



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Přínos tenkých vrstev pro obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Autor:** Jan Škvarka

**Studijní program:** Výroba a ekonomika ve strojírenství

**Studijní obor:** Technologie obrábění, projektování a metrologie

**Vedoucí práce:** Ing. Lubomír Štajnochr

**Praha, 2018**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Škvarka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457296**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přínos tenkých vrstev pro obrábění**

Název bakalářské práce anglicky:

**Benefits of thin layers for machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte přehled používaných tenkých vrstev (povlaků) nástrojů pro obrábění.
2. Porovnejte jejich vhodnost a přínos povlaků pro různé obráběné materiály.
3. Navrhněte nejvhodnější povlaky pro obráběná nerezových ocelí.
4. Proveďte ověření navržených nástrojů praktickou zkouškou.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

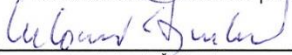
**Ing. Lubomír Štajnochr, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Lubomír Štajnochr  
podpis vedoucí(ho) práce


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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

4.5.2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

**Anotace:**

Bakalářská práce mapuje druhy povlaků užívaných při obrábění a metody vytváření tenkých vrstev. Práce popisuje projevy opotřebení na nástroji a možnosti měření opotřebení. V praktické části se zabývá nástrojovými povlaky a jejich aplikací při obrábění korozivzdorných ocelí. Závěrem práce je optimalizační experiment pro podnik NAVEL, spol. s r. o.

**Klíčová slova:**

Nástrojové povlaky, PVD, CVD, frézování, korozivzdorná ocel

**Anotation:**

The bachelor thesis describes the types of coatings used in machining and thin film forming methods. The paper describes wear and tear on the tool and wear measurement. The practical part deals with tool coatings and their application in machining of stainless steels. As conclusion there is the experiment for NAVEL, spol. s r. o.

**Key words:**

Tool coatings, PVD, CVD, milling, stainless steels

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne:

Podpis:

**Poděkování:**

Mé poděkování patří Ing. Lubomíru Štajnochrovi za cenné rady a obětavou pomoc při zpracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>- 7 -</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>- 10 -</b>
<b>1. ROZDĚLENÍ NÁSTROJOVÝCH POVLAKŮ</b> .....	<b>- 11 -</b>
1.1. PRVNÍ GENERACE POVLAKŮ .....	- 11 -
1.2. DRUHÁ GENERACE POVLAKŮ .....	- 11 -
1.3. TŘETÍ GENERACE POVLAKŮ .....	- 11 -
1.4. ČTVRTÁ GENERACE POVLAKŮ .....	- 12 -
<b>2. PŘÍPRAVA PRO POVLAKOVÁNÍ</b> .....	<b>- 16 -</b>
2.1. ODJEHLENÍ .....	- 16 -
2.2. ODMAŠTĚNÍ .....	- 16 -
2.3. PÍSKOVÁNÍ .....	- 16 -
2.4. MOKRÉ ČIŠTĚNÍ .....	- 16 -
2.5. OMÍLÁNÍ .....	- 17 -
2.6. STRIPPING – ODSTRANĚNÍ STARÝCH POVLAKŮ .....	- 17 -
<b>3. POVLAKOVACÍ METODY</b> .....	<b>- 18 -</b>
3.1. CVD .....	- 18 -
3.2. MT CVD .....	- 20 -
3.3. PA CVD .....	- 21 -
3.4. PVD .....	- 21 -
3.4.1. <i>Napařování</i> .....	- 22 -
3.4.2. <i>Naprašování</i> .....	- 22 -
3.4.3. <i>Iontová implantace</i> .....	- 23 -
<b>4. OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ</b> .....	<b>- 24 -</b>
4.1. MECHANICKÉ OPOTŘEBENÍ .....	- 24 -
4.1.1. <i>Abrazivní opotřebení</i> .....	- 24 -
4.1.2. <i>Lom (statický a dynamický)</i> .....	- 25 -
4.1.3. <i>Adhezní opotřebení</i> .....	- 25 -
4.2. CHEMICKÉ OPOTŘEBENÍ .....	- 25 -
4.2.1. <i>Difuzní opotřebení</i> .....	- 25 -
4.3. DRUHY OPOTŘEBENÍ .....	- 26 -
4.3.1. <i>Opotřebení hřbetu břitu</i> .....	- 26 -
4.3.2. <i>Opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje</i> .....	- 27 -
4.3.3. <i>Plastická deformace břitu</i> .....	- 27 -
4.3.4. <i>Opotřebení ve tvaru vrubu</i> .....	- 28 -



4.3.5.	<i>Hřebenovité trhliny na ostří</i> .....	- 29 -
4.3.6.	<i>Únavový lom</i> .....	- 29 -
4.3.7.	<i>Vydrolování ostří</i> .....	- 30 -
4.3.8.	<i>Tvorba nárůstku</i> .....	- 30 -
<b>5.</b>	<b>METODY MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ</b> .....	<b>- 32 -</b>
5.1.	METODY PŘÍMÉ .....	- 32 -
5.1.1.	<i>Metoda váhová</i> .....	- 32 -
5.1.2.	<i>Metoda mikrometrická</i> .....	- 32 -
5.1.3.	<i>Metoda stínová</i> .....	- 33 -
5.1.4.	<i>Metoda nanesené odporové vrstvy</i> .....	- 34 -
5.1.5.	<i>Metoda pneumatická</i> .....	- 34 -
5.2.	METODY NEPŘÍMÉ .....	- 35 -
5.2.1.	<i>Optické metody</i> .....	- 35 -
5.2.2.	<i>Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu</i> .....	- 35 -
5.2.3.	<i>Detekce mezery mezi nástrojem a obrobkem</i> .....	- 35 -
5.2.4.	<i>Měření prostřednictvím vibrací</i> .....	- 36 -
5.2.5.	<i>Měření zvuku</i> .....	- 36 -
5.2.6.	<i>Metoda odečtu</i> .....	- 36 -
<b>6.</b>	<b>PRE-EXPERIMENT</b> .....	<b>- 37 -</b>
6.1.	VÝBĚR POVLAKŮ .....	- 37 -
6.2.	OBRÁBĚCÍ STROJ .....	- 38 -
6.3.	OBRÁBĚCÍ NÁSTROJ .....	- 39 -
6.4.	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL .....	- 43 -
6.5.	UPNUTÍ MATERIÁLU.....	- 43 -
6.6.	ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	- 44 -
6.7.	MĚŘICÍ SOUSTAVA.....	- 44 -
6.8.	POSTUP MĚŘENÍ .....	- 45 -
6.9.	VÝSLEDEK PRE-EXPERIMENTU .....	- 46 -
6.10.	SROVNÁVACÍ ZKOUŠKA .....	- 49 -
6.10.1.	<i>Řezné podmínky pro frézu z katalogu Hoffmann</i> .....	- 50 -
6.10.2.	<i>Srovnávací zkouška</i> .....	- 50 -
6.11.	VERIFIKACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK .....	- 52 -
6.11.1.	<i>Řezné podmínky</i> .....	- 52 -
6.11.2.	<i>Výsledek verifikace</i> .....	- 53 -
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>- 55 -</b>
	<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	<b>- 56 -</b>

# Úvod

Třískové obrábění je jedním ze základních odvětví strojírenství. Během vývoje se pro obrábění používaly nejrůznější materiály. Prvními obráběcími materiály byly nástrojové a rychlořezné oceli, které následovaly slinuté karbidy, uměle vytvořený diamant, řezná keramika a další materiály. Společně s vývojem nových řezných materiálů se zvyšovaly i využívané řezné rychlosti a vyvíjely se nové obráběcí stroje. Nejmodernější řezné materiály, jako je kubický nitrid bóru, jsou ve své čisté formě velice drahé, a proto se používají pouze pro výrobu řezných částí nástrojů, na které jsou pájeny, nebo jsou součástí vyměnitelných břitových destiček.

Pro zvýšení životnosti a výkonnosti nástrojů a vyměnitelných břitových destiček dochází k jejich povlakování. Jedná se o depozici velice tenké vrstvy extrémně tvrdého materiálu na povrch nástroje. Tato tenká vrstva pak dokáže výrazně prodloužit dobu životnosti nástroje a ovlivňuje kvalitu obrobeneho povrchu. Tvoří bariéru mezi materiálem těla nástroje a obrobku.

V současnosti se používají pro povlakování technologie PVD (fyzikální napařování, nebo napařování), CVD (chemická depozice) a jejich další modifikace. Dnešní povlaky jsou tvořeny větším počtem vrstev, které svou kombinací navyšují užité vlastnosti více, než kdyby se jednalo o jednu silnější vrstvu. Trendy v povlakování jsou gradientní vrstvy, supermřížkové povlaky a nanokompozitní povlaky. Tato práce se věnuje využití takových moderních nástrojových povlaků pro obrábění nerezových ocelí.

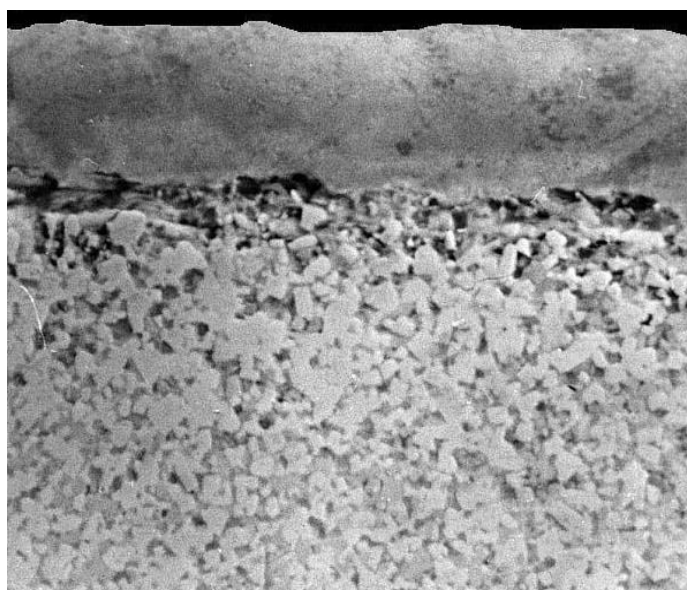
# 1. Rozdělení nástrojových povlaků

## 1.1. První generace povlaků

Mezi povlaky první generace počítáme téměř výhradně povlaky TiC, které byly tvořeny pouze jednou vrstvou povlaku tloušťky 5-7  $\mu\text{m}$ . U těchto povlaků však docházelo ke vzniku křehkého eta-karbidu, který působil potíž v soudržnosti povlaku a podkladu. Povlaky se při užívání velmi rychle začaly odlupovat a docházelo tím k znehodnocování vrstvy a nástroje. [1], [2]

## 1.2. Druhá generace povlaků

Druhá generace povlaků se od první generace liší tím, že byla eliminována vrstva křehkého eta-karbidu. Tyto povlaky pak měly lepší přilnavost k podkladu a neodlupovaly se. Do této kategorie pak můžeme řadit povlaky TiC, TiN a TiCN. Dokonalejší technologie výroby také dovolila zvětšit tloušťku vrstvy na 10  $\mu\text{m}$ . [1]

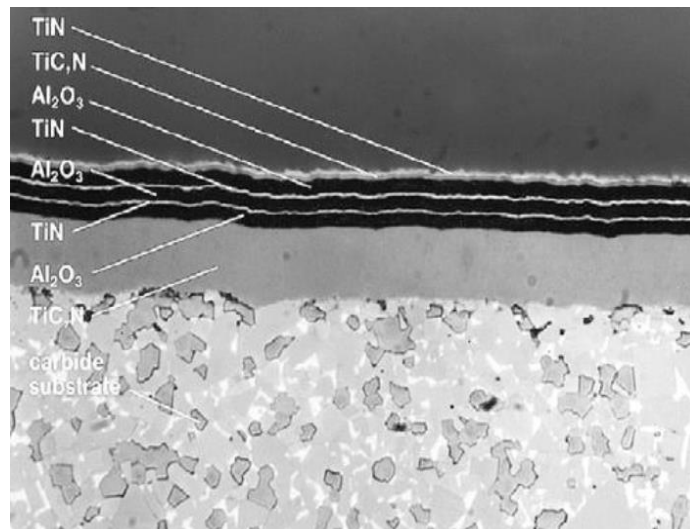


Obr. 1: Povlak druhé generace [3]

## 1.3. Třetí generace povlaků

Třetí generace povlaků je charakteristická větším počtem na sobě nanášených vrstev. Převážně se jedná o 2-3 vrstvy s ostře ohraničenými přechody. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny podle svých vlastností. Blíže k substrátu se vyskytují vrstvy s lepší přilnavostí, a naopak na povrchu

jsou vrstvy s velkou tvrdostí, tepelnou stabilitou a odolné proti opotřebení. Příklady častého řazení vrstev od podkladu k povrchu: TiC – TiN; TiC – TiCN - TiN; TiC - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiN. [2]

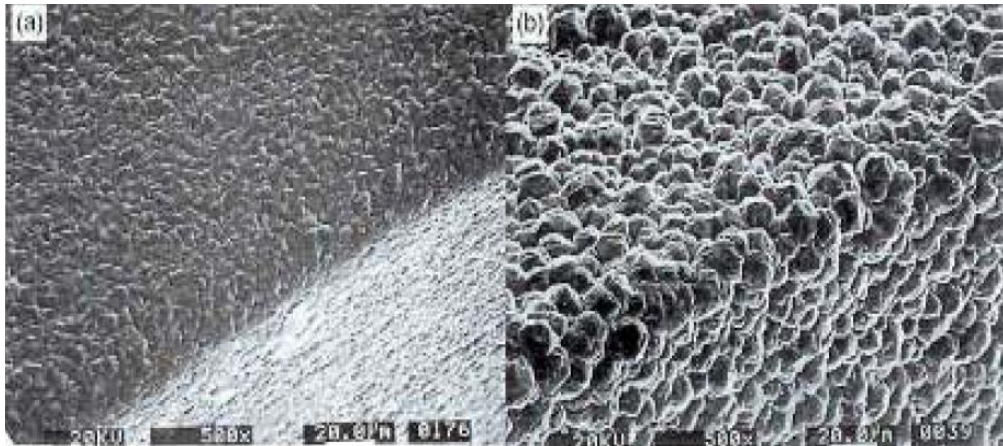


Obr. 2: Povlak třetí generace [1]

#### 1.4. Čtvrtá generace povlaků

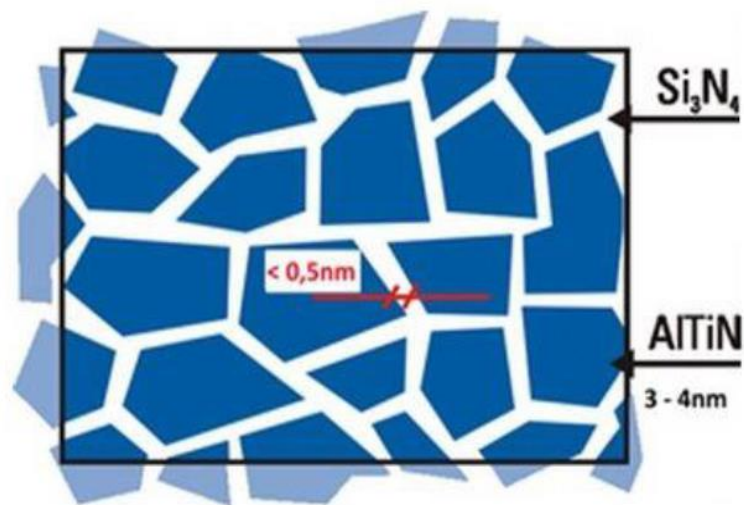
Ve čtvrté generaci se již bavíme o multivrstevných povlacích. Jsou to povlaky, které jsou tvořeny deseti a více vrstvami, popř. mezivrstvami, řazenými obdobně jako u třetí generace podle svých užitných vlastností. Řazením jednotlivých vrstev dochází k brzdění a odklánění trhlin v povlaku a výrazně se tím zvyšuje jejich životnost. Do skupiny povlaků čtvrté generace můžeme dále zařadit povlaky:

