

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie  
– technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Možnosti zvyšování řezivosti nástrojů z RO

Autor: **Bc. Jiří Černohorský**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2013/2014

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ČERNOHORSKÝ**  
Osobní číslo: **S12N0072K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Možnosti zvyšování řezivosti nástrojů z RO**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace experimentů
4. Zhodnocení výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

**Astakhof, Viktor P.**, Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006, ISBN 0-444-52881-4

**Shaw, Milton Clayton**, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3

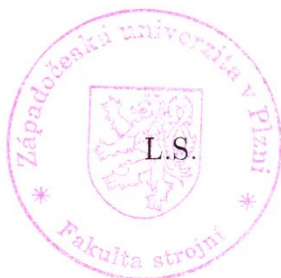
**Juneja, B.L.**, Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7


**Staněk, Jiří**, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. listopadu 2013

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi pomohli při zpracování diplomové práce. Dále bych poděkoval všem pracovníkům ZČU, kteří mi po dobu studia předávali své znalosti a zkušenosti.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Bc. Černohorský	<b>Jméno</b> Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Jméno</b> Miroslav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Možnosti zvyšování řezivosti nástrojů z RO		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	64	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	64	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>	Diplomová práce se zabývá zvyšováním řezivosti rychlořezných ocelí. Práce obsahuje experimentální testování soustružnických nožů zpracovaných karbonitridace ve fluidní směsi termo-aktivních prášků. Výsledky testování jsou použity jako zdroj pro další vývoj této technologie
<b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	rychlořezná ocel, řezivost, trvanlivost nástroje, karbonitridace, fluidace, fluidní lože, termo-aktivní prášek

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Bc. Černohorský	<b>Name</b> Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2303T004 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Name</b> Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Possibilities of increasing the cutting power of the tools from HSS		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	64	<b>TEXT PART</b>	64	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis deals with increasing of cutting property high-speed steel. The work includes experimental testing of turning tools nitrocarburing processed in a fluid mixture of thermo-active powders. The test results are used as a source for further development of this technology.
<b>KEY WORDS</b>	high speed steel, cutting property, durability of tool, nitrocarburing, fluidization, fluidized bed, thermo-active powder

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	3
<b>1 Úvod .....</b>	<b>4</b>
1.1 Cíle práce .....	4
<b>2 Rozbor současného stavu .....</b>	<b>5</b>
2.1 Historický vývoj řezných materiálů.....	5
2.2 Klasické způsoby zvyšování řezivosti rychlořezných ocelí .....	8
2.2.1 Výroba nástrojových ocelí .....	8
2.2.2 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování .....	9
2.2.2.1 Zušlechťování .....	9
2.2.2.2 Nitridování.....	11
2.2.2.3 Karbonitridování .....	13
2.2.3 Difuzní sírování .....	13
2.2.4 Depozice tenkých vrstev.....	14
2.2.4.1 Metoda PVD .....	15
2.2.4.2 Metoda CVD.....	17
2.3 Moderní způsoby zvyšování řezivosti RO .....	18
2.3.1 Speciální metalurgické procesy .....	18
2.3.2 Prášková metalurgie .....	20
2.3.3 Netradiční tepelné a chemicko-tepelné zpracování .....	22
2.3.3.1 Kryogenní zpracování .....	22
2.3.3.2 Iontová nitridace .....	23
2.3.3.3 Chemicko-tepelné zpracování ve fluidním loži .....	25
2.3.3.4 Marstressing.....	27
2.3.3.5 Boridování .....	28
2.3.4 Speciální metody depozice tenkých vrstev.....	29
2.3.4.1 Iontová implantace PVD vrstev .....	29
2.3.4.2 Plazmaticky aktivovaná CVD metoda .....	29
2.3.4.3 CVD za středních teplot .....	30
2.3.4.4 Stripping .....	30
2.3.5 Úpravy geometrie břítu nástroje .....	31
2.3.6 Technologie DMLS.....	33

<b>3</b>	<b>Návrh experimentů.....</b>	<b>35</b>
3.1	Návrh experimentu tepelně zpracovaných soustružnických nožů.....	35
3.1.1	Testované nástroje.....	36
3.1.2	Obráběný materiál.....	42
3.1.3	Volba řezných podmínek.....	42
3.1.4	Testovací zařízení .....	43
3.1.4.1	Soustruh Masturn 50 C/800.....	43
3.1.4.2	Dílenský mikroskop Multicheck Pc 500 .....	44
3.1.4.3	Drsnoměr MarSurf M 300. ....	45
<b>4</b>	<b>Realizace experimentů.....</b>	<b>46</b>
4.1	Průběh experimentu .....	46
4.2	Nástroj 30-1.....	48
4.3	Nástroj 30-2.....	50
4.4	Nástroj 30-3.....	52
4.5	Nástroj 30-4.....	54
4.6	Nástroj 30-5.....	56
<b>5</b>	<b>Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>63</b>



**Seznam použitých zkratk a symbolů**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
KTO	Katedra technologie obrábění
ČSN	Česká státní norma
ISO	International Organization for Standardization
HSS	Rychlořezná ocel
$A_{C1}$	Teplota překrystalisace ve fázovém diagramu
$M_s$	Teplota počátku martenzitické přeměny
$M_f$	Teplota konce martenzitické přeměny
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
PVD	Fyzikální metoda depozice tenkých vrstev
CVD	Chemická metoda depozice tenkých vrstev
EB-PVD	Elektronové napařování PVD
PLD	Pulzní laserová depozice
MTCVD	CVD za středních teplot
PCVD, PACVD, PECVD, MWPCVD	Plazmaticky aktivovaná CVD
DMLS	Přímé laserové spékání kovů
TiC	Karbid titanu
TiN	Nitrid titanu
TaC	Karbid tantalu
TiCN	Karbonitrid titanu
HV	Tvrдость podle Vickerse
HM	Martensova tvrдость
HRC	Tvrдость podle Rockwella
$VB_B$	Opotřebenění hřbetu ostří
$VB_N$	Maximální opotřebenění hřbetu ostří
$VB_{B \text{ krit}}$	Kritické opotřebenění hřbetu ostří
$V_c$	Řezná rychlost
$a_p$	Hloubka řezu
$f_{ot}$	Posuv na jednu otáčku

# 1 Úvod

Zvyšování výkonnosti řezných nástrojů je kontinuální proces, který probíhá neustále, ale v současné době rychleji než kdy předtím. Rychlořezná ocel jako řezný materiál je známá již od počátku 20. století, nicméně i v současné době je to nenahraditelný řezný materiál, u kterého je stále potenciál pro zvýšení řezivosti. Výrobci řezných nástrojů se předhánějí v představování nových a nových nástrojů s vyšší výkonností. Uvedení nového nástroje na trh však předchází velice dlouhá doba, po kterou se nástroj nebo použitá technologie vyvíjí. Vývoj zahrnuje proces od myšlenky, přes návrh a realizaci experimentů až po finální odladění.

## 1.1 Cíle práce

Jednou z myšlenek je karbonitridace ve fluidním loži se směsí termoaktivních mikroprášků. Tento princip je známý již delší dobu, ale v současné době se testují nové možnosti využití této technologie. Karbonitridace není tolik využívaná pro nástroje z rychlořezných ocelí, a proto je předmětem zkoumání. Účelem této práce je otestování několika nástrojů, které budou zpracovány touto metodou, prokázání vlivu fluidace na řezivost nástroje a porovnání nástrojů s běžným nástrojem při obrábění. Poznatky z testování povedou k dalšímu nasměrování experimentů a vývoje této metody.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Historický vývoj řezných materiálů

Pojem řezných materiálů se váže s pojmem obrábění a z dnešního pohledu se obrábění téměř výhradně chápe ve spojitosti s obráběcími stroji. Ovšem veškeré tyto pojmy mají dlouhou historii a to, co nám dnes přijde jako naprostá samozřejmost, bylo v minulosti absolutně nemyslitelné.

Obrábění kovů není nijak starou záležitostí, tato technologie započala až v 18. století a je víceméně spjata s vynalezením mechanického pohonu obráběcích strojů. Před tímto milníkem byl nejběžněji obráběný materiál dřevo. Obrábění kovů bylo omezeno téměř výhradně na kovářské práce až do doby, než byl vynalezen parní stroj. „První mechanický stroj poháněný parou sestrojil Hérón Alexandrijský v 1. století našeho letopočtu. Považoval jej ale jen za hračku a na praktické využití nedošlo. Dnes je vynález parního stroje obvykle připisován Jamesi Wattovi, který ho vynalezl v roce 1765. Ve skutečnosti Watt „pouze“ významně zdokonalil stroje Thomase Saveryho a Thomase Newcomena. Jednalo se o stroje na principu kondenzace syté páry ve válci a využití síly vyvolané podtlakem k čerpání vody.“ [1]

Následovala doba bouřlivého rozvoje strojírenské výroby, zemědělství, těžby, dopravy, atd., která znamenala přechod od ruční výroby v manufakturách ke strojní mechanizované výrobě. Toto období se historicky nazývá průmyslová revoluce, která trvala od 18. do 19. století. Docházelo k velmi rychlému vývoji obráběcích strojů, které byly centralizovány do velkých průmyslových hal. Zdrojem mechanické energie byl parní stroj, od kterého se pomocí transmisí a řemenových převodů dostávala mechanická energie k jednotlivým strojům. V této době již existovaly předchůdci hoblovek, frézek a soustruhů. Na soustruzích již bylo možné řezat závity.

Během 19. Století se i nadále rozvíjely a zdokonalovaly obráběcí stroje a to jak v Evropě tak Americe. Technický pokrok hnal kupředu zbrojařský průmysl. Jako jeden z největších pokroků byly myšlenky na standardizaci rozměrů a potažmo normalizace součástí, jejímž typickým příkladem je spojovací materiál. To mělo za následek vzájemnou vyměnitelnost komponent. Toto vše vedlo k zavedení hromadné výroby.

Zároveň s mohutným vývojem v oblasti obráběcích strojů bylo nutné inovovat i řezné materiály. V době průmyslové revoluce se jako jediný řezný materiál používala zakalená nelegovaná uhlíková ocel. Tento materiál byl relativně tvrdý, nicméně umožňoval jen velice malé řezné rychlosti a s teplotou velice rychle ztrácel svou tvrdost. Velkým krokem kupředu byla tzv. Mushetova ocel, kterou vyrobil Robert Forester Mushet. Britský metalurg, narozený 8. Dubna 1811. Mushet experimentoval s manganem již od roku 1848. Roku 1868 představil 'R Mushet's Special Steel' (RMS), typické složení oceli bylo 9% wolframu, 2,5% manganu a 1,85% uhlíku. Tutu ocel bylo velice těžké zakalit ve vodě, proto Mushet vymyslel

kalení oceli v proudu vzduchu z kovářského měchu. Výsledná ocel měla dvojnásobnou výkonnost oproti kaleným uhlíkovým ocelím a zároveň daleko větší stabilitu při vysokých teplotách. Mushet i v pozdějších letech pokračoval s vylepšováním této oceli. V roce 1894 testoval tuto ocel Frederick Winslow Taylor, americký strojní inženýr, který se snažil o zlepšení průmyslové efektivity. Prováděl srovnávací testy, ocel dosahovala až 47% nárůstu výkonnosti u výkovek a až 90% u měkkých ocelí. Další zvýšení (až 30%) výkonnosti bylo dosaženo při použití aktivního chlazení řeznou kapalinou.

Dalším z milníků vývoje řezných nástrojů byla Světová výstava v Paříži roku 1900. Zde Frederick Taylor demonstroval v té době něco nevídaného a to obrábění takovou rychlostí, že třísky se barvily do modra, nástroj červeně svítil a přitom zůstal ostrý. Obrábění bylo prováděno řeznou rychlostí 40m/min, posuv 1,6mm/ot, hloubka řezu 4,8mm. Tepelná odolnost nástroje byla cca. 600°C. Taylor i nadále pracoval na zdokonalování Mushetovi oceli, která měla stále vyšší výkonnost. Historická literatura uvádí, že Taylor s kolegou Maunselem Whitem provedl desetitisíce pokusů a obrobil 400 tun oceli. Výsledkem takto rozsáhlých testů bylo razantní zvýšení řezných parametrů při současném prodloužení trvanlivosti nástroje. V důsledku sledování těchto veličin Taylor zformuloval



Obr. 1 Frederick Winslow Taylor r.1900 [5]

matematickou závislost pro výpočet hospodárné trvanlivosti. Dalším experimentováním s chemickým složením oceli a tepelného zpracování docházelo ke zvyšování podílu tvrdých karbidů. Složením se jednalo o nástrojové oceli téměř tak, jak je známe dodnes.

V roce 1615 spatřili světlo světa slévárenské slitiny, jejichž základ je wolfram, chrom a kobalt. Tyto slitiny měly až 50% obsah tvrdých karbidů. Tyto materiály se vyznačovaly velkou tvrdostí, teplotní odolností až 800°C a velkou abrazivní odolností za cenu velké křehkosti a malé houževnatosti. Pájely se jako destičky na nástrojové držáky. Svým chemickým složením byly předchůdci slinutých karbidů.

Slinuté karbidy přišly ve 30. letech 20. století, poprvé však byly k vidění v roce 1927 na výstavě v Lipsku. Jedná se o produkt práškové metalurgie. Procesem slinování a spékání výchozího prášku bylo docíleno, že ve výsledném produktu bylo až 90% tvrdých karbidů. První slinuté karbidy byly na bázi karbidu wolframu a kobaltového pojiva. Tyto průmyslově vyráběné slinuté karbidy byly značeny pod názvem Widia. Tento název přetrvál až dodnes

hlavně u starší generace pracovníků, kteří mají pod tímto názvem shrnuté veškeré slinuté karbidy. Slovo Widia je složeno ze dvou německých slov Wie DIAMante, což v překladu znamená jako diamant. Toto sousloví vyjadřovalo tehdejší nadšení z objevu nového materiálu tvrdého „jako diamant“. Odpovídalo to také předchozímu výzkumu, jelikož slinuté karbidy byly objeveny jako vedlejší produkt při intenzivní snahou vyrobit umělý diamant. To se však podařilo až v roce 1955.

Vývoj i nadále intenzivně probíhal, nicméně slinuté karbidy se jen velice pomalu dostávaly do strojírenských firem a to díky hospodářské recesi v 30. letech. Na konci 30. Let došlo k obratu a to díky nástupu výkonnějších strojů a potřebám dopravního a zbrojního průmyslu. I v dalších letech podíl slinutých karbidů nebyl nijak veliký. Nárůst přišel až v 50. letech, ač i v té době byly karbidové nástroje oproti HSS nástrojům podstatně dražší a zdaleka ne všechny firmy měly adekvátní strojový park, který by nové řezné materiály efektivně využíval. V dalších letech podíl slinutých karbidů dále rostl a rychlořezné oceli byl předvídan rychlý ústup.

V 60. letech však přišla technologie depozice tenkých vrstev. Nejprve se jednalo o jednoduché TiN a TiCN vrstvy, deponované technologií CVD. Touto technologií bylo možné nanášet vrstvy pouze na slinuté karbidy a to díky depoziční teplotě cca. 1000°C. Počátkem 80. let byla vinuta metoda PVD, která umožňovala nanášení vrstev i na rychlořeznou ocel. To pro tento řezný materiál znamenalo razantní zvýšení řezivosti. Dnes jsou tenké vrstvy deponované na veškeré řezné materiály, kde plní mnoho funkcí.

Keramika jako řezný materiál se zrodila již ve 30. letech 20. Století. Jako průmyslově použitelné vyměnitelné destičky se začala využívat až v 50. letech. Byla vyráběna z oxidu hlinitého. Oblast použití keramiky byla velice malá a to díky velké tvrdosti, z níž vycházela i velká křehkost. Tento stav platí víceméně dodnes. Polykrystalický diamant a kubický nitrid boru jako zástupci supertvrdých materiálů se objevili až v 70. letech 20. století. Jejich použití je značně omezené z důvodů křehkosti a u diamantu také díky afinitě uhlíku. V poslední době se využívají hlavně na obrábění neželezných kovů při hromadné výrobě, kde jsou ekonomicky výhodnější než jiné řezné materiály.

Zdroje: [2] [3] [4] [5] [6] [7]

## 2.2 Klasické způsoby zvyšování řezivosti rychlořezných ocelí

### 2.2.1 Výroba nástrojových ocelí

Nástrojové oceli se mohou vyrábět několika způsoby. První a nejběžnější je konvenční způsob v ocelárnách, kde se ocel zpracovává v elektrických pecích. Druhým způsobem je elektrostruskové přetavování (viz. Kapitola 2.3.1). Třetím způsobem je použití technologie práškové metalurgie (viz. kapitola 2.3.2). Následně se provádí tváření za tepla. Tvářením se rozruší struktura oceli, která je značně nestejnorodá (neplatí pro práškové oceli). Výsledkem tváření je ocel s vyšší homogenitou materiálu. Technologie tváření je daná od požadavků na tvar a rozměr výrobku a v neposlední řadě také na tvářitelnosti oceli. Válcované polotovary se vyznačují strukturou materiálu, která je uspořádaná do hlavního směru tváření. Oproti tomu kování se používá u hůře tvářitelných materiálů o větších rozměrech, nebo jako operace před válcováním.

Různé oceli mají různé tvářecí teploty resp. jiný interval ideálních tvářecích teplot. Ohřev na tvářecí teplotu je rovněž odlišný od použité oceli. Ve většině případů se provádí nejdříve předehřev a následně vlastní ohřev na tvářecí teplotu, nicméně některé druhy ocelí vyžadují pozvolný ohřev se stupňovitým zvyšováním teploty. Zejména při kování, kde se provádí velký úběr materiálu, jsou nutné přihřevy.

Po tváření následuje ochlazování. Řada nástrojových ocelí je kalitelná na vzduchu, proto je nutné ochlazování zpomalovat. Pomalejšího ochlazování může být docíleno postupným ochlazováním v peci nebo například ochlazováním v izolačním zásypu.

Ve většině případů následuje další tepelné zpracování, jehož cílem bývá snížení tvrdosti, což je velice důležité pro další obrábění. Žihání na měkko probíhá těsně pod teplotou AC1, nicméně u rychlořezných ocelí s vyšším obsahem karbidotvorných prvků se žihání na měkko může provádět i těsně nad touto teplotou. Výdrž na teplotě bývá kolem 4 hodin, záleží na velikosti a tvaru polotovaru. Poté následuje pomalé chladnutí rychlostí 10-20°C za hodinu až do teploty 600°C, poté chladnutí na vzduchu.

Výsledkem je válcovaný nebo kovaný polotovar ve formě tyčí, profilů, bloků nebo různotvarých výkovků. Tyto polotovary mají značné povrchové defekty, jako např. rýhy, otlaky, okuje, atd. Dále bývá povrch materiálu oduhličen. Proto je nutné povrch dále opracovat.

V současné době je snaha o maximální snižování nákladů což se projevuje zrychlováním procesů výroby ocelí. Někdy jako řešení, jak zvýšit řezivost nástroje nebo vyřešit selhání nástroje, stačí dodržet správné technologické postupy výroby základního materiálu.

Zdroje: [8], [9]

## 2.2.2 Tepelné a chemicko-tepelné zpracování

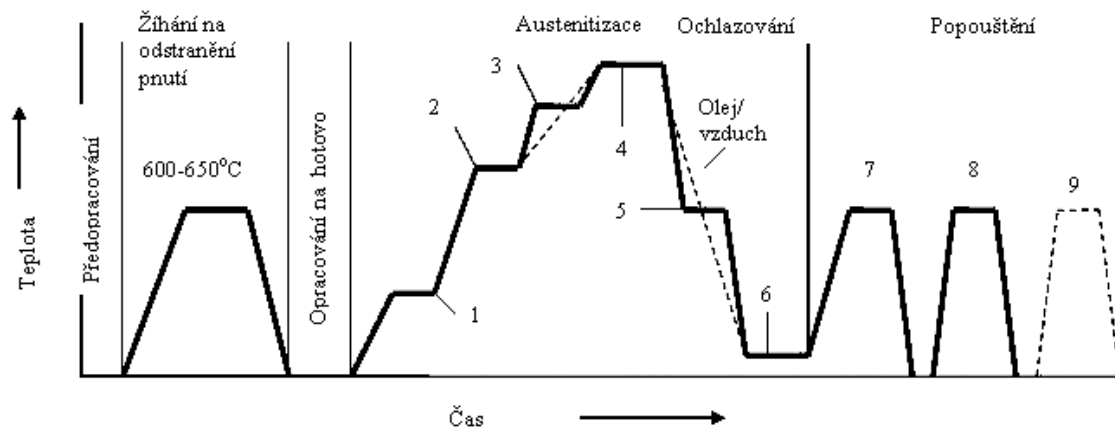
### 2.2.2.1 Zušlechťování

Pojem zušlechtění zahrnuje dva druhy tepelného zpracování, kalení a následné popouštění. Princip je velice jednoduchý, materiál se ohřeje na kalící teplotu, která se nachází v oblasti austenitu. Na této teplotě je nutné setrvat a následně zchladit nadkritickou rychlostí, čímž se potlačí rovnovážné změny ve struktuře materiálu. Účelem této operace je přeměna co nejvíce austenitu na martenzit. Bezprostředně po kalení je nutné materiál popustit, což znamená ohřev materiálu na popouštěcí teplotu, výdrž na teplotě a následné vhodné ochlazování. Účelem popouštění je snížení vnitřního pnutí v materiálu, nicméně to má za následek i snížení tvrdosti. Čím vyšší popouštěcí teplota, tím více se snižuje tvrdost.

Zušlechťování rychlořezných ocelí je technologicky náročnější, než zušlechťování běžných konstrukčních ocelí. Ohřev je nutné provádět v několika stupních. Nejčastěji se provádí první stupeň 500-550°C, druhý stupeň 850°C a u tvarově komplikovanějších součástích se doporučuje ještě třetí stupeň při 1050°C. Doba výdrže na jednotlivých stupních se odvíjí od charakteristické tloušťky materiálu, běžně se udává na 1mm tloušťky výdrž 1 minuta. Po dosažení kalící teploty se provádí výdrž na teplotě, které není závislá na tloušťce materiálu. U konstrukčních ocelí je tato doba 10-15 minut, u více legovaných ocelí 20-25minut, nicméně u rychlořezných ocelí je doba výdrže výrazně kratší a to z důvodu velice vysokých kalících teplot. Veškeré údaje jsou pouze orientační, jelikož velice záleží na typu zařízení, ve kterém se ohřev provádí. Po výdrži následuje ochlazení. Ochlazení se provádí v různých prostředích, např. voda, vzduch, solné lázně, plynné atmosféry, aj. Každé prostředí umožňuje jinou ochlazovací rychlost, která je závislá na typu materiálu a požadovaných cílových vlastnostech. Pro volbu správné ochlazovací rychlosti se používají tzv. ARA diagramy, které popisují průběh rozpadu austenitu a nově vznikající struktury. Rychlořezné oceli se vyznačují velice vysokou prokalitelností, proto je nutné tyto oceli kalit v prostředích s menší rychlostí ochlazování. Často se používá olej nebo roztavené solné lázně. Solné lázně umožňují termální kalení, které se často používá u rychlořezných ocelí. Solná lázeň má teplotu těsně nad počátkem martenzitické přeměny ( $M_s$ ), na této teplotě se setrvává až do vyrovnání teplot mezi jádrem a povrchem a poté se dochlazuje na vzduchu.

Popouštění rychlořezných ocelí se provádí minimálně 3x za sebou, může se provádět jak v pecích, tak například v solných lázních. Jako první se provádí předeřev na cca. 300°C a následně se ohřívá rychlostí 30-50°C za hodinu až na požadovanou popouštěcí teplotu. Na popouštěcí teplotě je nutná výdrž minimálně 2 hodiny. Teplota druhého a dalšího popouštění je asi o 10°C nižší, než předchozí. Vícenásobným popouštěním se docílí dokonalejšího rozpadu zbytkového austenitu.

