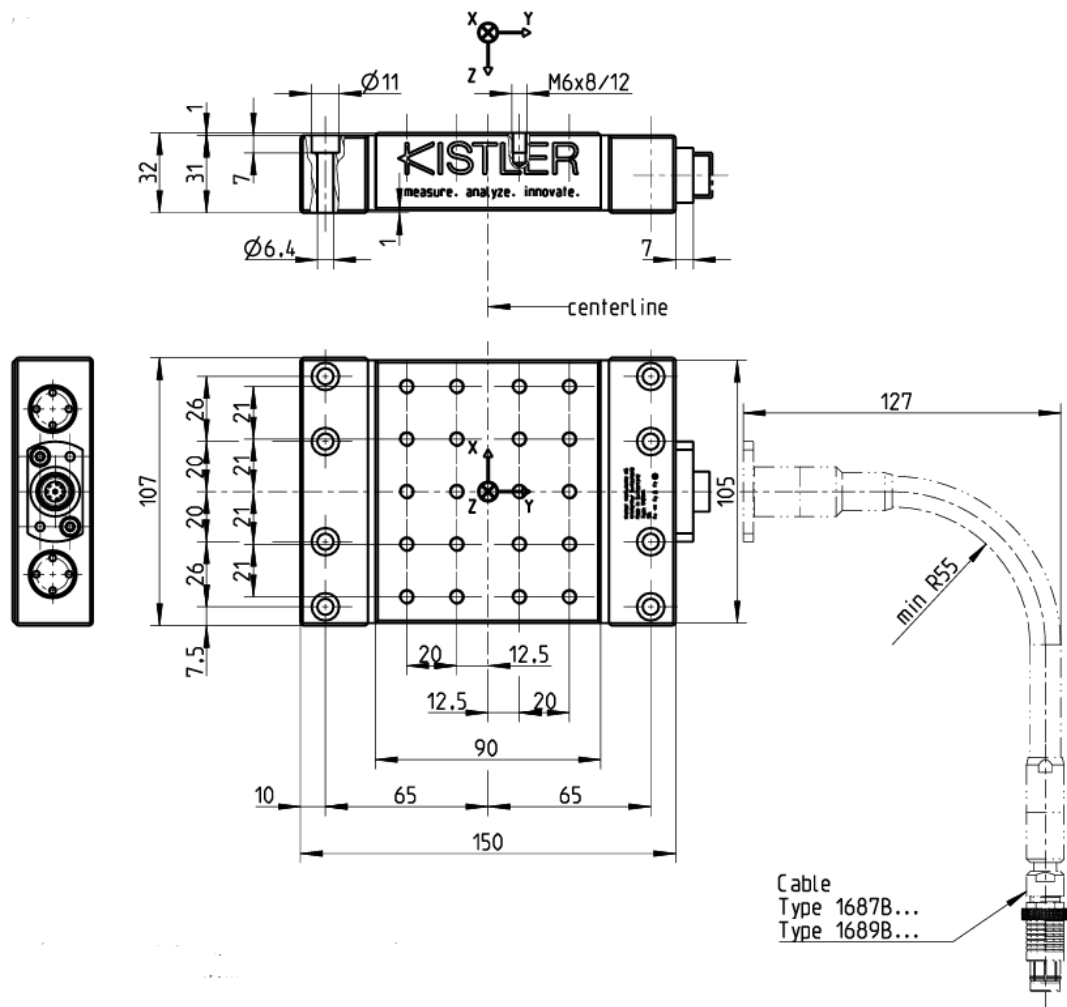
- Výroba složitých součástí v jednom upnutí
- Zvýšená přesnost a kvalita obrábění
- Kratší výrobní časy a nižší náklady
- Flexibilita pro širokou škálu aplikací
- Snadné použití a údržba [29]



Obrázek 29 Obráběcí centrum NTX 1000 DMG MORI [29]

9.1.2 Měřicí dynamometr Kistler

Pro analýzu řezných sil působících na obráběcí nástroj byl zvolen piezoelektrický dynamometr označený jako model 9129AA, vyráběný firmou Kistler. Tento multifunkční nástroj je navržen pro detekci a měření tří složek vektoru celkové síly a tří složek vektoru celkového momentu. Jeho konstrukce zahrnuje čtyři jednotlivé snímače síly, umístěné uvnitř těla dynamometru, které umožňují detekci a zaznamenání síly ve všech směrech. Díky použití odolných materiálů je dynamometr odolný vůči korozi a chrání ho proti pronikání tekutin, což zvyšuje jeho spolehlivost a životnost. [29]



Obrázek 30 Náskres dynamometru Kistler 9129AA [30]

9.1.3 Zesilovač Kistler 5167A

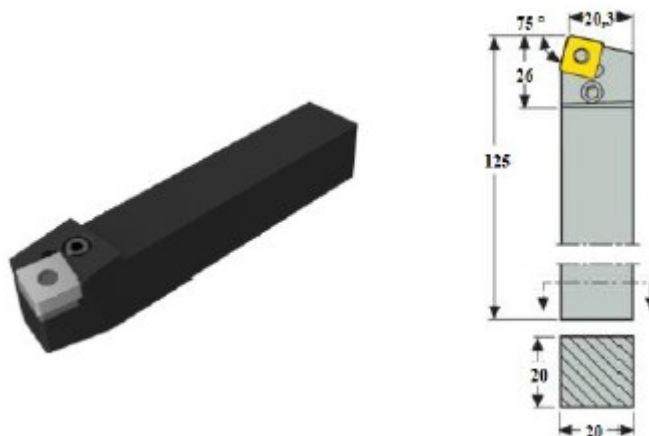
Zesilovač Kistler 5167A nabízí široké možnosti měření síly s vysokou přesností a dynamickým rozsahem. Disponuje rychlým sběrem dat a flexibilními možnostmi filtrování a výstupů. Dvojitě ethernetové porty a synchronizace PTP umožňují pokročilou integraci do síťových měřicích systémů. Kistler 5167A byl použit k zesílení signálu měřené síly a jeho převodu do digitální podoby. To umožnilo precizní a spolehlivé měření síly působící na soustružnický nůž a destičky během experimentu. Díky vysoké přesnosti a rychlé odezvě zesilovače bylo možné sledovat i dynamické změny síly, čímž se získal komplexní obraz silových interakcí v průběhu obrábění. [30]



Obrázek 31 Zesilovač Kistler 5167A [31]

9.1.4 Soustružnický nůž

Od samého začátku procesu obrábění hraje klíčovou roli soustružnický nůž PSBNR2020K12. Tento nůž, pocházející od výrobce Seco, byl vybrán pro svou odolnost vůči vysokým silám, které vznikají během procesu odebrání třísky z materiálu. Díky své upínací části o rozměrech 20 x 20 mm umožňuje nůž používat vyměnitelné břitové destičky s různou drsností. Právě zkoumáním vlivu této drsnosti na konečnou úpravu povrchu obrobku se bude tento nůž podílet na celém experimentu.

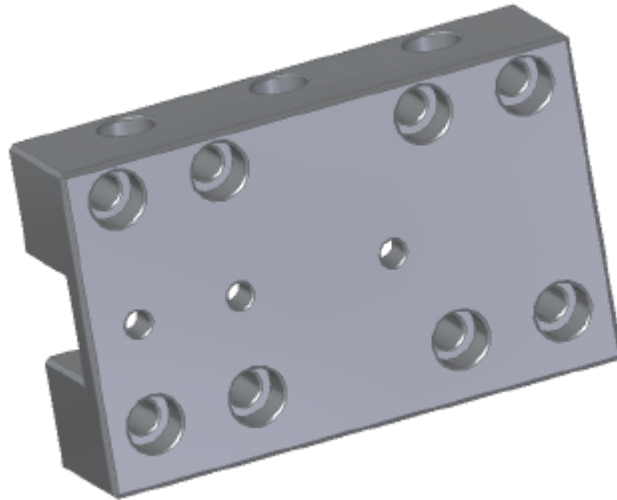


Obrázek 32 Soustružnický nůž PSBNR2020K12 [32]

9.1.5 Upínací mechanismus pro upnutí nožů

V rámci experimentálního uspořádání byl pro uchycení rezného nástroje využit předem navržený a vyrobený upínací mechanismus. Díky své variabilní konstrukci umožňoval tento

prvek kompatibilitu s měřicím dynamometrem Kistler a širokou škálou soustružnických nožů, a to jak s rozměry upínací části 14 x 14 mm, tak i 20 x 20 mm. Tato univerzální vlastnost představovala faktor pro bezproblémové uchycení i soustružnického nože Seco PSBNR2020K12, čímž se stal integrální součástí experimentálního setupu.



Obrázek 33 Upínací mechanismus pro upnutí nožů

9.1.6 Upínací mechanismus pro dynamometr

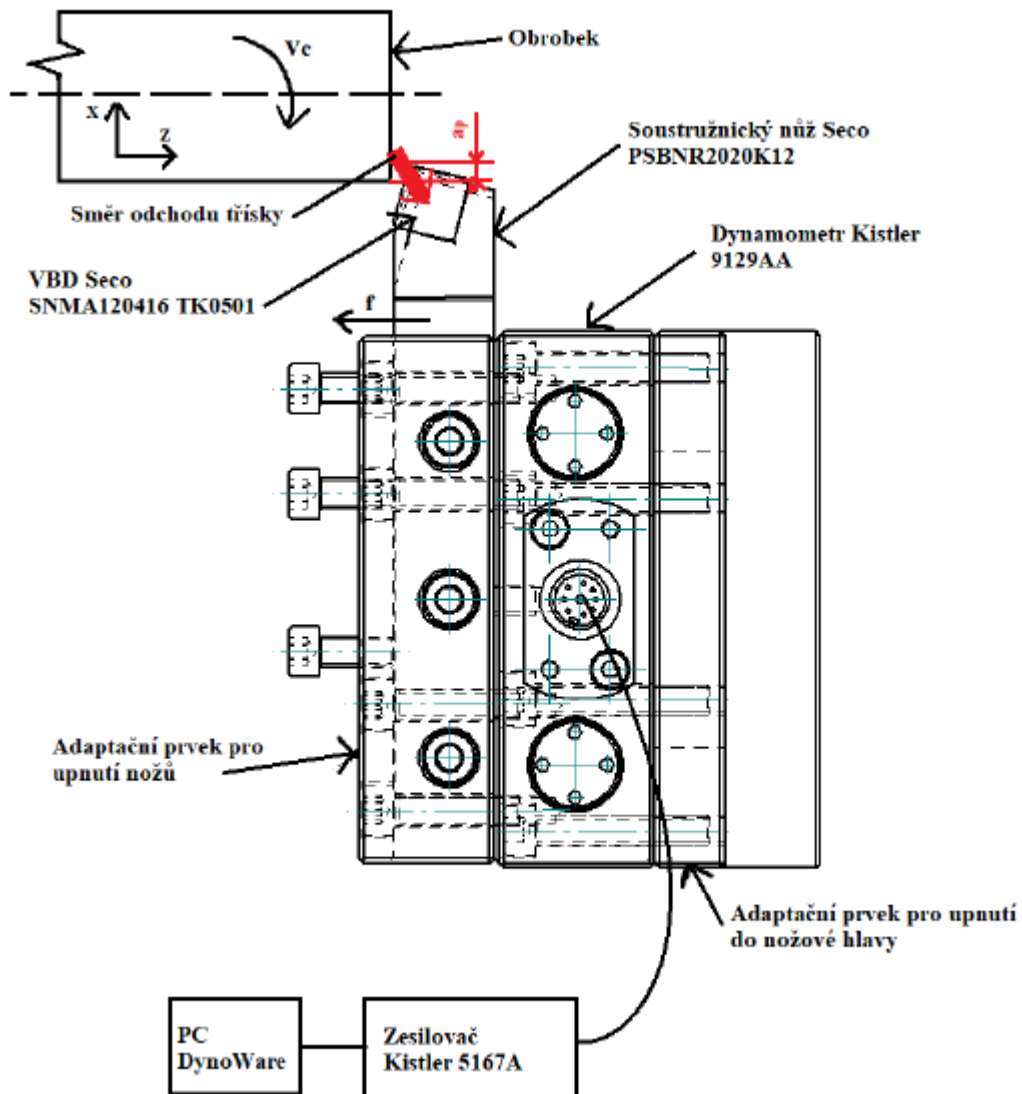
Upínací aparatura umožnila precizní uchycení nástrojů a minimalizovala nežádoucí vibrace, čímž přispěla ke zvýšení přesnosti měření sil působících během obráběcího procesu. To vedlo k dosažení spolehlivých a důvěryhodných experimentálních závěrů.



Obrázek 34 Upínací mechanismus pro dynamometr

9.2 Kompletace nástrojů

Měřicí sestava byla sestavena a pevně upevněna do spodní nástrojové hlavy na CNC soustružnicko-frézovacím centru do pozice 1. Tato montáž zaručila stabilní a spolehlivé uchycení sestavy, čímž byla připravena pro precizní měření sil působících během obráběcího procesu.



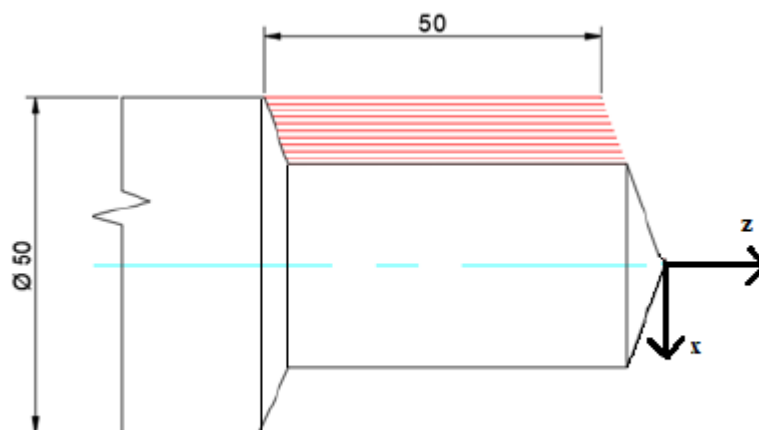
Obrázek 35 Schématické zapojení setupu

Experimentální studie probíhala v kontrolovaném prostředí na soustružnicko-frézovacím centru NTX 1000. Zkoumaným objektem byl kruhový vzorek o průměru 50 mm (ČSN 425510.12 – 11600) a délce 500 mm. Před zahájením měření byl vzorek podroben důkladné přípravě, která zahrnovala odstranění veškerých okují a úpravu délky měřeného úseku tak, aby byla zajištěna konzistence a minimalizován vliv rušivých faktorů.

Před zahájením série experimentů proběhlo pilotní ověření funkčnosti měřicí sestavy a trajektorie na předem připraveném zkušebním vzorku. Měřicí sestava se pohybovala po trajektorii dle obrázku 37 v délce 50 mm, čímž simulovala dráhu pro snímání silových interakcí během obráběcího procesu. Měření se zaměřilo na čelní plochu vyměnitelné břitové destičky a na analýzu destiček různých drsností. Po každých 6 řezech byla obrobená část zkušební tyče separována pásovou pilou a následovala nová příprava vzorku a další série 6 řezů.



Obrázek 36 První trajektorie ubrání polotovaru



Obrázek 37 Trajektorie pro měření řezných sil

Tabulka 6 Řezné podmínky použité při experimentu

Řezná rychlost	$V_c = 250 \text{ m/min}$
Posuv	$f = 0,5 \text{ mm/ot}$
Hloubka řezu	$a_p = 1 \text{ mm}$

V rámci experimentu byly sledovány řezné síly, koeficient pěchování a úhel střižné roviny. Pro provedení testů byly použity tři typy destiček: referenční, pískovaná a MRF. Každý typ destičky podstoupil 12 řezů za účelem studia obrábění bez použití procesní kapaliny za náročných podmínek. Během testů byly monitorovány řezné síly a kvalita obrobené plochy. V případě VBD byl proveden řez dle přednastaveného CNC programu na materiálu ČSN 11 600.

Pro měření řezných sil byla využita sestava obsahující měřicí dynamometr, upínací zařízení pro nožovou hlavu, upínací zařízení pro nože, soustružnický nůž a texturovaná VBD. Naměřené složky řezných sil byly interpretovány v souladu s normovanou konvencí dle obrázku 38, který zároveň poskytoval barevné a symbolické označení jednotlivých složek, jež budou použity při grafickém znázornění měření.