- **Diamantové povlaky** – Vyznačují se vysokým modulem pružnosti, nízkým koeficientem tření a nízkým modulem teplotní roztažnosti. Nevýhodou je však nízká houževnatost. Je nezbytné, kvůli špatné adhezi povrch nástroje nejprve upravit leptáním, případně použít jiné mezivrstvy s lepšími adhezními vlastnostmi. To ovšem přináší problém s celkovou drsností diamantové vrstvy, která je zdrsněním substrátu pro depozici ovlivněna a diamantový povlak je díky tomu a velikosti krystalů (které mohou mít i desítky mikrometrů) drsný. [4]



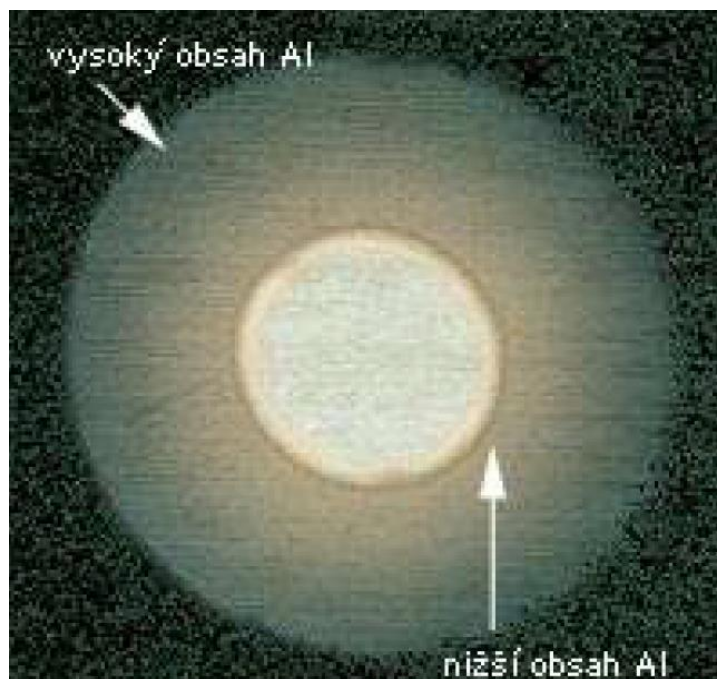
Obr. 3: Jemnozrnný diamantový povlak (a) a hrubozrnný diamantový povlak (b) [5]

- **Nanokompozitní povlaky** – Tyto povlaky se skládají ze dvou, či více složek materiálu, které nejsou vzájemně rozpustné, přičemž alespoň jedna složka je krystalická, vyznačují se jemnozrnností. Hranice zrn se projevují jako efektivní bariéra pro rozvoj poruch a současně ovlivňují tvrdost povlaku. [1]



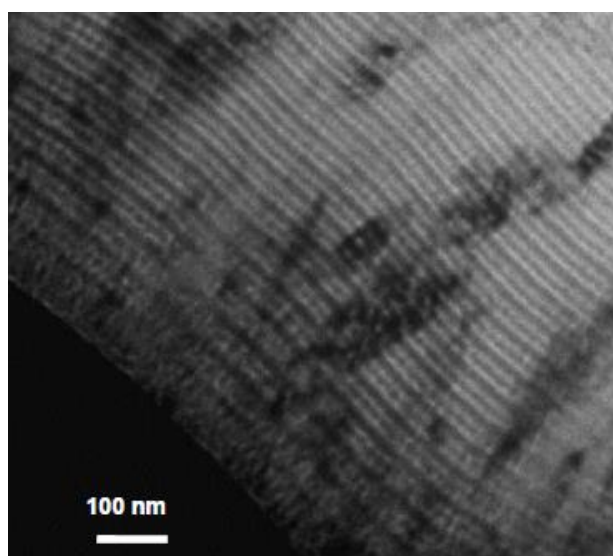
Obr. 4: Struktura nanokompozitního povlaku [6]

- **Gradientní vrstvy** – Tyto vrstvy jsou specifické proměnným složením vrstvy od substrátu k povrchu. U vrstev TiAlN směrem k povrchu roste podíl Al zajišťující oxidační odolnost a klesá podíl Ti. Vrstva je limitována podílem 70 % Al, při vyšším obsahu by Al způsobilo vytvoření hexagonální struktury, která je nevhodná pro obrábění. [1]



Obr. 5: Gradientní vrstva s proměnným množstvím Al [7]

- **Supermřížkové povlaky** – Tyto vrstvy jsou tvořeny opakováním základní vrstvy s velice krátkou periodou. Dojde tak ke vzniku povlaku, ve kterém se jednotlivé vrstvy střídají se supermřížkovou periodou. Kombinací vrstev dvou materiálů dochází ke zvýšení pevnosti nad pevnost jednotlivých materiálů. Např. TiN/NbN:  $H_{\text{TiN}} = 21 \text{ GPa}$ ,  $H_{\text{NbN}} = 14 \text{ GPa}$ ,  $H_{\text{TiN/NbN}} = 52 \text{ GPa}$ . Toto multivrstevné zpevnění vysvětlují různé modely, např. Shinnůn, nebo model Chua a Barnetta. [1]



Obr. 6: Multivrstevný povlak [3]

- **Povlaky kubickým nitridem bóru** – CBN má mimořádně vysokou tvrdost za tepla, je houževnatý a odolává teplotním rázům. Jeho užití je proto vhodné pro vysokorychlostní hrubování. [8]

## **2. Příprava pro povlakování**

### **2.1. Odjehlení**

Tento proces je standardně používán výrobcí nástrojů. Nejvíce je používán u nástrojů z rychlořezné oceli, kdy při výrobě dochází ke vzniku otřepů na hranách. Nejčastěji je pro odjehlení použito kartáčů. Tyto kartáče jsou však vzhledem k následnému povlakování limitovány – nevhodné je užití kartáčů, které mají jako nosič abraziva plast, případně mosazné kartáče. Někdy se pro odjehlení užívá omílání. [9]

### **2.2. Odmaštění**

Odmašťování je proces, při kterém se z výrobku odstraňuje nejenom mastnota a konzervační látky, ale i další na povrchu usazené nečistoty. Technik odmašťování je celá řada, počínaje ručním odmašťováním, přes odmašťování postřikem, ponorem, tlakové odmašťování, nebo ultrazvukové odmašťování. V dnešní době se používají odmašťovadla na základě tenzidů, které snižují povrchové napětí kapaliny a jsou ekologičtější, než dříve používaná odmašťovadla jako byl benzín a petrolej. [9]

### **2.3. Pískování**

Pískování, někdy též tryskání je postup, při kterém je výrobek vystaven proudu abrazivních částic, které odstraňují z povrchu materiálu pevně ulpělé nečistoty i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. Velkou důležitostí na kvalitu procesu má volba správného abraziva. Pro pískování se používají ocelové granuláty, skleněné kuličky, nerezové abrazivo, nebo keramické abrazivo. U operace před povlakováním to bývá SiC, nebo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se zrnitostí 20–100 μm. [10]

[1]

### **2.4. Mokrý čištění**

Mokrý čištění je jedním ze způsobů odstraňování povrchových nečistot a mastnoty. Provádí se v mycích linkách, kde je aplikováno několik metod očištění najednou – jsou to oplachy, tlakové oplachy, vakuové sušení, popřípadě ultrazvuk či jiné elektrochemické metody. Následně probíhá sušení odpařením či odstředěním.

Průběh samotného čištění zahrnuje většinou více mycích a oplachovacích van řazených za sebou. Možné je použít i jednovanový systém, ve kterém se automaticky vyměňují jednotlivé



mycí lázně. Lázně jsou většinou alkalické (KOH; NaOH) s přídavkem tenzidů (pro snížení povrchového napětí). Po provedení jednotlivých čištění následují oplachy demineralizovanou vodou s přídavkem pasivátoru, který krátkodobě chrání očištěnou plochu proti korozi, zároveň však nesmí narušit adhezní vlastnost materiálu, aby nedocházelo k horší depozici povlaku. Na konci procesu je důležité rychlé a kvalitní osušení, ať již za zvýšené teploty odpařováním, nebo odstřed'ováním. [1]

## **2.5. Omílání**

Omílání v granulátu je jednou z mechanických úprav nástroje. Před povlakováním je tato mikro-úprava břitu velice důležitá pro zajištění dobrých adhezních vlastností povlaku na břitu. Tato úprava zahluhuje nerovnosti způsobené broušením nástrojů z rychlořezné oceli, které jsou způsobeny zrnitostí brusného kotouče, či postupem broušení, nebo zkušeností obsluhy CNC brusek. Jakékoliv nerovnosti na břitu nástroje totiž snižují řezný výkon. V případě PVD povlakování je omílání o to důležitější, že povlak se na ostrých, přerušovaných hranách může odlupovat. Omílání ve vhodně zvoleném abrazivu je schopno tomuto nežádoucímu jevu zabránit. [1]

## **2.6. Stripping – odstranění starých povlaků**

Používá se u přebroušovaných nástrojů, kdy je potřeba odstranit zbytky starých povlaků. U nástrojů z rychlořezné oceli je odstranění starých povlaků prováděno pomocí chemické a elektrochemické cesty. Užívá se roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu. Reakce s horkým peroxidem probíhá při teplotě kolem 70 °C. Nezbytnou součástí procesu je důkladné opláchnutí a rychlá pasivace.

Odstranění starého povlaku z tvrdokovových nástrojů je mnohem náročnější. Hrozí zde, za nesprávných technologických podmínek, nebo při nedodržení přesného postupu, že dojde k vyleptání kobaltu, jenž je součástí HM (tvrdokovového) nástroje přibližně 6–12 %. Kobalt je velice náchylný na kyselé nebo zásadité prostředí. Naleptá-li se kobalt do hloubky 5 µm, bude s největší pravděpodobností docházet k vážným problémům při povlakování i následném použití nástroje. Užívá se proto výrazně slabšího roztoku peroxidu vodíku, než u HSS a teplota aplikace se pohybuje okolo 23 °C. [1]

## 3. Povlakovací metody

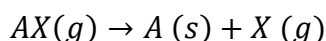
### 3.1. CVD

Chemické napařování z plynné fáze (Chemical Vapour Deposition) je technologie povlakování nástrojů užívaná od počátku 50. let. U této technologie výroby je nezbytné kvůli disociaci plynů pro tvorbu tuhých povlaků dosahovat vysokých teplot – okolo 1000 °C. Významnými představiteli takto utvářených povlaků jsou TiC a TiN, které díky stejné mřížce jsou mísitelné a vyznačují se dobrými adhezními vlastnostmi, odolností proti difuzi a rovnoměrností vrstvy pokrytí všech ploch bez směrového účinku. Dochází u nich k zaoblení řezné hrany, což se osvědčuje zejména u hrubovacích nástrojů. Teploty okolo 1000 °C však vedly k praskání karbidických fází, a proto byla tendence posunout teplotu depozice do oblasti kolem 700 °C, více viz. MT CVD. [11]

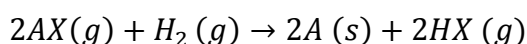
Samotný proces chemického povlakování je založen na souboru chemických reakcí, které se uskutečňují v reaktoru soustavy pro CVD povlakování. Jedná se o vzájemnou reakci plynů, která se uskutečňuje na rozmezí plynné a pevné fáze (povlakovaného nástroje). [12], [13]

Rozlišujeme čtyři základní kategorie reakcí při tvorbě povlaků:

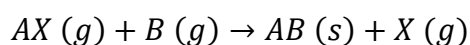
- Reakce tepelného rozkladu



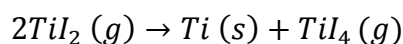
- Redukční reakce



- Substituční reakce



- Disproporční reakce

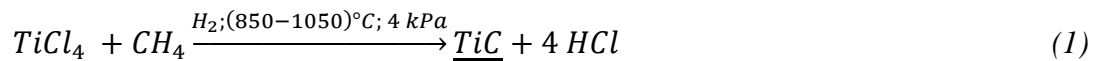


Pro procesy CVD se užívají dva typy reaktorů – reaktor se studenou stěnou a reaktor s teplou stěnou. V případě reaktorů studenou stěnou je vyhříván pouze držák substrátu, reaktor se používá převážně pro reakce endotermické. Stěna, chlazená vodou, nemá takovou teplotu, jako substrát, a proto reakce probíhá přednostně právě na něm a nedochází ke kontaminaci procesu produkty vzniklými reakcí se stěnou reaktoru. U reaktorů s teplou stěnou je stěna vyhřívána na stejnou teplotu jako substrát pro povlakování. Na stěnách dochází k chemickým reakcím, tedy

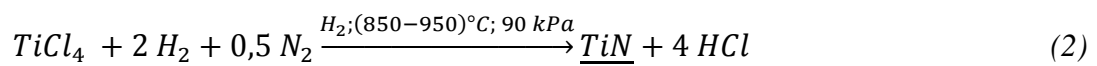
usazování povlaku a může dojít ke kontaminaci povlaku na substrátu. Přednostně je proto vhodný pro reakce exotermické. [1]

Nejvýznamnějšími reakcemi pro tvorbu povlaků TiC, TiN, TiCN jsou:

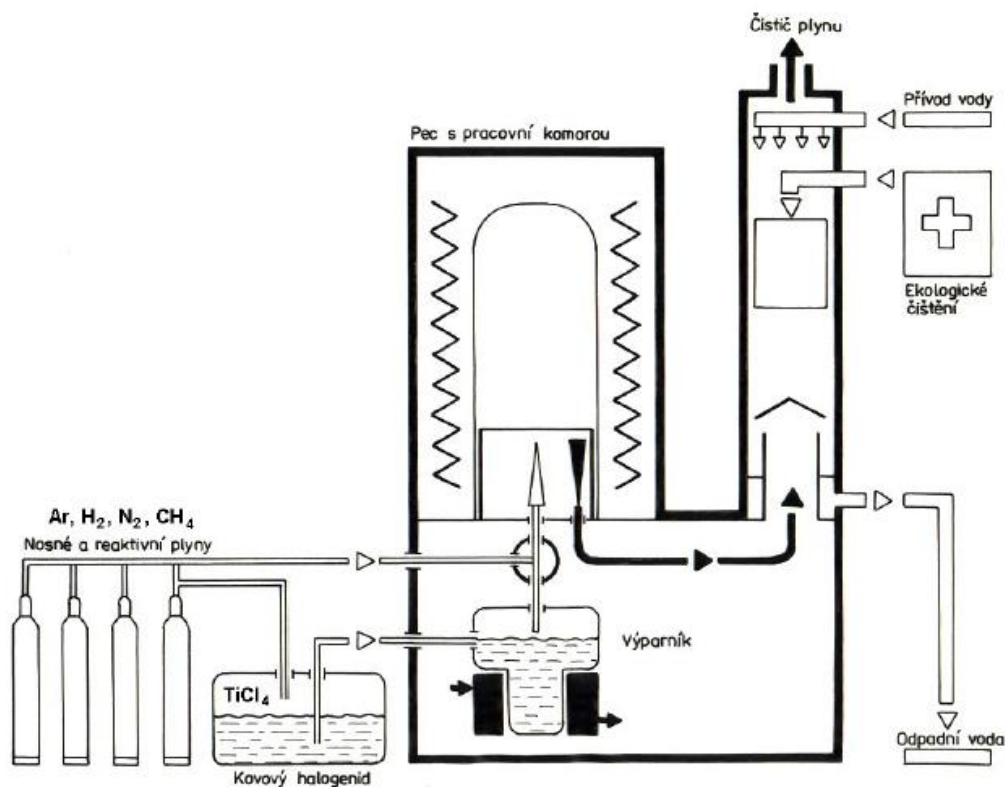
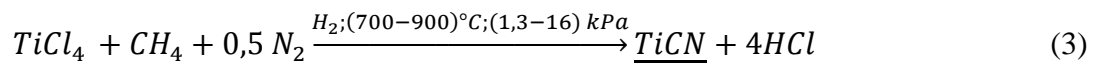
- tvorba TiC



- tvorba TiN



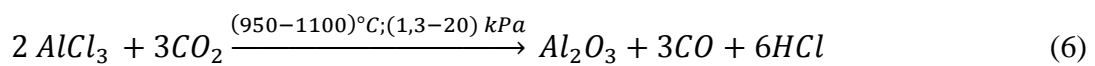
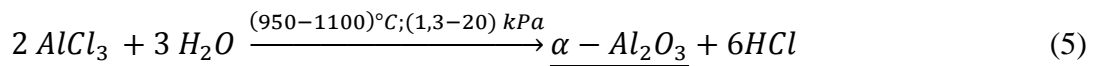
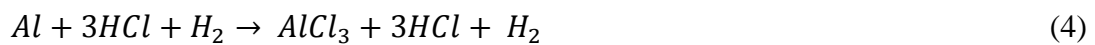
- tvorba TiCN



Obr. 7: Princip povlakovacího zařízení pro metodu CVD [3]

Na zobrazeném schématu je vidět princip a konstrukce povlakovacího zařízení pro metodu CVD, konkrétně tvorbu povlaků TiC, TiN, TiCN. Zdrojem titanu je chlorid titaničitý (TiCl<sub>4</sub>), který je zahříván do oblasti bodu varu a dochází k jeho vypařování. Tyto páry jsou unášeny nosnými plyny H<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> pro tvorbu TiC (1), nebo N<sub>2</sub> a H<sub>2</sub> pro tvorbu TiN (2). Užitím všech tří plynů pak dochází ke vzniku karbonitridu titanu TiCN (3). V peci s pracovní komorou dojde při teplotách kolem 1000 °C k povlakování nástroje a následně jsou zbylé produkty reakce odváděny pryč z pece do čističe plynů.