Příklad postupu základního tepelného zpracování rychlořezných ocelí je znázorněn na Obr. 2



- 1 – první předehřev (0,5 min/mm ~ 400°C); 2 – druhý předehřev - 850°C;  
 3 – třetí předehřev - 1050°C; 4 – kalící teplota; 5 – teplá lázeň 500 až 600°C;  
 6 – vyrovnávací teplota 1 hod. na 100 mm tloušťky; 7 – první popouštění 2 hod. vzduch; 8 –  
 druhé popouštění - 2hod. vzduch; 9 – 3. popř. další popouštění – 2 hod. vzduch.

**Obr. 2 Průběh tepelného zpracování nástrojů z rychlořezných ocelí [8]**

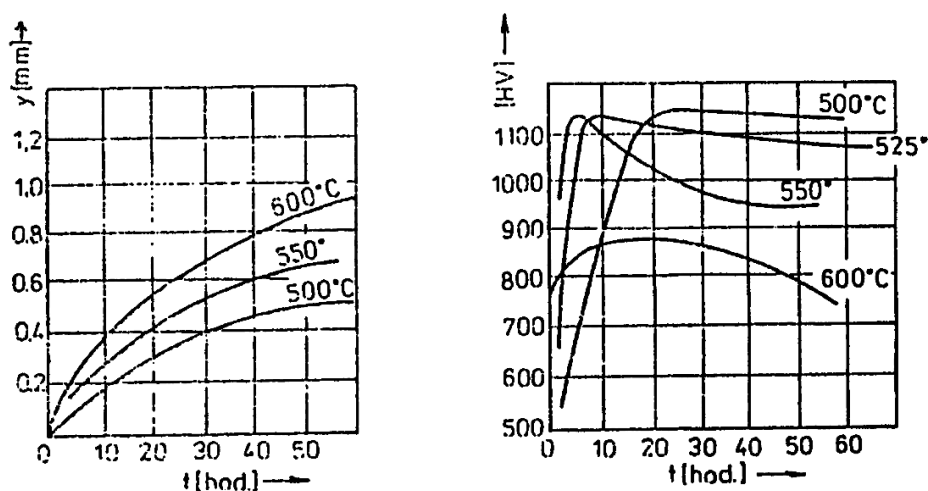
Kalící a popouštěcí teploty jsou jiné pro každý materiál. Ukázky teplot pro rychlořeznou ocel ČSN 19830 jsou uvedeny v kapitole 3.1.1.



### 2.2.2.2 Nitridování

Nitridování je proces, při kterém se povrch materiálu sytí dusíkem. Vznikne povrchová vrstva, která obsahuje vysoce disperzní nitrity legujících prvků s vysokou afinitou k uhlíku (Al, Cr, Ti, W, V). Vytvořená povrchová vrstva má vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení a to i za vyšších pracovních teplot. Nitridace se provádí v plynu, kapalných solích nebo v prášku při teplotách těsně pod  $A_{C1}$ . Vytvořená vrstva má požadované vlastnosti bez dalšího tepelného zpracování. Díky poměrně nízkým nitridačním teplotám (500-570°C) dochází k menším deformacím zpracovávaného materiálu.

Nitridace v plynném prostředí, které se většinou tvoří čistý čpavek nebo směsná atmosféra čpavku s dusíkem. Sycení povrchu má dvě fáze, tepelnou a chemickou. Zvolení nitridační teploty vychází z typu materiálu a požadavků na výslednou tvrdost a tloušťku vrstvy. Příklad diagramů pro výběr parametrů nitridace je uveden na Obr. 3.



Obr. 3 Vliv teploty a doby nitridace na tvrdost a tloušťku nitridované vrstvy oceli 15340 při nitridování v plynu [10]

Chemický proces je charakterizovaný stupněm disociace čpavku, který vyjadřuje množství zplodin rozkladu dusíku a vodíku v celkovém objemu nitridační atmosféry. Úroveň disociace závisí na teplotě. Při nízké disociaci dochází k přesycení povrchu dusíkem a vznikají velice silné nitridační vrstvy, oproti tomu vysoký stupeň disociace zapříčiňuje tenčí vrstvu. Před nitridací se musí součásti dokonale očistit, odmastit, popřípadě opískovat. Dále je důležité vhodné rozmístění v peci pro snadný a rovnoměrný přístup atmosféry. Nitridační pec musí být vzduchotěsně uzavřená. Doba nitridace je velice pomalý proces, na vytvoření 0,2mm tlusté vrstvy je potřeba cca. 24 hodin. Po vlastním procesu nitridace následuje pomalé chladnutí v peci, výrobky se vyndávají až po úplném zchladnutí. Při nitridaci je nutné počítat se zvětšením rozměrů zpracovávaných součástí.

Velkou nevýhodou nitridace jsou právě velice dlouhé a tím nákladné časy. Zrychlení je možné dvěma způsoby, první je vytvořit atmosféru s vyšším nitridačním potenciálem, druhý je usnadnit difuzi do materiálu. Pro atmosféru s vyšším potenciálem se používá přídavek kyslíku, vodíku nebo dusíku v různých poměrech. Pro urychlení difuze se obdobně

jako u cementace využívá dvou etap a to sice etapy sytící a etapy difuzní. Tento způsob se nazývá Floe proces. Syčení probíhá při 500°C po dobu 5-8 hodin s disociací 15-15%, difuze probíhá při 550°C po dobu 5-42 hodin s disociací 75-85%.

Jinou modifikací nitridace v plynném prostředí je nitridování v ultrazvukovém poli, kde se dosahuje až 1,5x vyšší rychlosti. Jiným způsobem je nitridování s použitím vysokofrekvenčního ohřevu. Tento způsob usnadňuje disociaci čpavku a tím urychluje proces syčení povrchu na počátku nitridace.

Nitridace v solných lázních se využívá hlavně pro vysokolegované materiály, a to hlavně rychlořezné oceli. Zpracování se provádí v kyanidových lázních provzdušňovaných vzduchem při teplotách 540-570°C po dobu 60-120minut. Dosahuje se tloušťky vrstvy do 30 $\mu$ m, větší tloušťky nejsou hospodárné. Tímto způsobem je možné zpracovávat uhlíkové oceli, kde se dosahuje tlouštěk až několik desetin milimetru po pouhých 2 hodinách. Díky absenci legujících prvků nevykazují tak vysokou tvrdost. Dříve byl tento způsob označován jako měkké nitridování, dnes je spíše považován za karbonitridaci.

Prášková nitridace je v principu podobná cementaci v prášku. Prášek je složený z nitridačního prášku a aktivátoru. Poměrem těchto dvou přísad se určuje množství uvolňovaných aktivních částic. Čím má ocel více nitridotvorných prvků, tím méně aktivátoru se používá. Pro dosažení potřebných vlastností nitridovaných součástí je třeba optimálně zvolit metodu, teplotu i potřebnou dobu nitridace. Vzhledem k tomu, že nitridační teploty jsou v oblasti popouštěcích teplot, dochází s prodlužující se dobou nitridace ke snížení pevnosti součástí (dodatečné popouštění). Proto je třeba pomocí nepřímého úměrného vztahu mezi teplotou a dobou popouštění odvodit o kolik musí být vyšší pevnost před dlouhodobou nitridací, aby byla dosažena žádaná hodnota pevnosti součástí.

Práškovou nitridací je možné zpracovávat naprostou většinu vyráběných součástí určených k nitridaci. Tato metoda je však poměrně pracná, a proto je vhodná hlavně pro kusovou výrobu s vysokou variabilitou požadavků na nitridované vrstvy. Další výhodou je nenáročnost na technické zařízení, postačí běžná pec ideálně s nucenou cirkulací vzduchu.

Jiné způsoby speciálních druhů nitridace jsou uvedeny v kapitole 2.3.3

Zdroje: [10] [11]

### 2.2.2.3 Karbonitridování

Princip karbonitridace je obdobní nitridaci s tím rozdílem, že povrch součástí je sycen dusíkem a uhlíkem při teplotách pod  $A_{C1}$  (běžně 560-620°C). Při tomto druhu zpracování vzniká na povrchu bílá vrstva karbonitridů  $\epsilon$  o hloubce do 50 $\mu$ m. Tato vrstva je poměrně tvrdá (do 1000HM) s výbornými třecími vlastnostmi a zvýšenou odolností proti korozi. Do hloubky až 1mm proniká dusík a zpevňuje materiál až na 400HV a tím zvyšuje únosnost vrstvy karbonitridů. U legovaných ocelí bývá tato difuzní vrstva tenčí. Při ochlazování do oleje dochází k vyššímu zpevnění difuzní vrstvy a tím k navýšení meze únavy. Karbonitridované vrstvy nevykazují křehkost jako je tomu u vrstev nitridovaných.

Jako prostředí pro karbonitridace je možné použít plynnou atmosféru, solnou lázeň nebo prášek s aktivátorem obdobně jako u jiných metod chemicko-tepelného zpracování. Velkou výhodou je výrazně kratší doba zpracování oproti nitridaci a to na 2 – 4 hodiny, avšak látky používané ke karbonitridaci jsou vysoce toxické. Díky nízkým teplotám jsou deformace výrobků malé a nárůst rozměrů oproti nitridaci je menší, většinou 0,01mm.

Tato technologie se používá v mnohých odvětvích, typickými díly jsou ozubená kola, šoupátka, válce, vačkové hřídele, nástroje a mnoho jiných aplikací.

Zdroje: [10]

### 2.2.3 Difuzní sírování

Jedná se o proces podobný nitridaci, provádí se za teplot pod  $A_{C1}$ . Sycení povrchu sírou má za následek pokrytí povrchu vrstvou oxikarbonitridů FeS, která má dobrou odolnost proti opotřebení a třecí vlastnosti.

Difuzní sírování se provádí v solních lázních (sulfizace) nebo v plynném prostředí (sulfonitridování). Sulfizace provádí 0,5 – 3hodiny za použití kyanidu sodného a siřičitanu sodného při teplotě 570°C. Síra je přítomná hlavně v povrchové vrstvě ve formě sirníků o tvrdosti 400HM, díky tomu má dobré kluzné vlastnosti. Pod touto vrstvou se nachází vrstva o tvrdosti až 900HM, která obsahuje tvrdé karbonitridy. Celková tloušťka vrstev je 10 - 30 $\mu$ m, přírůstek rozměrů se uvažuje 0,01mm. Sulfidonitridování v plynném prostředí se provádí v nitridačních pecích s částečně disociovaným čpavkem a přísadou 1 - 2% sirovodíku. Tímto způsobem se vytvoří vrstva nitridů, která je však měkčí, než vrstva karbonitridů ze solných lázní. Jako atmosféra se používá směs čpavku, propanu ( $C_3H_8$ ), parami sirouhlíku ( $H_2S$ ) a etylalkoholu.

Zdroje: [10]

#### 2.2.4 Depozice tenkých vrstev

Tenké vrstvy jsou v současné době nezbytnou součástí většiny obráběcích nástrojů. Hlavní funkce tenkých vrstev obráběcích nástrojů je vysoká odolnost proti opotřebení, snížení tření mezi obrobkem a nástrojem, tepelná odolnost, odolnost proti difuzi a oxidaci.

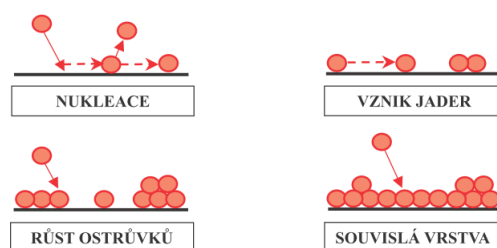
První tenké vrstvy vznikly již v 19. století při experimentování s elektrickými výboji. První patent týkající se napařování vrstev elektrickým obloukem zaregistroval Thomas Alva Edison v letech 1892 – 1894. Velice intenzivní vývoj probíhal ve dvacátých a třicátých letech 20. Století, nicméně nevedl k průmyslově využitelným výsledkům. Obrat nastal až v poválečném období, kdy německý podnik Metallgesellschaft AG použil tuto metodu k výrobě otěruvzdorných povlaků na oceli. Výsledkem byla v roce 1952 první série povlaků na oceli vrstvou TiC. Roku 1959 firma podala patent na povlakování slinutých karbidů. Záhy se stala tato technologie velice významná při povlakování vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Tenké vrstvy byly nanášeny metodou CVD. Metoda PVD přišla na trh v na počátku 80. Let, pomocí této metody byl vytvořen povlak TiN. V následujícím časovém období docházelo ke zdokonalování technických postupů, vývoji nových vrstev a tvorbě vícevrstvých povlaků.

Zdroje: [7] [12]

### 2.2.4.1 Metoda PVD

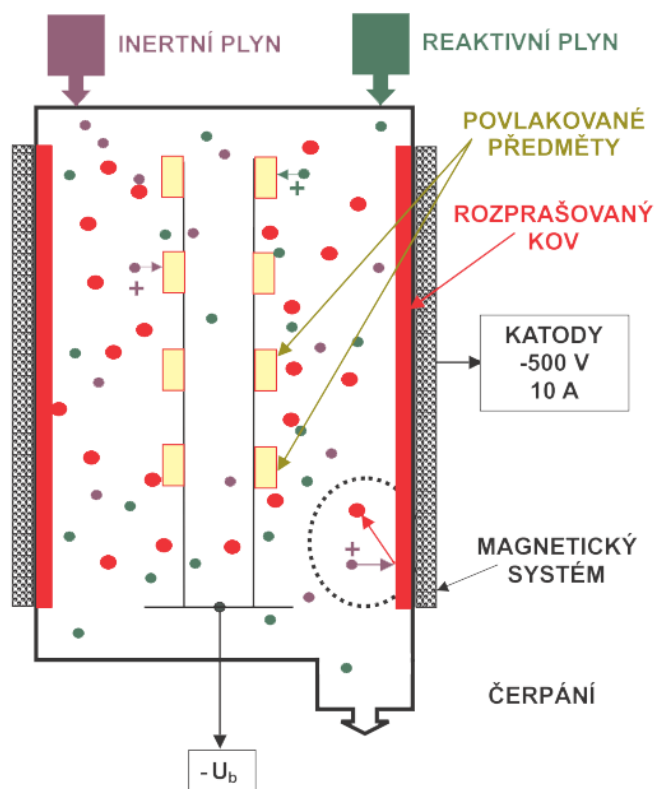
Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) byla původně vyvinuta speciálně pro nástrojové ocele. Její největší výhodou je poměrně nízká depoziční teplota, která se pohybuje do 500°C. Tato teplota zaručuje, že nástroje z rychlořezných ocelí vydrží bez problému depoziční proces. Postupný vývoj této metody umožnil nasazení depozice na slinuté karbidy a jiné materiály.

Metoda PVD je založená na kondenzaci par pevného materiálu na deponovaném povrchu. Jedná se o fyzikální proces, který není doprovázený žádnou chemickou reakcí. V základu se technologie dělí na napařovací a naprašovací metodu.



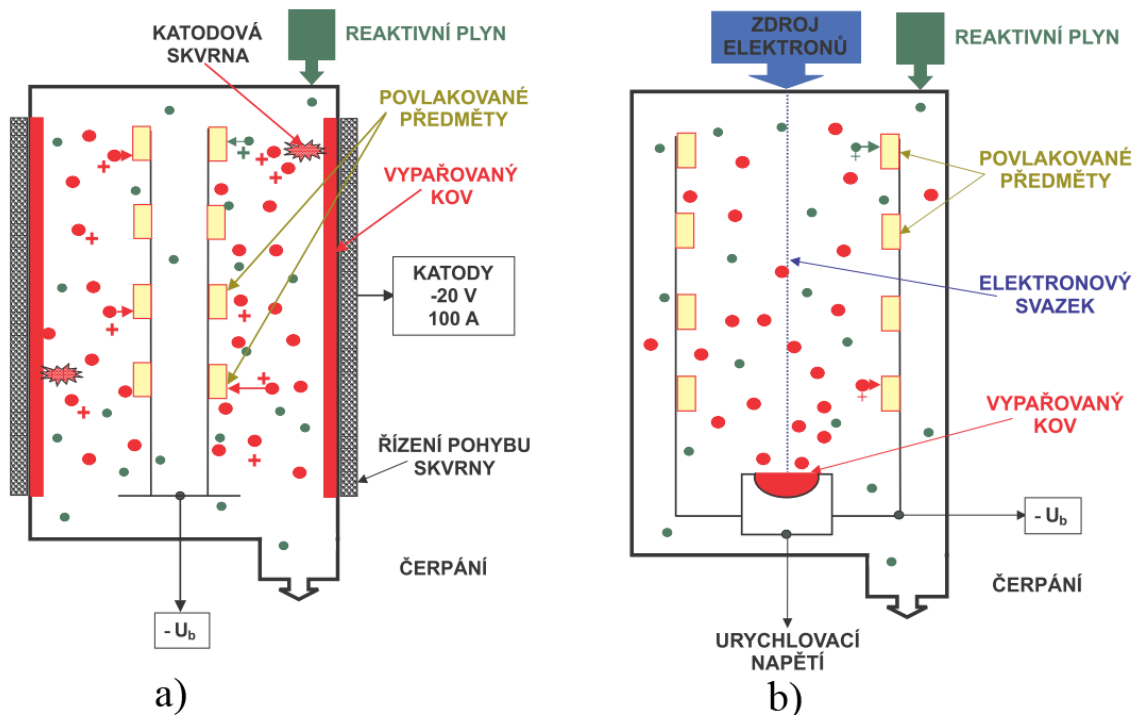
Obr. 4 Schéma vzniku PVD vrstvy [13]

Při naprašování dochází ve vysokém vakuu k bombardování katody (terče) ionty pracovního plynu. Tím jsou atomy odprašovány z terče a deponovány na povrch substrátu. Nejjednodušší naprašování je prováděno v doutnavém výboji rovinné diody, jiné metody jsou magnetronové nebo radiofrekvenční naprašování.



Obr. 5 PVD magnetronové naprašování [13]

Metoda napařování je založená na vysokoteplotním odpaření terče. Metod, jak materiál odpařit je několik. Nejběžnější je odporová metoda, kde je terč zahříván stejnosměrným nebo střídavým elektrickým proudem. Jinými způsoby je napařování elektronovým (EB-PVD) nebo laserovým paprskem (PLD).



Obr. 6 PVD metody napařování - a) odporové, b) elektronové [13]

Pomocí metody PVD se vytvářejí vrstvy o velice malých tloušťkách (1 - 5 $\mu$ m). Díky této vlastnosti je možné nanášet vrstvy a na velice ostré ostří rezných nástrojů s poloměrem zaoblení pod 20 $\mu$ m. Při vlastním nanášení povlaku je nutné s cílovým substrátem neustále pohybovat a tím zajistit rovnoměrnou vrstvu. Při tomto pohybování může docházet k nežádoucímu stínovému efektu, kdy některé plochy jsou zastíněné a tím nedojde k dokonalému nebo vůbec žádnému nanesení povlaku. Proto se tato metoda nehodí pro tvarově rozmanité součásti nebo součásti s požadavkem nanesení vrstvy v dutinách nebo úzkých štěrbinách. Nevýhodou procesu je nutnost udržování vysokého stupně vakua, což klade vysoké technické nároky na zařízení.

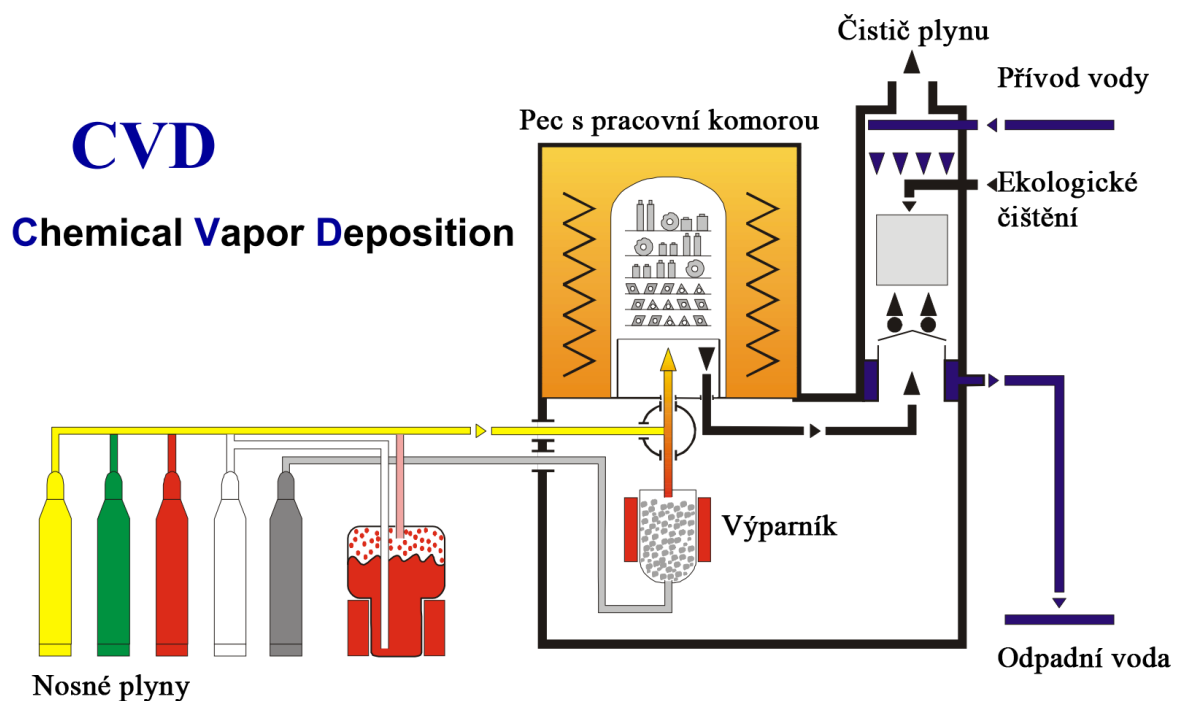
Speciální metody, které vycházejí z této technologie jsou popsány v kapitole 2.3.4.

Zdroje: [6] [7] [13] [14]

### 2.2.4.2 Metoda CVD

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze) je metoda technologicky starší, která probíhá za výrazně vyšších teplot a to až 1200°C. Díky takto vysoké teplotě není možné tuto metodu použít pro rychlořezné oceli. Hlavní využití nachází při povlakování slinutých karbidů a jiných materiálů s vysokou tepelnou odolností.

Proces je založený na chemické reakci plynných sloučenin v plazmě, která se tvoří v těsné blízkosti deponovaného předmětu. Jako nosný plyn bývá použit plynný metan a čistý dusík. Touto metodou se vytvářejí vrstvy o větších tloušťkách (5 – 10μm) v porovnání s PVD metodou. Metoda je vhodná pro tvarově složité součásti, u kterých je možné nanést vrstvu i v dutinách a drážkách. CVD vrstvy mívají větší soudržnost se základním substrátem a lepší třecí vlastnosti. Chemický proces má negativní vliv na životní prostředí. Schéma procesu viz Obr. 7.



Obr. 7 Schéma CVD povlakovacího zařízení [14]

Dalším cílem vývoje CVD metody bylo především snížení pracovní teploty. Byli vyvinuty speciální metody, které jsou blíže popsány v kapitole 2.3.4.

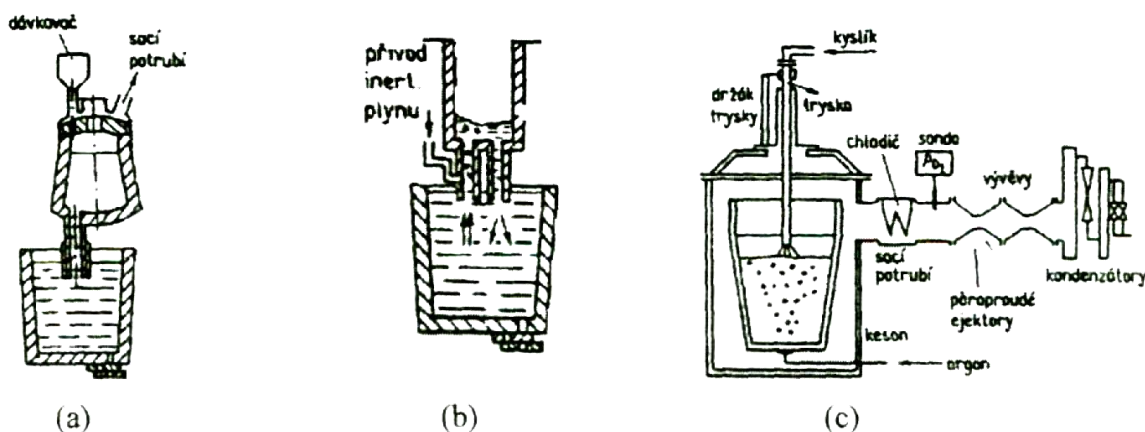
Zdroje: [6] [7] [14]

## 2.3 Moderní způsoby zvyšování řezivosti RO

### 2.3.1 Speciální metalurgické procesy

S požadavkem na čím dál vyšší výkonnost rychlořezných ocelí dochází ke zpřísnění požadavků na mikročistotu materiálů. Primární výroba ocelí se provádí tavením oceli v konvertorech, elektrických nebo indukčních pecích. Chemická čistota oceli je závislá na technologii, jakou byla vyrobena. Pro moderní oceli, na které jsou kladeny vysoké požadavky, tato úroveň chemické čistoty není dostačující, a proto se tyto oceli musejí sekundárně zpracovávat.