Obrázek 38 Schématické složky řezných sil

Během hodnocení jakosti povrchu byly pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ – 410. Pro každou měřenou hodnotu bylo provedeno 10 odečtů, z nichž byla následně vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka prostřednictvím statistické analýzy. Pro stanovení koeficientu pěchování třísek a úhlu střižné roviny byla provedena měření tloušťky odřezávané třísky. Na základě těchto dat byly užitím vzorců 1 a 2, vypočteny příslušné parametry. Pro měření šířky byl využit digitální mikrometr od firmy Mitutoyo, který zajistil přesné a spolehlivé výsledky.

9.2.1 Koeficient pěchování třísky k_s

Plastické deformace vznikající vlivem působení řezného nástroje vedou k pěchování v oblasti, která je podrobena odřezávání. Tento proces způsobuje rozdíl mezi průřezem materiálu před odřezáním a průřezem třísky vytvořené během obrábění. Koeficient pěchování, zkráceně označovaný jako k_s , je klíčovým faktorem, kterým lze vyjádřit míru tohoto pěchování. Jeho hodnota se obvykle pohybuje mezi 1,1 a 10 a slouží jako kritérium pro posouzení intenzity primární plastické deformace. Koeficient pěchování třísky, který je základem pro hodnocení, lze vypočítat pomocí (1). Znalost tohoto koeficientu je vhodná pro porozumění chování materiálu při obrábění a optimalizaci procesu.

$$k_s = \frac{h_{Ds}}{h_D} \quad (1)$$

kde h_{Ds} – je tloušťka třísky [mm], h_D – je jmenovitá tloušťka řezu [mm]

9.2.2 Úhel roviny stříhu ϕ

Úhel střížné roviny může být stanoven nejen na základě teorie minimální vynaložené práce, kdy je místo řezu ovlivněno minimální silou nástroje. Nicméně v této práci bude prezentován výpočet úhlu střížné roviny ϕ pomocí koeficientu pěchování třísky, jehož výpočet byl předveden výše. Existuje závislost mezi velikostí intenzity plastické deformace a koeficientem pěchování, která je využitelná k predikci úhlu stříhu. Samotný úhel střížné roviny ϕ , vyjádřený pomocí součinitele pěchování třísky, je možné pozorovat podle (2)

$$\phi = \arctg\left[\frac{\cos(\gamma_0)}{k_s - \sin(\gamma_0)}\right] \quad (2)$$

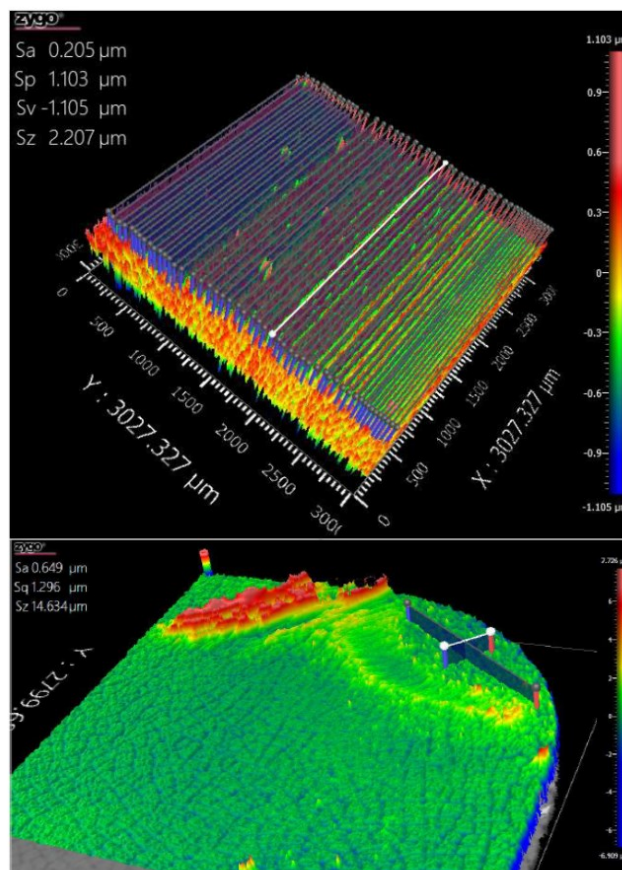
kde γ_0 – označuje normálový (ortogonální) úhel čela na nástroji

10 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

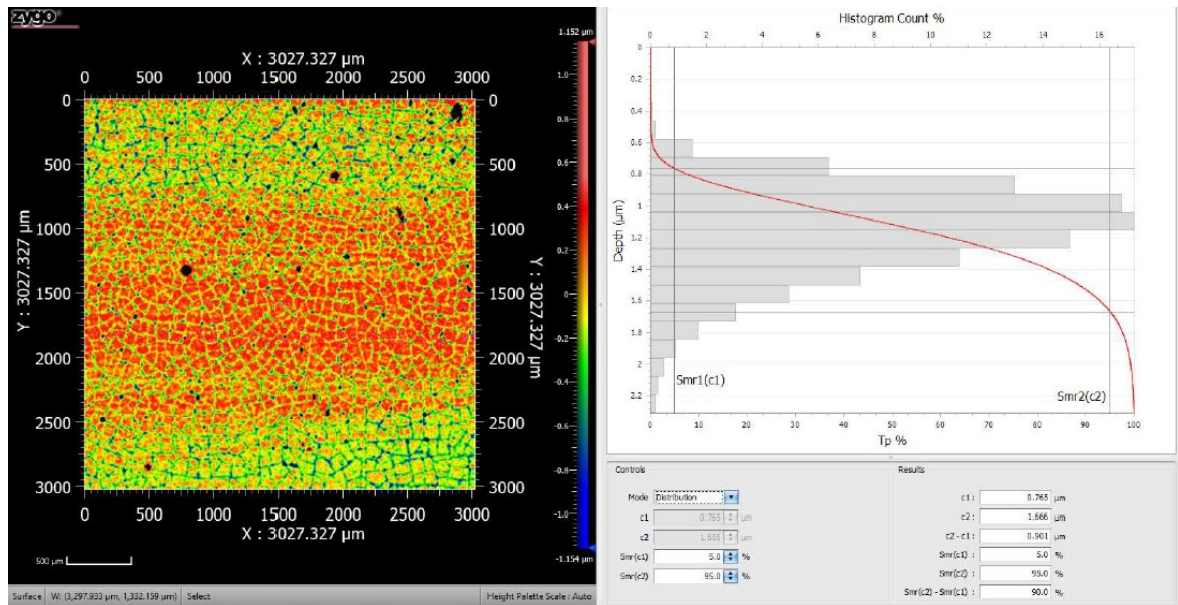
Následující části budou zaměřeny na prezentaci břitových destiček, které byly zachyceny pomocí optického profilometru Zygo 8000 před a po absolvování testování. Optický profilometr Zygo 8000 je vysoce přesným zařízením, které umožňuje detailní a přesné měření povrchových vlastností. Díky jeho schopnosti zachytit i mikroskopické detaily povrchu poskytuje důležité informace o geometrii a kvalitě břitových destiček. Dále byly prezentovány průběhy povrchu po obrábění, naměřené řezné síly, drsnost povrchu materiálu po obrábění a rovněž koeficient pěchování třísky a úhel střížné roviny. Tímto přístupem se bude soustředěno na detailní analýzu chování vyměnitelných břitových destiček v průběhu testování a získají se důležité poznatky o jejich vlastnostech a výkonnosti.

10.1 Testování referenční vyměnitelné břitové destičky

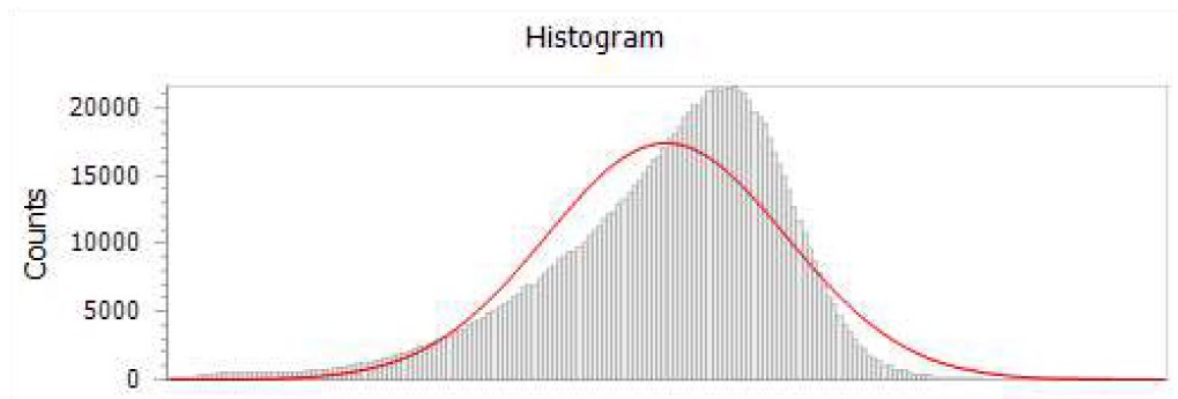
Na destičce byla pozorována výrazná řezného nástroje a svědčí o mechanickém opotřebení destičky. Stopy tepelného namáhání naznačují lokální nárůst teploty během obráběcího procesu.



Obrázek 39 Referenční VBD pozorována před a po obrábění

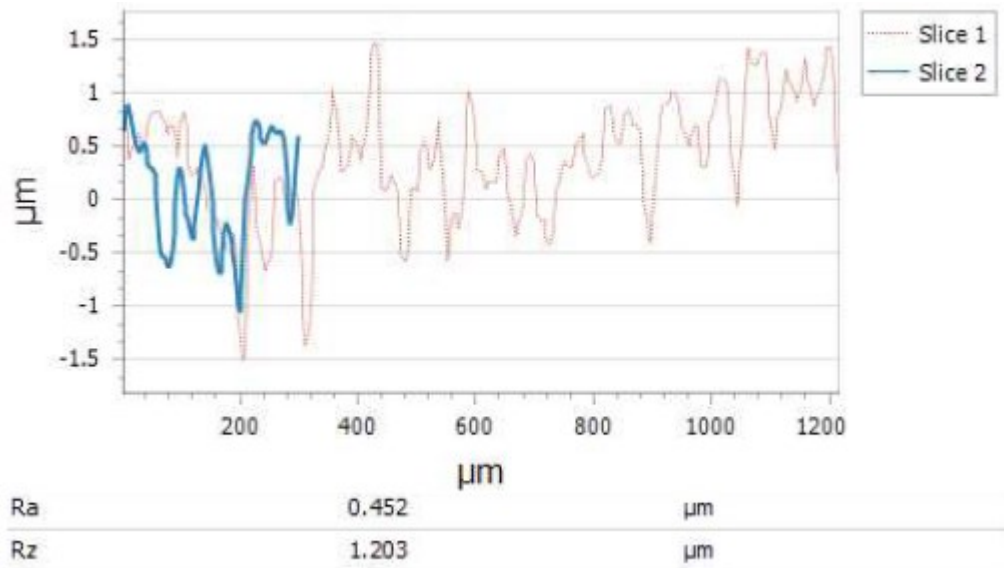


Obrázek 40 Abbottova–Firestoneova křivka referenční VBD před obráběním



Obrázek 41 Histogram referenční VBD před obráběním

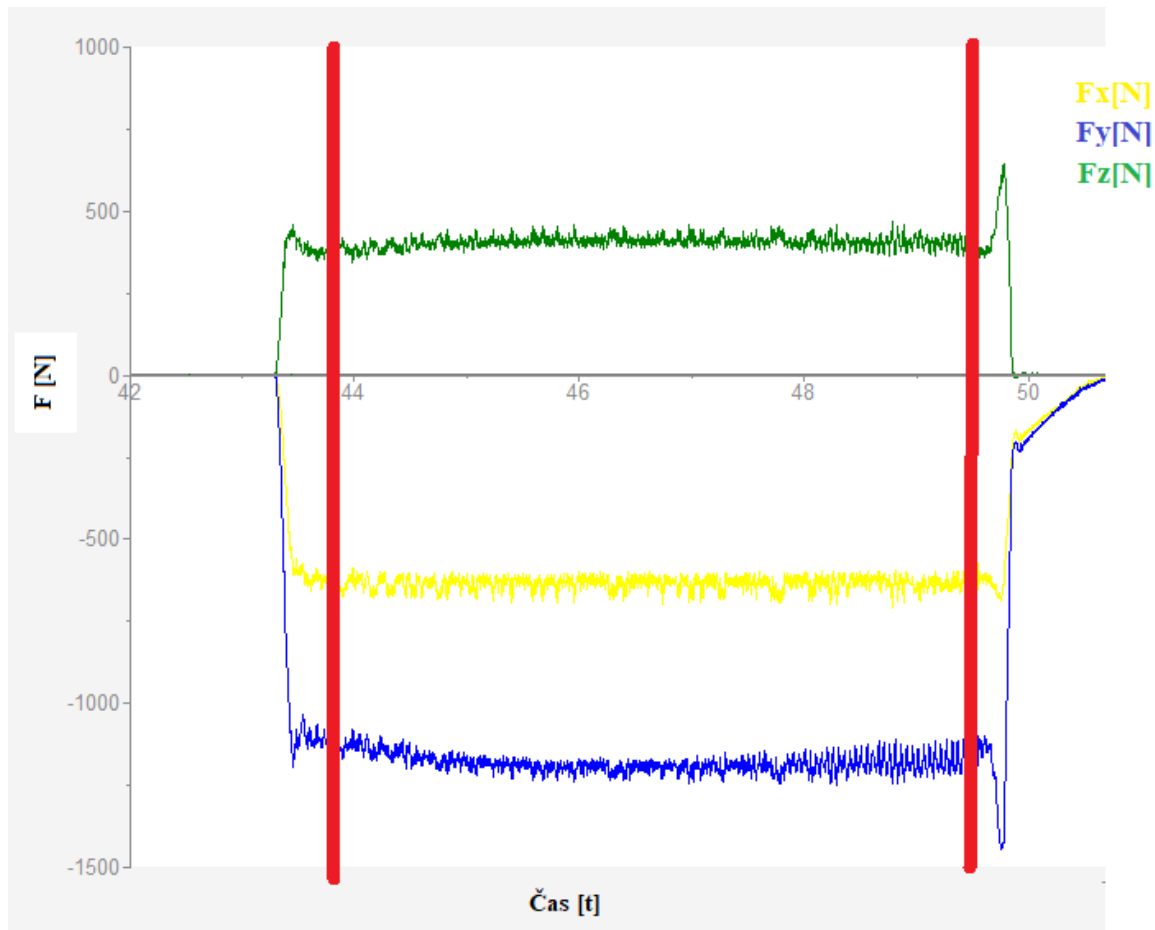
Rozbor histogramu naznačuje, že rozložení má pravděpodobnostní charakter, s výrazným sklonem směrem k pravé straně, což naznačuje, že destička byla již v základním stavu vybroušena.



Obrázek 42 Průběh drsnosti referenční VBD po obrábění v místě styku
 Průběh drsnosti při obrábění referenční VBD, kde jsou sledovány vysoké vrcholy, je způsoben vysokým opotřebením, přičemž následně dochází k vytváření nepravidelností. Měření bylo provedeno v místě styku s obrobkem a je znázorněno na obrázku 39. Slice 1 znamená, že měření probíhalo v podélném směru, slice 2 probíhal v příčném směru.