Nejvýznamnějšími reakcemi pro tvorbu povlaků Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jsou:

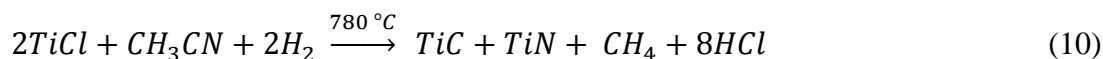
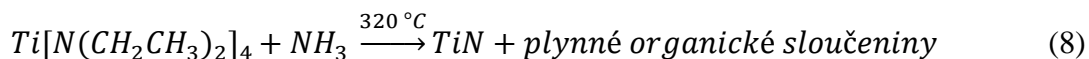
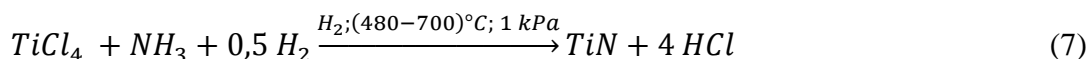


K nanášení oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dochází po oxidaci chloridu hlinitého ClAl<sub>3</sub>. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se vylučuje ve dvou modifikacích α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (struktura jako má korund) a κ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (modifikace s teplotní odolností až do 1200 °C). [14]

### 3.2. MT CVD

Technologie se sníženou teplotou depozice povlaku na cca 700 °C se nazývá MT CVD (Medium Temperature Chemical Vapour Deposition), neboli středně teplotní technologie chemického povlakování. Nositelem uhlíku a dusíku jsou v tomto případě organické látky. Eliminací vyššího teplotního vlivu na substrát nedochází k tak výraznému ovlivnění jeho vlastností, jako u metody CVD. Nedochází ke vzniku oduhličených vrstev η-fáze, která negativně ovlivňuje houževnatost substrátu. Takto tvořené povlaky vykazují zvýšenou houževnatost u některých vrstev a snížení intenzity difuze. [15]

Na následujících rovnicích je vidět pokles teploty depozice a průběh reakcí:



### 3.3. PA CVD

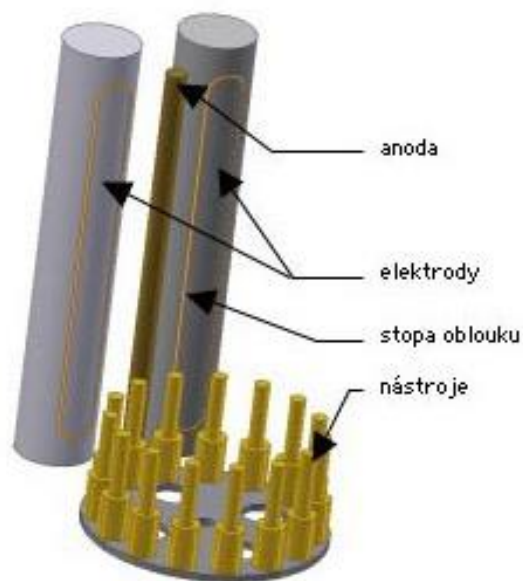
Dalším způsobem depozice tenkých vrstev za nižších teplot je i metoda PA CVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) – Plasmou aktivovaná chemická depozice. Tento způsob výroby povlaku probíhá za teplot od 470 do 530 °C. Nástroje jsou povlakovány až po zušlechtnění na požadovanou tvrdost a při povlakování nedochází k rozměrovým změnám. PA CVD je pak vhodná i pro povlakování dutin. Plasmaticky tvořené povlaky se vyznačují velice nízkým koeficientem tření – až 0,1.

Zařízení pro plasmové povlakování umožňuje kromě samotného povlakování také iontové čištění a nitridování. Po ustálení teploty probíhá jako první iontové čištění, kdy kladné ionty procesního plynu o vysoké kinetické energii vyrážejí z povrchu substrátu nečistoty. Následně je prováděna plazmová nitridace, která zlepší adhezi mezi povlakem a substrátem. Nakonec proběhne samotné nanesení povlaku. V plazmě se vytvoří kladně nabitě molekuly  $Ti^+$  a  $N^+$ , které se usazují na záporně nabitým polotovaru. Přesným řízením procesu dochází ke tvorbě požadovaných vrstev povlaku s přesným složením a vlastnostmi. Metoda PA CVD je vhodná pro tvorbu nanovrstvených povlaků, supermřížkových povlaků a multivrstevných povlaků. [15]

### 3.4. PVD

Fyzikální metody nanášení povlaků (PVD = Physical Vapour Deposition) jsou založeny na odpaření, případně odprašení pevných látek v řízené atmosféře. Teploty při použití PVD jsou

výrazně nižší než při CVD, a to v rozmezí 150–500 °C a vyžadují kvalitnější předúpravu nástrojů před povlakováním. Užitím této metody nedochází k tak výraznému teplotnímu ovlivnění těla nástroje. Tlak při povlakování se pohybuje v rozmezí 0,1–10 Pa. Proces výroby povlaku sestává ze tří fází: 1. odpaření deponační látky, 2. vedení plynu od zdroje do povlakovací komory, 3. vytvoření povlaku na nástroji. Je důležité zajistit také neustálý pohyb nástrojů v povlakovací komoře, aby docházelo k povlakování celého povrchu vzorku a na „stíněných“ místech nezůstala nepovlečená místa. Výsledná tloušťka povlaku pak bývá 1-5  $\mu\text{m}$ . [7], [1]



Obr. 8: Schéma soustavy pro povlakování PVD [16]

### 3.4.1. Napařování

Při tomto procesu dochází k odpařování kovu (nejčastěji titanu) elektrickým obloukem, odporovým ohřevem, nebo svazkem elektronů. Uvolněné částice v komoře (tlak pod 1 Pa) reagují s inertním plynným argonem Ar a reaktivním plynným dusíkem  $\text{N}_2$ . S tepelnou energií přibližně 0,5 eV pak dopadají na povrch povlakovaného nástroje, kde se usazují a adhezně připojují na substrát. [3]

### 3.4.2. Naprašování

Naprašování probíhá za velice nízkého tlaku – do 0,7 Pa, aby bylo zaručeno, že odprašované částice dosáhnou povlakované plochy bez kolize s jinými molekulami. Touto metodou lze

vytvořit vrstvy z těžkotavitelných materiálů, bez ohřevu terče, který je potřeba při napařování. Naprašovací zařízení se skládá z terče (materiál, který bude nanášen, zapojený jako katoda), držáku substrátu, odprašovacího plynu, vakuové komory, čerpacího systému a zdroje energie. Vakuová komora plní funkci anody. V ní hoří doutnavý výboj vytvořený elektrickým polem. V okolí se nachází zředěný inertní plyn. Nad záporně nabitým terčem se udržuje argonová plazma, jejíž kationty jsou elektrickým polem směřovány na terč a při dopadu na povrch terče vystřelují jednotlivé atomy (molekuly), které následně směřují na substrát. [1]

Možné způsoby naprašování:

- doutnavým výbojem rovinné elektrody – 50–100 mm od sebe jsou umístěny katoda (terč) s anodou (držák nástrojů).
- magnetronové naprašování – probíhá za nízkého tlaku. Ionizovaný plyn je urychlován elektrickým polem. Po nárazu do terče vyrazí částice, které následně kondenzují na povrchu substrátu a deponují se.
- naprašování iontovým paprskem – reakční, nebo inertní plyn utvoří iontový svazek. Na substrátu pak dochází k výborné adhezi a vysoké kvalitě povlaku.
- Radiofrekvenční naprašování – vysokofrekvenčními signály dochází k vybuzení elektronů a plazmy. Terč je z nevodivého materiálu a elektrické pole směřuje částice na substrát.

### 3.4.3. Iontová implantace

Iontová implantace je hybridní proces, při kterém je substrát bombardován proudem částic s vysokou energií. Deponované složky vznikají buď naprašováním, nebo napařováním. Substrát působí jako katoda a terč jako anoda. Mezi nimi je vyvozeno elektrické pole (až 1000 V). V plynu vzniká elektrický výboj ionizující částice plynu i částice z terče. Povlak vzniká na povrchu reakcí jednotlivých iontů. Dopad atomů má zásadní vliv na výsledné vlastnosti povlaku (tvrdost, vnitřní napětí, ...). Depozicí Ti v prostředí  $N_2$  ( $O_2$ ,  $CH_4$ ) lze iontovou implantací nanášet povlaky TiN ( $TiO_2$ , TiC) za teploty okolo 300 °C. [1]

## 4. Opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení je ve strojírenství všudypřítomný jev, který je způsoben cyklickým zatěžováním strojírenských součástí. Při obrábění kovů má otupení nástroje nepříznivý vliv na práci nástroje, stroje i kvalitu obrobeneho povrchu. S nárůstem řezných podmínek se i opotřebení nástroje rychleji zvyšuje, klesá tedy jeho trvanlivost (životnost). Opotřebení nástroje je nemožné eliminovat, ale je nutno ho nezanedbávat a pracovat s ním pomocí různých korekcí a snížit tak jeho nepříznivé vlivy na minimum.

Hlavní příčinou otupení je tření mezi nástrojem a obráběnými plochami. Tření na čele je způsobeno odchodem třísky po ploše čela, kde dochází k plastickým deformacím třísky a vzniká zde nejvíce tepla, místo největšího tlaku třísky na plochu čela se nazývá těžiště tlaku třísky. Druhou plochou, kde dochází k výraznému tření je hřbet nástroje, který se otírá o obrobeneý povrch. K tomuto jevu dochází díky elasticitě obrobku, kdy se za ostřím, kde dochází ke stlačování opět roztáhne o hodnotu  $H$ , a proto obrušuje hřbet nástroje. Otupením ostří pak vzrůstá odpor proti obrábění, klesá kvalita obrobeneé plochy a dochází k většímu zahřívání nástroje. [17]

### 4.1. Mechanické opotřebení

#### 4.1.1. Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení materiálu je způsobováno třením dvou ploch po sobě. Díky drsnosti povrchu jednotlivých částí, které se třou a díky rozdílné tvrdosti těchto částí pak dochází k tomu, že tvrdší prvek vniká do materiálu měkčího a obrušuje jej. Můžeme rozlišovat tření dvou těles a tření těles třech. Při dvou tělesovém tření dochází ke tření pouze mezi dvěma povrchy. Při tří tělesovém tření pak dochází k tomu, že mezi dvěma povrchy je mezivrstva (např. ocelové kuličky), která buď obrušuje zbylé povrchy, či je sama obrušována, aby nedošlo k poničení jednotlivých povrchů.

Při obrábění je pak toto opotřebení velice hojně zastoupeno. Dochází k němu převážně na hraně ostří nástroje, kde dochází k „vytrhávání materiálu“. Na čele nástroje dochází za vysokých teplot a tlaku třísky způsobené rotací obrobku při soustružení, nebo frézovací hlavy při frézování, k silnému tření materiálu obrobku, utvořeného v třísku, k velice silnému abrazivnímu opotřebení.

Hlavní roli v odolnosti proti abrazi mají vlastnosti vrstvy povlaku. Tvrdé a hladké vrstvy odolávají abrazi nejlépe. Záleží na koncentraci tvrdých částic ve svrchní vrstvě povlaku, která



bývá nejtvrďší a pod ní jsou vrstvy s lepší houževnatostí a adhezí, které vrchní vrstvě umožňují efektivně pracovat na povlakovaném nástroji. V případě nepovlakovaných nástrojů pak odolnost zajišťuje koncentrace karbidických, tvrdých částí v povrchu nástroje. [18]

#### 4.1.2. Lom (statický a dynamický)

Lom je jeden ze způsobů opotřebení, který je zapříčiněn hlavně termodynamickými vlastnostmi. Riziko vzniku lomů je nejvyšší u přerušovaného řezu, kdy dochází k cyklickému ohřívání a chlazení řezného nástroje, což vyvolává změny rozměru zapříčiněné teplotní roztažností a následně vyvolává vznik trhlin na ostří. Druhou častou příčinou vzniku křehkého lomu je špatné nastavení řezných podmínek – např. vysoké řezné síly, či rychlý posuv. Při takto špatně zvolených podmínkách špička nástroje nemusí pracovní cyklus zvládnout a dojde k odlomení špičky nástroje. Nejnáchylnější na křehký lom je řezná keramika, která je sama o sobě křehká, a proto je u ní správné nastavení řezných sil velmi důležité pro správné fungování. [19]

#### 4.1.3. Adhezní opotřebení

Tento způsob opotřebení se objevuje na styku třísky s čelem a hřbetem. Děje se tak za nízkých řezných teplot, kdy ve vrcholcích mikronerovností dochází při působení vysokého tlaku k místní plastické deformaci, díky ní se obnaží vrcholky mikronerovností a následně v těchto místech vzniknou adhezní mikroskopické svary. Při vzájemném pohybu mezi třiskou a nástrojem pak dochází k vytrhávání těchto mikrosvarů převážně z obrobku a v menší míře i z nástroje. Některé části navařeného obrobku zůstávají na nástroji a tvoří nárůstky. Adhezní opotřebení funkčních ploch břitů je tudíž výsledkem opakovaného vzniku a porušování mikrosvarů. [19]

### 4.2. Chemické opotřebení

#### 4.2.1. Difuzní opotřebení

Difuzní opotřebení je velice specifické. Je známo, že difuze mezi jednotlivými látkami v pevném skupenství probíhá velice pomalu. K tomuto faktu ještě přispívá to, že při obrábění se jedna ze složek neustále mění – jak probíhá obrábění, tak je přisouván stále nový materiál. Vezmeme-li rychlost s jakou se odstraňují třísky, můžeme tvrdit, že doba styku nástroje se třiskou je v rozmezí 0,01 až 0,001 sekundy, v závislosti na řezné rychlosti. Nejvýraznějším

činitelem ovlivňujícím rychlost difuze je teplota. Ve strojírenské výrobě, při vysokých obráběcích rychlostech je zahřívání rezného nástroje nepopíratelným nežádoucím jevem, právě kvůli difuzi. Pro názornost – pokud se nástroj ze slinutého karbidu zahřeje z běžné pokojové teploty při obrábění na 850 °C, rychlost difuze vzroste 10<sup>9</sup> krát. Za takových podmínek již přestává být nevýrazným činitelem. Difuzi urychlují také vysoké tlaky a skutečnost, že ve styčných plochách dochází ke tření chemicky čistých povrchů vzhledem k tomu, že difuze probíhá neustále za počátečního, nejvyššího, difuzního spádu. Významným milníkem pro boj proti difuzi jsou povlaky, které vytvářejí difuzní bariéry. Ty zabraňují difuzi s nosným kovem, který nejvíce podléhá difuzi. [19]