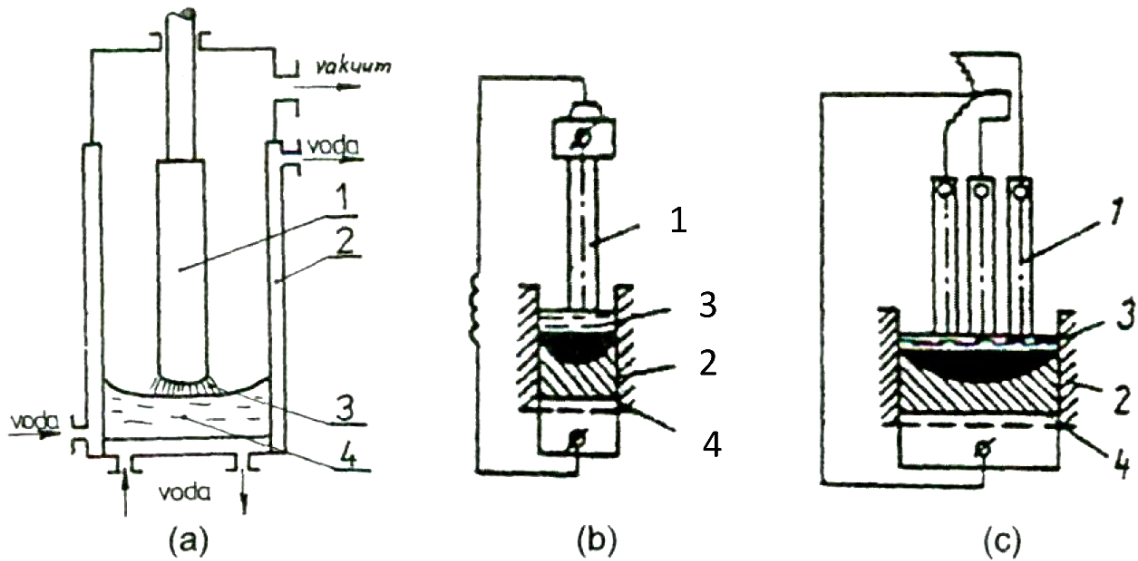
Vysoce čisté oceli nesmí překračovat obsah fosforu 0,005%, síry 0,002% a dusíku 0,003%. „Nejrozšířenějšími postupy sekundární metalurgie jsou různé modifikace vakuování v pánvi nebo v licím proudu. Rozpustnost H a N v tekuté oceli je funkcí parciálního tlaku těchto plynů v okolní atmosféře. Snížením vnějšího tlaku na  $10^{-1}$  až  $10^{-3}$  Pa klesá obsah těchto prvků v oceli. Dále probíhají procesy promývání a čerení oceli argonem, desulfurizace zásaditou struskou a konečné dolegování včetně finální dezoxidace.“ [15] Pro zpracování se používá vakuové odplyňování v kesonu s dávkováním feroslitin. Vakuování je doprovázeno intenzivním varem oceli. Dalším způsobem je vakuové odplynění oceli zdvižným způsobem – DH proces (Obr. 8a), nebo vakuové odplynění běžným způsobem – RH proces (Obr. 8b). Na Obr. 8c je naznačená rafinace postupem VOD (Vacuum-Oxygen-Decarburization), který je v ČR označen názvem Vakuvit.



Obr. 8 Schéma zařízení pro rafinaci oceli, DH proces (a), RH proces (b), VOD (Vakuvit) (c) [15]

Materiály pro práci za vysokých teplot nebo slitiny na bázi Ti, Ni, W a Co při metalurgickém zpracování nemohou přijít do styku s žáruvzdornou vyzdívkou. Proto se musejí vyrábět speciálními postupy. Většinou se vyrábějí vakuovým indukčním tavením (VIM) s následným obloukovým přetavováním (VAR), nebo elektrostruskovým přetavováním (ESR). Schémata zařízení viz Obr. 9.





Obr. 9 Schéma VAR (a), ESR jednofázové zařízení (b), ESR - trojfázové zařízení s jedním krystalizatorem (c)  
1 – Odtavená elektroda, 2 – Krystalizátor, 3 – Roztavená struska, 4 – Ingot [15]

Při procesu přetavování nedochází pouze ke zlepšení chemického složení materiálu, ale i k lepšímu průběhu krystalizace. Veškeré tyto výhody mají za následek menší riziko fatálního selhání řezných nástrojů při obrábění.

Zdroje: [15]

### 2.3.2 Prášková metalurgie

„V dřívějších dobách byla v popředí především snaha o zvýšení odolnosti proti otěru. Tato tendence však velmi rychle narazila na hranice dané při konvenční výrobě oceli fyzikálními okrajovými podmínkami. Zvýšená tvorba hrubě jehlovitých karbidických struktur s jejich špatnou tvářitelností při kování, výrazně sníženou houževnatostí a zvýšenými problémy při třískovém obrábění znamenají pro technickou využitelnost ocelí s obsahem uhlíku pohybujícím se v oblasti 2,15% citelná ohraničení. Teprve s rozvojem práškové metalurgie a její aplikací pro výrobu nástrojových materiálů začátkem sedmdesátých let minulého století mohla být tato „zvuková bariéra“ prolomena. Vývoj této technologie probíhal v Evropě a USA téměř paralelně a vůdčími firmami byly společnosti Stora - Koppaberg (ASP) ve Švédsku a Crucible (CPM) v USA.“ [8]

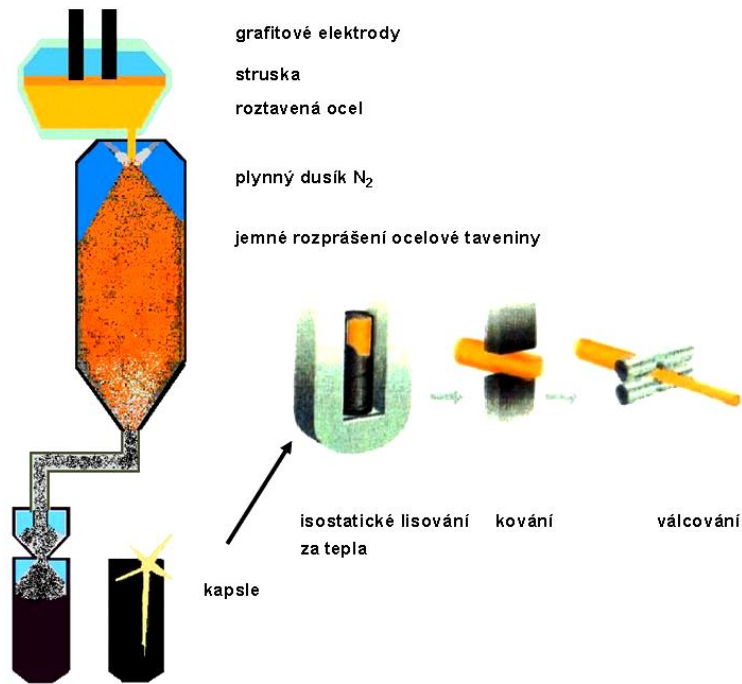
#### **Výroba ocelí pomocí práškové metalurgie:**

- Bez přístupu atmosféry je rozprašována pomocí dusíku vysoce čistá tekutá ocel. Při takto extrémně vysoké rychlosti chlazení oceli je výrazně omezena velikost a růst karbidů legujících prvků.
- Prášek padá při současném dochlazování ve vakuové nádobě dolů, kde je prosíván.
- Poté je plněn do kapslí (stále ve vakuu).
- V kapslích je prášek izostaticky lisován při teplotě 1200°C a tlaku cca. 1200 bar, tím se nataví okraje prášků a spojí se s okolními zrnky. Výsledkem je velice homogenní struktura s izotropními vlastnostmi.
- Následně je materiál kován a válcován do žádaných tvarů, čímž se odstraní pórovitost s velikostí karbidů 3-5 $\mu$ m a zvýší se houževnatost.

Schéma výroby práškových ocelí viz Obr. 10.

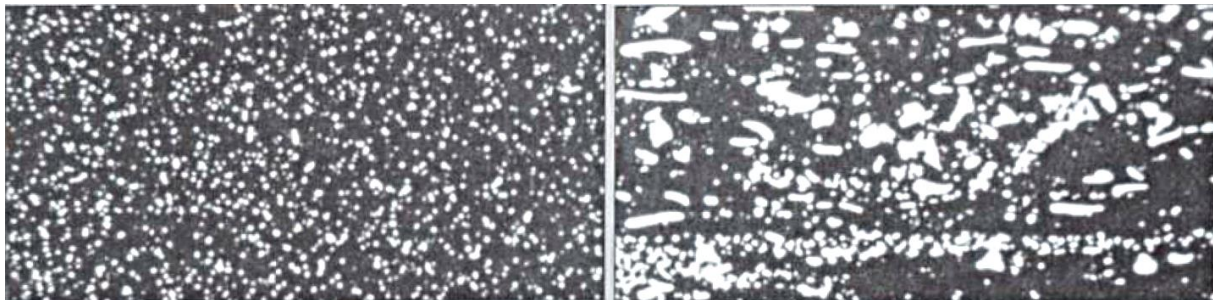
Současná vyspělost této technologie dokáže vyrobit oceli s obsahem uhlíku až 3,4% a legujících prvků až 39%.

Cena ocelí vyráběných práškovou metalurgií je několikanásobně vyšší než stejné, konvenčně vyráběné oceli.



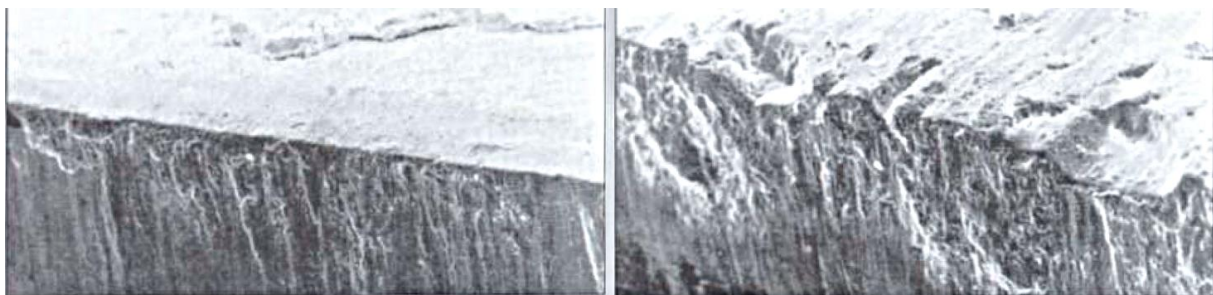
Obr. 10 Výroba ocelí práškovou metalurgií [8]

Na obrázku Obr. 11 je porovnání materiálové struktury práškové a konvenční oceli (zvětšeno 500x). PM ocel má jasně stejnoměrnou strukturu oproti konvenčně vyráběné oceli, která má zřetelně hrubou karbidickou strukturu s řádkovitostí.



Obr. 11 Vlevo struktura práškové oceli, vpravo struktura konvenční oceli

Na obrázku Obr. 12 je ostří nástroje po obrábění. U konvenční oceli dochází v místech shluků karbidů k mikroskopickému vydrolení resp. makroskopickým výlomům materiálu.



Obr. 12 Ostří nástroje po obrábění, vlevo prášková ocel, vpravo konvenční ocel

Zdroje: [8]

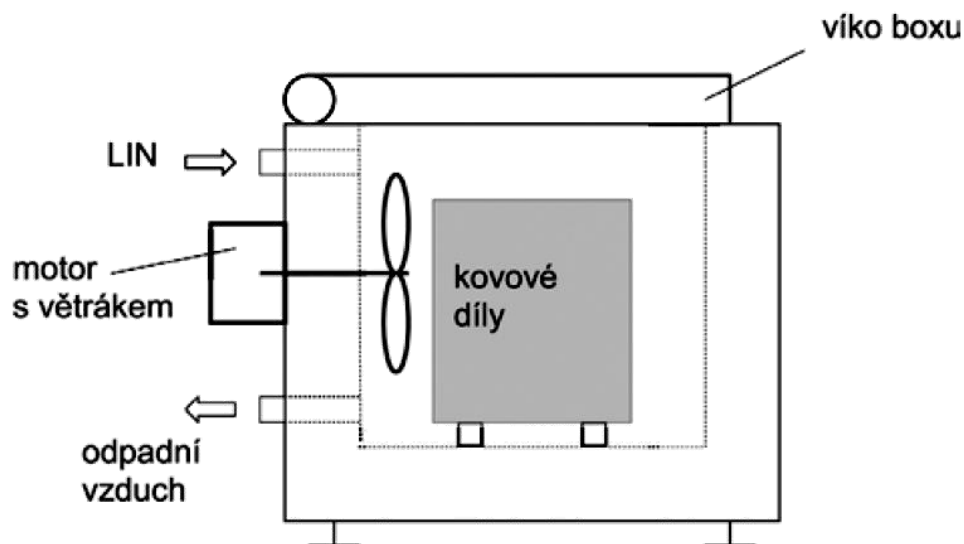
### 2.3.3 Netradiční tepelné a chemicko-tepelné zpracování

#### 2.3.3.1 Kryogenní zpracování

Technologie kryogenní zpracování jinak označené kalení se zmrazováním. V první fázi se provede běžné martenzitické kalení a následně se co nejrychleji provede zamrazení a teplotu nižší než  $M_f$ . Cílem tohoto zpracování je přeměnit co nejvíce austenitu na martenzit, čímž se docílí vyšší tvrdosti, rozměrové stálosti a otěruvzdornosti.

Pro podchlazení materiálu se obvykle používá suchý led, což je směs lihu a tuhého oxidu uhličitého nebo tekutý dusík. Pomocí suchého lihu se dosahuje teploty  $-80^{\circ}\text{C}$  a u dusíku až  $-196^{\circ}\text{C}$ . Přímé zchlazení z austenitizační teploty má za následek vnesení vysokého pnutí do materiálu, což má za následek vznik velkých deformací předmětu nebo až vznik trhlin. Dalšími nevýhodami jsou vysoká spotřeba ochlazovacího média a vznik parního polštáře kolem předmětu při jeho ponoření. Častějším způsobem je napřed předmět zchlazen nad teplotu  $M_s$ , na této teplotě se vydrží až do vyrovnání teplot v celém průřezu (nejčastěji solná lázeň) a následně je předmět podchlazen pod teplotu  $M_f$ , čímž se docílí nepřetržité martenzitické přeměny. Následně je nutné zchlazený předmět postupně přivádět na pokojovou teplotu a následně popustit na nízkou teplotu ( $150^{\circ}\text{C}$ ).

V současné době je možné využít šetrnější postup zchlazování v mrazicích boxech pomocí kapalného dusíku. Předměty se vloží do boxu, do něhož se pomocí rozprašovacích lišt vstříkne dusík. Vznikající výparné teplo ochladí plyn v komoře a zpracovávané předměty. Pomocí ventilátorů je zajištěná cirkulace chladícího plynu s dusíkem a tím rovnoměrné rozložení teploty v celém boxu. Schéma zařízení je na obrázku

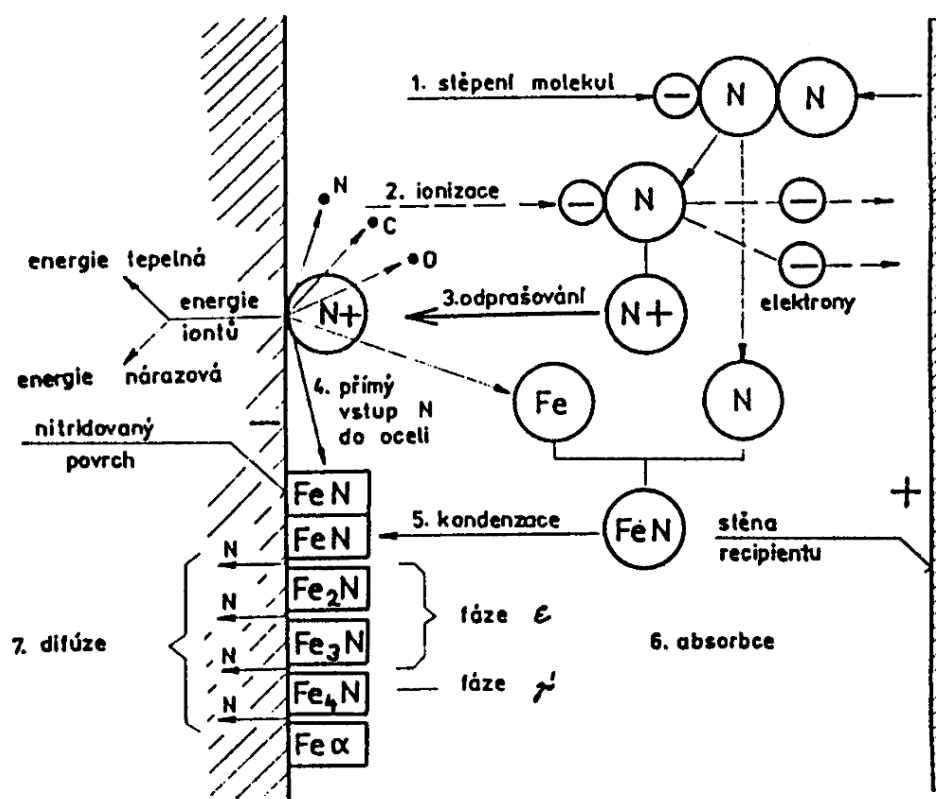


Obr. 13 Schématické znázornění mrazicího boxu [16]

Zdroje: [10] [9] [16]

### 2.3.3.2 Iontová nitridace

Iontová nitridace je někdy označována také jako plazmová nitridace nebo nitridace v doutnavém výboji. Pro sycení povrchu dusíkem je využíváno částečně ionizovaného plazmatu, které obsahuje ionty, elektrony a také značné množství neutrálních částic. Nitridované komponenty (katoda) jsou izolovaně umístěné ve vakuové nádobě (anoda). V nádobě je udržovaný podtlak se zředěnou směsí nitridačního plynu. Po zapojení stejnosměrného proudu o napětí 400-1000V vznikne mezi katodou a anodou elektrické pole o parametrech, aby odpovídalo oblasti anomálního doutnavého výboje. V elektrickém poli dohází ke štěpení plynu a ionizaci. Kladné ionty jsou urychlovány směrem k povrchu nitridovaných komponent. Schématické znázornění procesu viz. Obr. 14.



Obr. 14 Schéma dějů probíhajících při iontové nitridaci [10]

Při dopadu kladných iontů dusíku na součásti se část energie mění na teplo, tím jsou komponenty ohřívány. Nárazem jsou z povrchu vyráženy atomy železa a jiných prvků (odprašování), které se dále srážejí s ionty a kondenzují na povrchu součástí. Odsud pomocí difuze se dusík dostává do povrchu součástí. Část atomů dusíku při srážce s nitridovanými součástmi přímo vstupuje do povrchu.

Iontová nitridace má řadu výhod. Součásti jsou ohřívány dopadem částic na povrch, není potřeba externí zdroj tepla. Proces je snadno říditelný, lze tedy dosáhnout poměrně přesného průběhu a konečných výsledků. Vlastní proces iontové nitridace nevyžaduje žádné zvláštní bezpečnostní opatření. V porovnání s nitridací v plynu je spotřeba plynné atmosféry nižší. Nevýhody iontové nitridace spočívá v použití speciálního zařízení pro udržení

hermetické těsnosti nádoby a sníženou úroveň tlaku. Vlastní řízení procesu vyžaduje vyšší úroveň elektronického řízení.

Iontová nitridace se přednostně hodí pro vysoce legované oceli, u nichž se dosahuje velice vysoké tvrdosti povrchu (nad 1000 HV) a tím odolnosti proti opotřebení. Navíc v materiálu vznikají povrchová tlaková napětí, která zvyšují mez únavy. Technologií se zpracovávají vysoce namáhané součásti, jako jsou ozubená kola, hřídele, zdvihátka ventilů, nástroje pro tlakové lití a mnoho jiných. V některých případech se vytvořit pouze povrchové nitridy bez difuzní vrstvy, na kterou je následně nadeponovaná tenká vrstva metodou PVD nebo CVD. Změnou aktivní atmosféry je možné provádět iontovou karbonitridace.

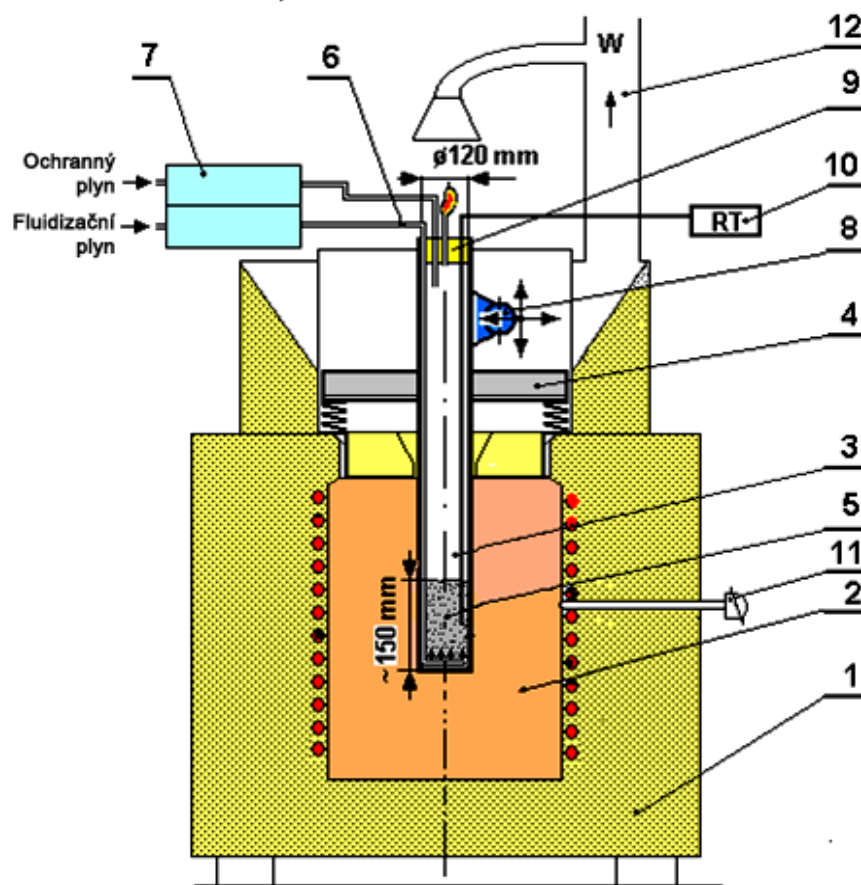
Zdroje: [10] [17]

### 2.3.3.3 Chemicko-tepelné zpracování ve fluidním loži

Jedná se o speciální metodu sycení povrchu součástí atomy různých prvků, nejčastěji uhlíku a dusíku. Difundující prvky se do součástí dostávají ze směsi chemicky aktivních termoprášků, ve kterých jsou součásti zasypany. Zároveň pomocí mechanického vibrátoru a přívodu fluidizačního plynu do retorty je směs prášků vířena. Vířením se celý proces zintenzivní, směs prášků se součástmi je homogenně ohřívána a neustále promíchávána. Výsledkem chemicko-tepelného zpracování tímto způsobem je zkrácení celého procesu, snížení energetické náročnosti a zvýšení životnosti směsi prášků.