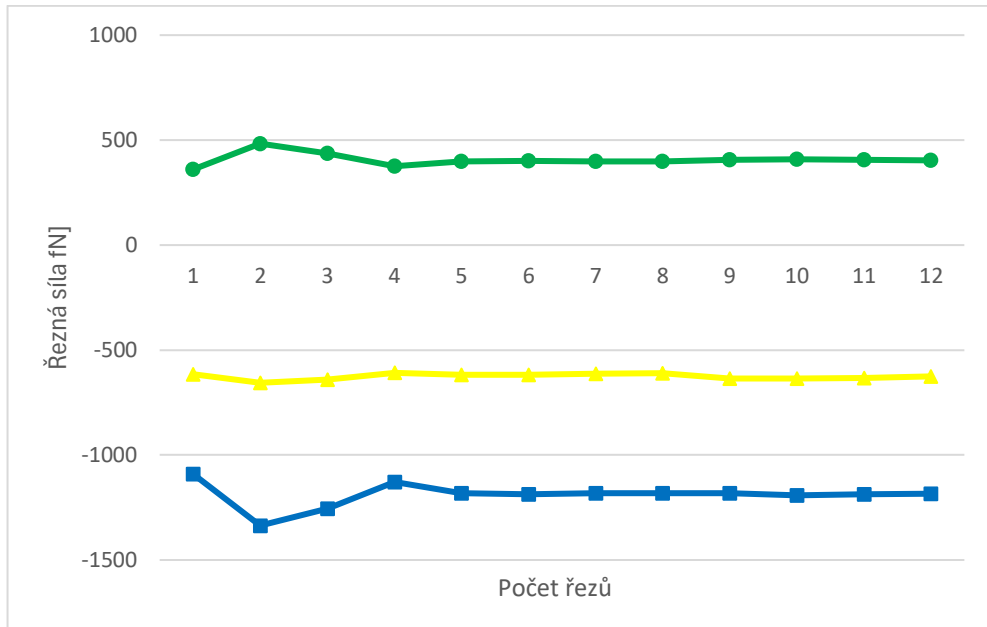
10.1.1 Naměřené řezné síly

Naměřené data o řezných silách z dynamometru Kistler byla podrobena vizualizaci v softwarovém prostředí DynoWare. Jako příklad slouží graf na obrázku 43, který znázorňuje 25 000 naměřených hodnot za sekundu v časovém průběhu, včetně zobrazení náběhu a přeběhu řezných sil. Pro účely detailního vyhodnocení byly z celkového souboru dat vybrány pouze hodnoty řezných sil odpovídající časovému úseku, kdy břitová destička nástroje byla plně v záběru s materiálem obrobku. Tento vybraný úsek je na grafu ohraničen tlustými svislými čarami. Následně byla z vybraného úseku dat vypočtena průměrná hodnota velikosti jednotlivých složek řezných sil.



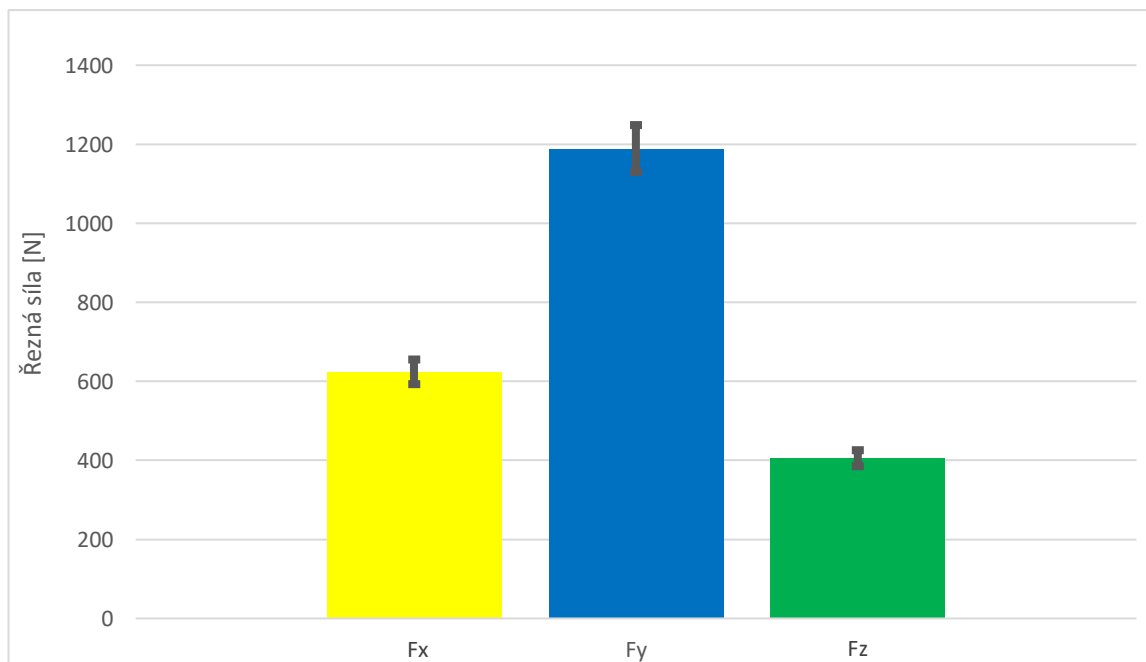
Obrázek 43 Průběh měření sil

Obrázek 44 prezentuje graf závislosti velikosti sil složek F_x , F_y a F_z na čase. Data byla získána měřením v pětisekundových intervalech a zahrnují průměrnou hodnotu z vybraného úseku. Analýza grafu prokazuje, že hodnoty rezných sil pro všechny tři složky (F_x , F_y a F_z) vykazují značnou míru shody a v průběhu celého testu se vyznačují stabilní charakteristikou.



Obrázek 44 Průběh velikosti řezných sil

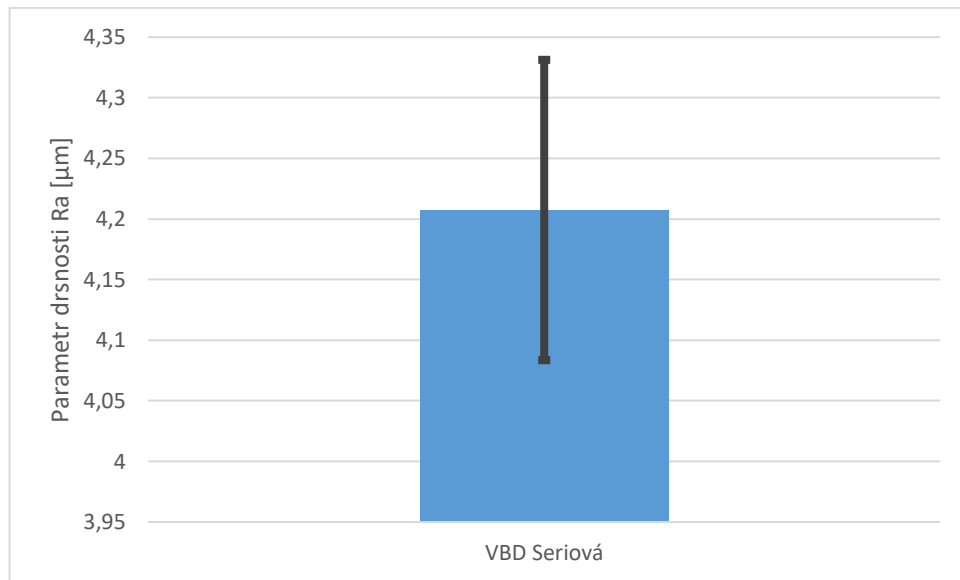
Obrázek 45 prezentuje grafické znázornění naměřených velikostí řezných sil složek F_x , F_y a F_z . Data zahrnují průměrnou hodnotu každé složky síly a doplňují ji o chybovou úsečku, která reprezentuje rozsah naměřených hodnot v daném intervalu. Z analýzy grafu je patrné, že nejvyšší naměřená síla je F_y . Velikost chybové úsečky vykazuje u všech os relativně konzistentní charakteristiku, čímž naznačuje stabilitu naměřených hodnot.



Obrázek 45 Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil referenční VBD

10.1.2 Naměřená drsnost

Byla provedena analýza parametru drsnosti Ra a to pomocí drsnoměru Mitutoyo Surfrest SJ-410. Během měření bylo pořízeno 10 hodnot. Průměrná hodnota drsnosti Ra a její směrodatná odchylka jsou patrné na obrázku 46. Nízká hodnota směrodatné odchylky ukazuje, že Ra dosahuje stabilních hodnot.



Obrázek 46 Průměrná drsnost povrchu Ra referenční VBD

10.1.3 Koeficient pěchování třísky a úhel střížné roviny

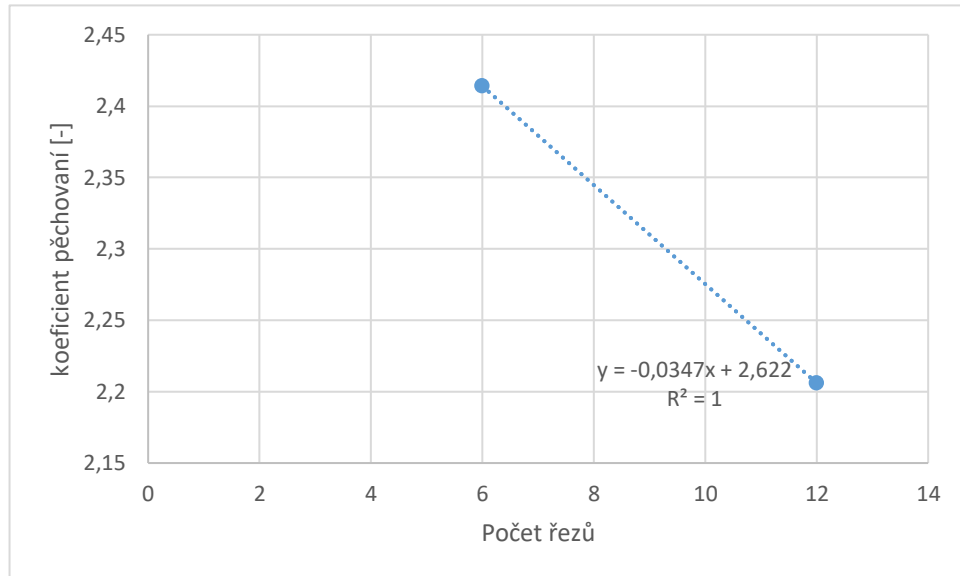
V tabulce 7 se nacházejí data o třískách, která zahrnují vypočtenou hodnotu roviny stříhu a koeficient pěchování třísek z testu referenční VBD. Po dokončení dvou testů byla vždy odebrána poslední tříska a následně vyhodnocena.

Tabulka 7 Měřená data šířky třísek referenční VBD

	6.řez	12.řez
1	2,45	2,21
2	2,38	2,21
3	2,4	2,18
4	2,42	2,17
5	2,42	2,27
6	2,45	2,15
7	2,37	2,21
8	2,4	2,19
9	2,41	2,24
10	2,44	2,23
průměr [mm]	2,414	2,206
směr. odchylka [mm]	0,026	0,033
koeficient pěchování [-]	2,414	2,206
úhel střížné roviny [°]	18,21	19,56

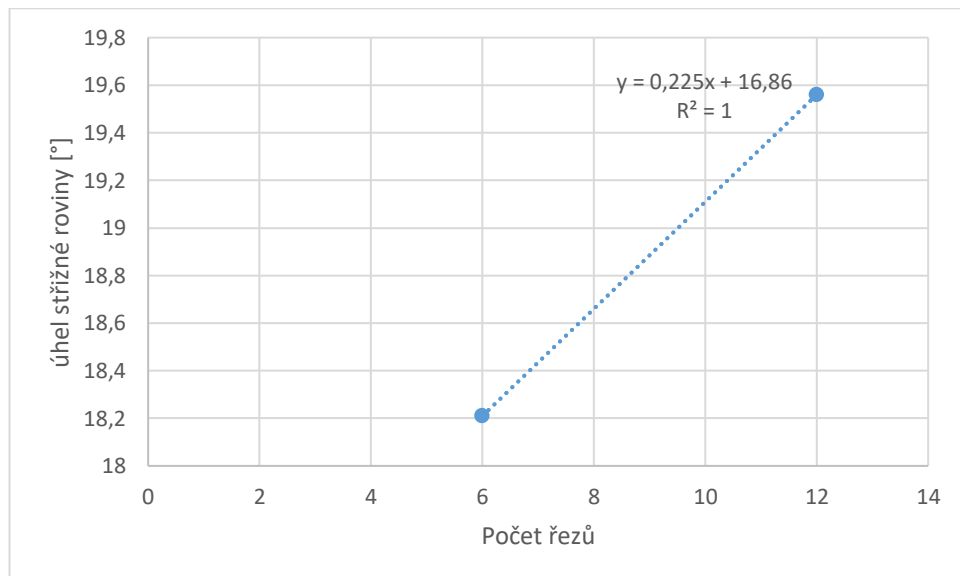
Obrázek 47 zobrazuje průběh koeficientu pěchování třísky. Proložení lineární spojnicí trendu ukazuje klesající hodnotu, čímž naznačuje, že koeficient pěchování se snižuje. Pro

přesnější určení trendu a potvrzení klesající tendence by bylo nutné provést dlouhodobější test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



Obrázek 47 Průběh koeficientu pěchování

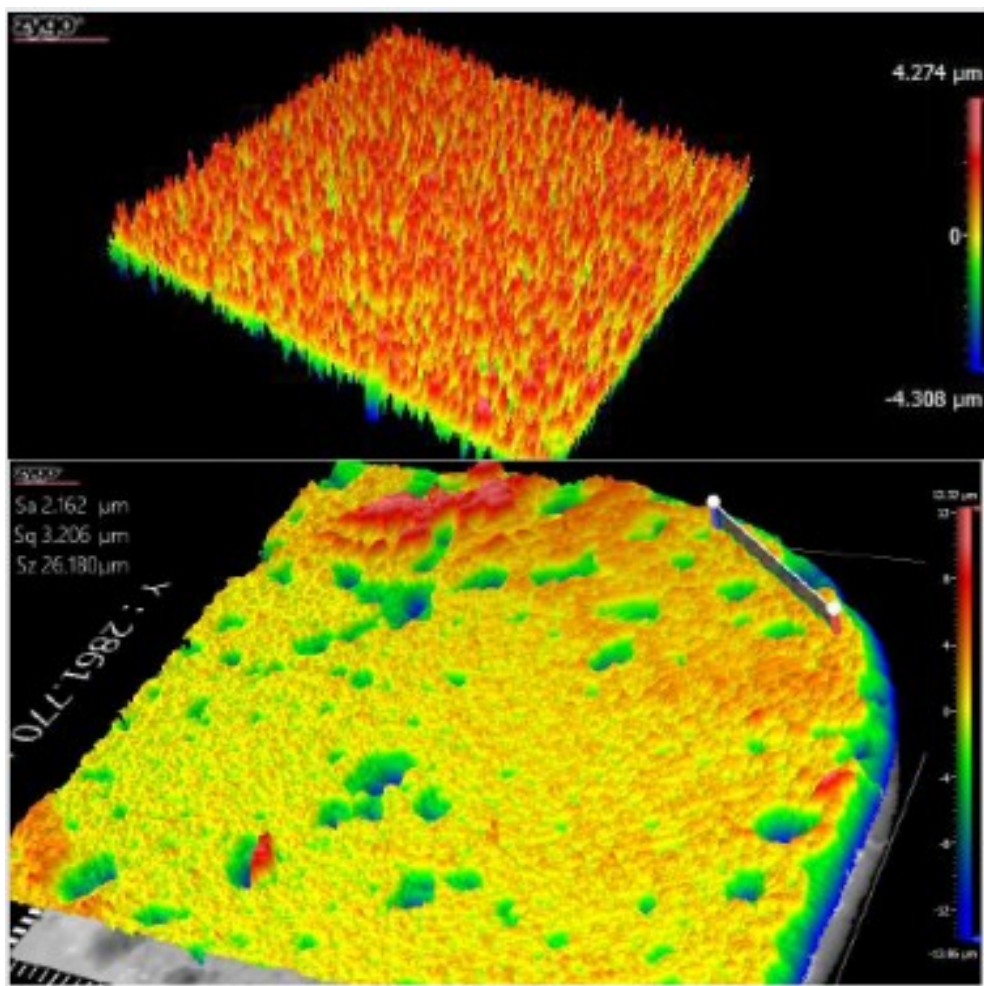
Obrázek 48 zobrazuje průběh úhlu střížné roviny. Na základě trendu lze pozorovat nárůst hodnot úhlu. Pro přesnější určení trendu a potvrzení jeho stoupajícího charakteru by bylo nutné provést delší test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