### **4.3. Druhy opotřebení**

#### **4.3.1. Opotřebení hřbetu břitu**

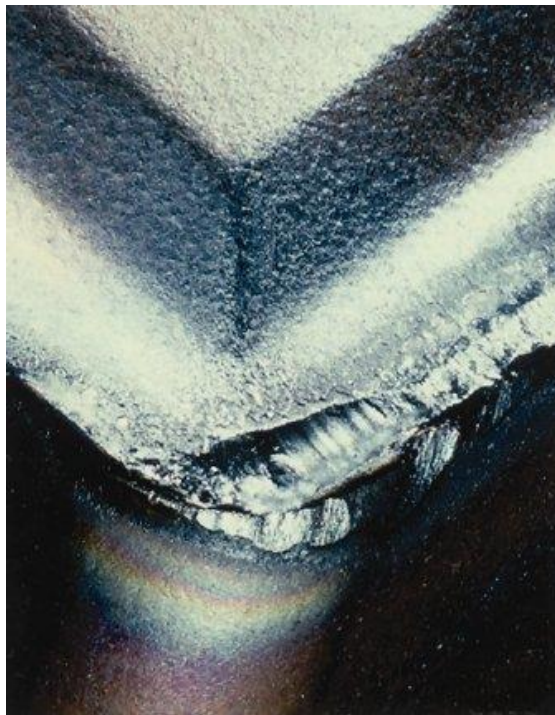
Toto opotřebení je způsobováno především abrazivním opotřebováváním. Na hřbetu se opotřebení projevuje proto, že při obrábění dochází k odtrhávání třísek, ale obrobek samotný je ve směru hlavního břitu mírně stlačován. Po posunutí materiálu na hřbet nástroje se zpět roztáhne a dochází ke tření o čelo a následné abrazi. Největší opotřebení na hřbetu je na začátku obrábění, pak následuje fáze lineárního opotřebení, která se využívá pro obrábění a následně exponenciálně začne narůstat opotřebení nástroje. Poslední, exponenciální část, se pro obrábění již nevyužívá a nástroj je před ní vyměněn. Při velkém opotřebení na hřbetu dochází ke zhoršení kvality obrobeného povrchu a nárůstu tření. [20]



Obr. 9: Opotřebení na hřbetu nástroje [21]

### 4.3.2. Opotřebení ve tvaru žlábků na čele nástroje

Je projevem kombinovaného abrazivního a difuzního opotřebení. Žlábků vzniká jednak úběrem řezného materiálu v místě těžiště tlaku třísky, kde tuhé částice obráběného materiálu vybrušují materiál řezného nástroje, a pak difuzí způsobenou vysokou teplotou v tomto místě. Rozhodujícím parametrem pro tvorbu žlábků je tvrdost za tepla, která udává velikost difuze při určité teplotě. Důležitým činitelem je také afinita mezi materiálem nástroje a obrobku. Vysoká tvrdost za tepla obráběcího materiálu a nízká afinita jsou předpoklady pro minimalizaci tohoto opotřebení. Vytvořením žlábků na nástroji totiž může dojít ke změně geometrie nástroje, a tím změně tvaru a směru odchodu třísky a výraznému zeslabení břitu nástroje. [20]

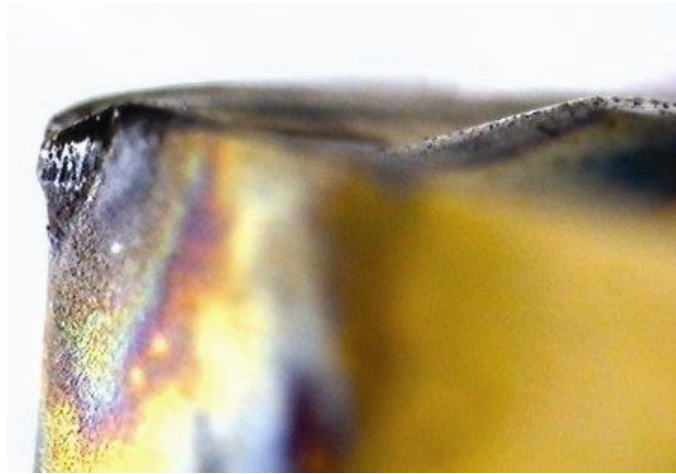


Obr. 10: Opotřebení ve tvaru žlábků [21]

### 4.3.3. Plastická deformace břitu

Působením vysokého tlaku a vysokých řezných teplot může u nástrojů dojít k plastické deformaci. Rozhodující vlastností, která ovlivňuje tento druh poruchy je tvrdost za tepla. V případě, že u nástroje k plastické deformaci dojde je typická změna geometrie nástroje – vyboulení, které zapříčiní ještě větší nárůst teploty a zhoršuje odvod třísek. Tato deformace břitu může velmi rychle dosáhnout kritické hranice. Opotřebení lze zamezit vhodnou volbou

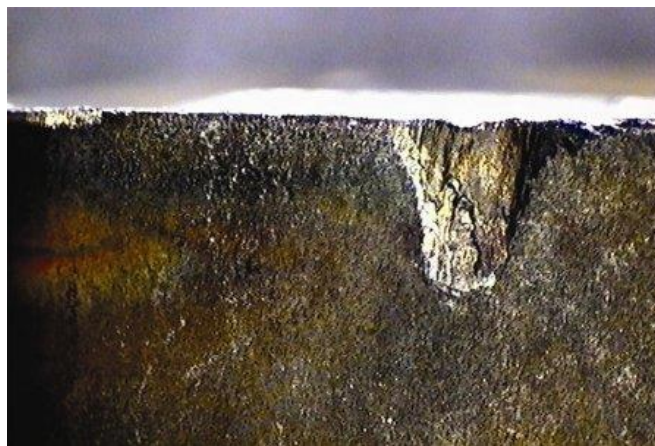
řezného materiálu s dostatečnou otěruvzdorností, případně zaoblením ostří a vhodnou geometrií. [20]



Obr. 11: Plastická deformace nástroje [21]

#### 4.3.4. Opotřebení ve tvaru vrubu

Toto opotřebení patří mezi příklady adhezního, případně oxidačního opotřebení. Vrub vzniká v místě styku břitu s bokem třísky. Opotřebení se vztahuje pouze na malou oblast, kudy se dostává vzduch do oblasti obrábění, zároveň s tím je také ovlivňováno mechanickými příčinami, a to výskytem tvrdých částic na povrchu materiálu obrobku. Vrub výrazně ovlivňuje utváření třísky a zároveň zvyšuje náchylnost na křehký lom. [20]



Obr. 12: Vrub na řezné hraně [21]

#### 4.3.5. Hřebenovité trhliny na ostří

Hřebenové trhlinky jsou následkem únavového opotřebení nástroje, vznikají tepelným šokem, zvláště při změnách teplot při frézování. Jednotlivé trhlinky jsou umístěny kolmo na samotné ostří nástroje a části, které oddělují se mohou snadno vylamovat a vydrolovat, čímž mohou způsobit i náhlý lom břitu. Hřebenovité trhlinky jsou důsledkem chlazení nástroje, který je v průběhu obrábění zahřát a při výstupu z materiálu je pak rychle procesní kapalinou zchlazen. Tyto změny objemu vedou k inicializaci trhlín. [20]

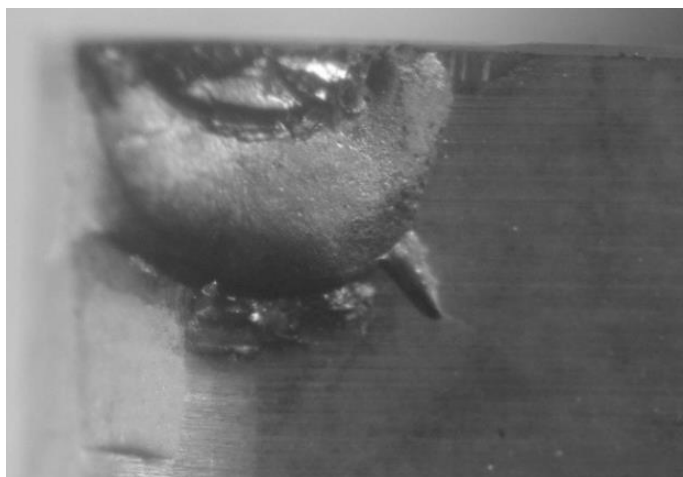


Obr. 13: Tepelné hřebenové trhlinky [21]

#### 4.3.6. Únavový lom

Tento způsob poškození nástroje je způsoben změnami velikosti řezné síly v průběhu namáhání nástroje, které je v součtu dostatečné pro to, aby mělo za následek lom. Způsob řezu nástrojem, při kterém nástroj cyklicky vchází a vychází ze řezu, přičemž se neustále mění velikost a orientace působení řezných sil, je příkladem cyklického namáhání, jehož důsledkem pak křehký, únavový lom, je. Plocha lomu probíhá paralelně s ostřím. [20]





Obr. 14: Křehký lom [20]

#### 4.3.7. Vydrolování ostří

Opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že se drobné částice řezného nástrojového materiálu začnou oddělovat z povrchu bříty. Velmi častou příčinou je obrábění s přerušovaným řezem, kdy dochází k iniciování hřebenových trhlin, mezi kterými následně dochází k vydrolování částí nástroje. Vydrolování ostří při řezném procesu může upozornit na hrozící lom bříty. Pro zamezení vydrolování je důležitá volba vhodného řezného houževnatějšího materiálu, volba lehce řezající geometrie nástroje pro snížení vzniku tepla, případně změnit řezné podmínky. [20]



Obr. 15: Vydrolování ostří [21]

#### 4.3.8. Tvorba nárůstku

Příčinou vzniku nárůstku je především adheze. Za působení vysokého tlaku, chemické afinity a teploty v oblasti řezu vzniká nárůstek na čele nástroje. S růstem nárůstku se zvyšuje i riziko

jeho odlomení, což má často za následek i odlomení části materiálu řezného nástroje – vyštipování ostří, čímž se zrychluje následné opotřebení. Při vzniku nárůstku dochází ke zhoršování přesnosti a kvality obrobeneho povrchu. Projevuje se především při nízkých řezných rychlostech, zejména u závitování, frézovacích a vrtacích operacích. Abychom zamezili tvorbě nárůstků je často vhodné zvýšit řeznou rychlost a/nebo posuv. Je možné využít chladicí kapalinu, nebo využít povlaku pro hladší plochu čela, případně leštěný nástroj. [20]



Obr. 16: Tvorba nárůstku [21]

## 5. Metody měření opotřebení

### 5.1. Metody přímé

Měření opotřebení pomocí přímých metod je značně komplikovanou záležitostí. Vzhledem k tomu, že nástroj je v řezném procesu zcela nedostupný kvůli odvodu třísky, obráběnému materiálu a užití chladicích kapalin. Z těchto důvodů nemáme možnosti, jak dostat měřicí přístroje k místu řezu a měřit opotřebení. Je proto u těchto metod nutné přerušit řez a vyjet s nástrojem do dostupného prostoru, případně nástroj zcela z obráběcího stroje vyjmout, což s sebou přináší další problémy vzhledem k ustavení nástroje pro měření a jeho následné opětovné upnutí a ustanovení do původní polohy. Přerušovaný proces obrábění se navíc může lišit od kontinuálního obráběcího procesu. [20]

#### 5.1.1. Metoda váhová

Váhová metoda je založena na úbytku hmotnosti materiálu na obráběcím nástroji. Je hojně používaná pro měření úbytku broušicích kotoučů u broušení. Tuto metodu není možné použít v průběhu procesu obrábění na stroji, je však poměrně přesná a opotřebení je určeno váhovým rozdílem. Pozor musíme dávat na obrábění, při kterém se tvoří na nástroji nárůstky, v takovém případě není možné přesně určit hmotnostní úbytek. Metoda je vhodná k užití na vyměnitelných břitových destičkách vzhledem k malým úbytkům hmotnosti. [22]

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

$\Delta M$  – hmotnostní úbytek (g)

$M_1$  – počáteční hmotnost (g)

$M_2$  – koncová hmotnost (g)

#### 5.1.2. Metoda mikrometrická

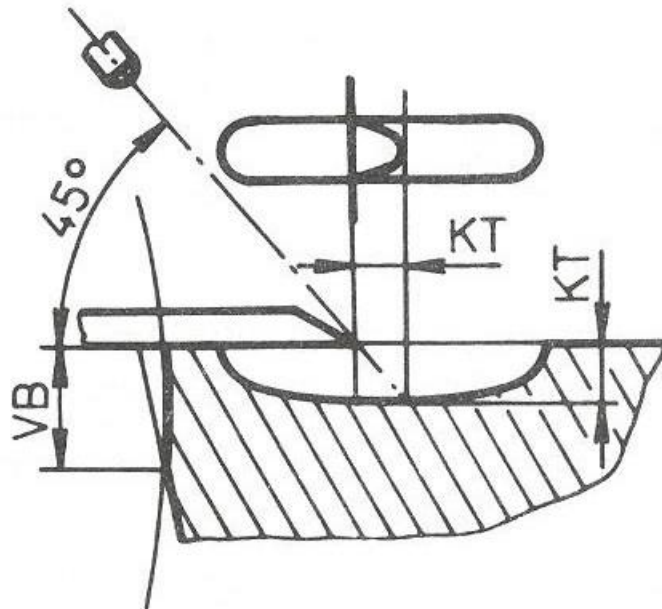
Mikrometrická metoda používá k vyhodnocování opotřebení měření přímých lineárních rozměrů. Pro měření se využívají dílenské mikroskopy s křížovým stolem. Pro měření hloubky žlábků se pak využívají číselníkové úchylkoměry, nebo kolimátory.

Dalším použitelným měřidlem jsou kamery se speciálním softwarem. Nejprve je nutné kameru zkalibrovat za pomoci kalibrační mřížky a následně za pomoci softwaru na snímku zadávat kóty a ukládat data do počítače. Jedná se o velice rychlý způsob měření lineárních typů opotřebení. [20]



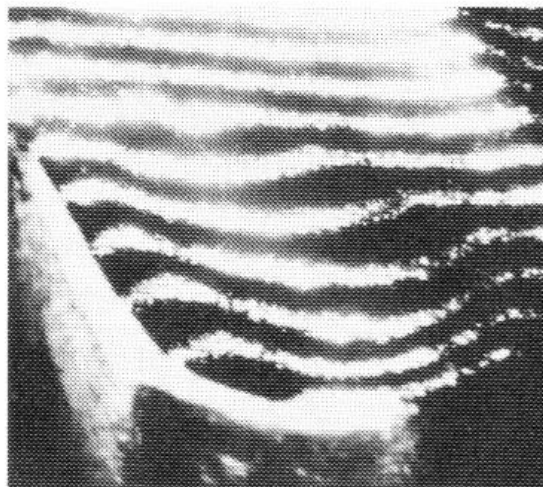
### 5.1.3. Metoda stínová

stínová metoda měření opotřebení je vhodná pro měření hloubky žlábků na čele nástroje. Na čelo nástroje je umístěna clonka s ostrou hranou a zdroj světla vrhá stín přes clonku pod úhlem  $45^\circ$ . Tím je docíleno toho, že při snímání shora se velikost stínu vrhaného clonkou rovná hloubce žlábků v daném místě – parametru opotřebení  $KT$  – hloubce žlábků



Obr. 17: Schéma optické měřicí metody [23]

Další možností využití stínové metody je měření žlábků na čele nástroje. Difuzorem je na čelo nástroje promítána pravidelná mřížka, která je snímána kamerou. Podle deformace mřížky je možné odečítat hloubku opotřebení v jednotlivých místech a následně pomocí softwaru převést do 3D zobrazení tohoto opotřebení. [20]



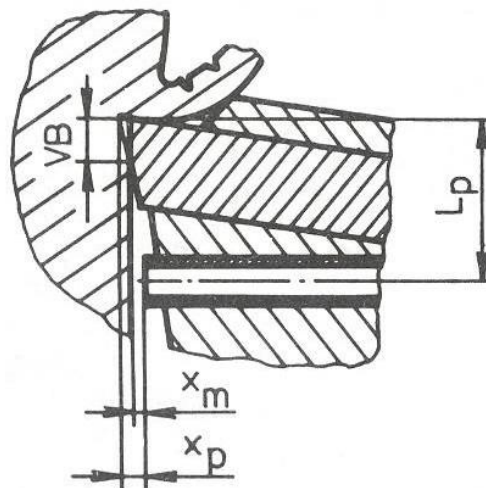
Obr. 18: Promítnutí mřížky difuzorem na čelo nástroje [20]

#### 5.1.4. Metoda nanesené odporové vrstvy

Tato metoda pracuje na principu měření změny elektrického odporu. Jedná se o vytvoření odporového obvodu na hřbetu nástroje. Metoda podléhá značnému ovlivnění snímače díky změně teploty, přítomnosti chladicí kapaliny a odchodem třísek. [20]

#### 5.1.5. Metoda pneumatická

Pneumatická metoda je konstrukčně jednoduchá a poměrně spolehlivá. Používá se zejména pro měření úbytku vyměnitelných břitových destiček ve směru kolmém k ploše řezu, případně v radiálním směru. Měří se tlak u trysky, který se různí v závislosti na vzdálenosti obrobene plochy od trysky. Výsledné opotřebení je pak dále dopočítáno. [20]



Obr. 19: Schéma pneumatické soustavy pro měření opotřebení VB [23]

Vzorec pro výpočet opotřebení:

$$VB = VB_0 * K_m * VB_0^{0,81}$$

$$VB_0 = \left( Xp - \frac{Lp * f}{\pi * D_0} - Xm \right) * \frac{1}{tg \alpha}$$

*K<sub>m</sub>* – konstanta daná konstrukcí měřidla (určuje se empiricky),

*x<sub>p</sub>* – vzdálenost trysky od obrobku (mm),

*x<sub>m</sub>* – hodnota *x<sub>m</sub>* se určuje pro tlak vzduchu změřený z cejchovní křivky daného měřidla.