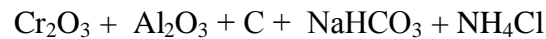
Uvedenou metodou lze zpracovávat libovolné součásti z materiálů vhodných pro chemicko-tepelné zpracování. Technické zařízení bylo navrženo na základě numerických simulací proudění, čímž byl vyvinut vhodný tvar lože, rozmístění trysek, tlak přivedeného plynu a mnoho dalších parametrů specifických pro jednotlivé součásti, použitý prášek a požadované výsledné vlastnosti.

Schéma zařízení je na obrázku Obr. 15.



Obr. 15 Schéma zařízení; 1-Vnější izolační plášť, 2-Topnice, 3-Retorta, 4-Pružinový držák retorty, 5-Směs prášků v loži, 6-Přívod fluidizačního plynu, 7-Přívod ochranného plynu, 8-Mechanický vibrátor, 9-Kryt retorty, 10-Regulátor teploty prášku, 11-Bezpečnostní termočlánek, 12-Odvod vzduchu [18]

Směs termoaktivních mikroprášků se odvíjí od metody chemicko-tepelného zpracování. Pro cementování se ložení prášku následující.



Složení prášku pro karbonitridaci a nitrocementaci je následující.



Fotografie reálného testovacího zařízení je vidět na následujícím obrázku.



**Obr. 16 Zařízení pro chemicko-tepelné zpracování ve fluidním loži [18]**

Jako zdroj mechanických vibrací jsou použity dva typy vibračních motorů od italské firmy O.M.B SRL. Prvním z nich je typ BM 110/10 s příkonem 140W a maximální odstředivou silou 92 kg, druhý typ je BM 40/10 s příkonem 85W a maximální odstředivou silou 35 kg.

Zdroje: [18]



#### **2.3.3.4 Marstressing**

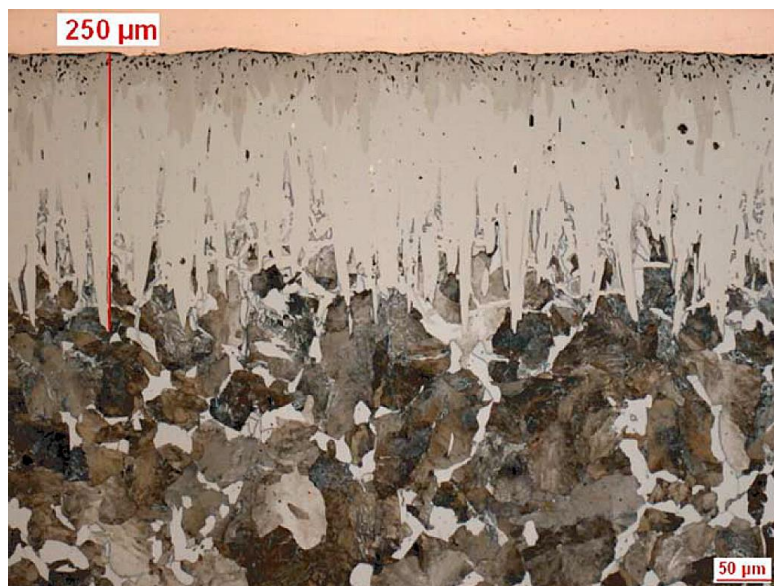
„Tento postup se nezabývá sytící operací (vznikem nitridované vrstvy), ale následným tepelným zpracováním. Provádí se u výrobků, které mají vysoké požadavky na pevnost a tvrdost jádra. U těchto výrobků ohřevem a setrváním na nitridační teplotě dochází k jejich poklesu. Následným tepelným zpracováním nitridovaného výrobku (kalením) dochází ke vzniku vysokých zbytkových tlakových pnutí v povrchových vrstvách zpracovávaného výrobku. Je to způsobeno snížení teploty M s dusíkového austenitu povrchové vrstvy a tím posunu martenzitické transformace během kalení. Vzniklá tlaková pnutí způsobují zvýšení odolnosti proti únavovému namáhání při současném zvýšení ořezavzdornosti.“ [10]

### 2.3.3.5 Boridování

Boridování je proces, při kterém pronikají atomy bóru do povrchu zpracovávané součásti. Tím se na povrchu vytvoří tvrdá intersticiální bórová sloučenina. Tato vrstva je tvrdší než vrstvy vytvořené jinými metodami povrchového vytvrzování a má nízký koeficient tření. Boridované vrstvy lze použít na nelegovaných až vysoce legovaných ocelích, litinách, neželezných kovech, slitinách Ti a Ni a cermetech. Boridovat nelze oceli s obsahem hliníku (max. 0,3%), křemíku (max. 1%) a vyšším množstvím olova a síry. Boridování rychlořezných ocelí je problematické, jelikož austenitizační teplota bývá nad 900°C a při tak vysoké teplotě dochází k natavování boridové vrstvy.

Boridování se provádí obdobně jako jiné druhy chemicko-tepelného zpracování. Nejvýhodnější je prostředí aktivního prášku. Součásti jsou obrobené na čisto, popřípadě vyžíhané na snížení vnitřního pnutí. Takto připravené se zasypávají do aktivního prášku a vkládají se do pecí s odvodem spalin. Pracovní teplota se pohybuje mezi 850 – 1000°C. Doba zpracování se odvíjí od zpracovávaného materiálu a požadavku na vlastnosti povrchové vrstvy. Tloušťka vrstvy bývá až 250µm. Po vyjmutí nádob z pece se obvykle nechávají klidně chladnout na vzduchu, druhou možností je zušlechtění, nicméně austenitizační teplota musí ležet pod 1050°C.

Pro boridované vrstvy je typické zubové spojení se základním materiálem u nízkolegovaných ocelí, viz Obr. 17. Boridování bývá aplikováno na pracovní nástroje, šoupátka, ventily, ozubená kola, šneky a mnoho dalších.



Obr. 17 Boridovaná vrstva, ocel 12 050, 900°C/16h [19]

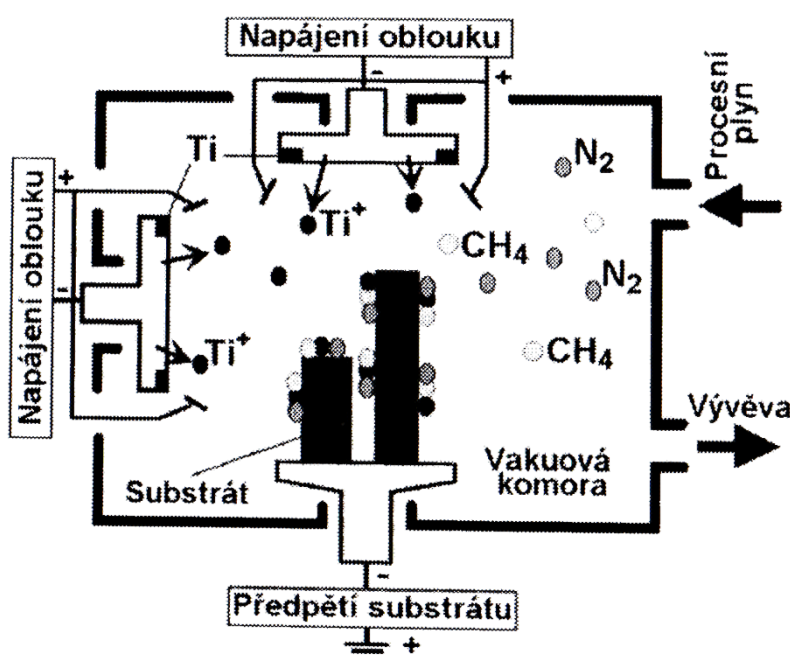
Zdroje: [17] [19]

### 2.3.4 Speciální metody depozice tenkých vrstev

#### 2.3.4.1 Iontová implantace PVD vrstev

Jedná se o hybridní proces, při kterém je deponovaná součást bombardována svazkem částic o vysoké energii. Zdrojem deponovaných částic může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry. Touto metodou je možné nanášet různorodé povlaky na mnohé materiály, jako jsou například zušlechtné oceli nebo plasty. Povlak TiN je možné nanášet již při teplotách 200 – 450°C, proces trvá 2 – 5 hodin.

Výhody této metody jsou přesně definované chemické složení povlaku, rovnoměrnost vrstvy, lepší přilnavost k substrátu, snížení teploty substrátu pod 160°C, a mnoho jiných. Naopak mezi nevýhody patří náročnost řízení procesu, vlivem bombardování povrchu může dojít k přehřátí substrátu nebo ke většímu tlakovému napětí ve vrstvě.



Obr. 18 Iontová implantace PVD vrstev [7]

Zdroje: [7]

#### 2.3.4.2 Plazmaticky aktivovaná CVD metoda

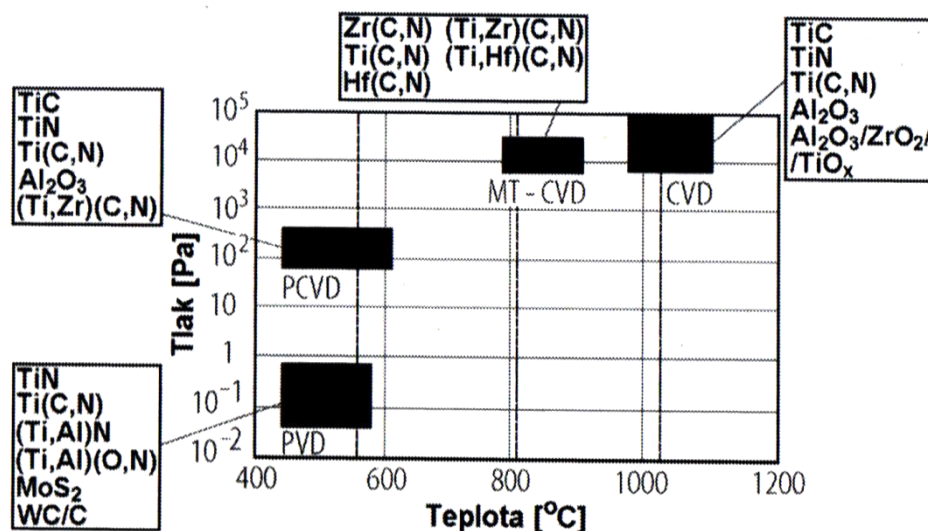
Tato metoda bývá různě značená (PCVD, PACVD – Plasma Assisted CVD, PECVD – Plasma Enhanced CVD, MWPCVD – MicroWave Plasma CVD). Jedná se o metodu s nižší pracovní teplotou, která se pohybuje kolem 600°C a tím tvoří přechod mezi klasickou PVD a CVD metodou. Princip metody je téměř shodný s CVD procesem. U této metody jsou částice reaktivního plynu ionizovány plazmovým výbojem při tlaku 100 – 300MPa. Zobrazení metody v grafu pracovních teplot a tlaků viz Obr. 19.

Zdroje: [7]

### 2.3.4.3 CVD za středních teplot

Metoda depozice za středních teplot bývá označována MTCVD (Middle Temperature Chemical Vapour Deposition). Depozice vrstev probíhá při teplotách 700 – 850°C a jako vstupní sloučenina je použit acetonitril nebo metylkyanid. Tyto sloučeniny jsou vysoce toxické.

Nespornou výhodou je nižší teplota, která má za následek zvýšení houževnatosti povlaku, snížení rizika trhlin a snížení pnutí. Zobrazení metody v grafu pracovních teplot a tlaků viz Obr. 19.



Obr. 19 Pracovní tlaky a teploty různých povlakovacích metod [7]

Zdroje: [7]

### 2.3.4.4 Stripping

Stripping je odstraňování starých tenkých vrstev z nástrojů. Provádí se metodou chemickou a elektrochemickou při použití silných oxidačních činidel a někdy i za účasti elektrického proudu. Pro odstranění vrstev z rychlořezných ocelí se používá roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu při teplotě 70°C. Okamžitě po odstranění povlaku je nutné nástroj opláchnout a povrch pasivovat.

Odstraňování tenkých vrstev z nástrojů ze slinitých karbidů je složitější než u rychlořezných nástrojů. Při odstraňování hrozí odleptání kobaltového pojiva, které je citlivé jak na kyselé, tak zásadité prostředí.

Povlaky na bázi diamantu jsou odolné prakticky všem rozpouštědlům, kyselinám, a to i kyselinám o vysokých koncentracích. Tyto vrstvy je možné odstranit metodou reaktivního plazmového leptání nebo pulzním iontovým svazkem. Stripping těchto povlaků je velice nákladný.

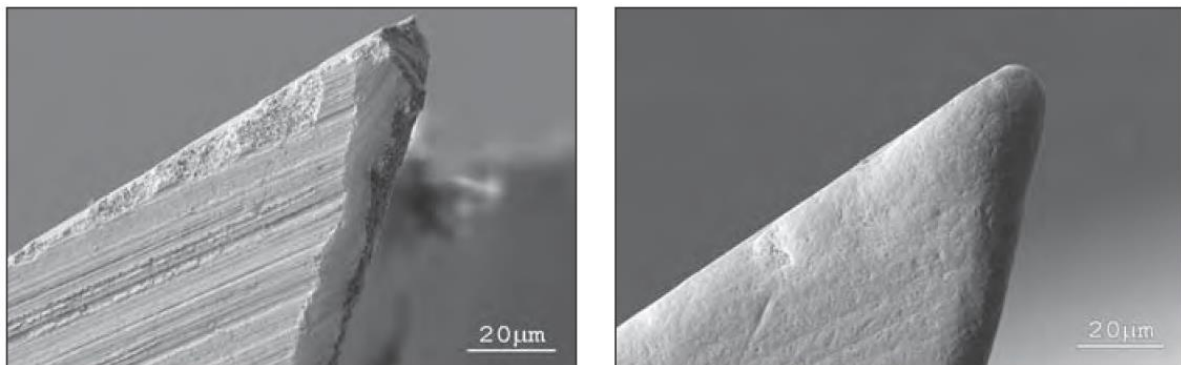
Zdroje: [7]

### 2.3.5 Úpravy geometrie bříty nástroje

Úpravy geometrie bříty se v základu rozdělují na makrogeometrii a mikrogeometrii. Makrogeometrií se rozumí pracovní úhly nástroje. V současné době je obrovský tlak na výkonnost nástrojů, a proto výrobci stále častěji vyrábějí nástroje specializované pro velice úzkou skupinu vhodných aplikací. Tato specializace umožňuje na nástroji vybrousit specifickou geometrii, která vyhovuje konkrétním podmínkám a tím docílit vyšší výkonnosti v konkrétní aplikaci.

Mikrogeometrie nástroje hraje v současnosti ještě větší roli a každý výrobce nástrojů si střeží své know-how. Mikrogeometrií se rozumí vlastní úprava řezné hrany. Úprava řezné hrany se nejčastěji provádí před depozicí tenkých vrstev, jelikož spojení mezi základním materiálem a deponovanou vrstvou je klíčovým parametrem pro úspěšné nanesení vrstvy.

Výchozím stavem před úpravou ostří je broušený nástroj. Na řezné hraně zůstávají stopy po brusném kotouči, otřepy, nedobroušené plošky a velice ostrá řezná hrana. Při obrábění takovýmto nástrojem dochází při prvním kontaktu s obrobkem k ulomení špičky ostří a tím nástroj ztrácí definovanou geometrii. Pokud by na nástroj ve výchozím stavu byla nanášena tenká vrstva, tak opět při prvním kontaktu dojde k odlomení špičky ostří, čímž se odhalí substrát a tenká vrstva ztrácí význam. Rozdíl před úpravou a po úpravě geometrie je porovnán na obrázku Obr. 20.



Obr. 20 Úprava řezné hrany nástroje [20]

Technologií, jak dosáhnout upraveného povrchu je mnoho. Správně zvolená technologie se odvíjí od technického vybavení, požadovaných vlastností nástroje, objemu a rozmanitosti výroby. Nejjednodušší a za určitých předpokladů i nejlepší technologie je leštění nástrojů v ruce. Kartáčování je poměrně rozšířené, avšak takto upravený nástroj není vhodný pro následné povlakování. Používá se měkký kartáč s různými vlákny a brusnou pastou. Hojně používanou metodou velkých výrobců nástrojů je omílání v granulátech. Jako granulát se využívá široké spektrum materiálů, od oxidů měkkých kovů, přes keramická tělíska až po skořápky ořechů. Omíláním dochází k vyhlazení vrubů a otřepů po předchozím broušení na povrchu ostří. Nepravidelné útvary na povrchu slouží jako koncentrátoři napětí, které mohou posléze vést k trhlinám a oddělení povrchových vrstev. Tudíž se touto úpravou zlepší přilnavost deponovaných vrstev. Někdy se provádí omílání i po depozici tenké vrstvy aby se

povlak zbavil makročástic na povrchu. Mikropískování je technologie, kdy je nástroj otryskáván abrazivem unášeným proudem plynu. Jako abrazivo je používán korund nebo karbid křemíku o velikostech částic 20 - 100 $\mu$ . Parametry technologie jako druh abraziva, velikost abraziva, dopadající rychlost nebo vzdálenost trysky od nástroje musí být vhodně zkombinovány, aby docházelo ke správnému otupování nástroje. V opačném případě je nástroje nepoškozený nebo naopak dochází k intenzivnímu úběru materiálu. Náročné je rovněž rovnoměrné opískování celého nástroje. Podobnou technologií je vodní paprsek, kde abrazivo není unášeno tlakovým plynem ale proudem vody. Méně tradičními postupy je například úprava řezné hrany magnetickým práškem nebo pomocí laseru. Laserová metoda se v poslední době stává velice oblíbenou technologií nejen pro úpravu vlastního ostří, ale například i pro tvarově složité utvářeče třísky. Některé z metod jsou porovnány v tabulce Tab. 1.

	<b>Kvalita</b>	<b>Opakovatelnost</b>	<b>Flexibilita</b>	<b>Produktivita</b>	<b>Cena</b>	<b>Jiné vlastnosti</b>
<b>Leštění v ruce</b>	nejlepší	závisí na konkrétním pracovníkovi	velmi vysoká	nízká	pouze plat pracovníků	běžné pro malé firmy
<b>Kartáčování</b>	střední	dobrá	střední	střední	střední, standardní stroje jsou nabízeny	běžně nabízeno pro frézy, obtížně použitelné pro závitníky
<b>Omílání v granulátech s brusnou pastou</b>	dobrá	dobrá	dobrá	střední	střední, standardní stroje jsou nabízeny	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování makročástic
<b>Mikro pískování</b>	střední	střední	nízká	dobrá	střední, standardní stroje jsou nabízeny	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování makročástic, suché i mokré pískování
<b>Vodní svazek</b>	dobrá	dobrá	střední	vysoká	velmi vysoká	vhodné jen pro velké výrobce, nezbytná ochrana výrobků proti korozi
<b>Úprava s magnetickým práškem</b>	dobrá	dobrá	dobrá	střední	vysoká	použitelné také pro leštění šroubovic, odstraňování makročástic, demagnetizace je pak nezbytná

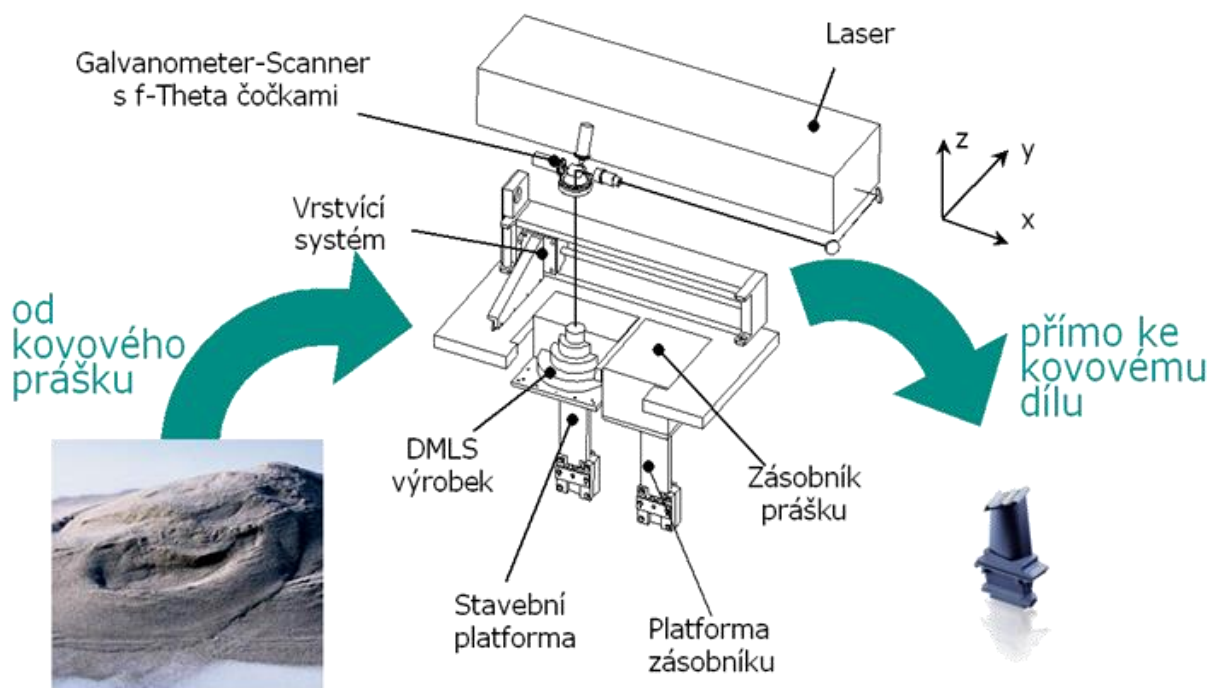
Tab. 1 Porovnání technologií úpravy řezné hrany [20]

Zdroje: [7] [20]

### 2.3.6 Technologie DMLS

Zkratka DMLS vychází z oficiálního anglického označení Direct Metal Laser Sintering což v překladu znamená přímé kovové laserové spékání. Touto metodou lze vyrábět kovové tvarově složité díly z kovových prášků, které mají mechanické vlastnosti plně srovnatelné s obráběnými nebo odlévanými díly.

„DMLS je technologie založená na postupném tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. 3D CAD model výrobku je nejprve „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy, díl je pak stavěn vrstvu po vrstvě. Energie laserového paprsku lokálně taví kovový prášek pouze v konturách řezu, který je definován průnikem dané roviny (vrstvy) tělesem (3D CAD modelem) výrobku. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k základní ocelové platformě. Podpůrné prvky jsou stavěny vrstvu po vrstvě zároveň s výrobkem. Minimální tloušťka vrstvy je 20 mikronů. Laser důkladně taví kov ve formě prášku, a tím je zajištěno dokonalé spojení jednotlivých vrstev. Laserový paprsek je precizně řízen v x a y souřadnicích, osa z je řízena posunem platformy o 20 mikronů při změně vrstvy, což umožňuje dodržení tvarových tolerancí v rozmezí  $\pm 0.1$  mm.“ [21] Výrobní čas je závislý na velikosti, technických parametrech zařízení, tvarové náročnosti a požadované přesnosti výrobku. Schéma zařízení je na obrázku Obr. 21.