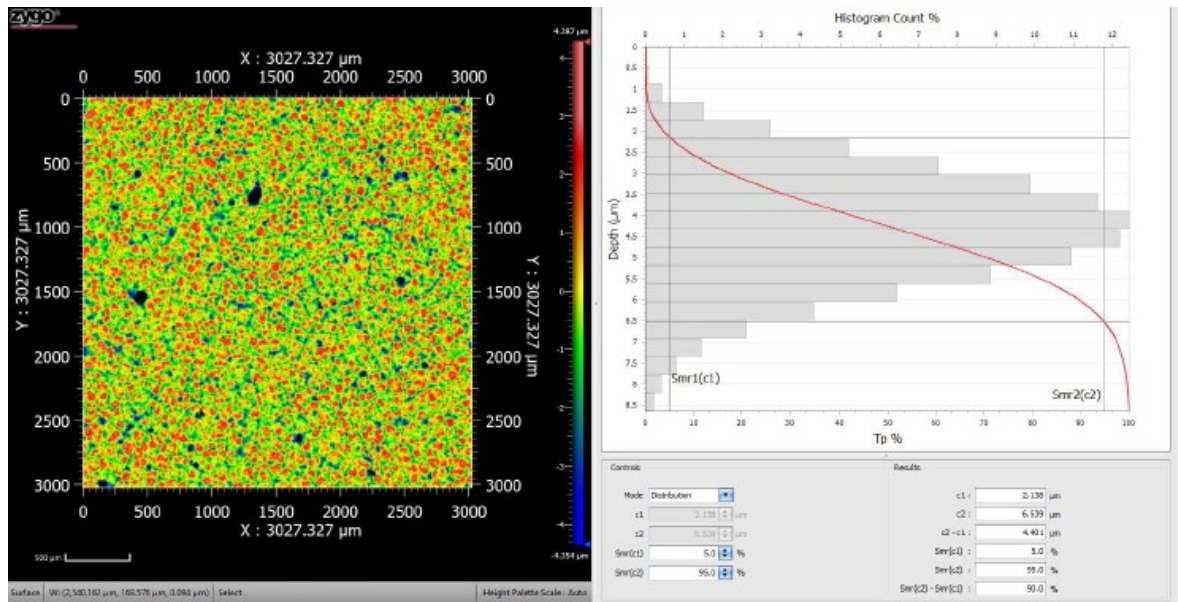
Obrázek 48 Úhel střížné roviny

10.2 Testování pískované vyměnitelné destičky

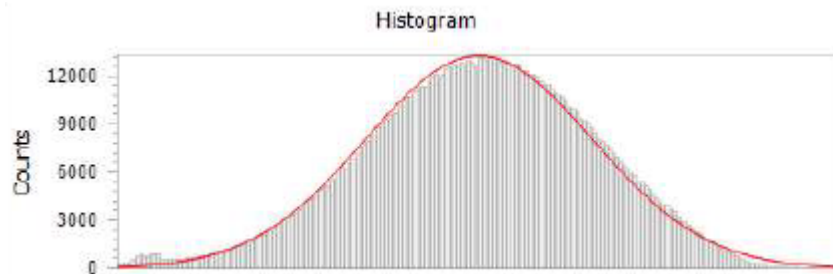
Povrch analyzované destičky nevykazoval výraznou rýhu. Toto zjištění lze připsat předchozímu zdrsnění destičky pískováním, které optimalizovalo odlučování materiálu a minimalizovalo zachycování nečistot. Zjištěná rýha indikuje trajektorii pohybu řezného nástroje a koresponduje s mechanickým opotřebením destičky. Nicméně míra opotřebení není nijak alarmující, jelikož destička byla již v minulosti zdrsněna. Stopy tepelného namáhání na povrchu destičky nasvědčují lokálnímu nárůstu teploty během obráběcího procesu.



Obrázek 49 Pískovaná VBD pozorována před a po obrábění

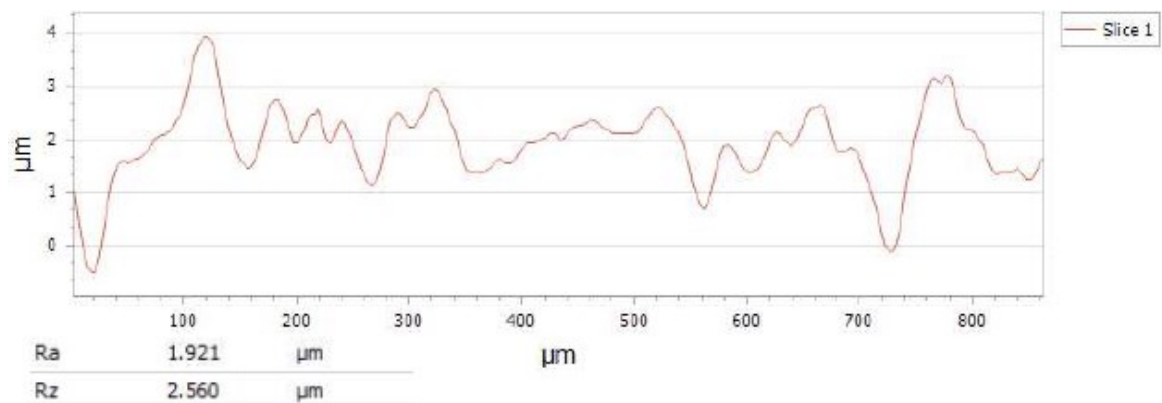


Obrázek 50 Abbottova–Firestoneova křivka pískované VBD před obráběním



Obrázek 51 Histogram pískované VBD

Interpretace histogramu dat naznačuje pravděpodobnostní charakter rozložení s perfektní shodou s gaussovým rozdělením. Toto zjištění silně implikuje rovnoměrné pískování povrchu destičky, k čemuž podstatně přispívá metodika použitého pískovacího procesu. "Náhodný" charakter rozprašování abrazivního materiálu vede k dosažení ideálního gaussova rozložení drsnosti povrchu.

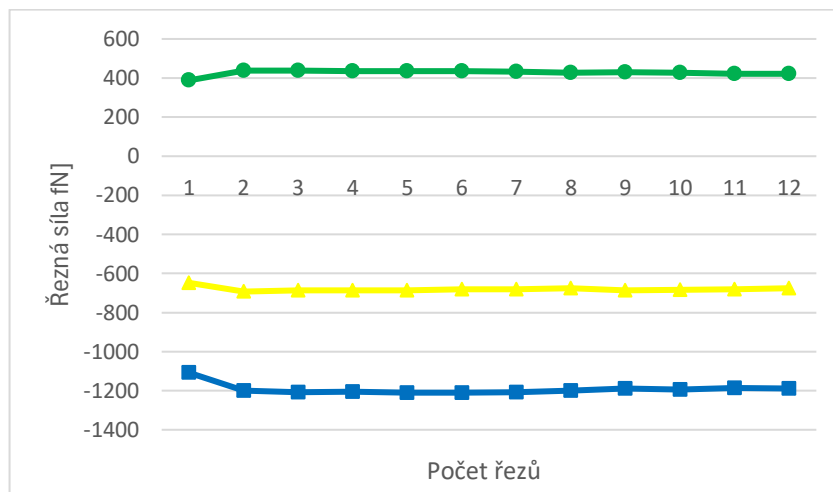


Obrázek 52 Průběh drsnosti pískované VBD po obrábění v místě styku

Při obrábění pískované VBD dochází k degradaci drsnosti povrchu, která se vyznačuje tvorbou tzv. vysokých vrcholů. Tyto nepravidelnosti vznikají v důsledku intenzivního opotřebení v oblasti styku s obrobkem. Měření bylo provedeno v místě styku s obrobkem a je znázorněno na obrázku 49.

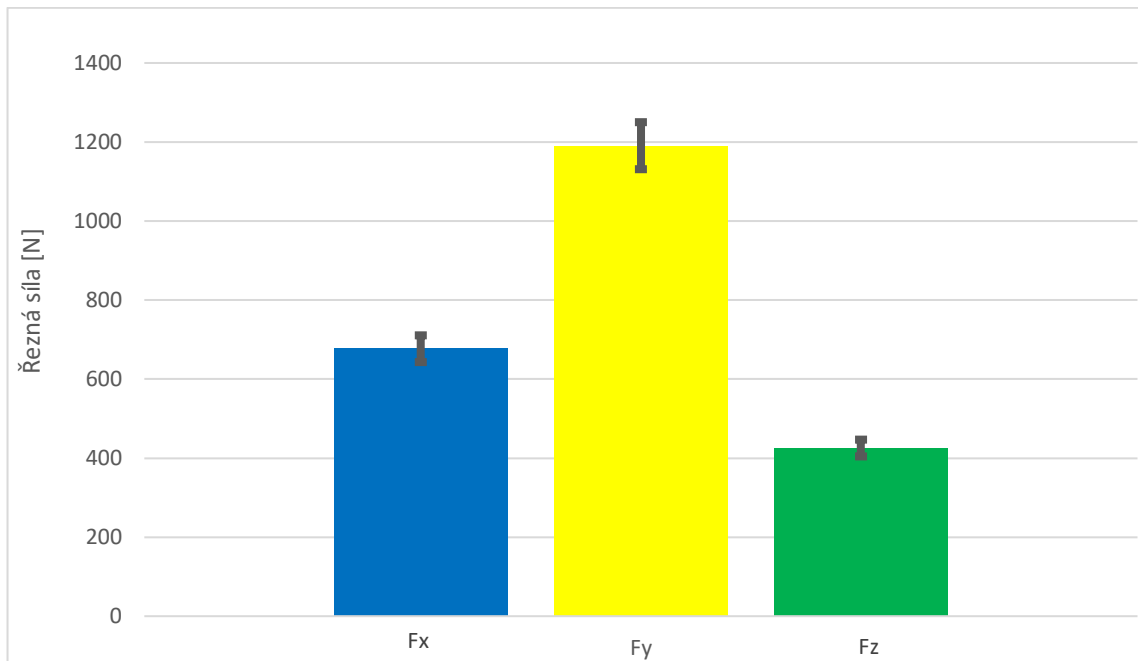
10.2.1 Naměřené řezné síly

Obrázek 53 prezentuje graf závislosti velikosti sil složek F_x , F_y a F_z na čase. Data byla získána měřením v pětisekundových intervalech a zahrnují průměrnou hodnotu z vybraného úseku. Analýza grafu prokazuje, že hodnoty řezných sil pro všechny tři složky (F_x , F_y a F_z) vykazují značnou míru shody a v průběhu celého testu se vyznačují stabilní charakteristikou.



Obrázek 53 Průběh velikosti složek řezných sil pískované VBD

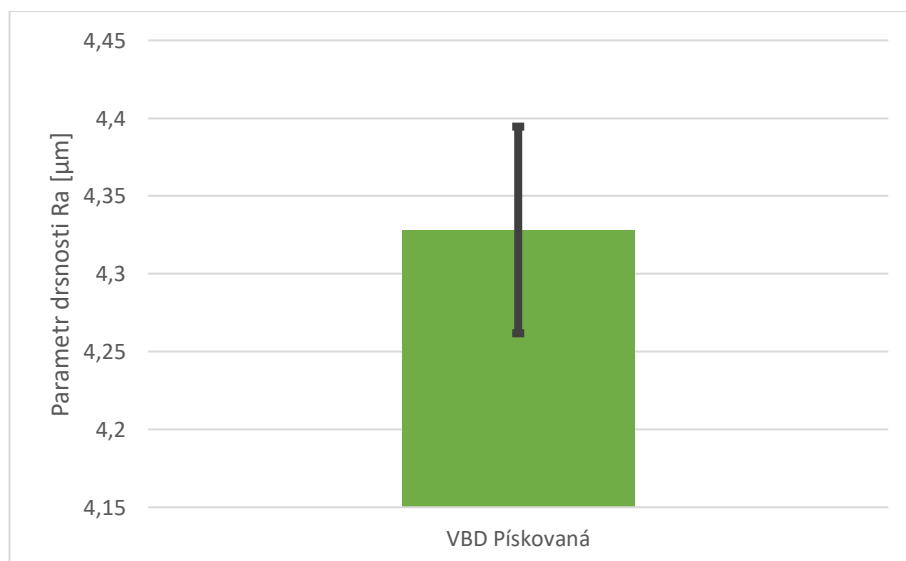
Obrázek 54 prezentuje grafické znázornění naměřených velikostí řezných sil složek F_x , F_y a F_z . Data zahrnují průměrnou hodnotu každé složky síly a doplňují ji o chybovou úsečku, která reprezentuje rozsah naměřených hodnot v daném intervalu. Z analýzy grafu je patrné, že nejvyšší naměřená síla je F_y . Velikost chybové úsečky vykazuje u všech os relativně konzistentní charakteristiku, čímž naznačuje stabilitu naměřených hodnot.



Obrázek 54 Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil pískované VBD

10.2.2 Naměřená drsnost

Byla provedena analýza parametru drsnosti Ra, a to pomocí drsnoměru Mitutoyo SurfTest SJ-410. Během měření bylo pořízeno 10 hodnot. Průměrná hodnota drsnosti Ra a její směrodatná odchylka jsou patrné na obrázku 55. Nízká hodnota směrodatné odchylky ukazuje, že Ra dosahuje stabilních hodnot.



Obrázek 55 Průměrná drsnost povrchu Ra pískované VBD

10.2.3 Koeficient pēchování třísky a úhel střížné roviny

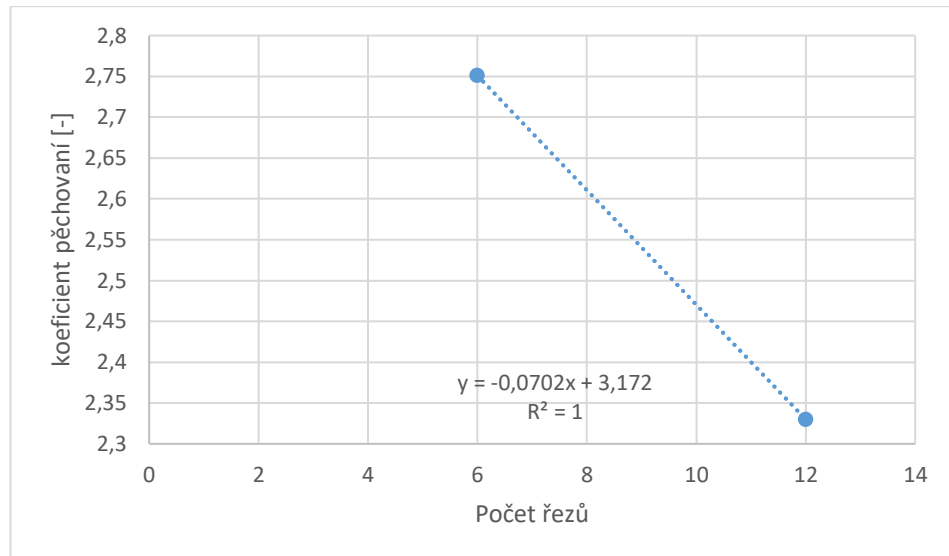
V tabulce 8 jsou shromážděna data o třískách z testu pískované VBD. Tato data zahrnují vypočtenou hodnotu roviny stříhu a koeficient pēchování třísek. Po každých dvou testech byla odebrána poslední tříška a podrobena vyhodnocení.