*L<sub>p</sub>* – vzdálenost osy trysky od špičky nástroje (mm),

*f* – posuv (mm),

*D<sub>0</sub>* – průměr obrobku (mm),

*n* – úhel hřbetu (°).

## 5.2. Metody nepřímé

Tyto metody se dají provádět přímo při řezném procesu, kdy nedochází k přerušování činnosti nástroje, což poskytuje komplexnější pohled na celkové chování nástroje. Na druhou stranu všechny metody nepřímého měření se opírají o znaky z řezného procesu, ale neposkytují absolutní obraz procesu. Můžeme říci, že tyto metody jsou pouze přibližné. [20]

### 5.2.1. Optické metody

Optická metoda využívá světelného paprsku, který se odráží od ostří nástroje. Charakter odraženého paprsku závisí na opotřebením nástroje. Tato metoda se používá u frézování a broušení.

U broušení dokáže podávat informace o stavu kotouče – o obroušení zrn, jejich počtu, šířce obroušení, ... Stav brusného kotouče lze určit v reálném čase ze střední plochy odlesku poškozených zrn.

Při frézování se používá kamery. Nástroj se přesune na určené místo a jsou snímány jeho jednotlivé břity. Z odrazů světla a vržených stínů je pak možné sestavit 3D model opotřebením nástroje a kontrolovat tak jeho životnost. [20]

### 5.2.2. Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu

Měření pomocí řezných sil a kroutících momentů je založeno na tom, že se zvyšujícím se opotřebením řezného nástroje obvykle narůstá i řezný odpor. Principem měření je měření jednotlivých složek řezných sil a krouticího momentu v soustavě stroj – nástroj – obrobek při obrábění. K měření můžeme používat dynamometry, u momentu též měření na vřeteníku.

Při měření se hledá závislost mezi opotřebením nástroje a rozložením/změnou řezných sil při procesu. Velice efektivně odhaluje nečekané případy v obrábění (křehký lom, ...) [20]

### 5.2.3. Detekce mezery mezi nástrojem a obrobkem

Tento způsob měření je založen na měření vzdálenosti mezi obrobkem a bodem definovaným na držáku, případně na nástroji. Pro měření můžeme použít dotykové a bezdotykové způsoby.

Při dotykovém způsobu je za nástrojem umístěn měřák na principu mikrometru, který měří vzdálenost obrobku od předem stanoveného bodu na držáku. Při změně této vzdálenosti je jasné, že došlo ke změně v řezném procesu. Měřák je na dotykové ploše vyroben z karbidu wolframu pro jeho velkou otěruvzdornost.

Při bezdotykovém měření je možné použít pro určení mezery místo mikrometru ultrazvuk. Další možností je využití měření vzdálenosti pomocí laseru. Možnou metodou je i vložení kovové destičky za nástroj. Destička slouží jako kondenzátor s danou kapacitou, která je v pulzech měřena – při změně velikosti pulzu je zřejmé, že mezera mezi destičkou a obrobkem se změnila. [24]

#### 5.2.4. Měření prostřednictvím vibrací

Tato metoda byla prozatím úspěšně aplikována pouze laboratorně. Je založena na korekci vibrací obráběcího stroje s opotřebením nástroje. [20]

Počítá se s možností měření 3 způsoby:

- Pomocí akcelometru
- Využitím kyvadla
- Využitím kolísání otáček vřetene

#### 5.2.5. Měření zvuku

Při tření nástroje s obrobkem vycházejí z místa řezu akustické vlny – zvukové vibrace, které je možno pomocí mikrofonu zaznamenávat a v závislosti na poměru vysokých a nízkých frekvencí můžeme pomocí spektrální analýzy vyhodnotit míru opotřebením nástroje. Při nárůstu opotřebením se ve spektru začnou objevovat nárůstky amplitud některých frekvencí. [24]

#### 5.2.6. Metoda odečtu

Metoda odečtu je jednou ze základních a nejjednodušších metod měření. Je založena na pozorování opotřebením za pomoci odměřovacího zařízení s optickým zaměřovacím systémem. Měření může být prováděno pomocí mikroskopu a odečtu hodnot pomocí mikrometrických šroubů, případně digitálně. Měření bývá prováděno za pomoci kamery a softwaru s kalibrací pro odměření velikosti opotřebením.

## 6. Pre-experiment

Zadavatelem práce je podnik NAVEL, spol. s r. o. z Velešína, v zastoupení aplikačním technikem Ing. Jiřím Němcem. Podnik se zabývá výrobou nástrojů pro soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů a přestřováním nástrojů. Ve svém portfoliu má velké množství nástrojů pro nejrůznější použití napříč strojírenským spektrem. V současné době se snaží o rozšíření portfolia svých výrobků, a proto oslovili Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie na FS ČVUT v Praze. Díky tomuto zadání mohla vzniknout i tato práce. Požadavkem podniku je zavést na trh novou frézu schopnou obrábění korozivzdorné oceli. Pro podnikem zvolené frézy mají být vytipovány dva nástrojové povlaky (další dva mají být vytipovány firmou NAVEL, spol. s r. o.), které by pro tento účel měly být nejvhodnější. Výběr povlaků se omezil na portfolia povlakoven s podnikem NAVEL, spol. s r. o. již spolupracujících. Po vytipování povlaků mají být dané frézy v povlakovnách opatřeny tenkými vrstvami a následně v laboratořích FS ČVUT v Praze otestovány, zda jsou takto navržené nástroje schopny obrábění korozivzdorných materiálů za daných podmínek. Vzhledem k finanční náročnosti budou pak zbylé testy prováděny externě.

### 6.1. Výběr povlaků

Výběr povlaků byl podložen průzkumem portfolií povlakoven spolupracujících se společností NAVEL, spol. s r. o. Nutno podotknout, že jednotlivé povlakovny si více, či méně střeží své know-how a pro zákazníky poskytují pouze vybrané informace o svých produktech, někdy pouze slovní hodnocení. Při výběru povlaků byl brán zřetel hlavně na faktory, které přímo souvisejí s povlakem, tj. na depoziční teplotu, mikrotvrdost a pracovní teplotu povlaku a na výrobcem doporučené řezné podmínky pro dané povlaky. Rozhodování mezi těmito povlaky vedlo většinou k jednoznačnému výběru povlaku z portfolia dané povlakovny. V jednom případě bylo dodatečné doporučení dané povlakovny odlišné od vybraného povlaku, v tomto případě došlo k rozšíření experimentu o tento povlak nad rámec již vybraného. Tímto způsobem byly vybrány 4 povlaky + jeden referenční povlak TiCN, který je v současnosti na tomto typu fréz používán. Vzhledem k tomu, že práce vzniká za donátorství společnosti NAVEL, spol. s r. o., omezíme se pro potřeby práce na označení povlaků zkratkami A, B, C, D + 0 (referenční TiCN)

Vlastnost\povlak	<b>0</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Typ povlaku	gradientní	nanostrukturní	nanokompozitní	nanokompozitní	trojvrstvý
Složení povlaku	TiCN	AlCrN	AlTiN	TiAlN	TiN – AlTiN- CrAlSiN
Koeficient tření	-	0.55	-	-	-
Max. provozní teplota [°C]	-	1050	1100	1000	-
Mikrotvrdost [HV 0,05]	-	3000	3700	3500	-
Vhodné užití	Závitníky, stříhání a tvářecí formy	Frézování s přerušovaným řezem	Frézování kalených ocelí	Vrtání a soustružení	Obrábění kalených materiálů a nerezových ocelí

## 6.2. Obráběcí stroj

Pro obrábění bylo použito trojosé obráběcí centrum MCV 500. Tento stroj je určen jak pro sériovou, tak přesnou kusovou výrobu složitých součástek. Obráběcí centrum je řízeno ovládacím systémem Acramatic.

### Technické parametry stroje:

<b>Pracovní rozsah</b>		
Pojezd podélný X	mm	500
Pojezd příčný Y	mm	500
Pojezd svislý Z	mm	500
Vzdálenost vřetena od plochy stolu	mm	150 -650
<b>Vřeteno</b>		
Výkon (100/44 % ED)	kW	7,5/11,3
Rozsah otáček	min <sup>-1</sup>	20 - 8000
Kuželová dutina vřetene		ISO 40

Přesnost (VDI/DGO 3441)			
Odměřování X / Y / Z		přímé	nepřímé
Přesnost stanovení souřadnic	mm	0,01	0,015
Přesnost opakovaného najetí	mm	0,003	0,005

### 6.3. Obráběcí nástroj

Pro řezný experiment byly poskytnuty společností NAVEL, spol. s r. o. hrubovací frézy Ø10 mm. Tyto frézy byly z důvodu opakovatelnosti měření vyráběny během jedné výrobní dávky, aby byla zajištěna homogenita pracovního procesu, a tím i výsledné homogenní vlastnosti jednotlivých těl fréz. Materiálem těla frézy je slinutý karbid Ceratizit CTS20D. Po výrobě byly frézy rozeslány do externích povlakoven, kde došlo k depozici povlaků.

TK HRUBOVACÍ NR FRÉZA – ŠROUBOVICE 45°



29

Carbide Roughing End Mill
 Hartmetall Schruffräser



3-6

45°

DIN  
6535

TICN  
MP

P

HRC  
<48



	Ød <sub>1</sub> [mm]	Ød <sub>2</sub> [mm]	l <sub>1</sub> [mm]	l <sub>2</sub> [mm]	z	Kód	Cena
STŘEDNÍ	4	6	57	14	3	A0414-3-NR45	18,27 €
	5	6	57	14	3	A0514-3-NR45	18,27 €
	6	6	57	16	4	A0616-4-NR45	18,27 €
	8	8	63	16	4	A0816-4-NR45	24,24 €
	10	10	72	22	4	A1022-4-NR45	35,23 €
	12	12	83	25	4	A1225-4-NR45	50,95 €
	14	14	92	32	5	A1432-5-NR45	73,87 €
	16	16	92	32	5	A1632-5-NR45	85,72 €
DLUHÉ	18	18	102	35	6	A1835-6-NR45	122,23 €
	20	20	104	38	6	A2038-6-NR45	133,34 €
	10	10	80	30	4	A1030-4-NR45	47,57 €
	12	12	93	36	4	A1236-4-NR45	68,64 €
	14	14	100	42	4	A1442-4-NR45	86,51 €
	16	16	110	48	5	A1648-5-NR45	135,56 €
20	20	126	60	6	A2060-6-NR45	214,33 €	

- 3 až 6břitá fréza
- rovné čelo, břity přes střed
- 45° pravouhlá šroubovice

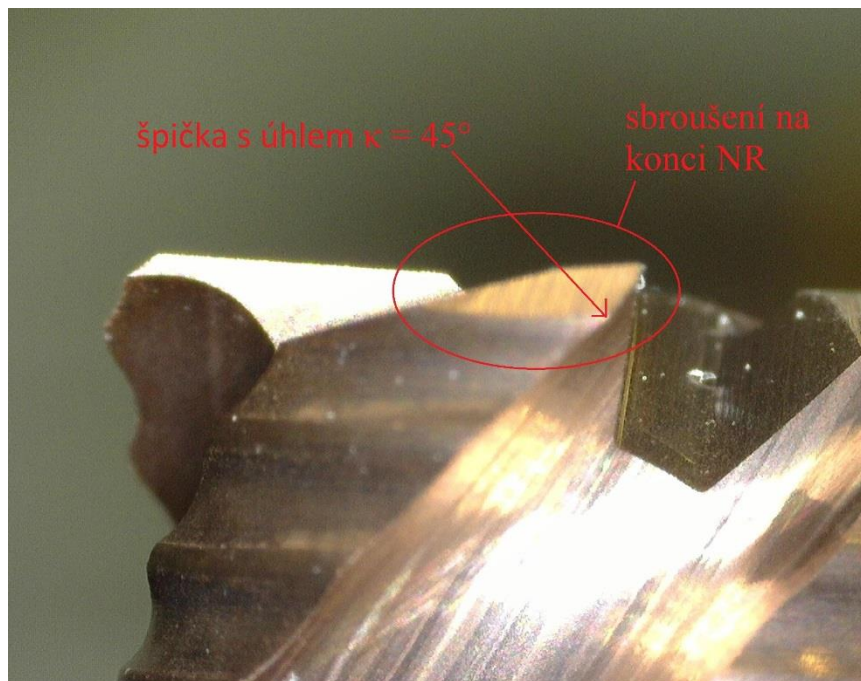
- hrubovací NR profil
- weldon

Obr. 20: Výřez z katalogu nástrojů podniku NAVEL, spol. s r. o. [25]



Prvotní ohledání nástrojů bylo učiněno na dílenském mikroskopu. Cílem bylo zkontrolovat kvalitu povlaků jednotlivých nástrojů, jejich integritu s povrchem, případně poškození nástrojů před testem samotným. Při seznámení se s nástroji byla ověřována i jejich geometrie, která, ačkoliv byly vyráběny při jedné výrobní dávce, nebyla na všech nástrojích stejná. Drobné odlišnosti geometrie budeme při vzájemném porovnání zanedbávat, protože se jedná převážně o geometrii špiček, přičemž řezná hloubka bude 10 mm a hlavní ostří bude konat zásadní podíl práce nástroje.

Důležitým prvkem u geometrie fréz je hrubovací NR profil, který slouží k lepšímu utváření třísek při obrábění. Tento profil je zakončen špičkou s úhlem  $\kappa = 45^\circ$ , které oproti zbytku hlavního ostří s úhlem hřbetu  $6^\circ$ , má úhel nulový. V této části hřbetu bude docházet pravděpodobně k intenzivnějšímu tření a hrozí riziko rychlejšího opotřebení této části hřbetu nástroje. U špičky vzniklé zalomením hlavního břitu může dojít k intenzivnímu namáhání při vstupu do obráběného materiálu a její deformaci v závislosti na vzdálenosti od středu nástroje.