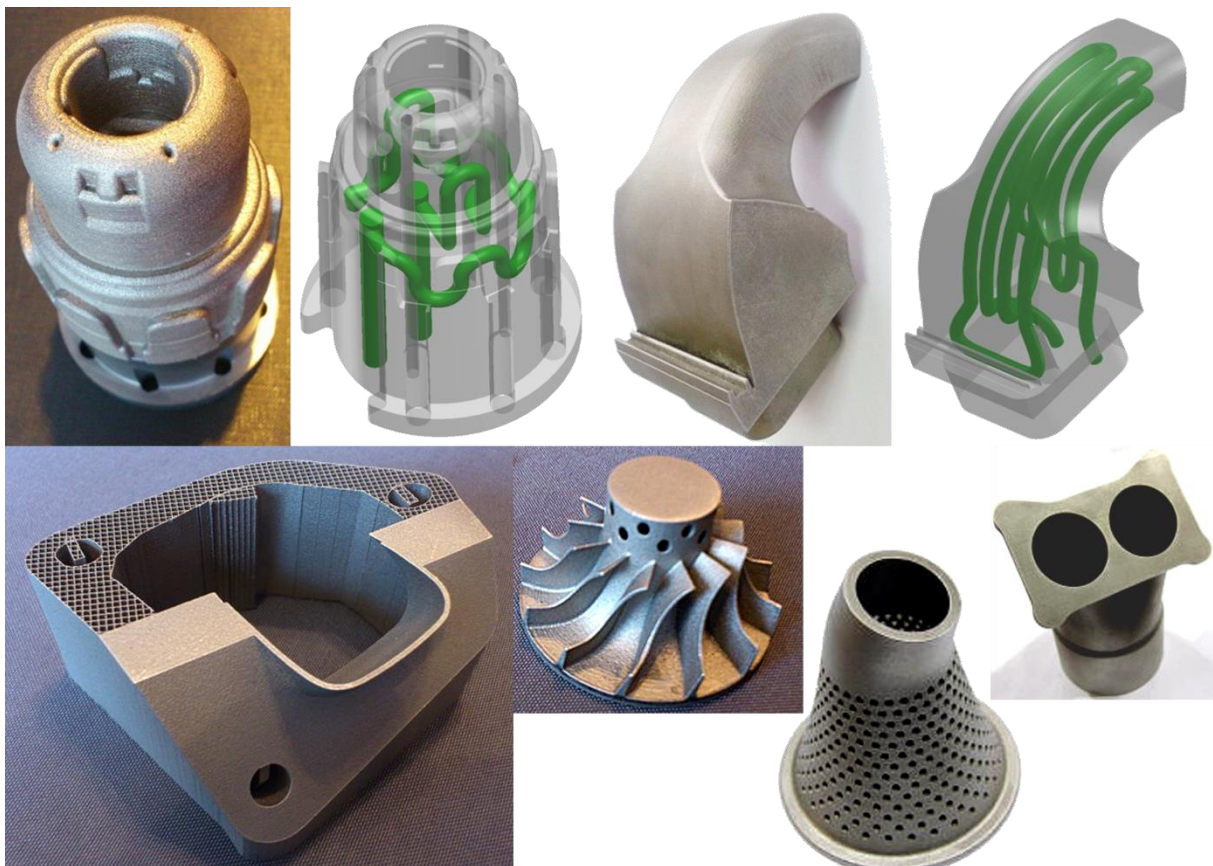


Obr. 21 Princip metody DMLS [21]

„Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nutno odstranit podpůrné struktury z povrchu výrobku, povrch lze dále tryskat, brousit, leštit či obrábět stejným způsobem, jako klasický kovový materiál. Principiální výhodou přímé výroby kovových dílů pomocí DMLS procesu je fakt, že odpadá potřeba výrobního nářadí

(forem, lisovacích nástrojů...). Nespotřebovaný prášek je z 98% znova využíván pro výrobu, tzn., že proces je ekonomický a zároveň ekologický. DMLS umožňuje vytvářet vnější i vnitřní tvary součástí (jakkoli složité) zároveň, což v důsledku přináší možnost přímé výroby tvarově komplexních dílů, které by dříve bylo nezbytné z technologických důvodů vyrobit z několika součástí - je zde určitý potenciál úspory výrobních nákladů, zkrácení doby kompletace a zvýšení spolehlivosti. DMLS proces umožňuje aplikovat drobné konstrukční variace pro každý jednotlivý díl, tzn. výrobu produktů optimalizovaných dle individuálních požadavků zákazníka.“ [21]

Nabídka práškových materiálů je v současné době poměrně široká. Na výběr jsou materiály od lehkých slitin, přes oceli až po super slitiny a kompozity. Jmenovitě jsou na výběr například tyto prášky: bronz, ocel, nerezová ocel 1.4542, martenzitická ocel 1.2709, chrom-kobaltové superslitiny, titan Ti6AlV4 a mnoho jiných. Ukázka výrobků vyrobených touto metodou je na obrázku



Obr. 22 Ukázky výrobků vyrobených metodou DMLS [21] [22]

V současné době tato metoda nachází největší uplatnění v prototypové výrobě tvarově složitých součástí, výroby forem s komplikovaným systémem chlazení a tvarovou náročností, dále v oblasti letectví, automobilového průmyslu, elektroniky a mnoho dalších. Metoda DMLS má za sebou poměrně krátký vývoj, nicméně již nyní je předurčena k masivnímu rozvoji v neďaleké budoucnosti.

Zdroje: [21] [22]



## **3 Návrh experimentů**

### **3.1 Návrh experimentu tepelně zpracovaných soustružnických nožů**

Plán experimentu je otestovat všech 5 nástrojů na jednom obrobku. Noži bude obráběno pokud možno rovnoměrně na jednotlivých průměrech obrobku. Nože budou postupně střídány. Po určité době obrábění bude vyjeto z řezu a změřeno opotřebení nástroje na dílenském mikroskopu. Dle zjištěného opotřebení bude odhadnut další časový úsek obrábění, po němž bude opět provedeno přeměření opotřebení nástroje. Takto se bude obrábět až do definovaného opotřebení nástroje. Dle zkušeností se předpokládá majoritní opotřebení hřbetu nástroje VB. Dále bude pomocí drsnoměru měřena kvalita obrobeného povrchu po každém úseku obrábění. Měření budou hodnoty drsnosti Ra a Rz.

Na základě výsledků z testování bude určen další postup.

### 3.1.1 Testované nástroje

Testováno bude 5 soustružnických přímých uběracích nožů pravých z rychlořezné nástrojové oceli 19830 (Dle ČSN 42 0002), HS 6-5-2 (dle EN ISO 4957), 1.339 (dle EN 10027-2).

Ocel 19830 je rychlořezná výkonná MO-W ocel s vysokou houževnatostí. Jedná se o hojně používanou ocel, ze které se zhotovují nástroje pro obrábění kovových materiálů o střední a menší pevnosti, běžně asi do pevnosti obráběného materiálu 900MPa. Z této oceli se vyrábějí soustružnické nože, frézy, vrtáky, závitníky, protahovací trny, pilové kotouče, nástroje pro práci za studena a mnoho jiných nástrojů.

#### Chemické složení

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]
0,8-0,9	Max. 0,45	Max. 0,45	Max. 0,035	Max. 0,035	3,8-4,6	4,5-5,5	5,5-7,0	1,5-2,2

Tab. 2 Chemické složení oceli 19830 [23]

#### Tepelné zpracování

Žihání na měkko	800-840°C	Ochlazování v peci
Žihání ke snížení pnutí	700-750°C	Ochlazování v peci
Kalení	1220-1250°C	Ochlazování v oleji
	1190-1220°C	Ochlazování v solné lázni 500-550°C
	1150-1170°C	Ochlazování dmýchajícím vzduchem
Prokalitelnost	V celém průřezu používaných nástrojů	
Popouštění	560-580°C	min 3x1/2 až 2h (olej)
	550-570°C	min 3x1/2 až 2h (solná lázeň)
	150-300°C	min 1 až 2h (vzduch)
Teploty přeměny A <sub>C1</sub>	820-870°C	
Teplota přeměny M <sub>S</sub>	155-165°C	
Teplota tváření	1100-900°C	

Teplota [°C]	520	540	560	580	600	620
Tvrdość [HRC]	63	65	66	65	64	62

Tab. 3 Závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě [23]

Typ soustružnického nože je přímý uběrací pravý s průřezem těla 20 x 20mm a délkou 160mm. Ukázka referenčního nástroje s označením 30-1 je na Obr. 23



Obr. 23 Referenční nástroj 30-1

Nástroje mají stejnou řeznou geometrii ale různé tepelné zpracování. Geometrie nástrojů je v Tab. 4.

Název	Označení	Hodnota
Úhel hřbetu	$\alpha$	8°
Úhel břitu	$\beta$	74°
Úhel čela	$\gamma$	8°
Úhel čela pracovní	$\gamma'$	16°
Úhel řezu	$\delta$	82°
Úhel nastavení hlavního ostří	$\kappa$	90°
Úhel nastavení vedlejšího ostří	$\kappa'$	15°
Úhel špičky	$\epsilon$	75°
Úhel sklonu ostří	$\lambda$	0°
Zaoblení špičky	$r_e$	1,5mm
Šířka žlábků utvařeče	-	2mm

Tab. 4 Řezná geometrie nástrojů

### Nástroj 30-1

Nástroj 30-1 je nástroj referenční. Na nástroji bylo provedeno základní tepelné zpracování, tj. zušlechtní na 65 HRC. Toto tepelné zpracování je výchozí pro všechny ostatní nástroje.

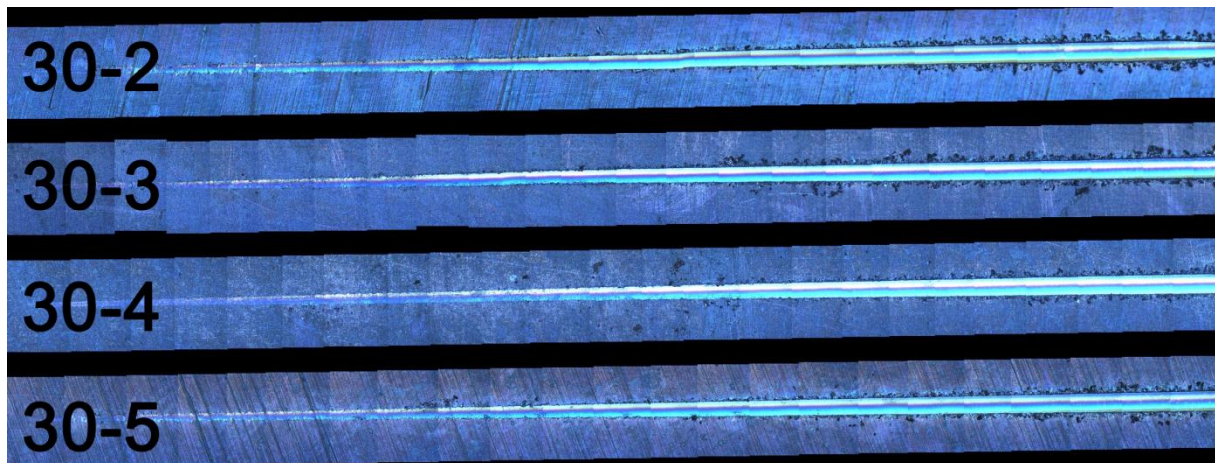
### Nástroje 30-2, 30-3

Výchozím stav nástrojů bylo zušlechtní 65HRC jako u nástroje 30-1. Následně byla provedena karbonitridace při teplotě 540°C po dobu 30 minut. Karbonitridace byla provedena technologií fluidního lože s termoaktivním mikropráškem. Popis této metody je uveden v kapitole 2.3.3.3. Mechanické vibrování bylo provedeno pouze na počátku procesu při zakládání nástroje do retorty. Během procesu byl prášek vířen pouze fluidizačním plynem. Po karbonitridaci následovala oxidace po dobu jedné hodiny.

### Nástroje 30-4, 30-5

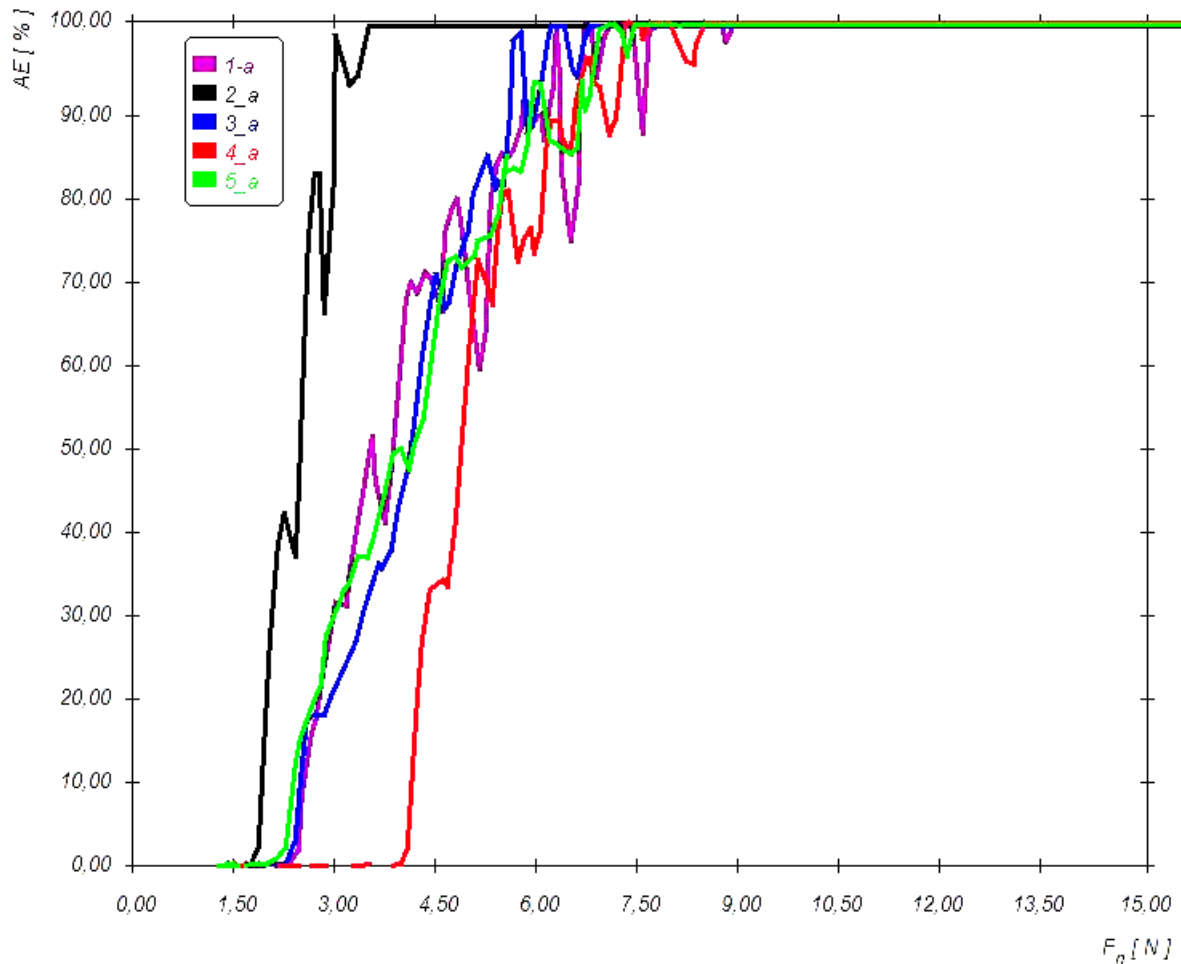
Obdobně jako u nástrojů 30-2 a 30-3 byla provedena identická karbonitridace s tím rozdílem, že mechanické vibrování bylo prováděno po celou dobu procesu. Poté opět následovala oxidace po dobu jedné hodiny.

Na nástrojích byla provedena vrypová zkouška na několika místech. Na obrázku Obr. 24 je porovnání vrypů na hřbetě jednotlivých nástrojů s chemicko-tepelným zpracováním. Nejlepšího výsledku dosáhl nůž 30-4, povrchová vrstva vykazuje nejlepší odolnost proti vnikajícímu indentoru.



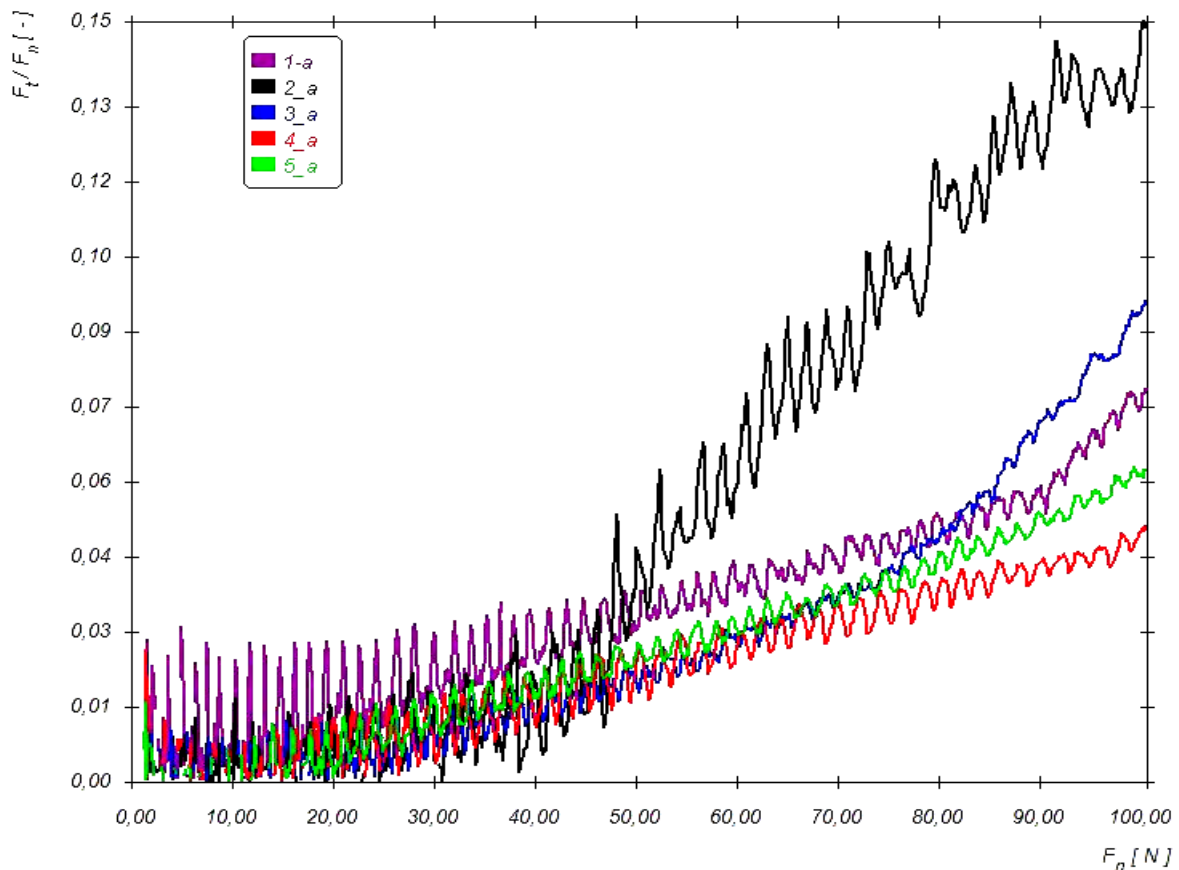
Obr. 24 Vrypová zkouška na hřbetě nástroje blízko ostří

Dále byla zaznamenávána akustická emise. Souhrnné výsledky z měření akustické emise na čele nástroje blízko ostří s indentorem 0,2mm jsou v grafu Graf 1. Z průběhu je zřetelné, že ke křehkému porušení docházelo nejvíce na noži 30-2 a naopak nejvyšší houževnatost vykazoval nůž 30-4.



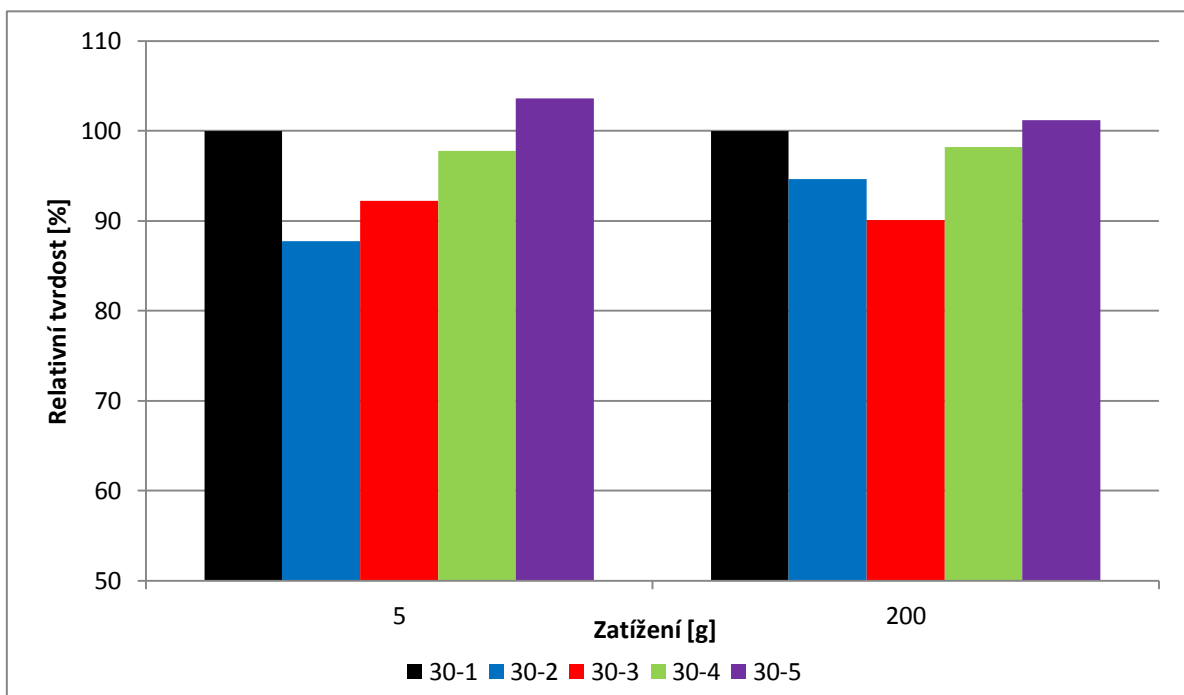
Graf 1 Souhrnný průběh akustické emise

Na grafu Graf 2 je zaznamenán průběh koeficientu tření na normálové síle. Ze závislosti je patrné, že nejlepších výsledků dosáhl nůž 30-4 a naopak nejhorších nůž 30-2.



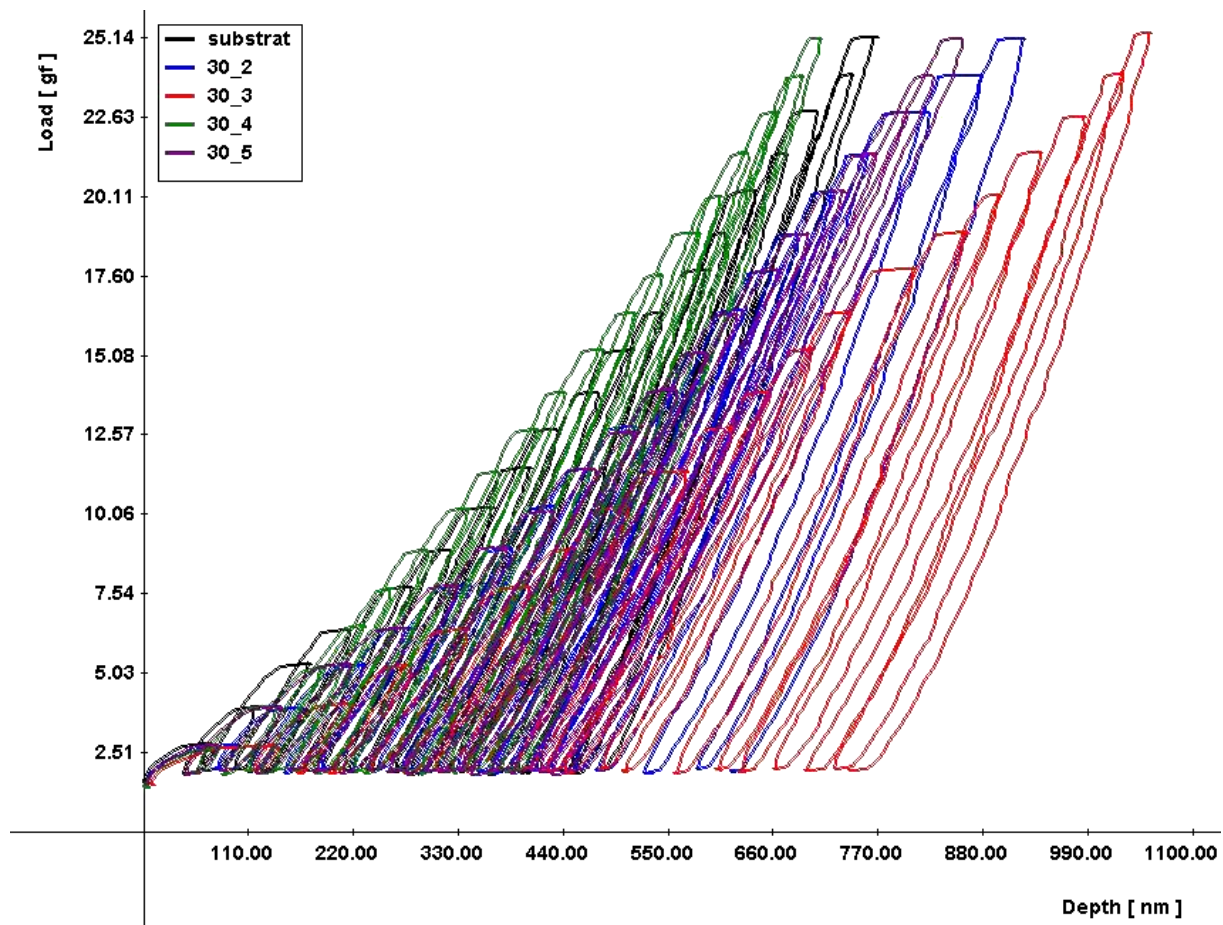
Graf 2 Souhrnný graf závislosti koeficientu tření na normálové síle měřený na čele nože blízko ostří

Dalším prováděným testem byla nanoindentační zkouška, která byla prováděna ve třech režimech. Dvakrát jako statická indentace se zatížením 5 a 200. Výsledky ze statického zatěžování byly shrnuty do grafu Graf 3.