Tabulka 8 Měřená data třísek pískované VBD

	6	12
1	2,77	2,26
2	2,79	2,32
3	2,83	2,34
4	2,73	2,37
5	2,7	2,33
6	2,72	2,36
7	2,77	2,32
8	2,75	2,41
9	2,69	2,31
10	2,76	2,28
průměr [mm]	2,751	2,33
směr. Odchylka [mm]	0,040	0,041
koeficient pēchování [-]	2,751	2,33
úhel střížné roviny [°]	16,37	18,73

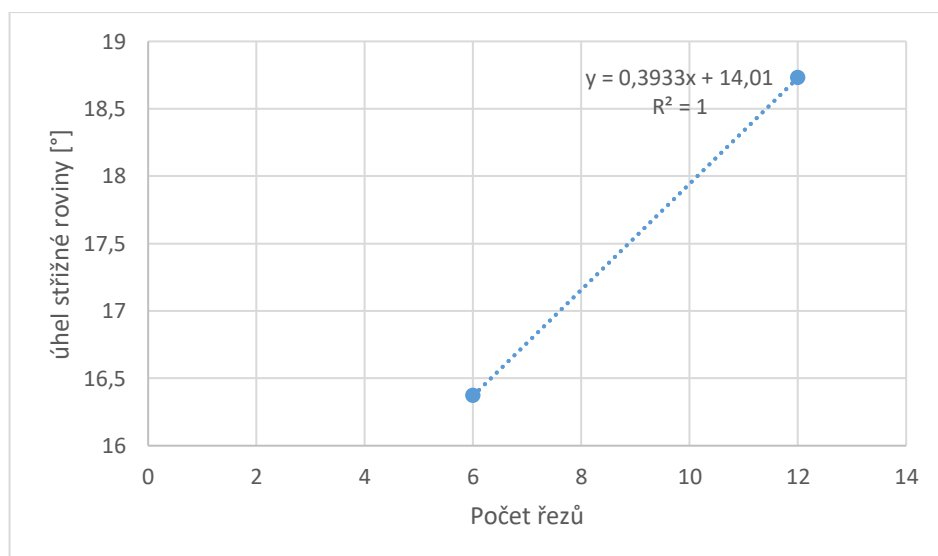
Obrázek 56 zobrazuje průběh koeficientu pēchování třísky. Proložení lineární spojnicí trendu ukazuje klesající hodnotu, čímž naznačuje, že koeficient pēchování se snižuje. Pro

přesnější určení trendu a potvrzení klesající tendence by bylo nutné provést dlouhodobější test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



Obrázek 56 Průběh koeficientu pýchování

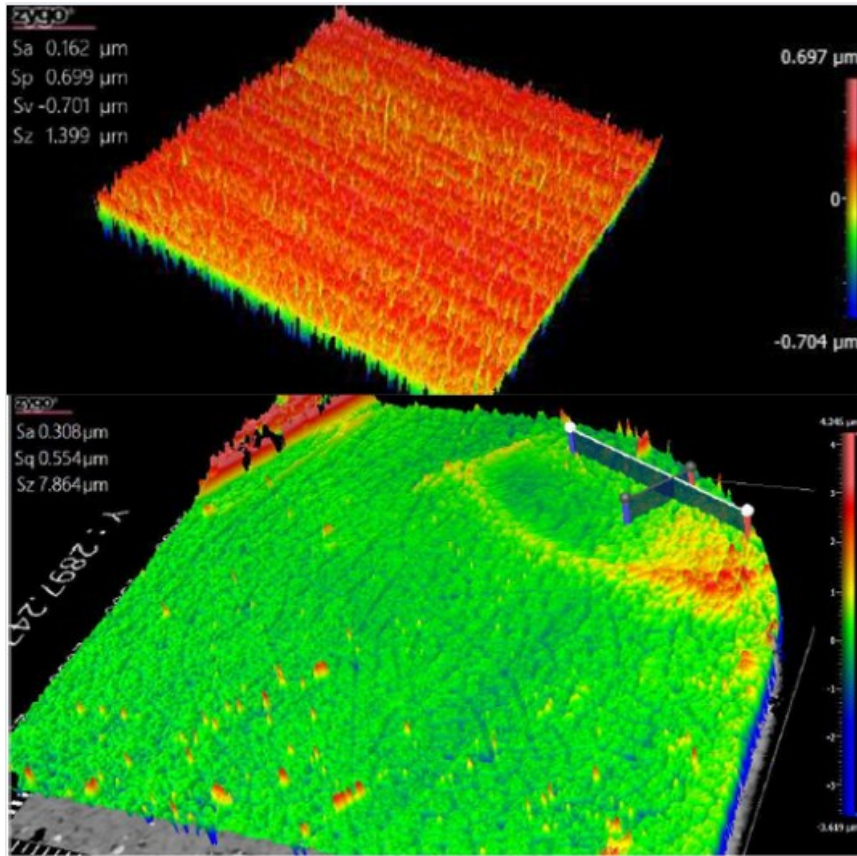
Obrázek 57 zobrazuje průběh úhlu střížné roviny. Na základě trendu lze pozorovat nárůst hodnot úhlu. Pro přesnější určení trendu a potvrzení jeho stoupajícího charakteru by bylo nutné provést delší test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



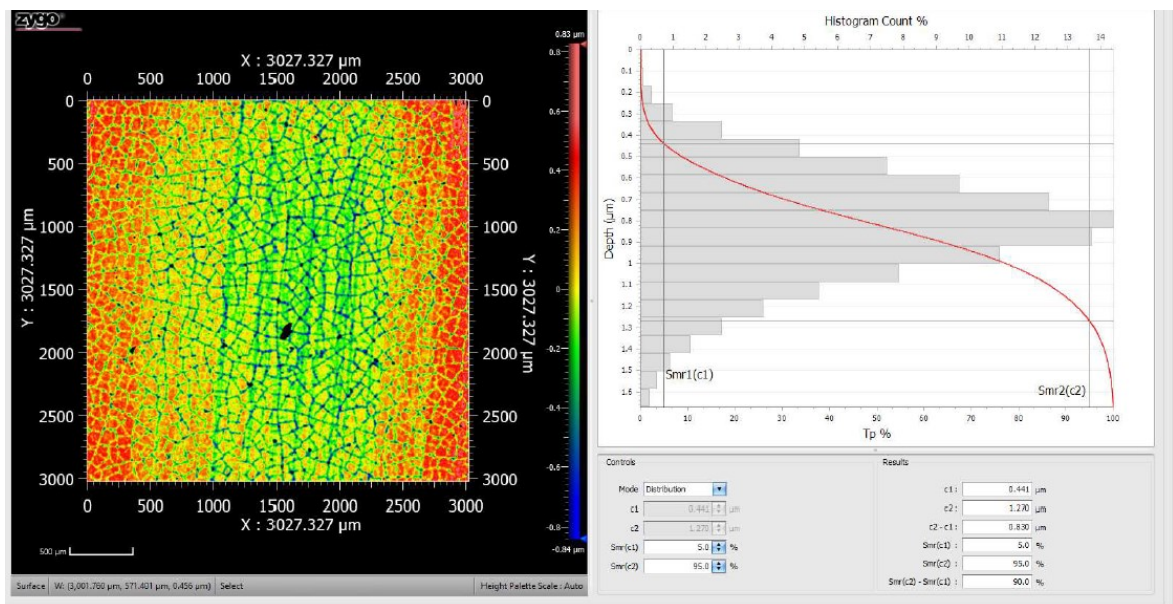
Obrázek 57 Úhel střížné roviny

10.3 Testování MRF vyměnitelné destičky

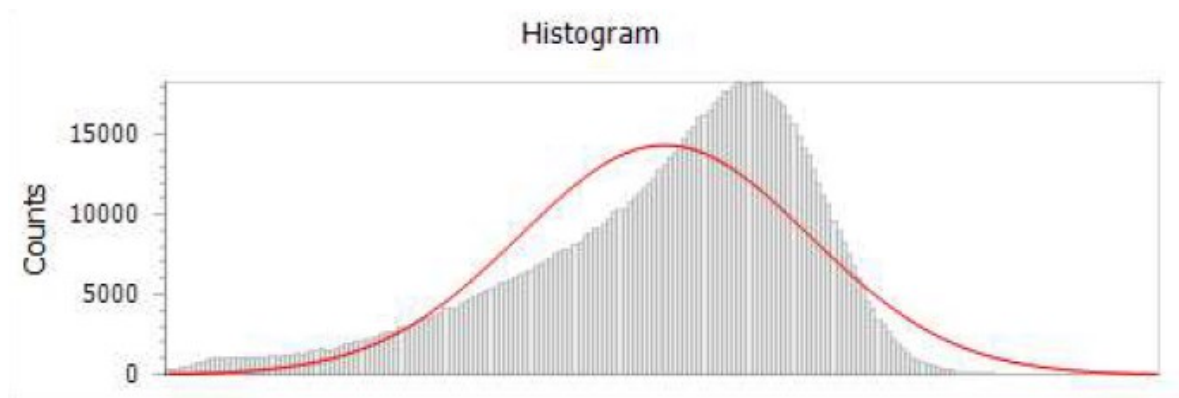
Na destičce byla zaznamenána výrazná drážka po zpracování a známky tepelného namáhání. Drážka naznačuje směr pohybu třísky a svědčí o opotřebením destičky. Známky tepelného namáhání naznačují lokální zvýšení teploty během procesu zpracování.



Obrázek 58 MRF VBD pozorována před a po obrábění

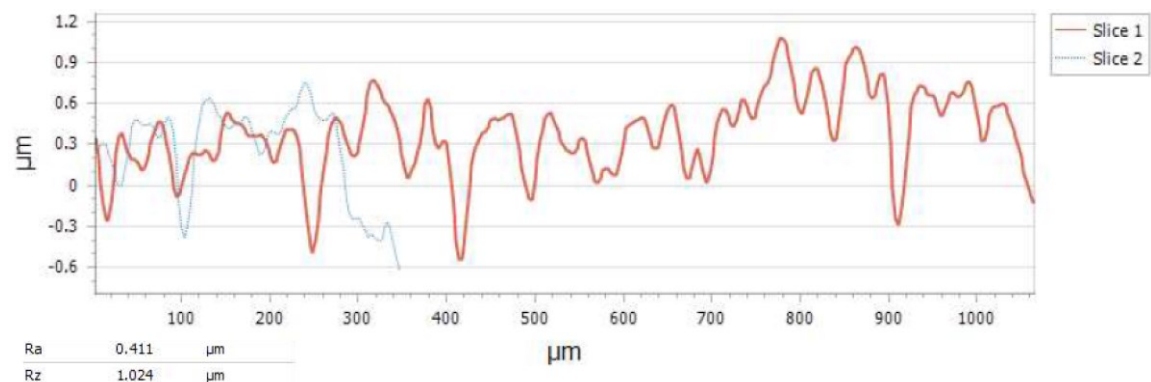


Obrázek 59 Abbottova–Firestoneova křivka MRF VBD před obráběním



Obrázek 60 Histogram MRF VBD

Podrobný rozbor histogramu odhaluje, že rozložení dat vykazuje pravděpodobnostní charakter, s výrazným sklonem doprava. Tato asymetrie histogramu silně ukazuje, že VBD prošla MRF leštěním.

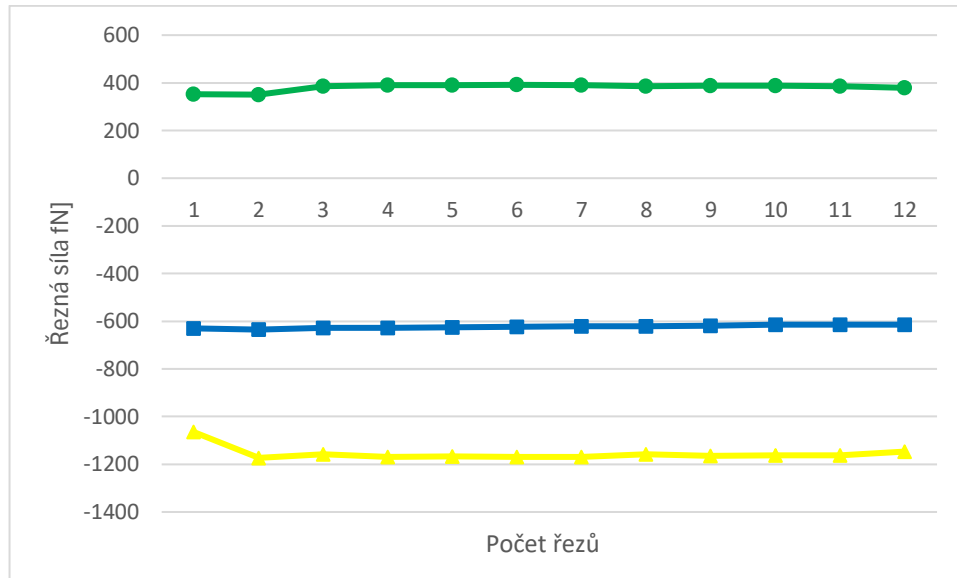


Obrázek 61 Průběh drsnosti MRFVBD po obrábění v místě styku

Při obrábění pískované VBD dochází k degradaci drsnosti povrchu, která se vyznačuje tvorbou tzv. vysokých vrcholů. Tyto nepravidelnosti vznikají v důsledku intenzivního opotřebení v oblasti styku s obrobkem. Detailní průběh změn drsnosti v průběhu obráběcího procesu je patrný na obrázku 58.

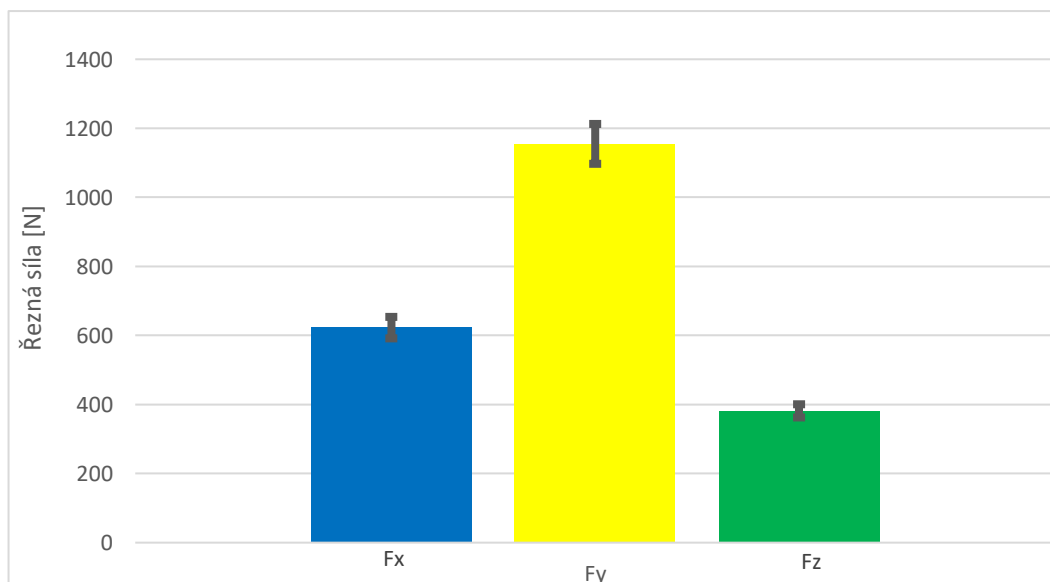
10.3.1 Naměřené řezné síly

Obrázek 62 prezentuje graf závislosti velikosti sil složek F_x , F_y a F_z na čase. Data byla získána měřením v pětisekundových intervalech a zahrnují průměrnou hodnotu z vybraného úseku. Analýza grafu prokazuje, že hodnoty řezných sil pro všechny tři složky (F_x , F_y a F_z) vykazují značnou míru shody a v průběhu celého testu se vyznačují stabilní charakteristikou.



Obrázek 62 Průběh velikosti složek řezných sil MRF VBD

Obrázek 63 prezentuje grafické znázornění naměřených velikostí řezných sil složek F_x , F_y a F_z . Data zahrnují průměrnou hodnotu každé složky síly a doplňují ji o chybovou úsečku, která reprezentuje rozsah naměřených hodnot v daném intervalu. Z analýzy grafu je patrné, že nejvyšší naměřená síla je F_y . Velikost chybové úsečky vykazuje u všech os relativně konzistentní charakteristiku, čímž naznačuje stabilitu naměřených hodnot.

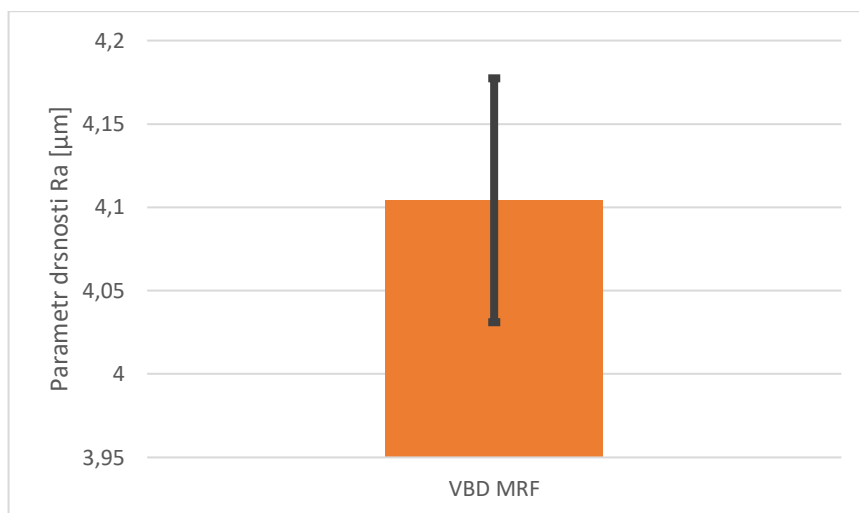


Obrázek 63 Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil MRF VBD

10.3.2 Naměřená drsnost

Byla provedena analýza parametru drsnosti R_a , a to pomocí drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-410. Během měření bylo pořizeno 10 hodnot. Průměrná hodnota drsnosti R_a a její

směrodatná odchylka jsou patrné na obrázku 64. Nízká hodnota směrodatné odchylky ukazuje, že Ra dosahuje stabilních hodnot.