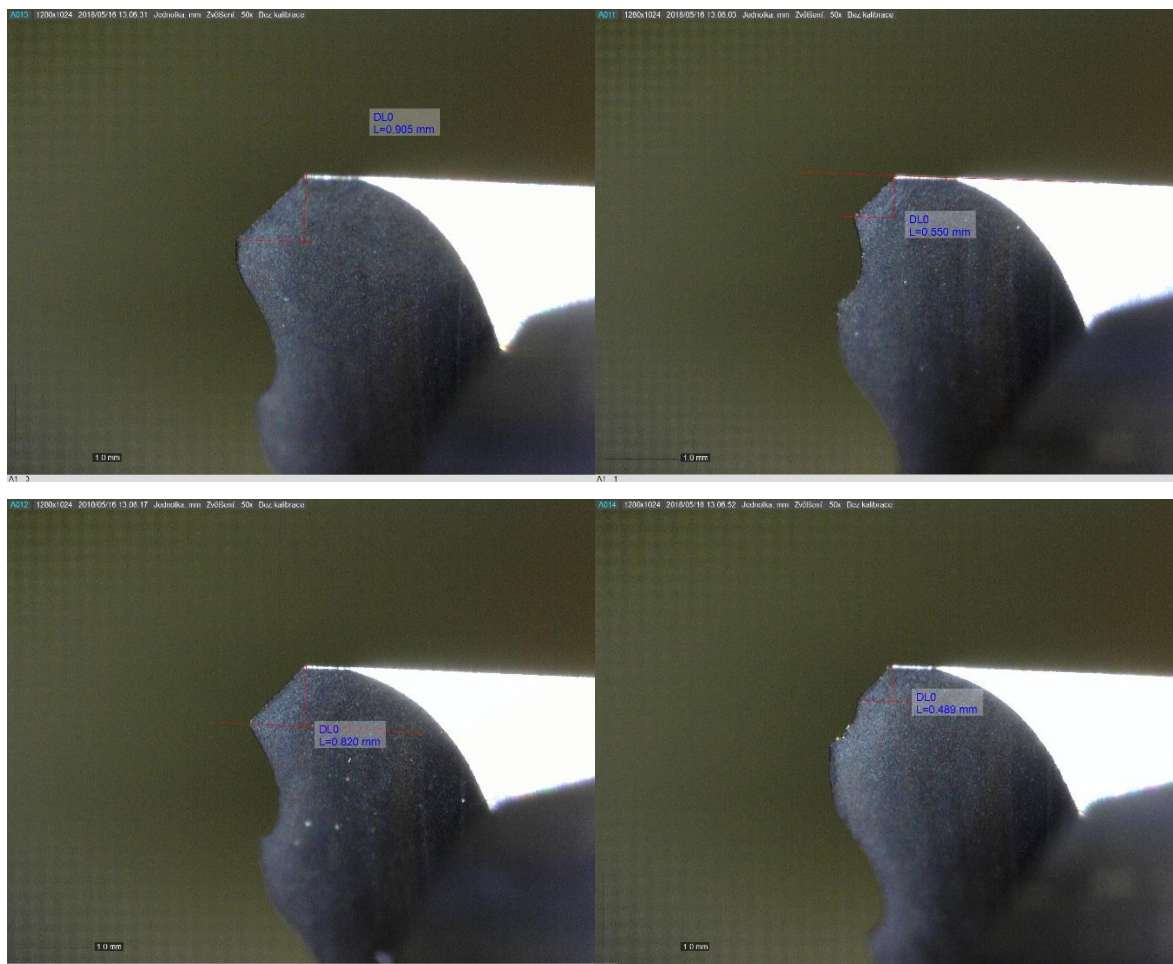


Obr. 21: Snímek s vyznačeným zbrúšením hřbetu nástroje a zalomením hlavního ostří ve špičce

Zbrúšení hlavního ostří pod úhlem  $45^\circ$  s sebou přináší změnu polohy zalomení hlavního ostří, jak je vidět na obrázku výše. V případě, že by na fríze nebyl NR profil, bylo by toto zalomení ostří vždy ve stejné poloze, přidáním profilu se ovšem toto schéma naruší a poloha zalomení se



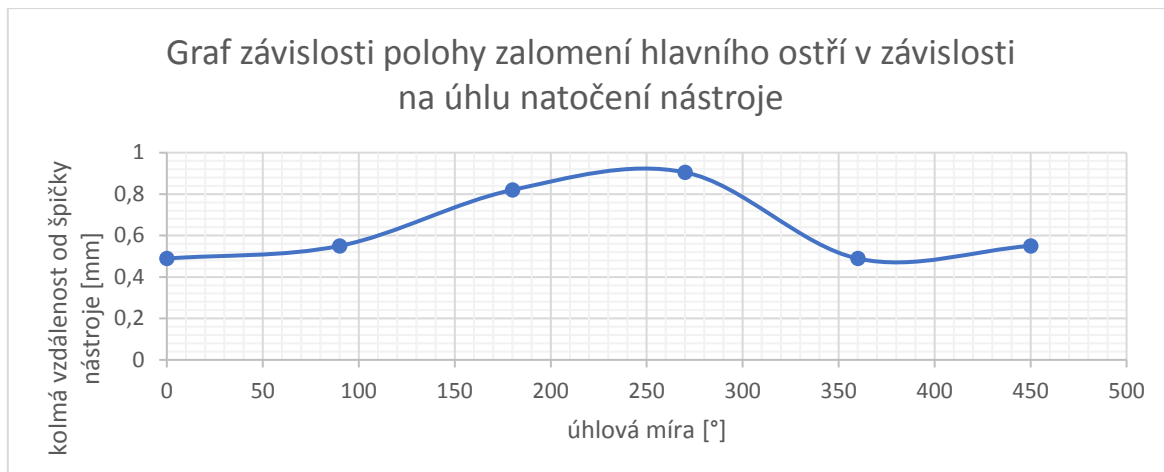
řídí umístěním na křivce NR profilu. Křivka NR profilu je tvořena při broušení a neřídí se sinusovou křivkou. Pro zjednodušení určení polohy tohoto zalomení NR profilu, pro matematickou jednoduchost, takto budeme uvažovat a křivku přibližně můžeme modelovat.



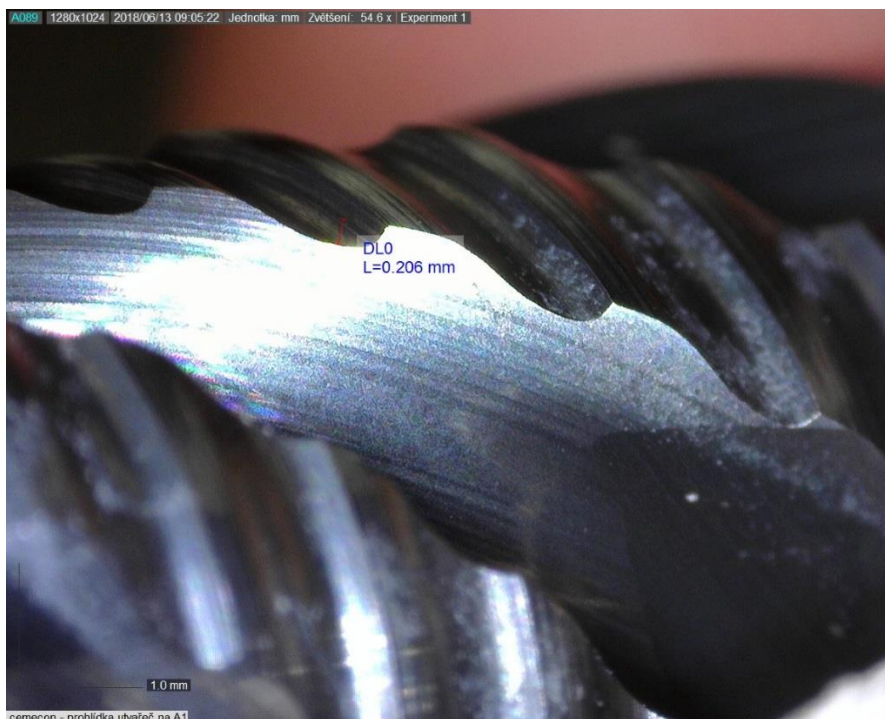
Obr. 22: Pohled na čela všech břitů pro odměření polohy zalomení hlavního ostří na jedné z fréz

Tabulka č. 1: Tabulka odměřených hodnot

Úhlová míra [°]	kolmá vzdálenost od špičky nástroje [mm]
90	0,55
180	0,82
270	0,905
360	0,489



Graf závislosti polohy zalomení hlavního ostří v závislosti na úhlu natočení nástroje nám zjednodušeně ukazuje, že jednotlivé části NR profilu vstupující do řezného procesu se vzájemně zakrývají, můžeme proto předpokládat, že vrcholy NR profilu budou extrémně namáhány, navíc přechod hrubovacího profilu je zakončen hranou, na které dochází ke kumulacím napětí. Předpokládané opotřebení hřbetu bude patrně pravděpodobně právě na nich.



Obr. 23: Reálný obraz hrubovacího NR profilu fréz NAVEL, spol. s r. o.

## 6.4. Obráběný materiál

Obráběným materiálem je chromniklová austenitická nerezová ocel 1.4301 dle ČSN 10088-1. Tato ocel má příměs legujících prvků: Cr 17 - 19,5 %; Ni 8 - 10,5 %; obsah C <0,07 %. Pevnost v tahu  $R_m$  520–720 N/mm<sup>2</sup>. Mez kluzu  $R_{p0,2}$  210 N/mm<sup>2</sup>. Tažnost A80mm min. 45 %. Teplota pro žhání 1000-1100 °C. Nemagnetická. Nekalitelná. Má sklon ke zpevňování za studena při tažení, nebo při třískovém obrábění nevhodnými řeznými podmínkami. Je odolná proti korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). Je náchylná k mezikrystalové korozi v oblasti tepelného ovlivnění. [26]

## 6.5. Upnutí materiálu

Vzhledem k charakteru obráběného materiálu, kterým je austenitická nerezová ocel, nebylo možné použít upnutí přes magnetickou desku – bylo proto použito upnutí soustavou 4 upínek. Pomocí úchylkoměru byla nalezena nejvhodnější základna pro obrábění. Následně byly do boků kvádrů vyfrézovány drážky hloubky 10 mm, šířky 16 mm a délky 60 mm, umístěné 15 mm od spodního okraje bloku. Blok byl zarovnán v ose x pomocí číselníkového úchylkoměru na pracovním stole frézky. Po vyrovnání kvádrů došlo k upnutí a kontrole vyrovnání. Úchylkoměrem byla změřena i vrchní plocha kvádrů, házení bylo v rámci desetin mm. Tato plocha nebyla dále upravována, protože hloubka řezu je 10 mm a tyto nerovnosti budou v rámci řezu a opotřebení nástroje zanedbatelné.



Obr. 24: Upnutí a vyrovnání obráběného materiálu

## 6.6. Řezné podmínky

Řezné podmínky zadané společností NAVEL, spol. s r. o., za kterých budou prováděny srovnávací zkoušky.

veličina	Řezné podmínky	jednotka
Řezná rychlost $v_c$	80	[m/min]
Otáčky $n$	2546	[ot/min]
Posuv na zub $f$	0,05	[mm]
Posuvová rychlost $v_f$	509,3	[mm/min]
Šířka řezu $a_e$	6	[mm]
Hloubka řezu $a_p$	10	[mm]
Chlazení (chladičí kapalina)	Záplava z boku, emulze	
Kritérium opotřebení	VB = 0,2mm / 20 min řezu	

## 6.7. Měřicí soustava

Při výběru možnosti měření opotřebení nástroje v průběhu řezného pre-experimentu bylo několik možností měření:

- Měření na dílenském mikroskopu
- Měření pomocí kamery umístěné na boku pracovního prostoru MCV obráběcího centra
- Měření pomocí kamery umístěné externě, mimo pracovní prostor MCV obráběcího centra

Při prvotním ohledání nástrojů na dílenském mikroskopu bylo velice obtížné pracovat se soustavou hran na nástroji a s vyrovnáním. Hrany na nástroji nebyly zřetelně patrné díky externímu osvětlení a docházelo k odrazům světla od lesklé plochy povlaku.

Při rozhodování o umístění kamery interně/externě v pracovním prostoru obráběcího centra byly uvažovány tyto okolnosti:

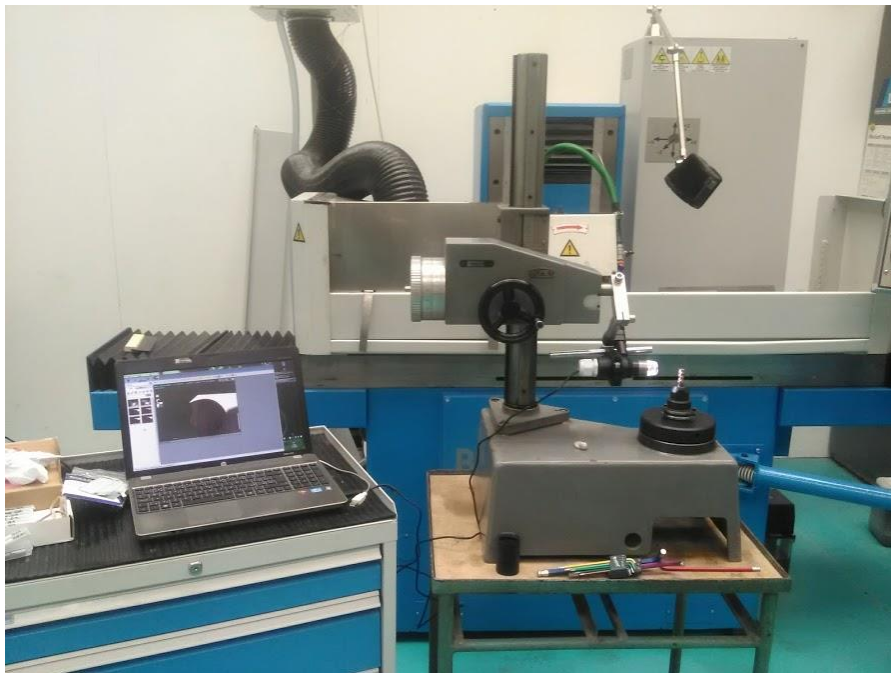
- užití chladicí kapaliny záplavou z boku – nutnost zakrytí kamery
- zbytková mlha v prostoru obrábění a tím způsobené zhoršení optických podmínek
- riziko poškození kamery vlhkostí
- opakovatelnost měření při vyjímání nástroje z obráběcího centra
- ustavení nástroje pro externí měření

Vzhledem k tomu, že byl v depozitu starý měřák na nástroje, který sloužil k dotykovému měření nástrojů, a který bylo možno upgradovat pomocí několika redukcí a kamery pro použití

při našem pokusu, byl vybrán systém externího měření kamerou. Tento měřák nám umožnil vertikální a horizontální posuv kamery a možnost s jednou kalibrací ostřit v rovině osy jak na hřbet nástroje, tak na obvodu na čelo nástroje.

Soustava pro měření opotřebení se skládá z těchto částí:

- kamera
- dotykový měřák opotřebení nástrojů s redukcemi pro uchycení kamery
- počítač se softwarem DinoCapture 2.0



Obr. 25: Schéma soustavy použité pro měření

## 6.8. Postup měření

Před řezným experimentem je měřicí aparatura zapojena a je provedena kalibrace kamery v programu DinoCapture 2.0. Kalibrace je prováděna podle kalibračních mřížek, které jsou v sadě kamery a jsou jejím příslušenstvím. Po provedení kalibrace je na kameru přidán ochranný kryt, který zaručuje, že zaostřování kamery bude nadále prováděno pouze jejím posunem.