Graf 3 Relativní tvrdost vztažená k referenčnímu nástroji statické nanoindentační zkoušky

Třetím způsobem byla cyklická indentace se zatížením 25g, jejíž záznam je v grafu Graf 4. Z grafu je patrná nejvyšší odolnost proti indentátoru u nože 30-4 a naopak nejméně odolný byl nůž 30-3.



Graf 4 Záznam cyklické indentace se zatížením 25gramů

Ze všech testů prováděných na nástrojích je patrná značná rozdílnost výsledků, a to hlavně v porovnání nástrojů s totožným tepelným zpracováním. Nástroje, ač byly zpracovány totožným technologickým postupem, tak byly zpracovány fluidní karbonitridací každý zvlášť. Tato skutečnost vnáší do výsledného zpracování jistou různorodost, která je zapříčiněná jistou nahodilostí celého procesu fluidní karbonitridace. Průběhy akustické emise na koeficientu tření jsou silně závislé na jakosti broušeného povrchu. Nože neměly žádné povrchové zpracování po broušení.

Celkově výsledky předběžně ukazují, že chemicko-tepelně zpracované nože nemají výrazně lepší výsledky než referenční nůž 30-1. Celkově se jeví, že nože 30-2 a 30-3 karbonitridované s mechanickou vibrací pouze na počátku procesu, jako celkově houževnatější a povrchová vrstva není tak dobře spojena se základním materiálem. Oproti tomu nože 30-4 a 30-5 vibrované po celou dobu jsou celkově tvrdší a povrchová vrstva je lépe spojena se základním materiálem, což je velký přínos fluidizace s mechanickým vibrováním.

### 3.1.2 Obráběný materiál

Pro experimentální obrábění bude použita běžná nelegovaná konstrukční uhlíková ocel 11523.0 (dle ČSN 42 002) o rozměrech polotovaru  $\varnothing 115 \times 600$  mm.

Ocel 11523 je běžná ocel, která se používá hlavně na svařované konstrukce všeho druhu. Chemické složení je uvedeno v následující tabulce Tab. 5.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	N [%]
Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.
0,2	1,6	0,55	0,04	0,04	0,009

Tab. 5 Chemické složení oceli 11523 [24]

Obrobitelnost ve stavu vyžíhaném na měkko je 15b, minimální pevnost v tahu 520MPa, minimální mez kluzu 355MPa. Tento materiál je v technické praxi velice oblíbený a to díky své nízké ceně, dostačujícím mechanickým vlastnostem pro mnoho aplikací a velmi dobrou obrobitelností.

### 3.1.3 Volba řezných podmínek

Řezné podmínky jsou zvoleny s ohledem na použitý stroj Masturn 50, použité soustružnické nože a obráběný materiál. Dalším kritériem je určitá návaznost na předchozí testování obdobných řezných materiálů a vůbec dlouhodobější povaha testování na Katedře technologie obrábění. V neposlední řadě hrají nemalou roli i zkušenosti odborníků z praxe.

Řezné podmínky jsou následující. Řezná rychlost  $v_c=56$ m/min, hloubka řezu  $a_p=2$ mm, posuv na otáčku  $f_{ot}=0,12$ mm. Jako řezné prostředí je použit vnější přívod chladicí kapaliny přímo do místa řezu. Jako majoritní opotřebení se předpokládá opotřebení hřbetu, kritérium opotřebení  $VB_{B\text{ krit}}=0,2$ mm



### 3.1.4 Testovací zařízení

Testování tepelně zpracovaných soustružnických nožů bude prováděno v halových laboratořích Katedry technologie obrábění na ZČU v Plzni.

#### 3.1.4.1 Soustruh Masturn 50 C/800

Jedná se o univerzální hrotový soustruh od českého výrobce obráběcích strojů Kovosvit MAS ze Sezimova ústí. Soustruh je vybaven řídicím systémem Heidenhain Manual plus. Soustruh disponuje kontinuální změnou pracovních otáček vřetene, což umožní při obrábění různých průměrů obrobku dodržet konstantní řeznou rychlost.



Obr. 25 Masturn 50 C/800

#### Hlavní parametry stroje:

- Oběžný průměr nad ložem 500 mm
- Oběžný průměr nad suportem 350 mm
- Vzdálenost mezi hroty 800 mm
- Otáčky 20 - 3000 /min
- Max. hmotnost obrobku 350 kg

### 3.1.4.2 Dílenský mikroskop Multicheck Pc 500

Dílenský mikroskop od firmy Blickle Werkzeuge Gmbh & Co. Kg dokáže měřit s přesností na 0,005mm. Mikroskop se skládá z několika hlavních částí. Základní granitová deska, pojezdové konzoly s kuličkovými šrouby, CCD kamera a počítač. Jako příslušenství patří k mikroskopu sada objektivů (10x, 30x, 75x, 150x), upínací přípravky, světelný zdroj a software.



Obr. 26 Dílenský mikroskop Multicheck PC 500 [25]

### 3.1.4.3 Drsnoměr MarSurf M 300.

Pro měření drsnosti obrobenej plochy bude použit drsnoměr MarSurf M 300 od německé firmy Mahr. Jedná se přenosný drsnoměr s bezdrátovou měřicí hlavou pro snadné použití. Přístroj má velký barevný displej, který zobrazuje nastavené parametry a naměřené hodnoty. Dále obsahuje vnitřní paměť pro 40 tisíc naměřených hodnot a 30 profilů.

#### Charakteristické parametry

- Měřicí rozsah do 350  $\mu\text{m}$  (.014 in)
- Jednotky  $\mu\text{m}/\mu\text{inch}$  volitelně
- Normy: ISO/ASME/JIS a MOTIF volitelně
- Délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288/ ASME B46.1:  
1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (0.07 in, 0.22 in, 0.7 in)  
i dle EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
- Počet měřicích drah: volitelně 1 až 5
- Automatická volba filtru a měřené dráhy
- Vyhodnocované parametry:  
DIN/ISO: Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv,  
Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rt, R3z, R<sub>Pc</sub>, R<sub>mr</sub>, R<sub>Sm</sub>, R<sub>sk</sub>  
JIS: Ra, Rz, RzJIS, Sm, S, tp  
ASME: Rp, Rpm  
MOTIF: R, Ar, Rx, W, CR, CL, CF
- Znázornění překročení tolerance na displeji včetně záznamu měření
- Automatické nebo manuální nastavení stupnice
- Tisk R-profilu (ISO/ASME/JIS), P-profilu (MOTIF) a záznamu měření
- Datový výstup s nebo bez časových údajů
- Integrovaná paměť pro 40 000 naměřených hodnot a 30 profilů
- Dynamické funkce pro kalibraci
- Možnost uzamčení nastavení přístroje s možností použití hesla



Obr. 27 Drsnoměr MarSurf M 300 [26]

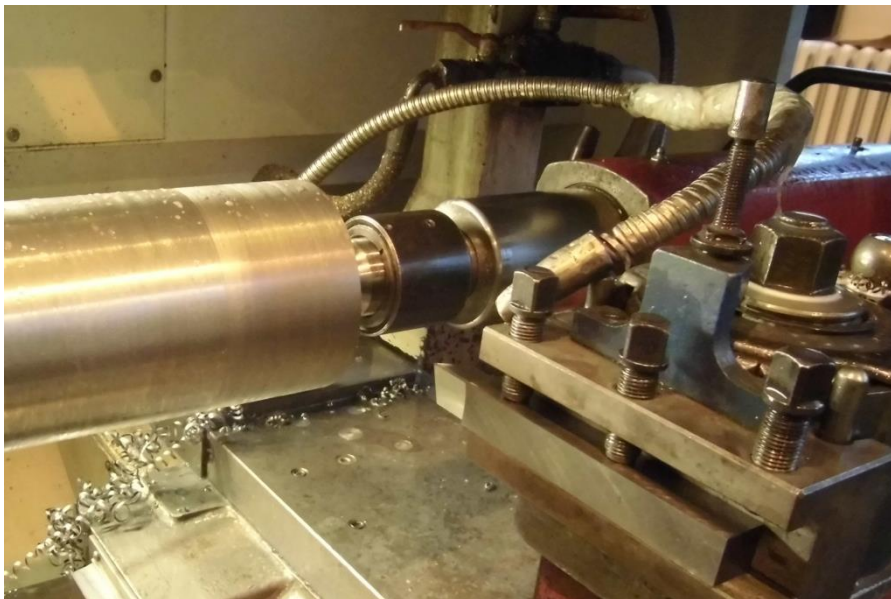
Zdroje: [26]

## 4 Realizace experimentů

### 4.1 Průběh experimentu

Vlastní testování nástrojů probíhalo dle návrhu popisovaného v kapitole 3.1. Obrábění probíhalo na soustruhu Masturn 50 v manuálním režimu, kde po celou dobu obrábění je nutné držet tlačítko, což je pro obsluhu velice nepříjemné.

Do soustruhu byl obsluhou stroje upnutý polotovár z materiálu ČSN 11523, délky 600mm. Po upnutí byl zarovnán soustružnickým nožem s VBD na průměr 119mm. Jako první nástroj byl testovaný referenční nůž 30-1. Řezné podmínky byly nastaveny dle kapitoly 3.1.3. Hned od počátku obrábění docházelo ke chvění celé obráběcí soustavy. Byly částečně korigovány řezné podmínky, což nevedlo ke zklidnění řezu. Dále byl vyměněn opěrný hrot v koníku za větší a koník byl pevně zafixován k loži stroje. Tato opatření částečně zklidnila proces obrábění, nicméně stále docházelo k vibracím. Tato skutečnost vycházela hlavně z velice dlouhého obrobku (600mm) a poměrně malého průměru (119mm). Tyto parametry zapříčinily, že obrobek pro dané řezné podmínky neměl dostatečnou tuhost. Nožem byla obrobena cca. třetina délky obrobku za 8 minut řezu nástroje. Během obrábění se tvořila dlouhá soudržná stuhovitá tříska, která měla tendenci namotávat se na nástroj. Obsluha stroje musela často namotanou třísku odstraňovat.



Obr. 28 Pracovní prostor soustruhu

Dalším testovaným nástrojem byl nůž 30-2. Tento nůž byl opět v řezu 8 minut a obráběl střední část obráběné délky polotovaru. Zde se opět objevovalo chvění při obrábění, nicméně již v menší míře než u předchozího nástroje. Tato skutečnost byla přisuzována místu řezu, které bylo postupně čím dál bližší ke sklíčidlu, a tím byl obrobek tužší. Opět se tvořila dlouhá soudržná stuhovitá tříska.

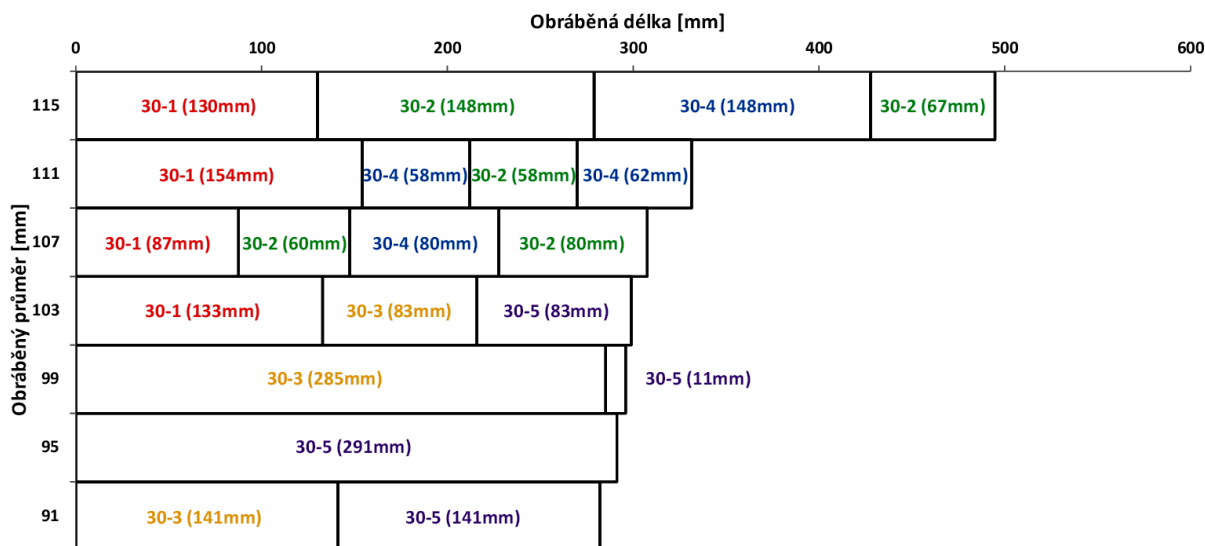
Následující část polotovaru byla obráběna nožem 30-4. Vzhledem k velké blízkosti místa řezu u sklíčidla již téměř vymizelo chvění při obrábění a řez byl velice klidný. Opět se s nožem obrábělo 8 minut.

Poslední část obráběné vrstvy byla dokončena nástrojem 30-2. Obrábění trvalo 3:36 minuty, řez byl velice klidný.

Po obrobení celé délky byl polotovar zkrácen, aby byli nežádoucí vibrace eliminovány. Chvění by mohlo mít vliv na výsledky celého experimentu, a také má neblahý vliv na testovací zařízení. Druhou možností by mohla být úprava řezných podmínek, nicméně toto řešení by nemuselo vést ke snížení vibrací a naopak by mohlo vést ke zkreslení výsledků opotřebení. Polotovar byl zkrácen na délku 350 mm.

Po změně polotovaru byl jako první použit referenční nástroj 30-1, kterým bylo obráběno dalších 8 minut. Během obrábění zcela vymizely nepříjemné vibrace a řez byl velice klidný. Tvar třísky byl stále stejný.

Další směr testování se již ubíral stále stejnou cestou. Systém střídání nástrojů je naznačený na Obr. 29. Přednostně bylo obráběno s nástroji 30-1, 30-2 a 30-4, a to z důvodu rozdílného tepelného zpracování. Nástroje 30-2 a 30-3 byly totožné stejně jako nástroje 30-4 a 30-5. Popis nástrojů je detailně zpracován v kapitole 3.1.1. Po otupení první řady nástrojů se přikročilo k testování zbývajících dvou nástrojů 30-3 a 30-5. Vzhledem k již předběžně vyhodnoceným výsledkům totožných nástrojů bylo přikročeno k rozdílným intervalům měřených úseků. Aby se získala lepší představa o opotřebení břitu na začátku obrábění, byla zvolena doba obrábění 4 minuty. Po tomto úseku následoval delší úsek a na závěr opět kratší.



Obr. 29 Schéma střídání nožů při obrábění

## 4.2 Nástroj 30-1

Referenční nástroj 30-1 byl zařazený jako první při testování. První časový úsek byl zvolený v délce 8 minut, takto dlouhý úsek byl zvolen s přihlédnutím na předchozí testování podobných řezných materiálů a na celkové zkušenosti obsluhy stroje. Po skončení obrábění bylo naměřeno opotřebení hřbetu 0,041 mm. Naměřené výsledky jsou shrnuté v tabulce Tab. 6. Takto velké opotřebení bylo předpokládáno. Snímek opotřebení je na Obr. 30. Již po prvním časovém úseku se začalo projevovat vrubové opotřebení  $VB_{krit}$ , které se projevovalo na největším obráběném průměru, tj. 2 mm od špičky nože.

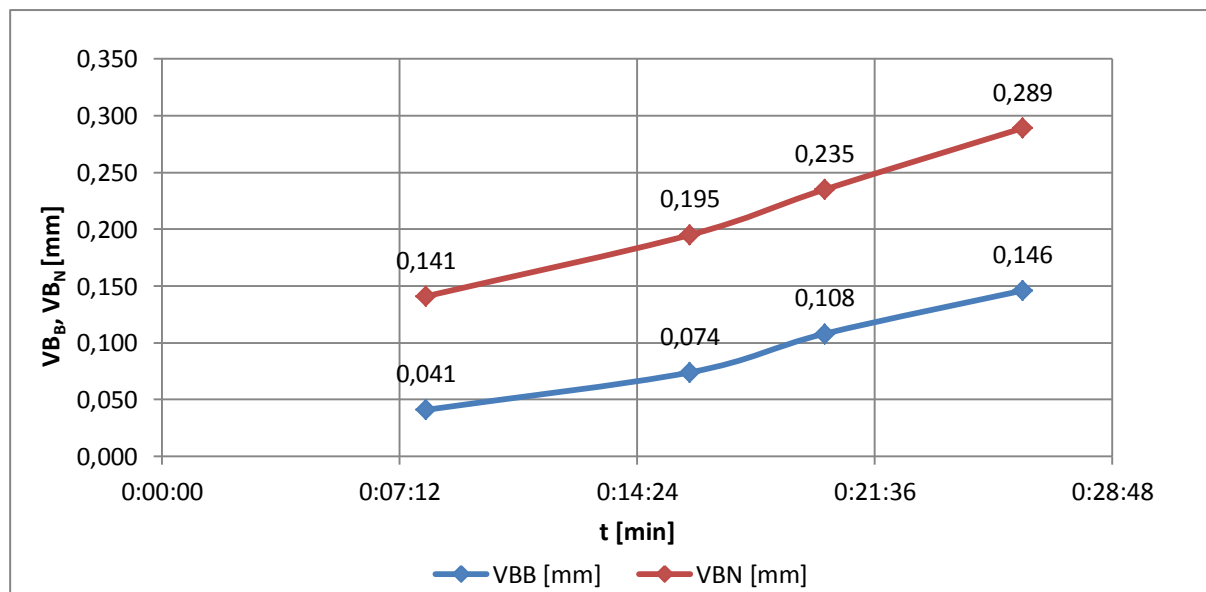
Následující časový úsek byl zvolen opět v délce 8 minut. Vrubové opotřebení se prohloubilo a navíc se objevila zřetelná oblast tepelně ovlivněné oblasti, která je na Obr. 30 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-1 viditelná jako tmavá oblast kolem ostří.

Následující dva časové úseky již byly zkráceny na dobu čtyř a šesti minut, přičemž testování bylo ukončeno na hodnotě opotřebení 0,146 mm. Nebylo dosaženo stanoveného maximálního opotřebení, jelikož nemělo smysl pokračovat vzhledem k výsledkům ostatních nástrojů uvedeným v následujících kapitolách.

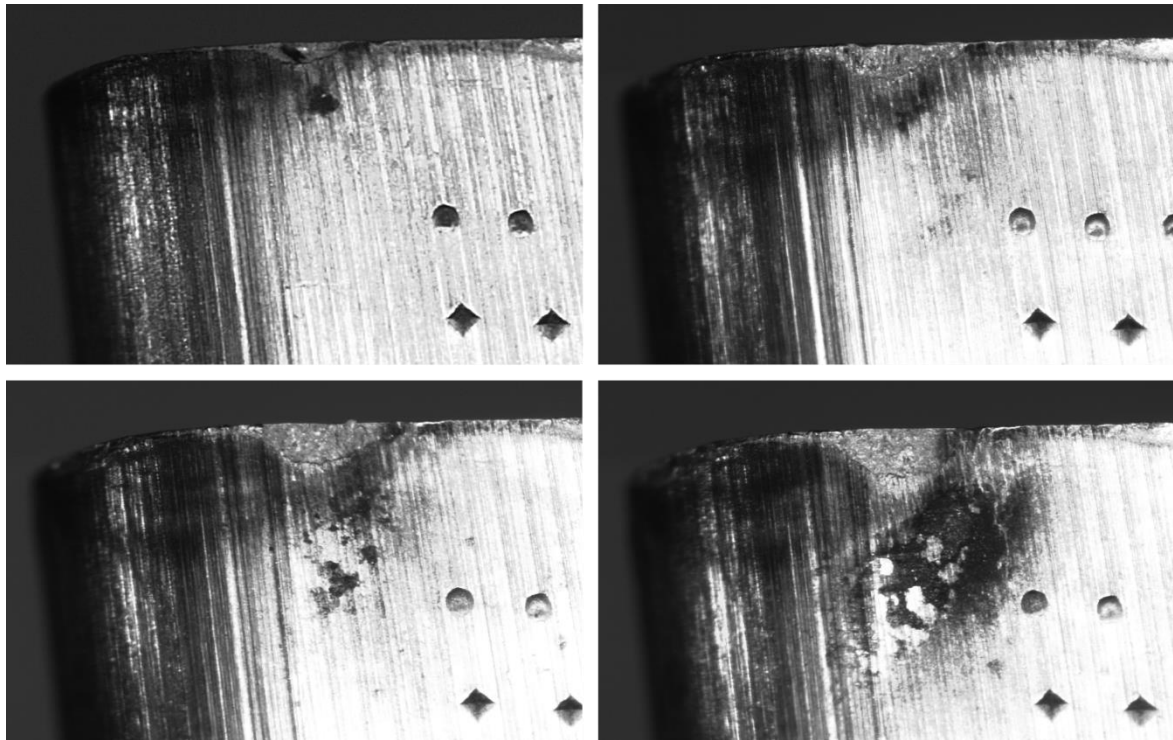
Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30-1	t [min]	0:08:00	0:16:00	0:20:05	0:26:05	
	$VB_B$ [mm]	0,041	0,074	0,108	0,146	
	$VB_N$ [mm]	0,141	0,195	0,235	0,289	
	$R_a$ [ $\mu$ m]	2,04	1,95	1,96	2,17	
	$R_z$ [ $\mu$ m]	11,08	11,40	11,52	12,49	

Tab. 6 Naměřené hodnoty nástroje 30-1

Celkový průběh opotřebení nástroje na hřbetě je uvedený v grafu Graf 5. Zde je vidět pozvolný, téměř lineární nárůst opotřebení.