Obrázek 64 Průměrná drsnost povrchu Ra MRF VBD

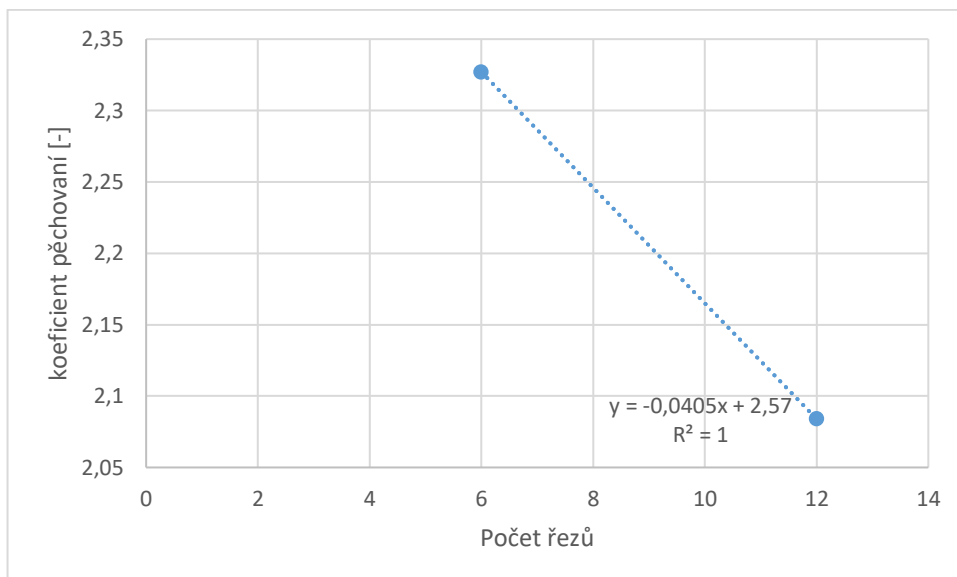
10.3.3 Koeficient přechování třísky a úhel střížné roviny

V tabulce 9 jsou shromážděna data o třískách z testu MRF VBD. Tato data zahrnují vypočtenou hodnotu roviny stříhu a koeficient přechování třísek. Po každých dvou testech byla odebrána poslední tříska a podrobena vyhodnocení.

Tabulka 9 Měřená data třísek MRF VBD

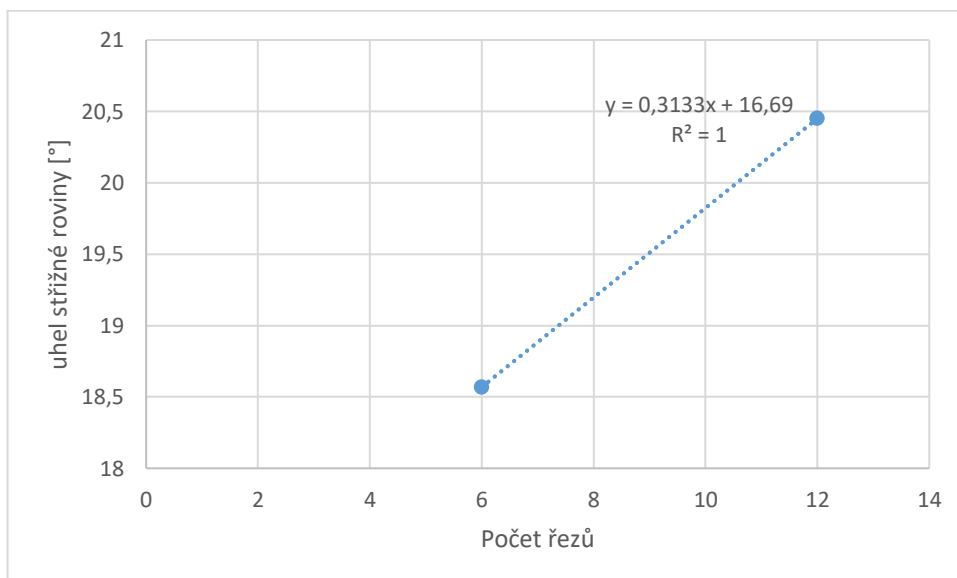
	6. řez	12.řez
1	2,38	2,01
2	2,31	2,1
3	2,28	2,12
4	2,29	2,05
5	2,33	2,06
6	2,36	2,13
7	2,37	2,04
8	2,3	2,12
9	2,31	2,11
10	2,34	2,1
průměr [mm]	2,327	2,084
směr. Odchylka [mm]	0,032	0,038
koeficient pěchování [-]	2,327	2,084
uhel střižné roviny [°]	18,57	20,45

Obrázek 65 zobrazuje průběh koeficientu pěchování třísky. Proložení lineární spojnicí trendu ukazuje klesající hodnotu, čímž naznačuje, že koeficient pěchování se snižuje. Pro přesnější určení trendu a potvrzení klesající tendence by bylo nutné provést dlouhodobější test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



Obrázek 65 Průběh koeficientu pěchování

Obrázek 66 zobrazuje průběh úhlu střížné roviny. Na základě trendu lze pozorovat nárůst hodnot úhlu. Pro přesnější určení trendu a potvrzení jeho stoupajícího charakteru by bylo nutné provést delší test, který by umožnil prokazatelnější vyhodnocení spojnice.



Obrázek 66 Úhel střížné roviny

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

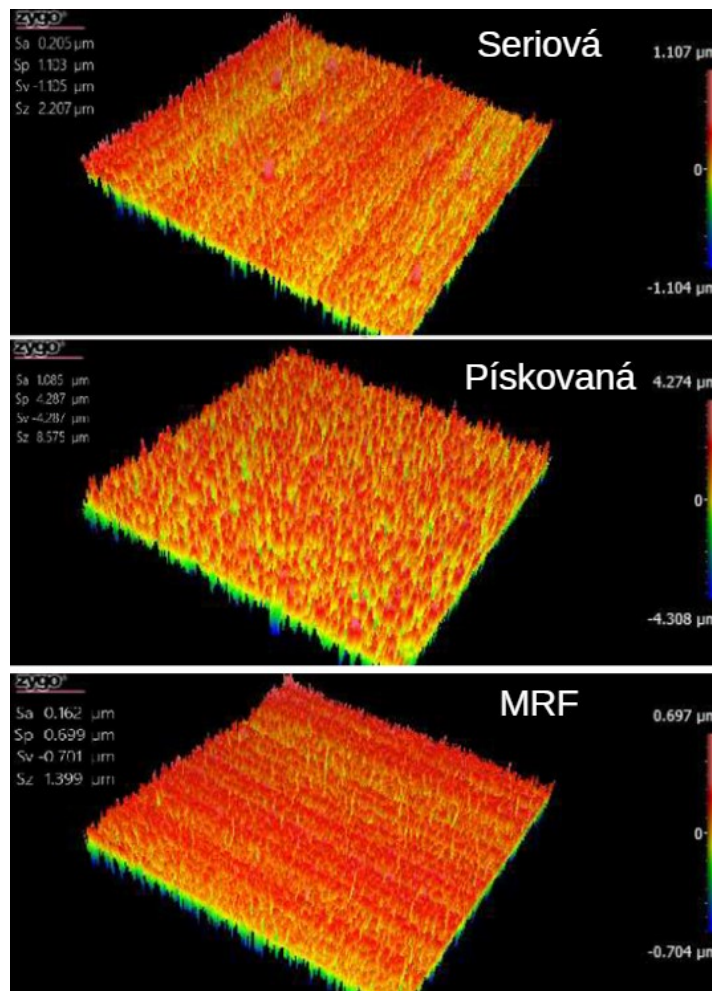
V následující kapitole budou výsledky měření porovnány mezi sebou. Dále budou porovnány velikosti složek řezných sil působících na řezný nástroj během obrábění, kvalita povrchu obráběné plochy, úhel střížné roviny a koeficient pěchování vzniklé třísky.

11.1 Porovnání drsností

Následující podkapitoly budou věnovány porovnání naměřených drsností jak destiček, tak na konečném obrobku.

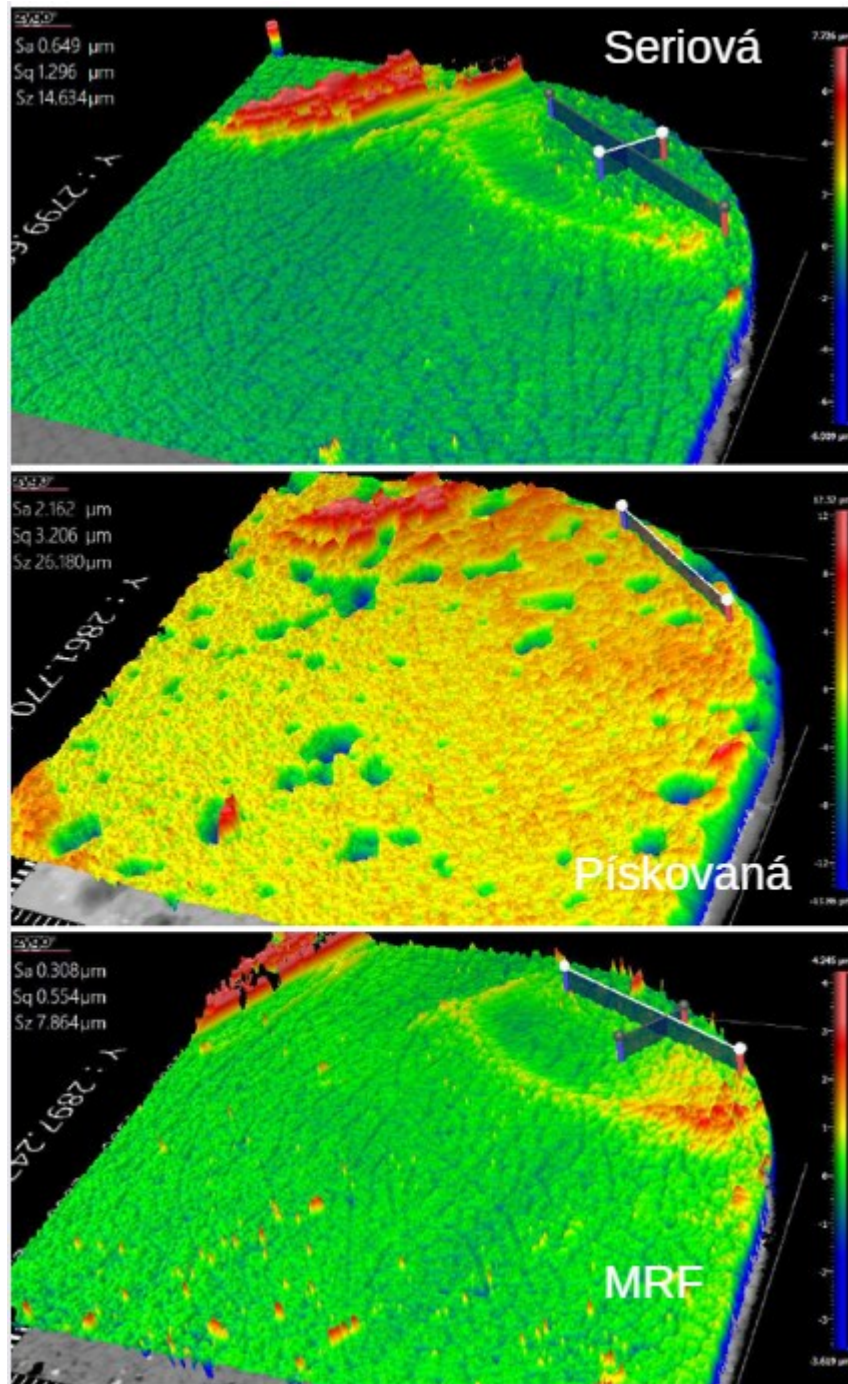
11.1.1 Porovnání destiček

Základní drsnost profilu byla změřena pomocí profilometru Zygo 8000. Měření bylo provedeno v oblasti špičky nástroje. Jednotlivé hodnoty drsnosti před obráběním lze pozorovat na obrázku 67.



Obrázek 67 Porovnání drsností VBD před obrábění

Obrázek 67 zachycuje optické srovnání VBD před provedením série řezů. Na první pohled jsou patrné rozdíly ve struktuře materiálů. Pískovaná VBD vykazuje nejvýraznější červené peaky, zatímco MRF VBD se vyznačuje nejstabilnější strukturou.



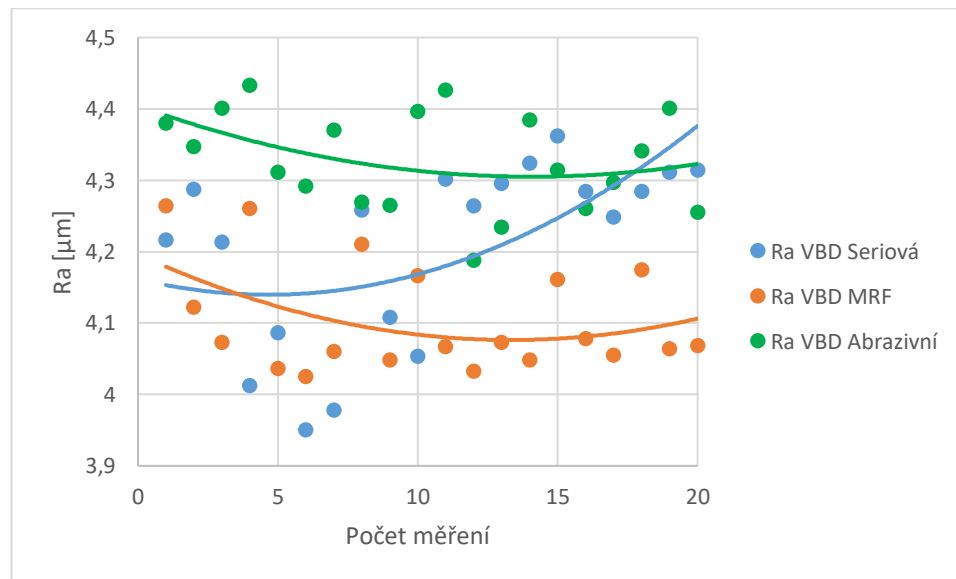
Obrázek 68 Porovnání drsností VBD po obrábění

Komparace optických vlastností referenční, pískovaná a MRF VBD. Na pískovaných a MRF VBD byla po oddělení třísky během procesu VBD pozorována zřetelná vybrání ve tvaru třísky a kráterů. Dále byla provedena analýza drsnosti povrchu referenční destičky v místě

odběru materiálu. Výsledek ukázal, že hodnota Ra (parametr drsnosti) u referenční destičky se ve srovnání s pískovaná a MRF VBD zvýšila téměř trojnásobně. U pískované a MRF VBD se hodnota Ra zdvojnásobila. Absence zřetelného vybrání na pískované VBD je pravděpodobně způsobena neplynulým odchodem třísky. Z experimentu lze usuzovat na důležitost hladkého povrchu referenční VBD pro plynulý odchod třísky a minimalizaci tvorby vybrání a kráterů. Pískovaná a MRF VBD pravděpodobně vedou k modifikaci povrchových vlastností materiálu, čímž dochází k jeho zdrsnění a horšímu odchodu třísky.

11.1.2 Porovnání drsnosti na obrobku

Obrázek 69 popisuje průběh Ra na obrobku po obrábění destičkami s různou drsností. Měření probíhalo na drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-410. Z analýzy polynomicke funkce u referenční VBD vyplývá strmější tendence opotřebení, čímž se tato VBD vyznačuje pravděpodobně kratší životností ve srovnání s pískovanou a MRF VBD.