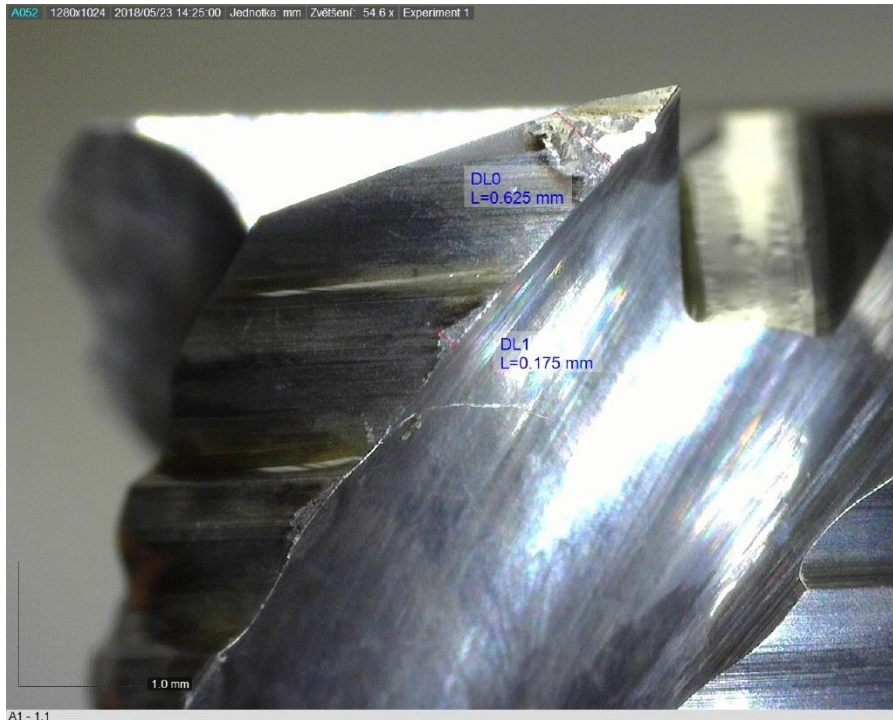
Před řezným procesem je za pomoci kamery ověřen okamžitý výchozí stav nástroje. Nástroj v upínací weldon stopce je vyjmut z měřáku a hydraulicky upnut do MCV obráběcího centra, kde je proveden řezný úkon. Řezný úkon tj. jeden řez materiálem, je roven délce 40 cm, což je



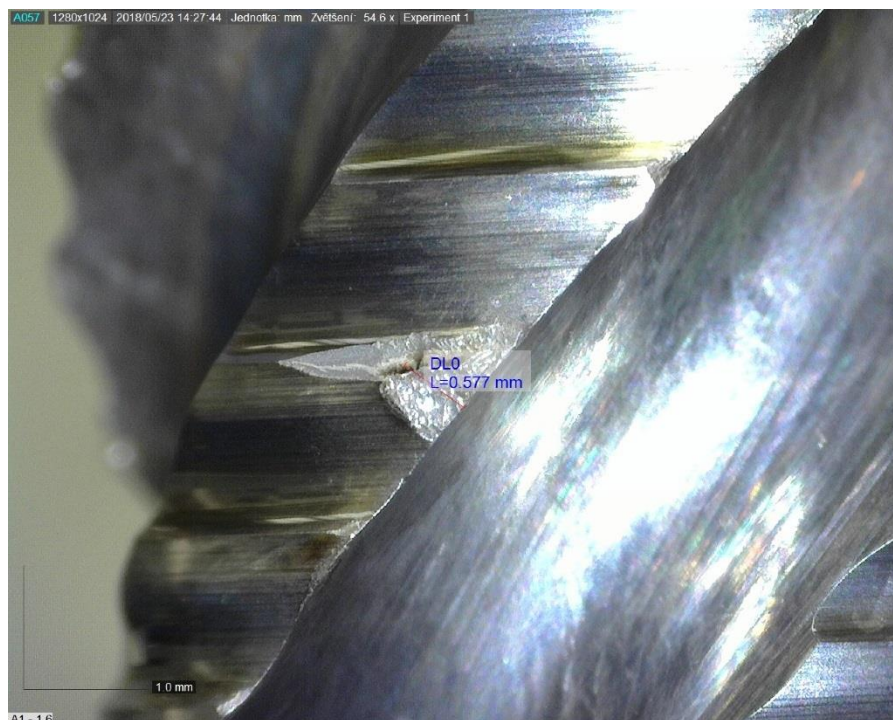
délka kvádrů. Po ukončení řezného úkonu je nástroj s upínací stopkou vyjmut, očištěn od chladicí kapaliny a vložen do stojanu měřicí aparatury. Ve stojanu je s nástrojem otáčeno, dokud se nenajede obrazem hřbetu nástroje do přibližně středu obrazu kamery. Od tohoto bodu se pak nástrojem otáčí po 90° a snímají se při tom snímky zaznamenávající opotřebení nástroje. V programu DinoCapture je následně možné provést odměření veličiny VB – opotřebení na hřbetu. Po zdokumentování stavu nástroje je možné celý proces opakovat do doby, kdy budou naplněna kritéria opotřebení nástroje.

## **6.9. Výsledek pre-experimentu**

Po prvním průjezdu nástroje A1 materiálem za stanovených řezných podmínek, při užití sousledného frézování, bylo pomocí měřicí aparatury a vyhodnocovacího programu Dinolite 2.0 zaznamenáno opotřebení nástroje A1. Opotřebení nástroje na hřbetě (VB) bylo dimenzionálně odlišné od opotřebení předpokládaného. Nástroj měl dle odhadů výrobce snést pracovní dobu zhruba 20 minut, než by dosáhl opotřebení na hřbetě  $VB = 0,2$  mm. Opotřebení nástroje však bylo již po prvním průchodu materiálem značně vyšší. Opotřebení jednotlivých částí se kumulovalo, dle předpokladu z prvotní prohlídky nástroje, na vrcholcích hrubovacího profilu. Hodnota VB se pohybovala od hodnot takřka nulových až do jednotek milimetrů. U některých vrcholů hrubovacího profilu došlo ke křehkému lomu. U špiček nástroje došlo v jednom případě k výraznému poškození. Ostatní špičky zaznamenaly opotřebení, které však nebylo zdaleka tak výrazné. To může být přisouzeno umístění špičky nejdále od středu, čímž se na ní kumulovala námaha řezného procesu.



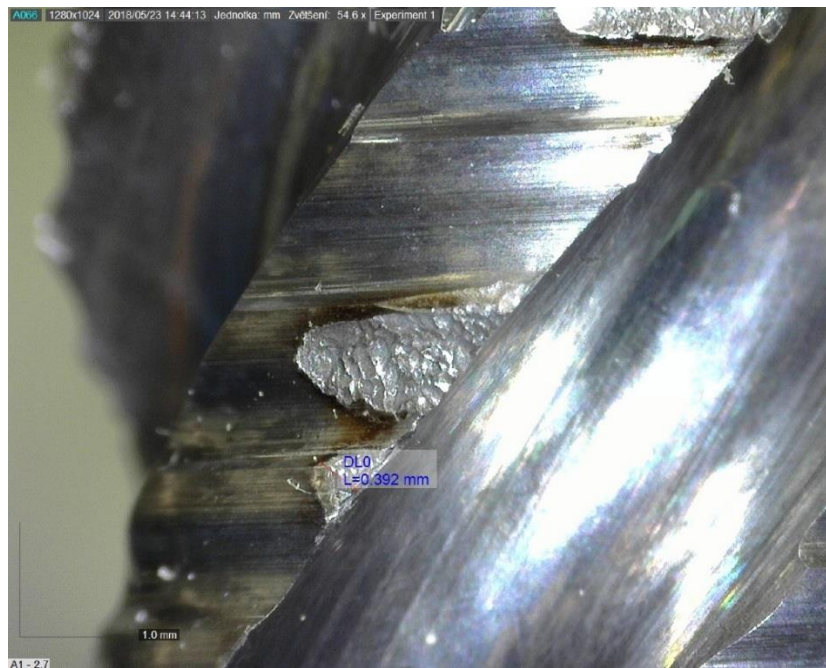
Obr. 26: Snímek špičky a hřbetu frézy A1 po 1. řezu



Obr. 27: Snímek hřbetu frézy A1 po 1. řezu

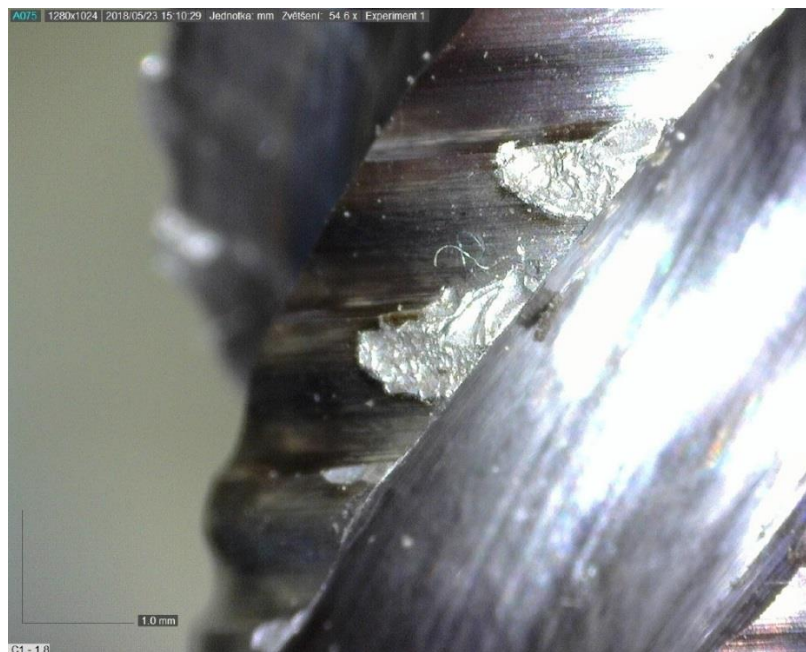
S nástrojem A1 byl proveden ještě druhý řez. Výsledkem byl rozvoj poškození způsobeného při prvním průchodu materiálem. Lavinovité opotřebení nástroje ukázalo, že nemá cenu

provádět další řez, při kterém by docházelo k devastaci nástroje, vzhledem k tomu, že původně předpokládané opotřebení nástroje bylo mnohonásobně překročeno již při prvním řezu.



Obr. 28: Snímek hřbetu frézy A1 po 2. řezu

Pro srovnání byl použit nástroj C1, aby se vyloučilo, že nešlo pouze o defekt v materiálu nástroje A1. Nástroj C1 však po prvním řezu vykázal obdobné opotřebení jako nástroj A1.



Obr. 29: Snímek hřbetu frézy C1 po 1. řezu



V závislosti na těchto výsledcích byly řezné zkoušky přerušeny, protože při procesu obrábění jsou evidentně některé parametry zvoleny chybně a je třeba zjistit, o které se jedná. Bylo zkontrolováno vřetenno, u kterého obsluha centra uváděla problémy při obrábění velkými frézovacími hlavami, pro nástroj o Ø10 mm toto házení však nemůže mít zásadní vliv. Možné příčiny neúspěchu pre-experimentu:

- vada v obráběném materiálu
- špatně nastavené řezné podmínky
- špatně zvolený slinutý karbid těla nástroje

Pro vyloučení jednotlivých parametrů byla provedena referenční zkouška.

## 6.10. Srovnávací zkouška

Pro srovnávací zkoušku byl zvolen nástroj od firmy Hoffmann, který je podobný nástrojům od firmy NAVEL, spol. s r. o., Tato hrubovací fréza je přímo určena k obrábění nerezových ocelí a s její pomocí by měla být vyvrácena hypotéza vady materiálu, případně dán základ pro nové řezné podmínky pro frézování nástroji firmy NAVEL, spol. s r. o.

**HSS E-SPM** **HRF** **k12** **30°** **h6 DIN 1835 B** **HPC**

**Garant Hrubovací fréza HPC**  
 Speciální substrát **SPM** s vysokým podílem kobaltu. Spojuje **tvrdost TK** a **houževnatost oceli PM**. Geometrie čelních břitů pro zanořování.  
 19 2852 – Konstrukční délky podle DIN 327.  
**Použití:** Pro nejvyšší nároky na řezný výkon a zvýšený objem úběru u nerezových ocelí.

**DIN 327** **45°** 192852  
**DIN 844** **45°** 192855

Vhodnost/ v <sub>c</sub> [m/min]	Al Pasty n302	Al 2025	Al Litina > 10% Si	IN < 300 N	IN < 750 N	IN < 900 N	IN < 1100 N	IN < 1400 N	IN < 55 HRC	IN < 60 HRC	IN < 65 HRC	IN < 67 HRC	IN < 70 HRC	INOX < 900 N	INOX > 900 N	Ti > 850 N	Grafit GFK CFK	Uni	Water	Oil	High Speed	High Temp	
19 2852/2855	N	N	N	P	P	P	P	P	H	H	H	H	H	M	M	S	N						

mm	HSS-E-SPM		Počet zubů Z	19 2852		19 2855		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	TiAlN	TiAlN		19 2852	19 2855	19 2852	19 2855										
6	34,34	41,02	3	8	13	52	57	6	0,3	0,008							
8	48,76	57,03	4	11	19	61	69	10	0,3	0,012							
10	56,18	66,99	4	13	22	63	72	10	0,3	0,019							
12	63,18	76,53	4	16	26	73	83	12	0,3	0,029							
14	70,81	104,94	4	16	26	73	83	12	0,3	0,03							
16	90,52	116,07	5	19	32	79	92	16	0,3	0,034							
18	98,79	136,21	5	19	32	79	92	16	0,3	0,038							
20	112,89	164,83	5	22	38	88	104	20	0,3	0,042							
25	180,73	190,80	5	26	45	102	121	25	0,3	0,047							
32	248,04	284,08	6	32	53	112	133	32	0,3	0,055							

Obr. 30: Výřez z katalogu nástrojů firmy Hoffmann Group [27]

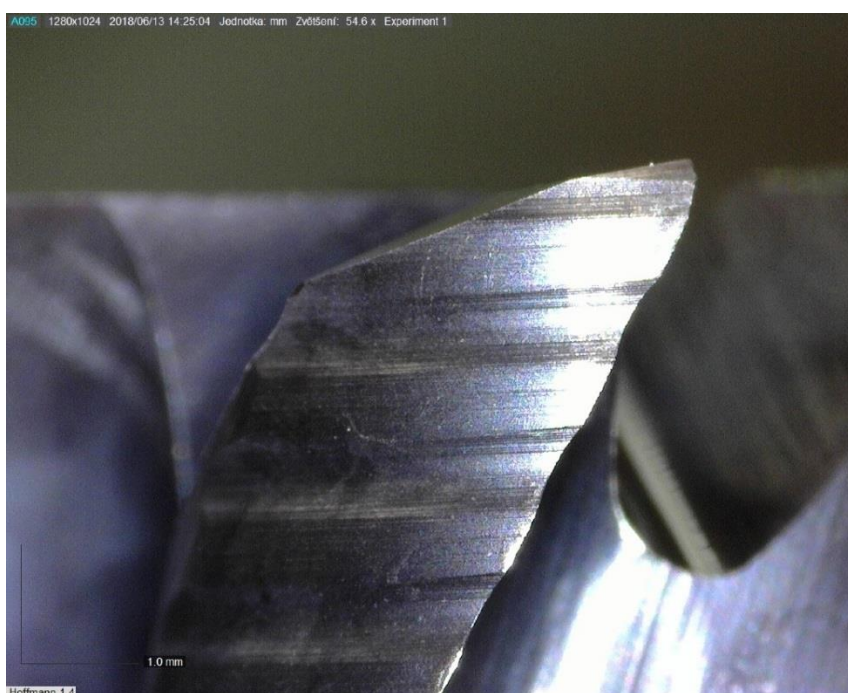
### 6.10.1. Řezné podmínky pro frézu z katalogu Hoffmann

Pro nástroj z nabídky katalogu Hoffmann jsou doporučeny tyto řezné podmínky:

veličina	Řezné podmínky	jednotka
Řezná rychlost $v_c$	26	[m/min]
Otáčky $n$	828	[ot/min]
Posuv na zub $f$	0,019	[mm]
Posuvová rychlost $v_f$	66,24	[mm/min]
Šířka řezu $a_e$	6	[mm]
Hloubka řezu $a_p$	10	[mm]
Chlazení (chladicí kapalina)	Záplava z boku, emulze	

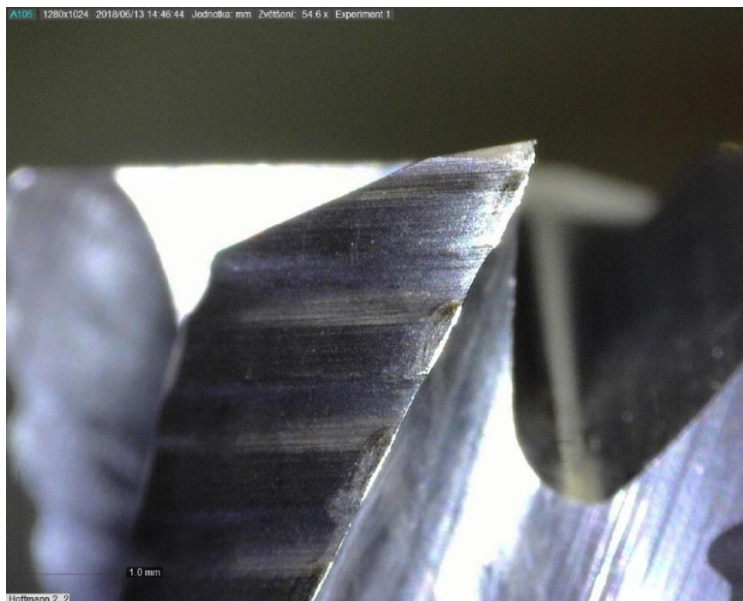
### 6.10.2. Srovnávací zkouška

Po prvotní prohlídce byl nástroj od firmy Hoffmann aplikován a použit za jejich řezných podmínek. V průběhu obrábění nebylo vidět potíže, vibrace obráběcího centra byly výrazně slabší oproti řezu za původních podmínek. Opotřebením na fréze Hoffmann bylo minimální – byly vidět stopy teplotního ovlivnění a tvorby nárůstku. Ve výsledku můžeme říci, že fréza Hoffmann obráběla materiál bez obtíží. Z toho bylo vyvozeno, že v materiálu není vada, která by měla mít přímý vliv na markantní opotřebením nástrojů NAVEL, spol. s r. o.