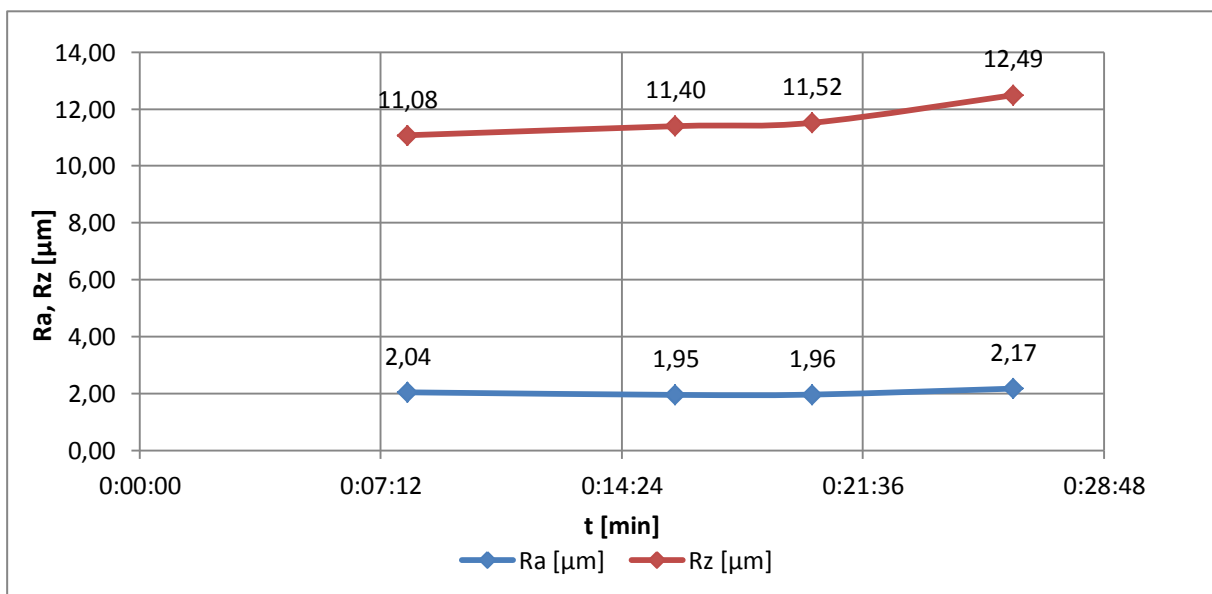


Graf 5 - Průběh opotřebení nástroje 30-1



Obr. 30 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-1

Průběh drsnosti obrobeneho povrchu je patrný v grafu Graf 6. Drsnost povrchu má velice malou, ale stoupající tendenci. Tento jev je přisuzován zvyšujícímu se opotřebení a tím stále většímu vlivu nárůstku na nástroji, který má negativní vliv na jakost obrobene plochy. Další vliv může mít postupně se zvětšující opotřebení špičky nástroje.



Graf 6 Průběh drsností obrobeneho povrchu nástroje 30-1

### 4.3 Nástroj 30-2

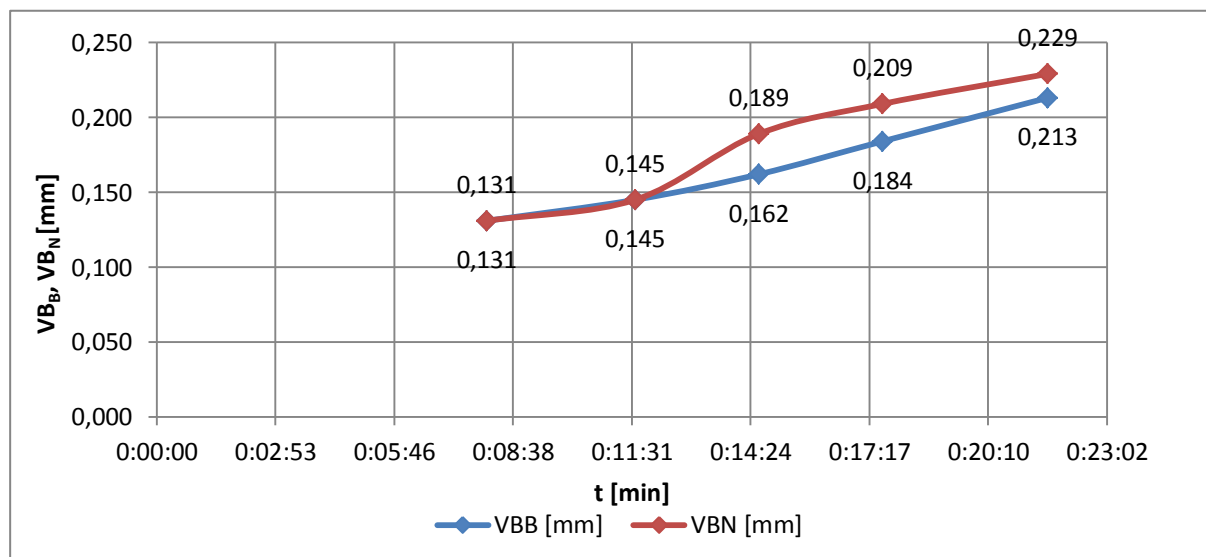
Na základě opotřebení referenčního nástroje byl první úsek zvolen rovněž 8 minut s předpokladem, že nástroje s pokročilým chemicko-tepelným zpracováním budou dosahovat menšího opotřebení. Po prvním testovaném úseku byla naměřena hodnota 0,131 mm. Naměřené výsledky jsou shrnuté v tabulce Tab. 7. Více než trojnásobné opotřebení než u referenčního nástroje bylo překvapivé. Odlišný byl tvar otupení, který byl rovnoměrný, bez výraznějšího vrubového opotřebení.

Následující časové úseky byly voleny výrazně kratší, maximálního opotřebení bylo dosaženo po cca 20 minutách nástroje v řezu.

Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30-2	t [min]	0:08:00	0:11:36	0:14:36	0:17:36	0:21:36
	VB <sub>B</sub> [mm]	0,131	0,145	0,162	0,184	0,213
	VB <sub>N</sub> [mm]	0,131	0,145	0,189	0,209	0,229
	R <sub>a</sub> [μm]	2,08	1,96	1,90	1,80	1,70
	R <sub>z</sub> [μm]	11,70	11,50	10,70	10,78	10,60

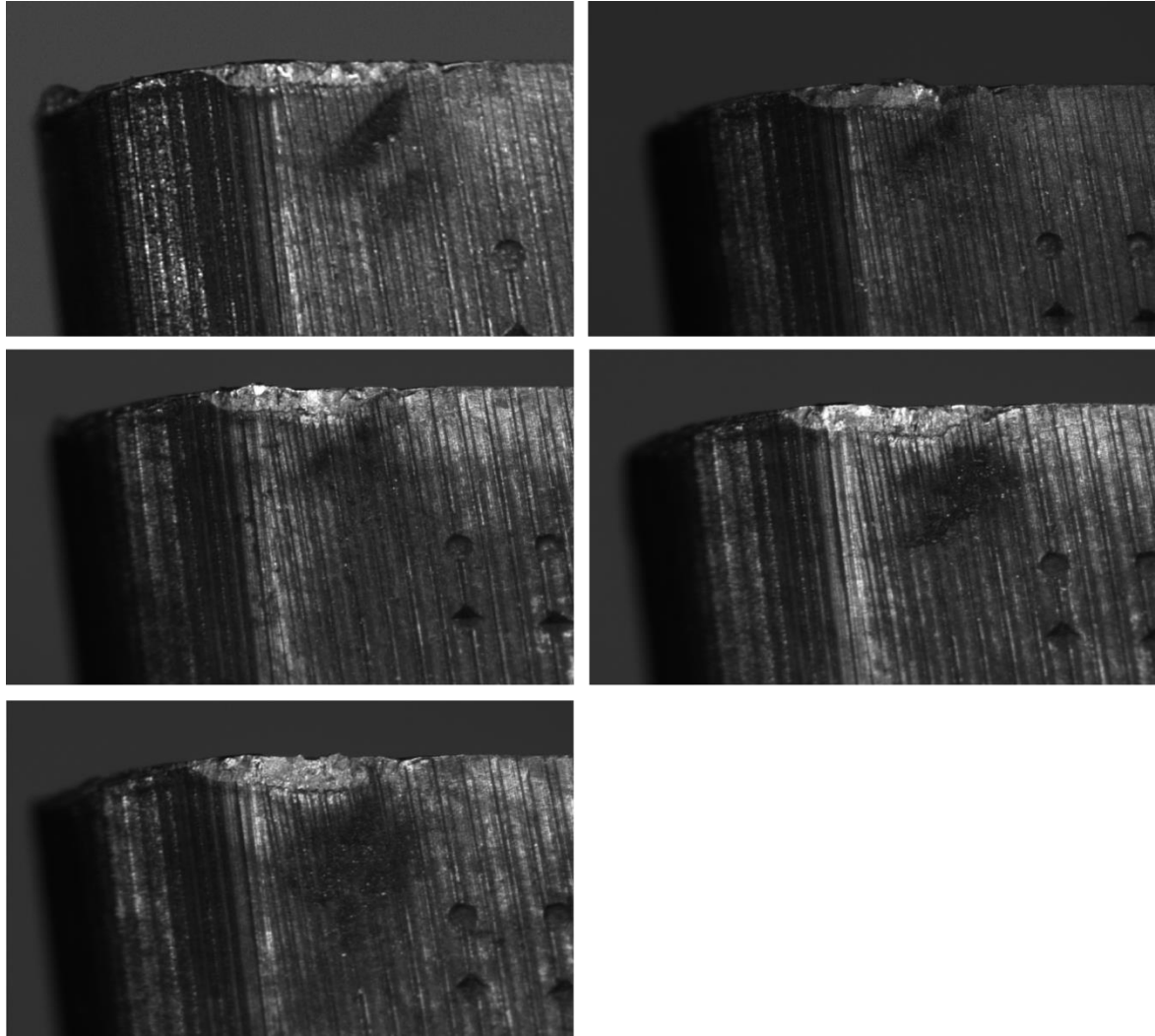
Tab. 7 Naměřené hodnoty nástroje 30-2

Celkový průběh opotřebení nástroje na hřbetě je uvedený v grafu Graf 7. Zde je vidět pozvolný nárůst opotřebení. Opotřebení VB<sub>krit.</sub> bylo zřetelné až po třetím měření. Rozdíl oproti opotřebení VB nebyl tak razantní, jako tomu bylo u referenčního nástroje.



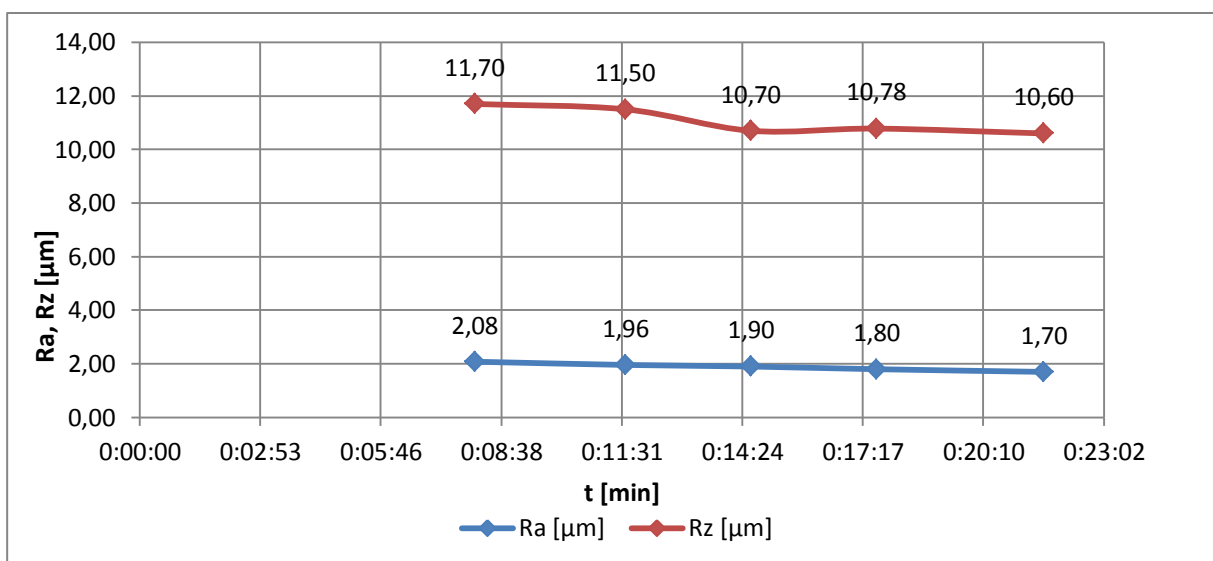
Graf 7 Průběh opotřebení nástroje 30-2





Obr. 31 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-2

Průběh drsnosti obroběného povrchu je patrný v grafu Graf 8. Drsnost povrchu pozvolnou klesající tendenci.



Graf 8 Průběh drsností obroběného povrchu nástroje 30-2

## 4.4 Nástroj 30-3

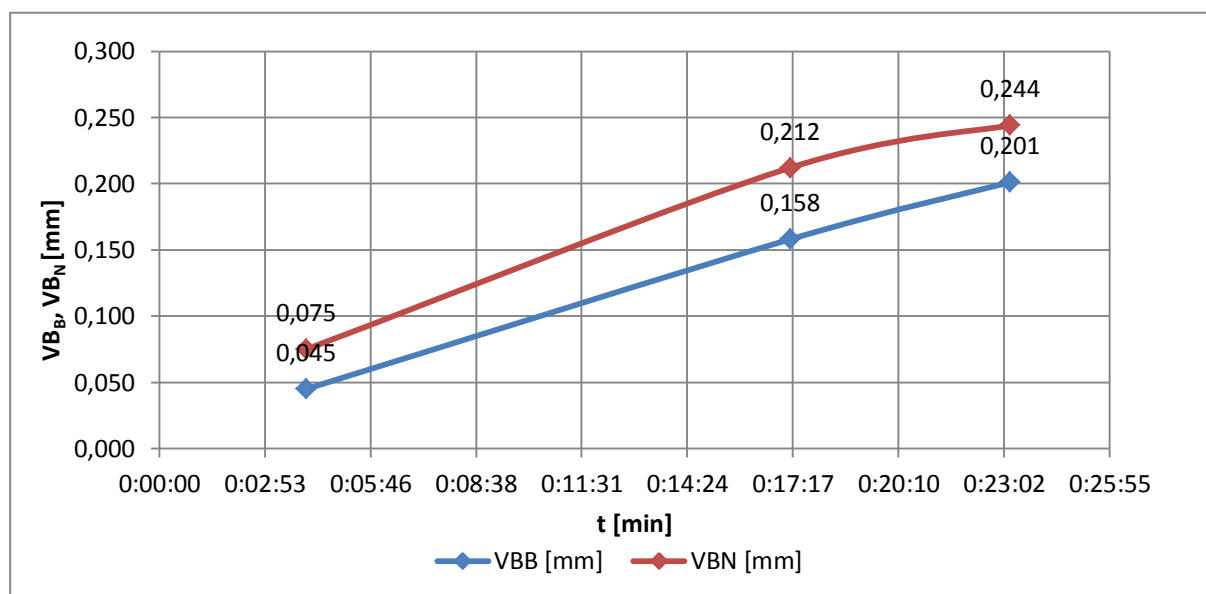
Nástroj 30-3 byl testován v druhé vlně spolu s nástrojem 30-5. Vzhledem k získaným zkušenostem u nástrojů 30-2 a 30-4 byl první časový úsek zkrácen na 4 minuty. Po čtyřech minutách byla naměřena hodnota opotřebení hřbetu 0,045 mm. Podobné hodnoty dosáhl referenční nůž až po osmi minutách. Naměřené výsledky jsou shrnuté v tabulce Tab. 8. Tvar otupení byl obdobný jako u nože 30-2, který měl totožné tepelné zpracování.

Následující časové úseky byly zvolené razantně delší s cílem ověřit trvanlivost břitu nástroje 30-2. Stanoveného otupení 0,2 mm bylo dosaženo po 23 minutách. Vyšší trvanlivost bude pravděpodobně důsledkem menšího počtu opětovného zajíždění do řezu a celkově delšího úseku obrábění bez přerušování.

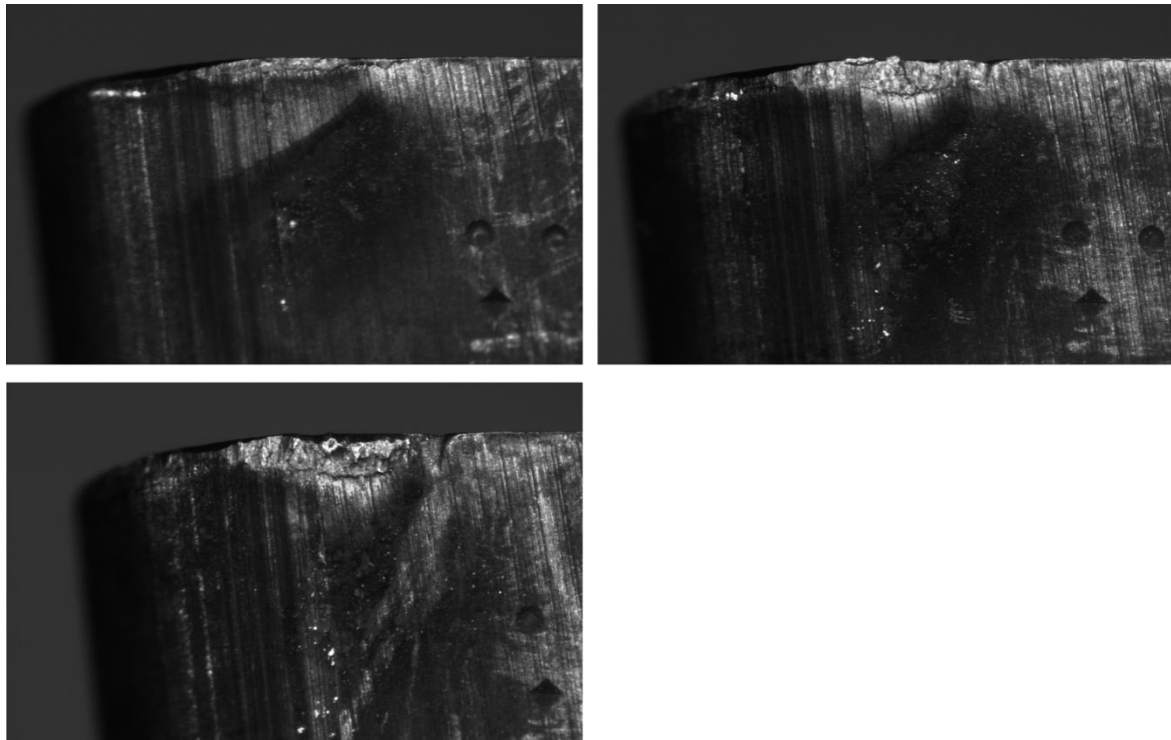
Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30-3	t [min]	0:04:00	0:17:12	0:23:12		
	VB <sub>B</sub> [mm]	0,045	0,158	0,201		
	VB <sub>N</sub> [mm]	0,075	0,212	0,244		
	R <sub>a</sub> [μm]	1,95	1,80	1,66		
	R <sub>z</sub> [μm]	10,70	10,90	9,66		

Tab. 8 Naměřené hodnoty nástroje 30-3

Celkový průběh opotřebení nástroje na hřbetě je uvedený v grafu Graf 9. Zde je vidět pozvolný nárůst opotřebení. Rozdíl oproti opotřebení VB nebyl tak razantní, jako tomu bylo u referenčního nástroje.

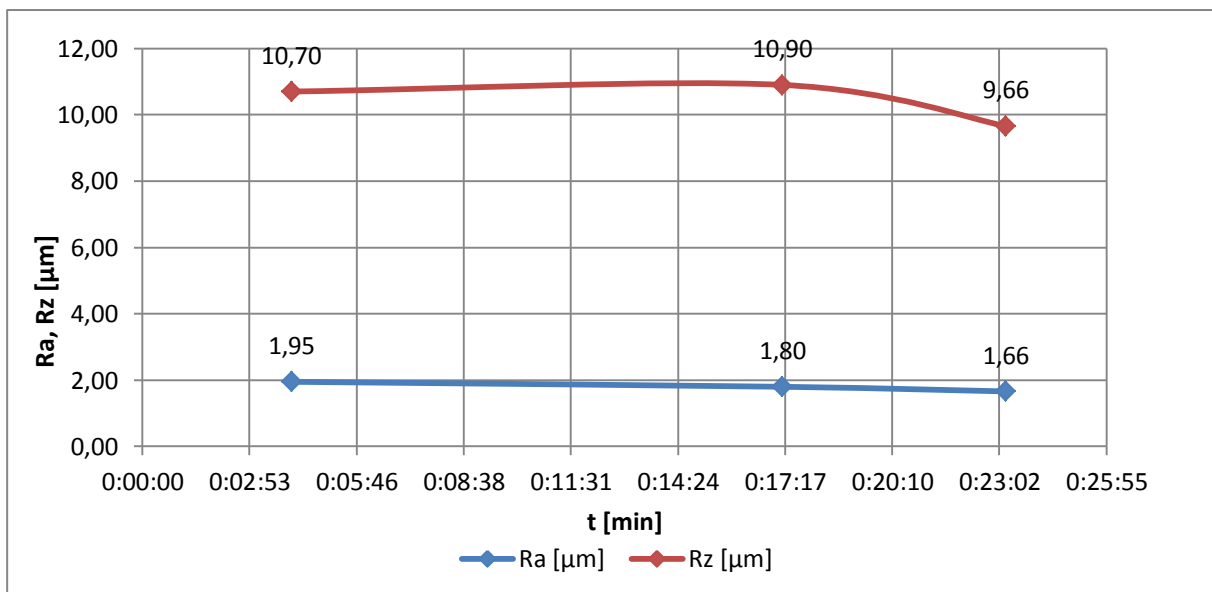


Graf 9 Průběh opotřebení nástroje 30-3



Obr. 32 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-3

Průběh drsnosti obrobenej plochy měl snižující se tendenci, což mohlo být důsledkem klidného řezu a zvyšujícímu se otupení špičky nástroje.



Graf 10 Průběh drsností obrobenej povrchu nástroje 30-3

## 4.5 Nástroj 30-4

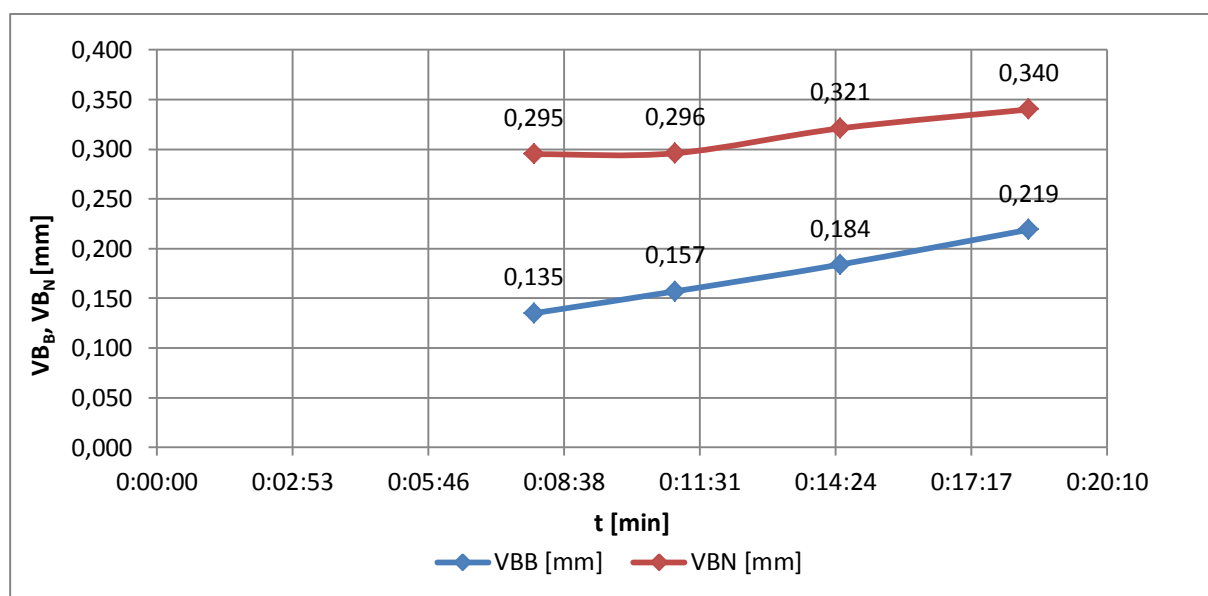
Tento nástroj byl testován v první vlně společně s nástrojem 30-2 a referenčním. Po překvapivě rychlém prvotním otupení nástroje 30-2 byl zvolen stejně dlouhý první časový úsek, aby bylo možné výsledky přímo porovnat. Při prvním měření bylo potřebování VB rovno 0,135 mm, což je téměř totožný výsledek jako nástroje 30-2. Velký rozdíl nastal u opotřebení  $VB_{krit}$ , které bylo razantně vyšší. Tento rozdíl je s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněn nedobroušením nástroje, které je dobře vidět na obrázku Obr. 33. V těchto místech nemuselo ani dojít k ideálnímu vytvoření tvrdé povrchové vrstvy. Naměřené výsledky jsou shrnuty v Tab. 9.