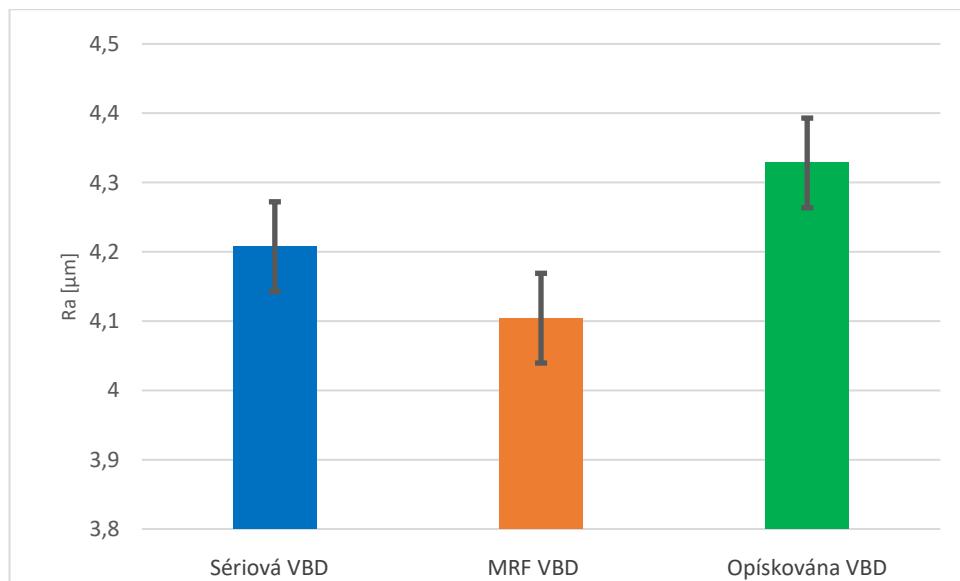


Obrázek 69 Průběh drsnosti Ra na obrobku

Obrázek 70 zkoumá vliv drsnosti VBD na konečnou drsnost obrobku. Nejlepších výsledků, co se týče konečné drsnosti, dosahuje leštěná MRF VBD, zatímco nejhorší drsnosti Ra je dosaženo u pískované VBD.

Z výše uvedeného je patrné, že drsnost VBD hraje roli v dosažení požadované drsnosti obrobku. Pro dosažení nejlepších výsledků by VBD měla mít ideálně co nejmenší drsnost. Nicméně, toto optimum je nutné zvážit v kontextu dalších faktorů, jako je čas leštění a celková životnost VBD. Nadměrné leštění VBD s cílem dosáhnout absolutně nejnižší

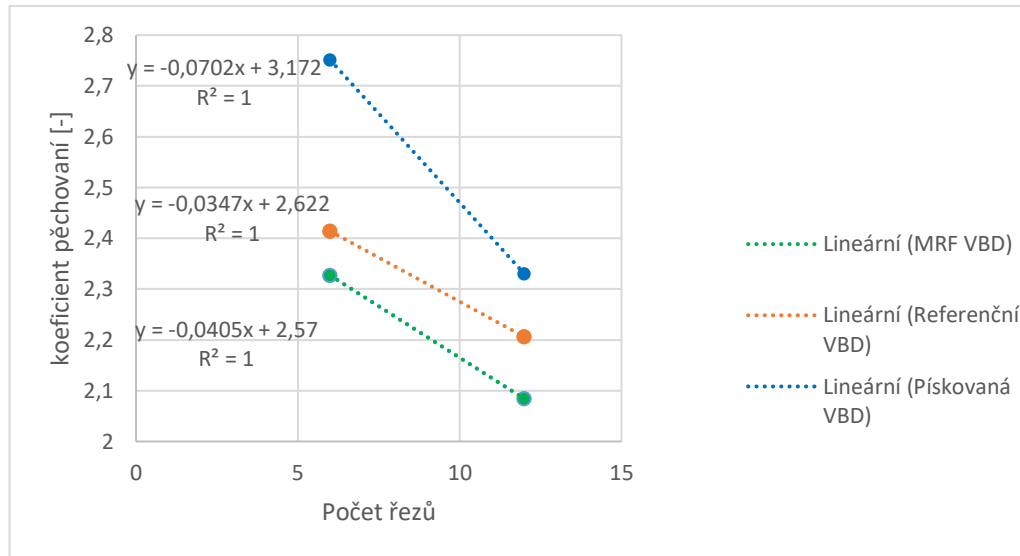
drsnosti se může ukázat jako neefektivní a zbytečně nákladné, jelikož nárůst drsnosti obrobku v praxi nemusí být natolik významný, aby ospravedlnil investované náklady a čas.



Obrázek 70 Porovnání drsnosti Ra

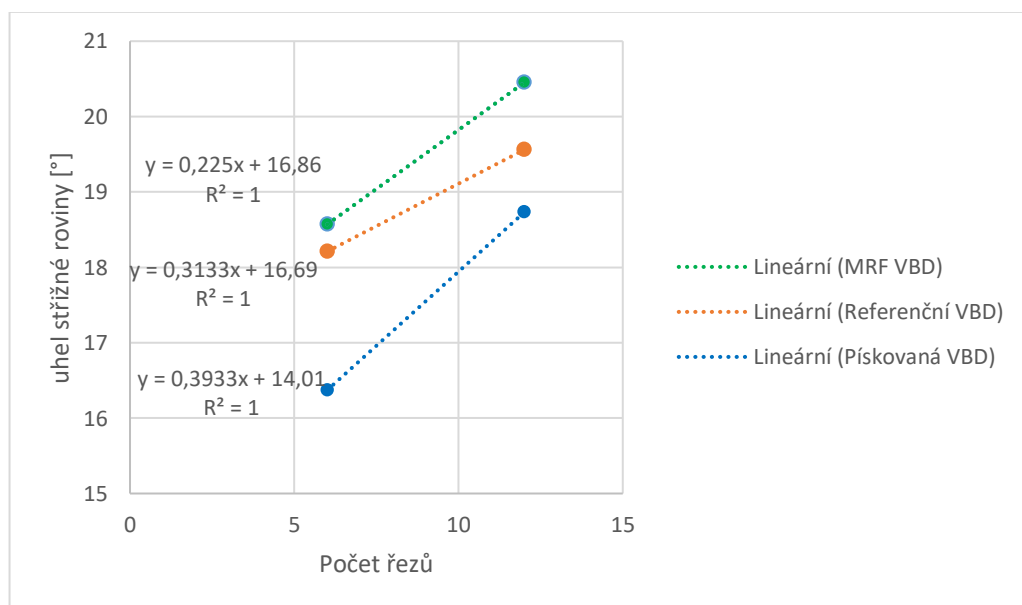
11.2 Porovnání dle tloušťky třísek

Výsledky ukazují, že drsnost destičky ovlivňuje koeficient pěchování. S rostoucí drsností VBD roste i koeficient pěchování, pravděpodobně kvůli většímu tření a deformaci materiálu. Naopak, MRF s nejnižší průměrnou drsností má i nejnižší koeficient pěchování. V tomto případě s konstantním materiálem a řeznými podmínkami je drsnost destičky jediným faktorem ovlivňujícím koeficient pěchování. Výsledky jasně demonstrují, že vyšší drsnost vede k většímu zvětšení objemu třísky, zatímco nižší drsnost vede k jeho zmenšení. Pro nízkou tvorbu třísek je vhodná MRF VBD s nízkou drsností, pro vysokou produktivitu pískovaná. Pískovaná destička může být vhodná pro vysokou produktivitu, ale jen v případě, že jsou akceptovatelné negativní dopady, jako jsou vyšší řezné síly, horší odvod třísek a větší deformace materiálu. MRF VBD s nízkou drsností je vhodnější pro obrábění, kde je důležitá vysoká přesnost rozměrů a lepší povrchová jakost.



Obrázek 71 Porovnání koeficientu přechování VBD

Výsledky ukazují, že drsnost destičky ovlivňuje úhel střížné roviny (ÚSR). S klesající drsností VBD se ÚSR zvětšuje. To je pravděpodobně způsobeno menším a deformací materiálu vlivem hladkého povrchu VBD. MRF VBD s nejnižší drsností má logicky i největší ÚSR. Naopak, pískovaná destička s nejvyšší drsností má i nejnižší ÚSR, jelikož drsný povrch zvyšuje třecí sílu, což bylo potvrzeno ve zkoumání sil, a deformaci materiálu. V tomto specifickém případě s konstantním materiálem, řeznými podmínkami a geometrií nástroje je drsnost destičky jediným faktorem ovlivňujícím ÚSR. Výsledky jasně demonstrují, že nižší drsnost vede k většímu sklonu střížné roviny, zatímco vyšší drsnost vede k jeho snížení.

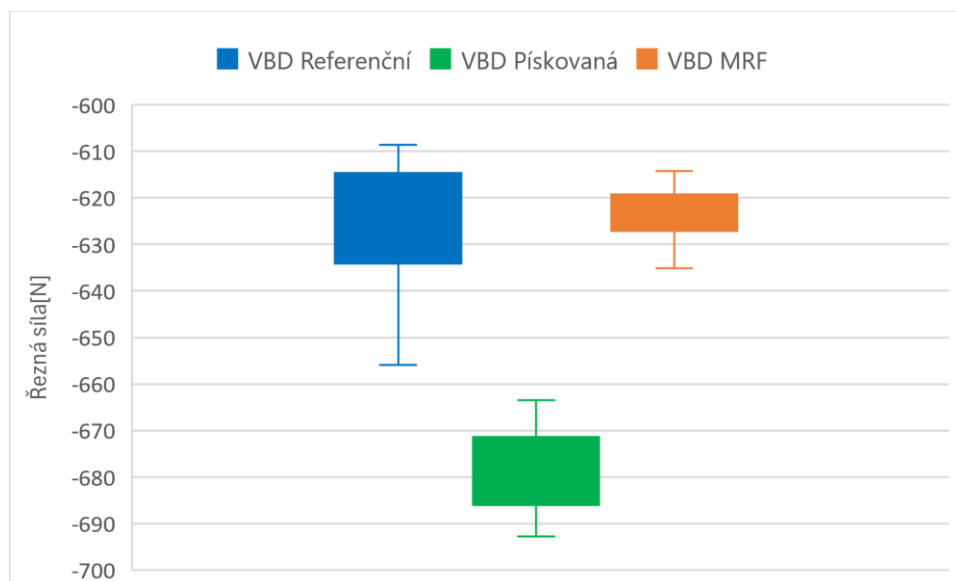


Obrázek 72 Porovnání úhlu střížné roviny

11.3 Porovnání sil

Porovnání síly F_x u pískované, referenční a MRF VBD. Z grafu je patrné, že největší síla F_x se vyskytuje u pískované VBD. Rozdíl mezi silami F_x u referenční a MRF VBD je malý a dosahuje podobných hodnot. U referenční VBD je patrný vysoký rozptyl sil F_x , jak dokládá směrodatná odchylka.

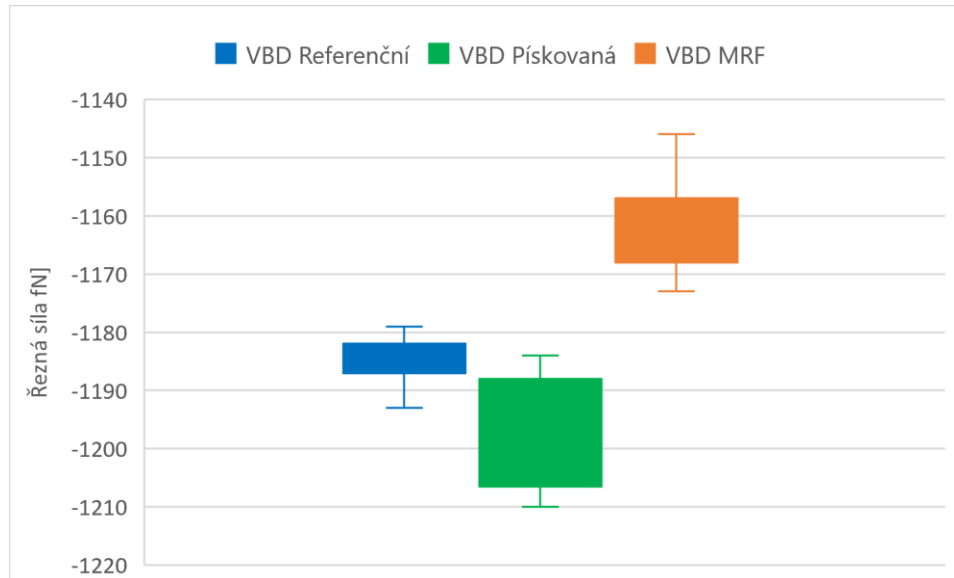
Síla F_x v pasivní složce hraje důležitou roli z hlediska technologického aspektu. Její velikost ovlivňuje konstrukci nástroje i část obráběcího stroje, a to z hlediska tuhosti. Vyšší síly F_x v pasivní složce vyžadují robustnější konstrukci nástroje a obráběcího stroje, aby se zajistila jejich stabilita a odolnost proti deformaci.



Obrázek 73 Porovnání průměrné síly F_x

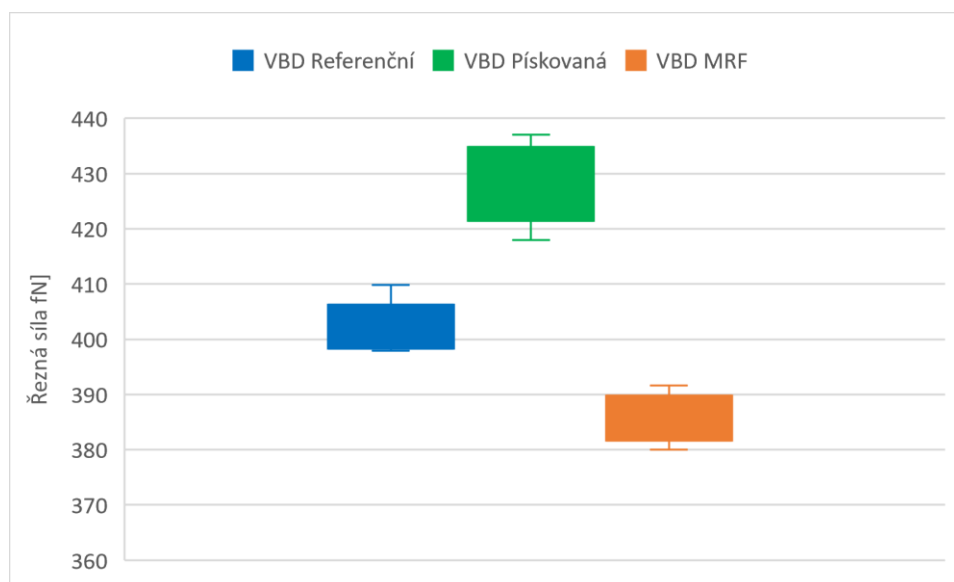
Analýza hlavní řezné síly F_y v závislosti na typu VBD ukazuje, že MRF VBD dosahuje nejnižší hodnoty síly ve srovnání s referenční a pískovanou VBD. To implikuje, že řezná složka představuje největší a nejdůležitější složku síly obrábění. Výpočty namáhání nástroje, upínacího mechanismu, pohonu stroje, výkonu na noži a příkonu elektromotoru se opírají o hodnotu řezné složky síly.

Nižší hodnota síly F_y u MRF VBD se tak promítá do menších nároků na výše uvedené komponenty. To vede k optimalizaci konstrukce nástroje a stroje, snížení opotřebení a prodloužení životnosti.



Obrázek 74 Porovnání průměrné síly Fy

Naproti tomu výsledky analýzy posuvové síly Fz v závislosti na typu VBD ukazují, že MRF VBD dosahuje nejnižší hodnoty síly Fz, zatímco pískovaná VBD vykazuje nejvyšší hodnotu. Nízké hodnoty síly Fz u MRF VBD indikují, že posuvová složka představuje nejmenší složku síly obrábění a zároveň kladou nejmenší nároky na posuvné mechanismy obráběcího stroje. To umožňuje jednodušší konstrukci a snižuje nároky na údržbu.



Obrázek 75 Porovnání průměrné síly Fz

Z provedené analýzy grafů vyplývá, že drsnost povrchu VBD má významný vliv na velikost sil působících při soustružení. Bylo zjištěno, že VBD s nejmenší naměřenou drsností Ra, dosahuje i nejnižších hodnot sil. Naopak VBD pískovaná, vykazující nejvyšší drsnost povrchu, generuje i nejvyšší naměřené síly.