Obr. 31: Snímek špičky a hřbetu frézy Hoffmann po 1. řezu

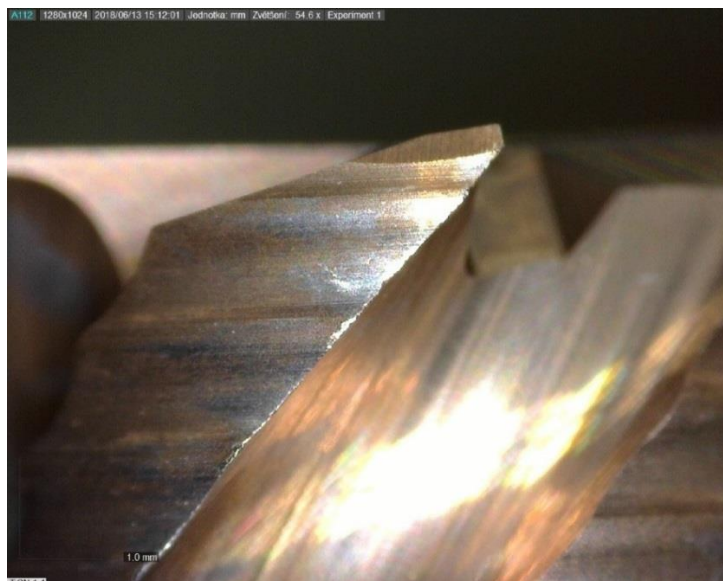
Pro zajímavost byly na frézu Hoffmann aplikovány i původní řezné podmínky. Po takto provedeném řezu a měření bylo zjištěno, že opotřebení frézy Hofmann bylo i za výrazně těžších podmínek minimální – došlo ke zvětšení oblasti teplotního ovlivnění a na čele nástroje vzniklo více nárůstků, nedošlo však k poškození nástroje. Toto svědčí o tom, že nástroje NAVEL, spol. s r. o. nejsou při obrábění nerezi tak odolné, jako nástroj od firmy Hoffmann.



Obr. 32: Snímek špičky a hřbetu frézy Hoffmann po 2. řezu

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto, že bude proveden ještě jeden řez, a to nástrojem 0 (TiCN) od firmy NAVEL, spol. s r. o., přičemž na něj budou aplikovány řezné podmínky od firmy Hofmann. Tento řez ukáže, zda chyba při pre-experimentu nebyla v příliš vysokých řezných podmínkách.

Nástroj TiCN od firmy NAVEL, spol. s r. o. za řezných podmínek Hofmann po jednom řezu a přeměření nevykazoval znaky markantního opotřebení. Došlo zde k otěru povlaku TiCN, ale nástroj nebyl výrazněji poškozen. Z toho můžeme vyvozovat, že příliš vysoké řezné podmínky pro tento typ nástrojů byly nevhodné a je třeba je před samotným následným řezným experimentem, který rozhodne o vhodnosti povlaků, optimalizovat.



Obr. 33: Snímek špičky a hřbetu frézy 0 (TiCN) po 1. řezu

## 6.11. Verifikace řezných podmínek

### 6.11.1. Řezné podmínky

Po širším průzkumu řezných podmínek pro obrábění korozivzdorné oceli v katalogích dalších prodejců nástrojů došlo k mírné úpravě řezných podmínek – dále jen nové řezné podmínky. Pro tyto podmínky bude provedena zkouška. Pokud za zvolených řezných podmínek bude nástroj 0 (TiCN) od firmy NAVEL, spol. s r. o. správně pracovat, můžeme nové řezné podmínky doporučit pro aplikaci v následných testech, které určí vhodnost vytipovaných povlaků.

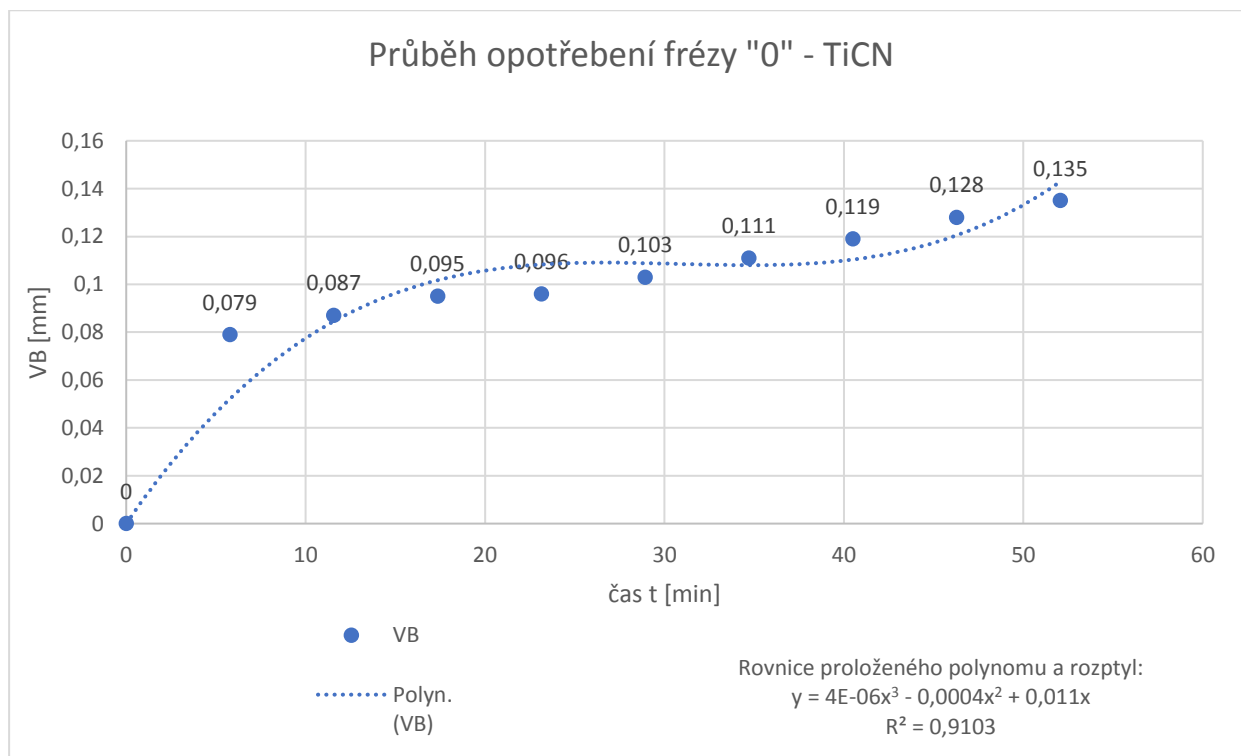
veličina	Řezné podmínky	jednotka
Řezná rychlost $v_c$	25	[m/min]
Otáčky $n$	796	[ot/min]
Posuv na zub $f$	0,022	[mm]
Posuvová rychlost $v_f$	70	[mm/min]
Šířka řezu $a_e$	6	[mm]
Hloubka řezu $a_p$	10	[mm]
Chlazení (chladičí kapalina)	Záplava z boku, emulze	

## 6.11.2. Výsledek verifikace

Při zachování postupu práce, obráběného materiálu a obráběcího stroje byla provedena zkouška opotřebení na nástroji s označením 0, povlakem TiCN ze současné nabídky společnosti NAVEL, spol. s r. o. Na nástroj byly aplikovány nové řezné podmínky. Měření opotřebení probíhalo vždy po jednom průchodu materiálem, tj. po každých 5:46 minutách.

Tabulka č. 2: Tabulka odměřených hodnot:

Čas t [min]	VB [mm]
0:00:00	0,000
0:05:46	0,079
0:11:32	0,087
0:17:18	0,095
0:23:04	0,096
0:28:50	0,103
0:34:36	0,111
0:40:22	0,119
0:46:08	0,128
0:51:54	0,135



Z grafu je patrné, že nástroj 0 (TiCN) je schopen za daných řezných podmínek obrábět korozivzdornou ocel. Pro názornost byla řezná zkouška provedena pro delší časový interval, než je maximální předpokládaná doba řezných zkoušek. Rozhodujícím faktorem v následných experimentech bude opotřebení na hřbetě VB dosažené po době řezu 30 min. V našem případě by toto opotřebení činilo přibližně 0,103 mm. Vzhledem k tomu, že proložený polynom modelující průběh opotřebení má charakteristický průběh velice podobný učebnicovým vzorům, můžeme vyvozovat, že řezné podmínky jsou zvoleny racionálně.

## 7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá nástrojovými povlaky. Vznikla ze zadání podniku NAVEL, spol. s r. o. Podnik chce zavést do svého katalogu nástrojů novou frézu, opatřenou vhodným povlakem, pro obrábění korozivzdorné oceli. Mým úkolem je vytipovat vhodné povlaky a následně ověřit užitnost pro dané řezné podmínky.

V úvodní části jsem zpracoval vývoj jednotlivých generací nástrojových povlaků. Vzhledem k tomu, že povlaky jsou tvořeny dvěma způsoby depozice – CVD (chemicky) a PVD (fyzikálně), věnoval jsem pozornost i tomuto dělení nástrojových povlaků a jejich vlastností z toho plynoucích. Dále jsem zpracoval téma opotřebení nástrojů a měření opotřebení. Seznámení se s těmito tématy je důležité pro správné vyhodnocení užitnosti v řezném experimentu.

Pro volbu nástrojových povlaků vhodných k obrábění korozivzdorných ocelí jsem využil informace poskytnuté povlakovými firmami. Vypracoval jsem metodiku snadného a rychlého měření opotřebení nástrojů a provedl řezný experiment. Výsledky tohoto experimentu byly velice nepříznivé. Za pomoci srovnávací zkoušky jsem určil chybu – špatně nastavené řezné podmínky, které jsem na základě srovnávací zkoušky ještě upravil a následně je při pokusu verifikoval – ověřil. S novými řeznými podmínkami by pro podnik NAVEL, spol. s r. o. nemělo být problémem provést zbylé řezné zkoušky a určit nejvhodnější povlak pro obrábění korozivzdorné oceli.

Celkově bych uvedl, že určit optimální řezné podmínky pro nástroj by vyžadovalo další experimenty. Při obrábění nerezových ocelí se názory na optimální podmínky u různých uživatelů velice různí. Je potřeba v tomto ohledu zohlednit i ekonomické hledisko a další podmínky procesu.

Doplňkově jsem při práci řešil nástroj samotný. Uvedl bych zde, že tělo nástroje je vyráběno ze slinutého karbidu Ceratizit CTS20D, který není primárně určen pro obrábění korozivzdorných ocelí. Společnost Ceratizit pro obrábění korozivzdorných ocelí doporučuje materiál CTS18D. Pro příští experiment navrhuji zvolit tento typ materiálu.

Další postup a celkové vyhodnocení nejvhodnějšího povlaku pro obrábění korozivzdorné oceli provede z ekonomických důvodů podnik NAVEL, spol. s r. o. externě.

Můžeme tedy konstatovat, že pro původně zadané řezné podmínky nástroj s vybranými povlaky není možné použít z důvodu příliš náročných řezných podmínek. Při užití nově navržených řezných podmínek by mělo být možné provést adekvátní řezné zkoušky.

## Bibliografie

- [1] A. Humár, *Materiály pro řezné nástroje*, Praha: MM publishing, s. r. o., 2008, pp. 61-120.
- [2] A. Jaromír, „Důležitost povlakování řezných nástrojů pro ekonomické obrábění,“ *MM Průmyslové spektrum*, č. 12, p. 46, 2009.
- [3] A. Humár, *Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část* Studijní opory pro magisterskou formu studia, Brno, 2003.
- [4] M. Marton a M. Vojs, „Diamantové povlaky,“ [Online]. Available: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12014/diamantove-povlaky.html>. [Přístup získán 3. 2. 2018].
- [5] J. VINTR, „Supertvrdé řezné materiály a jejich efektivní využití - Bakalářská práce,“ Zlín, 2006.
- [6] P. Holubář, „Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstevných povlaků,“ *MM Průmyslové spektrum*, 2008.
- [7] „Tenké vrstvy,“ [Online]. Available: [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf). [Přístup získán 15. 2. 2018].
- [8] „Polykrystalický kubický nitrid bóru,“ Sandvik Coromat, [Online]. Available: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/polycrystalline\\_cubic\\_boron\\_nitride/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx). [Přístup získán 4. 2. 2018].
- [9] P. Holubář, M. Šíma a O. Zindulka, „Technologie úprav nástrojů před a po povlakování,“ *MM Průmyslové spektrum*, č. 9, p. 70, 2005.
- [10] „Abraziva pro kvalitní tryskání a pískování,“ Spolmont, [Online]. Available: <https://spolmont.cz/abraziva>. [Přístup získán 7. 2. 2018].
- [11] M. Píška, „Trendy v PVD a CVD povlakování,“ č. 11, p. 70, 2014.
- [12] „učební materiály ústavu fyziky FS ČVUT v Praze,“ [Online]. Available: [fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_7.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf). [Přístup získán 8. 2. 2018].
- [13] H. Pastor a V. Brotek, „Chemické povlakování z plynné fáze. Pokroky,“ *VÚPM*, č. 4, 1979.



- [14] J. Bittner, „Metody povlakování řezných nástrojů, Bakalářská práce VUT,“ Brno, 2010.
- [15] S. Hořejš, „Povlakování nástrojů metodou PACVD,“ *MM Průmyslové spektrum*, č. 4, p. 60, 2008.
- [16] SHM, „PVD technologie SHM,“ [Online]. Available: <http://www.shm-cz.cz/cs/technicke-informace/pvd-technologieshm>. [Přístup získán 15. 2. 2018].
- [17] M. V. Gorelov, Opatřebení řezných nástrojů, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [18] A. S. Coromat, Příručka obrábění, Praha: Scientia, s. r. o., 1997.
- [19] J. Houdek a K. Kouřil, „Opatřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů,“ *MM Průmyslové spektrum*, p. 71, 2005.
- [20] J. Brychta, R. Čep, J. Nováková a L. Petřkovská, Technologie II \_ 1. díl, Ostrava: TU Ostrava, 2007.
- [21] P. De Vos, „Příručka pro technology - Opatřebení se nevyhneme!,“ *MM Průmyslové spektrum*, p. 56, 6 2012.
- [22] J. Gašpárek, Dokončovacie spôsoby obrábania, Bratislava: Alfa, 1979.
- [23] O. Bilík, Obrábění II, Ostrava: VŠB-TU , 1994.
- [24] J. Žižka, Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje, Liberec: TU Liberec, 2003.
- [25] *NAVEL, spol. s r. o. Katalog řezných nástrojů*, 2017.
- [26] „INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL,“ Inox s.r.o., [Online]. Available: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>. [Přístup získán 15. 6. 2018].
- [27] „HOFFMANNT GROUP, Tools to make you better,“ 2017/2018. [Online]. Available: [https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces\\_CZ\\_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page\\_298](https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_298). [Přístup získán 10. 6. 2018].