Tato zjištění jasně demonstrují přímou úměrnost mezi drsností VBD a silami vznikajícími během soustružení. Hladší povrch VBD klade menší odpor nástroji, čímž se snižují i potřebné řezné síly. Naopak hrubší povrch VBD způsobuje větší tření a deformaci materiálu, vedoucí k nárůstu silových poměrů.

Z výše uvedeného lze konstatovat, že optimalizace drsnosti VBD představuje faktor pro efektivní a energeticky nenáročné soustružení. V praxi to znamená volbu VBD s vhodnou mírou drsnosti, která zajistí požadovanou kvalitu povrchu obrobku při minimalizaci silových zatížení.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zaměřila na změnu drsnosti nepovlakovaných vyměnitelných břitových destiček (VBD) a na zjištění vlivu této drsnosti na konečný obrobek. V teoretické části byly popsány základní principy soustružení, vlastnosti vyměnitelných břitových destiček, metody dokončování povrchů, tribologie nástroje a třísky. Praktická část se zabývala přípravou destiček s různou drsností, popisem postupů pro změnu drsnosti a použitých přístrojů. Drsnost VBD byla měněna pomocí ručního tryskací zařízení Sinterit SANDBLASTER s brusivem hnědý korund K180, ve kterém se drsnost zvyšovala taktéž MRF zařízení, pomocí kterého se drsnost snižovala. Experiment probíhal na soustružnicko-frézovacím centru NTX 1000 od DMG Mori. Řezné síly byly měřeny dynamometrem Kistler 9129AA a vyhodnocovány v programu Dynoware. Testování probíhalo na testovacích tyčích z materiálu ČSN 11600 v náročných podmínkách pro rychlé dosažení výsledků. Z experimentu vyplynulo, že drsnost VBD má poměrně velký vliv na vlastnosti konečného obrobku. U leštěných VBD byly naměřeny menší řezné síly a dosaženo bylo lepší jakosti obrobku. S rostoucí drsností VBD roste i koeficient pěchování, ale s klesající drsností VBD se úhel střižné roviny zvětšuje. Zda je nezbytné leštit VBD pomocí MRF zůstává otázkou. Konečná změna drsnosti není u MRF leštění tak výrazná a tato metoda je poměrně nákladná a časově náročná. Navíc se drsnost VBD během používání mění, proto by vhodnějším řešením mohlo být zařazení konečného leštění až po soustružení. Vliv drsnosti VBD na řezné síly nebyl tak markantní, aby bylo nutné měnit uchycení nože nebo zvažovat další úpravy pro dosažení optimální drsnosti obrobku.

Diplomová práce zdůrazňuje důležitost drsnosti nepovlakovaných VBD pro vlastnosti konečného obrobku. Byly prokázány významné vlivy drsnosti na řezné síly a kvalitu obrobku. Další výzkum by se měl zaměřit na detailní analýzu těchto vlivů a na vývoj modelů pro predikci chování VBD v závislosti na jejich drsnosti. To by mohlo vést k optimalizaci procesu soustružení a dosažení vyšší efektivity a kvality výroby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ATTANASIO, A. et al., 2006. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear* [online]. 260(3), 333-338 [cit. 2023-11-19]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2005.04.024 [1]

DENKENA, B. a D. BIERMANN, 2014. Cutting edge geometries. *CIRP Annals* [online]. 63(2), 631-653 [cit. 2023-11-20]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2014.05.009 [2]

CHILDS, T.H.C., 2006. Friction modelling in metal cutting. *Wear* [online]. 260(3), 310-318 [cit. 2023-11-19]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2005.01.052 [3]

SCHMITZ, Tony L. a Kevin S. SMITH, 2009. *Machining Dynamics* [online]. Boston, MA: Springer US [cit. 2023-11-20]. ISBN 978-0-387-09644-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-09645-2 [4]

MARUDA, Radoslaw W. et al., 2016. The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 24, 107-115 [cit. 2023-11-20]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2016.08.006 [5]

SOUSA, Vitor F. C. a Francisco J. G. SILVA, 2020. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. *Metals* [online]. 10(2), 28 [cit. 2023-11-19]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met10020170 [6]

BYRNE, G., D. DORNFELD a B. DENKENA, 2003. Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals* [online]. 52(2), 483-507 [cit. 2024-02-10]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60200-5 [7]

GARCÍA, José et al., 2019. Cemented carbide microstructures: a review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 80, 40-68 [cit. 2023-11-20]. ISSN 02634368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004 [8]

LÓPEZ DE LACALLE, L. Norberto et al., 2011. Advanced Cutting Tools. In: DAVIM, J. Paulo, ed. *Machining of Hard Materials* [online]. London: Springer London, s. 33-86 [cit. 2024-02-10]. ISBN 978-1-84996-449-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84996-450-0_2 [9]

JAIN, V K et al., 2012. Nano-finishing techniques: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online].

226(2), 327-346 [cit. 2024-02-10]. ISSN 0954-4062. Dostupné z: doi:10.1177/0954406211426948 [10]

ZHANG, Jiong et al., 2020. Experimental and theoretical study of internal finishing by a novel magnetically driven polishing tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 153 [cit. 2024-02-11]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2020.103552 [11]

BOBZIN, Kirsten, 2017. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 18, 1-9 [cit. 2024-02-11]. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2016.11.004 [12]

SUN, Luzhao et al., 2021. Chemical vapour deposition. *Nature Reviews Methods Primers* [online]. 1(1) [cit. 2024-02-11]. ISSN 2662-8449. Dostupné z: doi:10.1038/s43586-020-00005-y [13]

GRZESIK, Wit. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials. 2.* Elsevier Science & Technology, 2016. ISBN 9780444637116 [14]

YOUSSEF, Helmi A. a Hassan EL-HOFY, 2008. *Machining Technology* [online]. CRC Press [cit. 2024-02-10]. ISBN 9780429142154. Dostupné z: doi:10.1201/9781420043402 [15]

EVANS, C.J. et al., 2003. Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. *CIRP Annals* [online]. 52(2), 611-633 [cit. 2024-02-10]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60207-8 [16]

CHETAN, Sudarsan GHOSH a P. VENKATESWARA RAO, 2015. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 100, 17-34 [cit. 2024-02-26]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.039 [17]

JAVIDI, A, U RIEGER a W EICHLSEDER, 2008. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue* [online]. 30(10-11), 2050-2055 [cit. 2024-02-26]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005 [18]

REHORN, Adam G., Jin JIANG a Peter E. ORBAN, 2005. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 26(7-8), 693-710 [cit. 2024-02-26]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-004-2038-2 [19]

DAVID, Stephenson, 2016. Metal cutting theory and practice. Third edition. CRC Press. ISBN 978-146658754-0. [20]

RANJAN, Priya a Somashekhar S. HIREMATH, 2019. Role of textured tool in improving machining performance: A review. Journal of Manufacturing Processes [online]. 43, 47-73 [cit. 2024-02-29]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.04.011 [21]

ROY, M., 2017. Protective Hard Coatings for Tribological Applications. In: Materials Under Extreme Conditions [online]. Elsevier, s. 259-292 [cit. 2024-02-29]. ISBN 9780128013007. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-801300-7.00008-5 [22]

HOGMARK, Sture, Staffan JACOBSON a Mats LARSSON, 2000. Design and evaluation of tribological coatings. Wear [online]. 246(1-2), 20-33 [cit. 2024-02-26]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(00)00505-6 [23]

BEDI, Talwinder Singh a Anant Kumar SINGH, 2015. Magnetorheological methods for nanofinishing – a review. Particulate Science and Technology [online]. 34(4), 412-422 [cit. 2024-02-10]. ISSN 0272-6351. Dostupné z: doi:10.1080/02726351.2015.1081657 [24]

ZHAI, Wenzheng et al., 2017. Carbon nanomaterials in tribology. Carbon [online]. 119, 150-171 [cit. 2024-03-12]. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbon.2017.04.027 [25]

UZOMA, Paul C. et al., 2020. Tribology of 2D Nanomaterials: A Review. Coatings [online]. 10(9) [cit. 2024-03-12]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings10090897 [26]

E-SHOP | MB CALIBR. Drsnoměr Surftest SJ-411 Mitutoyo 178-580-11D. Online. Eshop.mbcaltbr.cz. Dostupné z: <https://eshop.mbcaltbr.cz/meridla-drsnosti-povrchu/drsnomer-surfest-sj-411-mitutoyo-178-580-11d/>. [cit. 2024-05-06]. [27]

Sandblaster. Online. Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers. Dostupné z: <https://sinterit.com>. [cit. 2024-05-06]. [28]

NTX 1000. Online. DMG MORI. Dostupné z: <https://en.dmgmori.com/products/machines/turning/turn-mill/ntx/ntx-1000>. [cit. 2024-04-12]. [29]

Multicomponent dynamometer type 9129AA. KISTLER [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa/> [30]

Laboratory charge amplifiers LabAmp with data acquisition, for dynamic and or quasi-static signals, up to 8 channels / LabAmp. Online. Kistler. Dostupné z:

<https://www.kistler.com/US/en/cp/laboratory-charge-amplifiers-labamp-with-data-acquisition-labamp/P0000289>. [cit. 2024-04-14]. [31]

PSSNR2020K12. Online. Seco Tools. Dostupné z:
https://www.secotools.com/article/p_00038398. [cit. 2024-05-08]. [32]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Computer Numerical Control
MQCL	Mazání v minimálním množství
PCD	Polykrystalický diamant
WC	Karbid wolframu
TiC	Karbid titanu
PCBN	Kubický nitrid bóru
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
Si ₃ N ₄	Nitrid křemíku
CVD	Chemická depozice z par
PVD	Fyzikálního nanášení z plynné fáze
μm	Mikrometr
MRF	Magnet reologické dokončování povrchů
MFAF	Technologie dokončování pomocí magnetického pole
MAF	Magnetické abrazivní dokončování
ECM	Elektrochemické obrábění (ECM)
OAC	Otevřená architektura
XRD	Rentgenová difrakce
F	Řezná síla (N)
F _p	Pasivní složka řezné síly síla (N)
F _c	Hlavní složka řezné síly (N)
F _f	Axiální složka řezné síly (N)
VBD	Vyměnitelná břitová destička
ÚSR	Úhel střižné roviny

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma ručního soustruhu [1].....	12
Obrázek 2 Přechod od makroskopického k mikroskopickému tvaru nástroje s ohledem na řezné podmínky. [4].....	15
Obrázek 3 Makroskopický pohled nástroje [1].....	15
Obrázek 4 Vývoj tvaru třísky s postupným opotřebením nástroje v závislosti na způsobu chlazení při obrábění oceli AISI 1045 pro $v_c = 250$ m/min. [6].....	17
Obrázek 5 Odhadované celosvětové použití hlavních řezných materiálů [8].....	19
Obrázek 6 Houževnatost a tvrdost materiálů řezných nástrojů [9].....	19
Obrázek 7 Pohyblivý honovací nástroj se dvěma univerzálními klouby, které umožňují vyrovnání otvoru a nástroje. [13].....	23
Obrázek 8 Princip superfinišování [13].....	24
Obrázek 9 Princip lapování [13].....	25
Obrázek 10 Systém sledování opotřebenění nástrojů [23].....	33
Obrázek 11 Schematické znázornění zkoušky přilnavosti tažením [25].....	36
Obrázek 12 Řezná destička SNMA120416 TK0501.....	42
Obrázek 13 Vyrobený přípravek.....	43
Obrázek 14 Drsnoměr Mitutoyo SurfTest SJ-410 [27].....	44
Obrázek 15 R-profil referenční destičky.....	46
Obrázek 16 Křivka materiálového poměru profilu referenční destičky.....	46
Obrázek 17 Amplitudové rozdělení referenční destičky.....	47
Obrázek 18 Ruční tryskací zařízení Sinterit SANDBLASTER [28].....	48
Obrázek 19 Graf závislosti drsnosti na čase pískování.....	49
Obrázek 20 R-profil pískované VBD.....	49
Obrázek 21 Křivka materiálového poměru profilu pískované destičky.....	50
Obrázek 22 Amplitudové rozdělení pískované destičky.....	51
Obrázek 23 Zařízení pro MRF leštění.....	52
Obrázek 24 Destička v přípravku zalitá směsí v MRF zařízení.....	53
Obrázek 25 Závislost drsnosti leštěného povrchu na čase.....	54
Obrázek 26 R-profil MRF VBD.....	55
Obrázek 27 Křivka materiálového poměru profilu MRF destičky.....	55
Obrázek 28 Amplitudové rozdělení MRF destičky.....	56
Obrázek 29 Obráběcí centrum NTX 1000 DMG MORI [29].....	59
Obrázek 30 Nákres dynamometru Kistler 9129AA [30].....	60
Obrázek 31 Zesilovač Kistler 5167A [31].....	61
Obrázek 32 Soustružnický nůž PSBNR2020K12 [32].....	61

Obrázek 33	Upínací mechanismus pro upnutí nožů	62
Obrázek 34	Upínací mechanismus pro dynamometr	62
Obrázek 35	Schématické zapojení setupu	63
Obrázek 36	První trajektorie ubrání polotovaru	64
Obrázek 37	Trajektorie pro měření řezných sil	64
Obrázek 38	Schématické složky řezných sil.....	65
Obrázek 39	Referenční VBD pozorována před a po obrábění	67
Obrázek 40	Abbottova–Firestoneova křivka referenční VBD před obráběním	68
Obrázek 41	Histogram referenční VBD před obráběním	68
Obrázek 42	Průběh drsnosti referenční VBD po obrábění v místě styku.....	69
Obrázek 43	Průběh měření sil.....	70
Obrázek 44	Průběh velikosti řezných sil	71
Obrázek 45	Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil referenční VBD	71
Obrázek 46	Průměrná drsnost povrchu Ra referenční VBD.....	72
Obrázek 47	Průběh koeficientu přechování	74
Obrázek 48	Úhel střižné roviny	74
Obrázek 49	Pískovaná VBD pozorována před a po obrábění.....	75
Obrázek 50	Abbottova–Firestoneova křivka pískované VBD před obráběním	76
Obrázek 51	Histogram pískované VBD	76
Obrázek 52	Průběh drsnosti pískované VBD po obrábění v místě styku.....	76
Obrázek 53	Průběh velikosti složek řezných sil pískované VBD.....	77
Obrázek 54	Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil pískované VBD	78
Obrázek 55	Průměrná drsnost povrchu Ra pískované VBD.....	78
Obrázek 56	Průběh koeficientu přechování	80
Obrázek 57	Úhel střižné roviny	80
Obrázek 58	MRF VBD pozorována před a po obrábění	81
Obrázek 59	Abbottova–Firestoneova křivka MRF VBD před obráběním	81
Obrázek 60	Histogram MRF VBD	82
Obrázek 61	Průběh drsnosti MRFVBD po obrábění v místě styku.....	82
Obrázek 62	Průběh velikosti složek řezných sil MRF VBD	83
Obrázek 63	Průměrná absolutní hodnota naměřených řezných sil MRF VBD	83
Obrázek 64	Průměrná drsnost povrchu Ra MRF VBD	84
Obrázek 65	Průběh koeficientu přechování	86
Obrázek 66	Úhel střižné roviny	86
Obrázek 67	Porovnání drsností VBD před obrábění	87

Obrázek 68 Porovnání drsností VBD po obrábění	88
Obrázek 69 Průběh drsnosti Ra na obrobku	89
Obrázek 70 Porovnání drsnosti Ra	90
Obrázek 71 Porovnání koeficientu přechování VBD.....	91
Obrázek 72 Porovnání úhlu střížné roviny	91
Obrázek 73 Porovnání průměrné síly Fx	92
Obrázek 74 Porovnání průměrné síly Fy	93
Obrázek 75 Porovnání průměrné síly Fz	93

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Podmínky vyhodnocení	45
Tabulka 2 Výsledky referenční VBD	45
Tabulka 3 Vlastnosti hnědého korundu zrnitosti 180	48
Tabulka 4 Jakost povrchu v závislosti na čase pískování	49
Tabulka 5 Průběh drsností při MRF	54
Tabulka 6 Řezné podmínky použité při experimentu	65
Tabulka 7 Měřená data šířky třísek referenční VBD	73
Tabulka 8 Měřená data třísek pískované VBD	79
Tabulka 9 Měřená data třísek MRF VBD	85