Následující časové úseky byly voleny výrazně kratší, maximálního opotřebení bylo dosaženo po cca 16 minutách nástroje v řezu.

Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30-4	t [min]	0:08:00	0:11:00	0:14:30	0:18:30	
	$VB_B$ [mm]	0,135	0,157	0,184	0,219	
	$VB_N$ [mm]	0,295	0,296	0,321	0,340	
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,70	2,07	2,04	1,81	
	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,80	11,05	11,24	9,93	

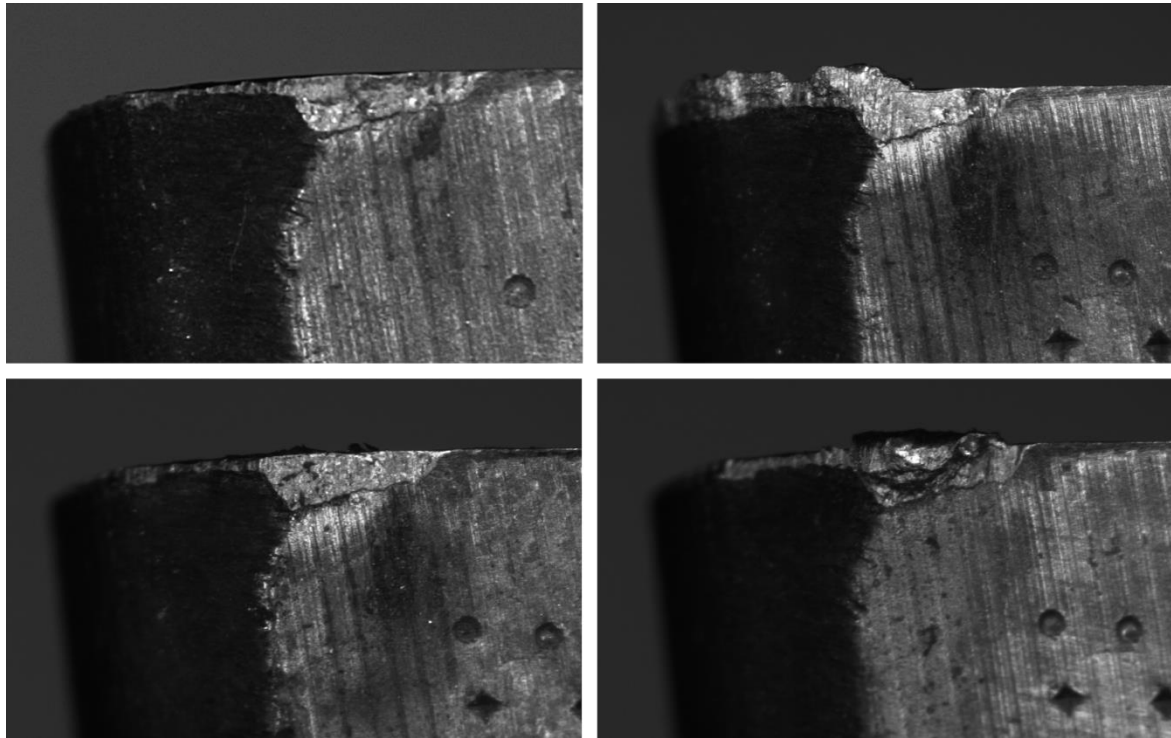
Tab. 9 Naměřené hodnoty nástroje 30-4

Celkový průběh opotřebení nástroje na hřbetě je uvedený v grafu Graf 11. Zde je vidět pozvolný nárůst opotřebení. Opotřebení  $VB_{krit}$  bylo výrazné.



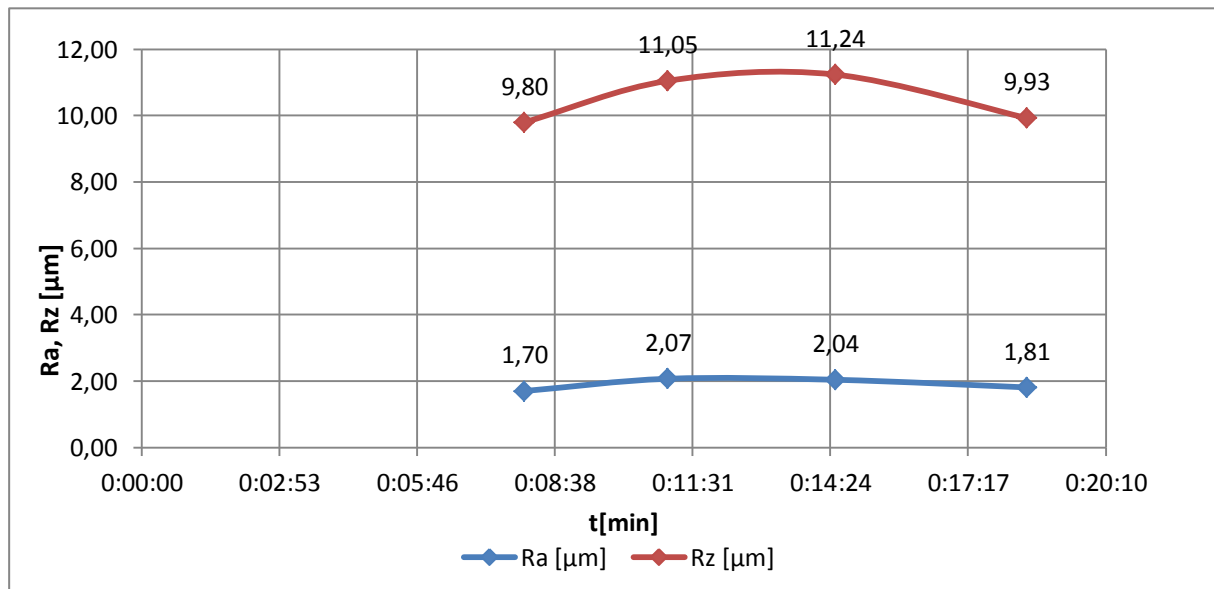
Graf 11 Průběh opotřebení nástroje 30-4

Na následujícím obrázku Obr. 33 jsou vidět jednotlivá opotřebení. Zde je zřetelně vidět nedobroušená ploška, která způsobuje neúplné napojení rádiusu nože na hřbetní plochu a tvorba velkého a tvrdého nárůstku.



Obr. 33 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-4

Průběh drsnosti je značně nestálý, v první části obrábění se drsnost zvyšovala a naopak v druhé snižovala.



Graf 12 Průběh drsností obrobeného povrchu nástroje 30-4

## 4.6 Nástroj 30-5

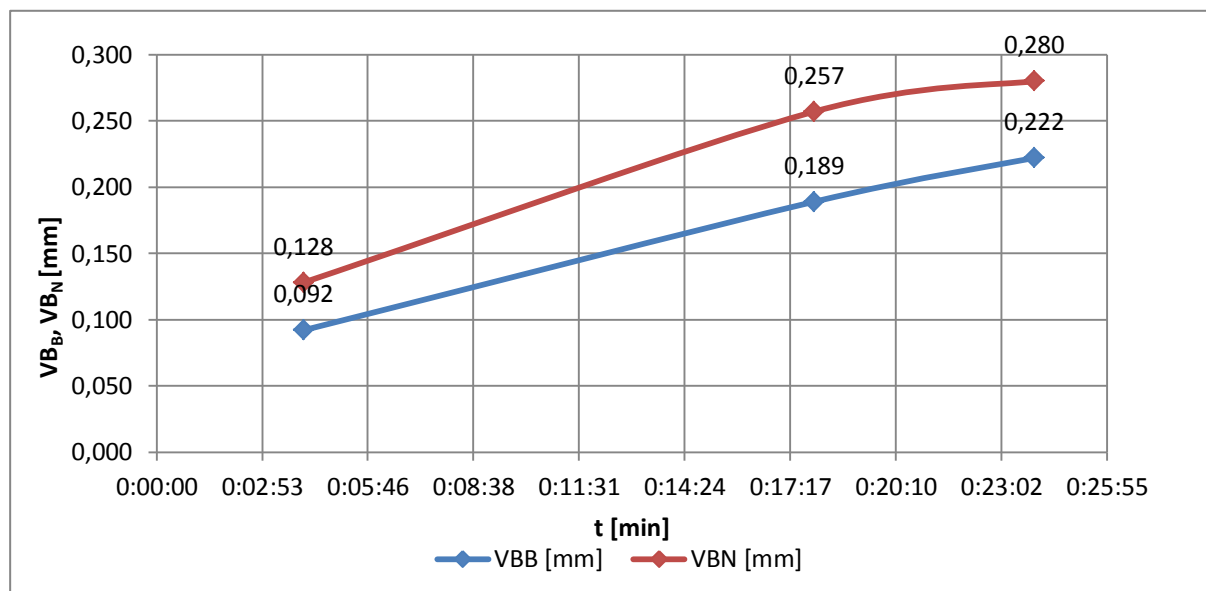
Nástroj 30-5 byl testován spolu s nástrojem 30-3 v druhé vlně. První časový úsek byl opět zvolen 4 minuty dlouhý. Po tomto čase byla naměřena hodnota opotřebení 0,092 mm, což je téměř dvojnásobná hodnota oproti nástroji 30-3. Naměřené výsledky jsou shrnuty v tabulce Tab. 10. Tvar otupení byl obdobný jako u spolu testovaného nože 30-3 a naprosto odlišný od nože 30-4, který měl totožné tepelné zpracování.

Následující časové úseky byly zvolené razantně delší s cílem ověřit trvanlivost bříty nástroje 30-4. Stanoveného otupení 0,2 mm bylo dosaženo po cca 20 minutách. Vyšší trvanlivost bude pravděpodobně důsledkem menšího počtu opětovného zajíždění do řezu a celkově delšího úseku obrábění bez přerušování. Dalším důvodem vyšší trvanlivosti může být nedobroušené ostří nože 30-4, které jeho trvanlivost velice snížilo.

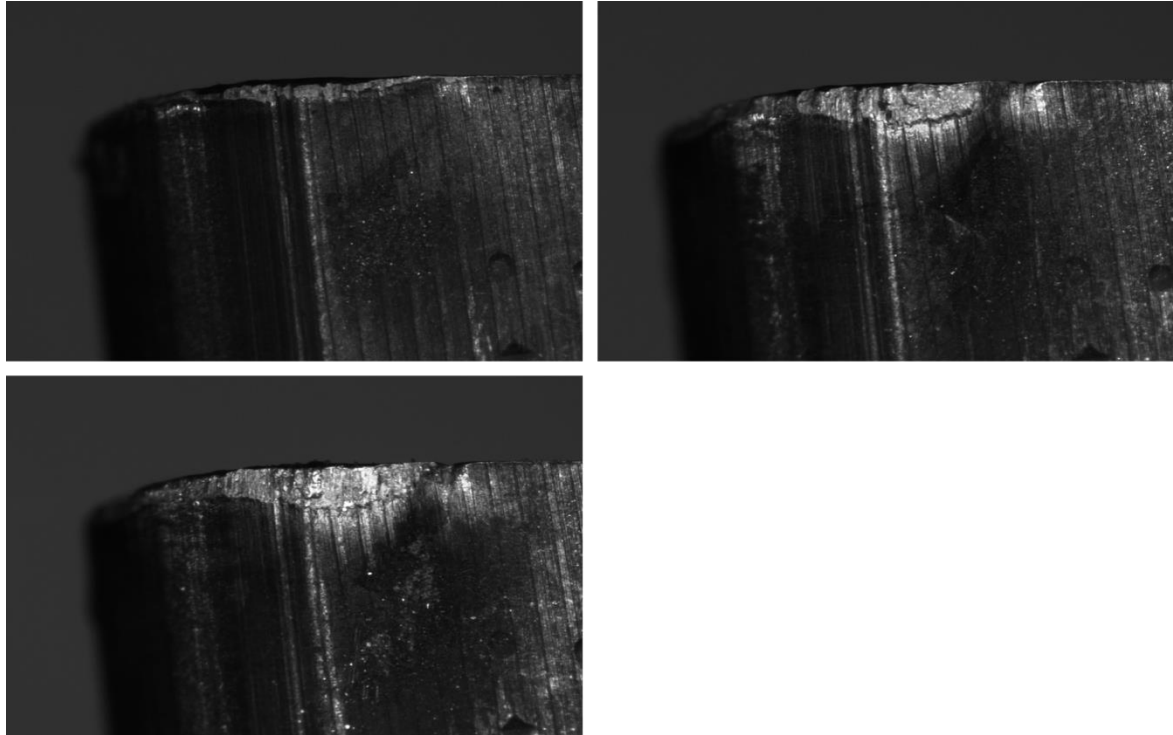
Nástroj	Měření	1	2	3	4	5
30-5	t [min]	0:04:00	0:17:56	0:23:56		
	VB <sub>B</sub> [mm]	0,092	0,189	0,222		
	VB <sub>N</sub> [mm]	0,128	0,257	0,280		
	R <sub>a</sub> [μm]	1,60	1,70	1,80		
	R <sub>z</sub> [μm]	8,97	9,50	10,69		

Tab. 10 Naměřené hodnoty nástroje 30-5

Celkový průběh opotřebení nástroje na hřbetě je uveden v grafu Graf 13. Zde je vidět pozvolný nárůst opotřebení. Opotřebení VB<sub>krit</sub> nebylo tak výrazné, jako tomu bylo u nástroje 30-4.

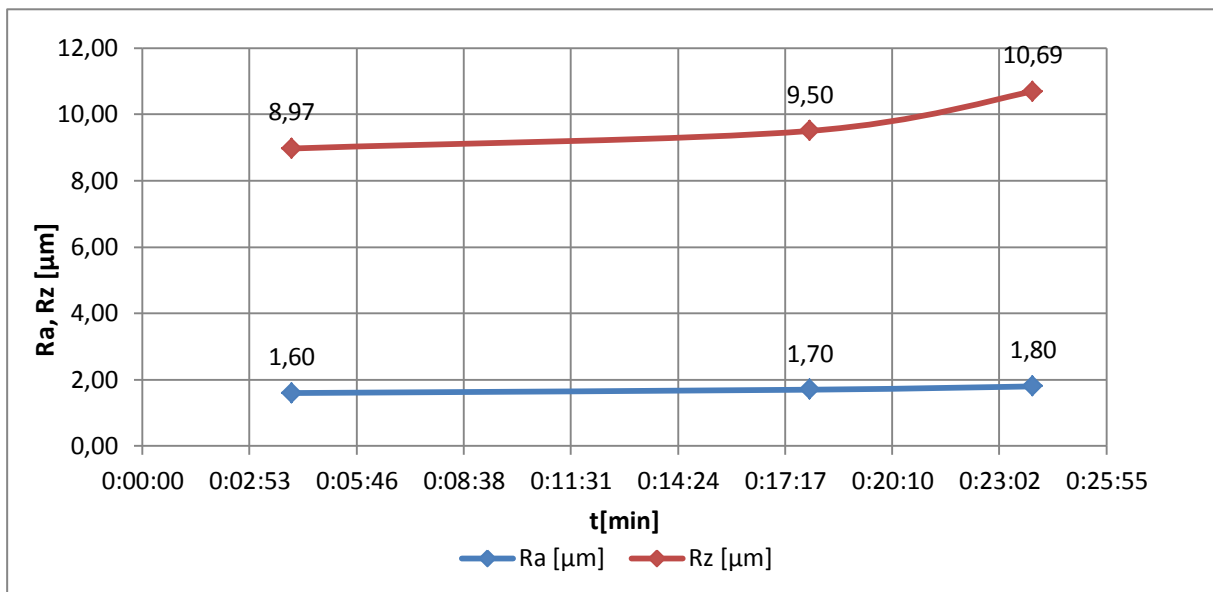


Graf 13 Průběh opotřebení nástroje 30-5



Obr. 34 Průběh opotřebení hřbetu nástroje 30-5

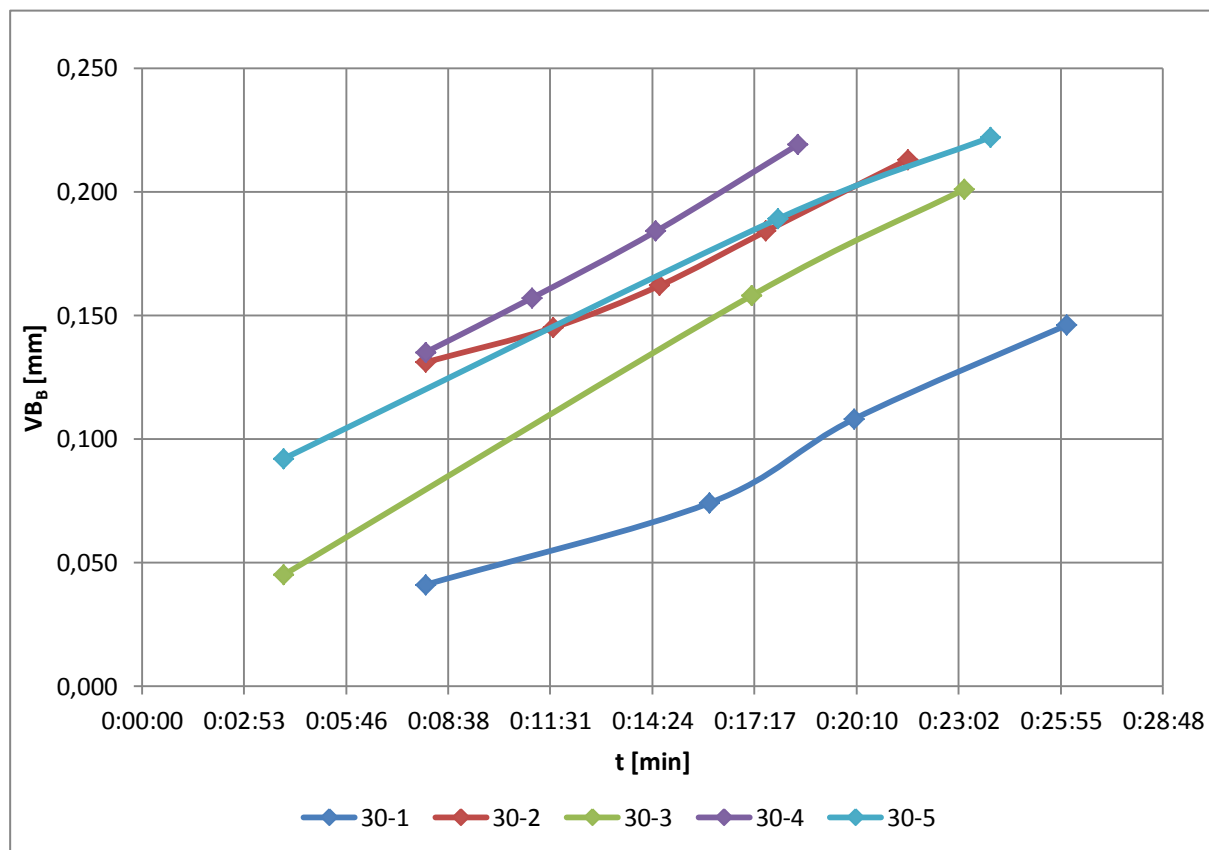
Hodnoty drsnosti obrobenej plochy měly stoupající tendenci, ale hodnoty jsou vůči ostatním nástrojům nejnižší.



Graf 14 Průběh drsností obrobenej povrchu nástroje 30-5

## 5 Zhodnocení výsledků

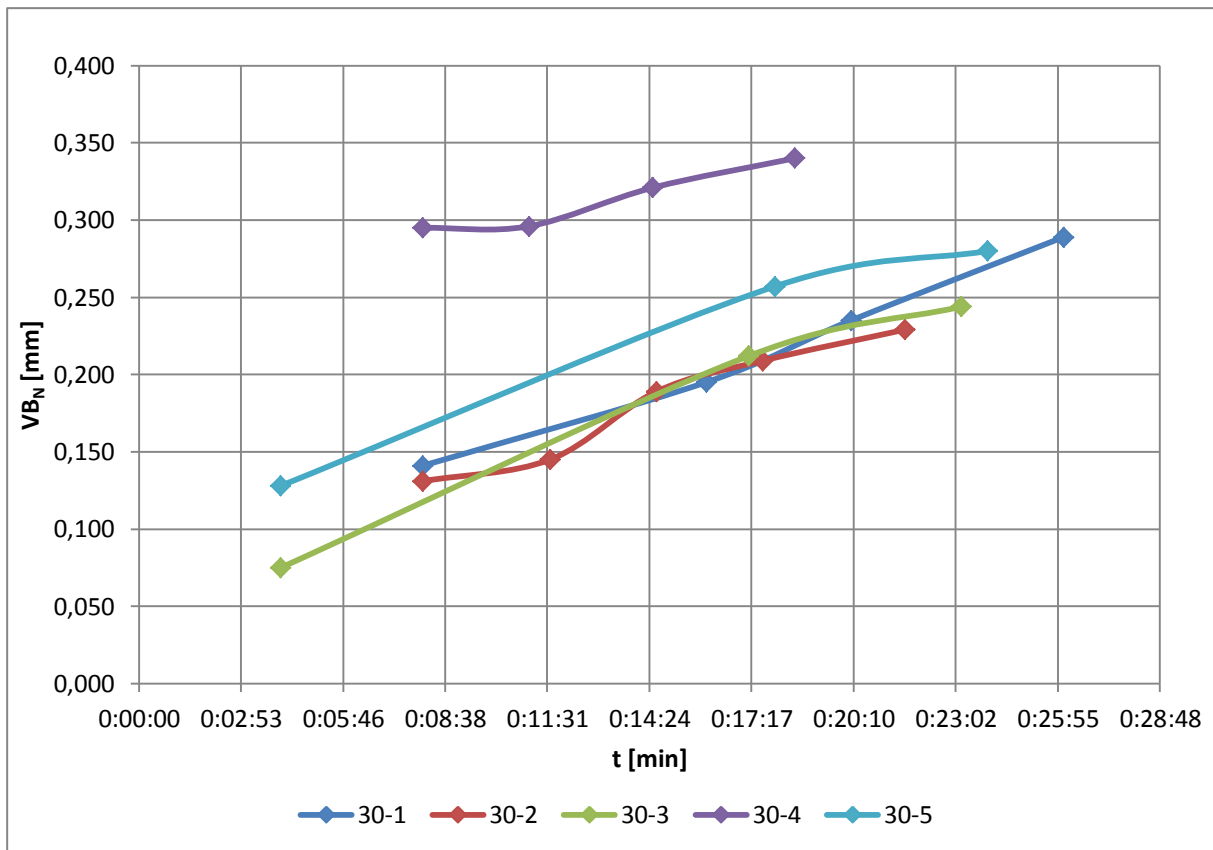
Výsledky uvedené v předchozích kapitolách naznačují citelně vyšší trvanlivost v řezu referenčního nástroje 30-1 na úkor ostatních nástrojů s chemicko-tepelným zpracováním. Veškeré výsledky trvanlivosti ostří jsou shrnuty v grafu Graf 15. V grafu je patrné menší opotřebenění nástroje 30-1 v porovnání se všemi ostatními nástroji. Z grafu je také patrné, že nástroje 30-2 a 30-3, které byly zpracované bez fluidace, vykazují nepatrně lepší výsledky oproti nástrojům 30-4 a 30-5 s fluidací. Nicméně kritérium trvanlivosti není jediné směrodatné v hodnocení nástrojů.



Graf 15 Souhrnný graf opotřebenění VB

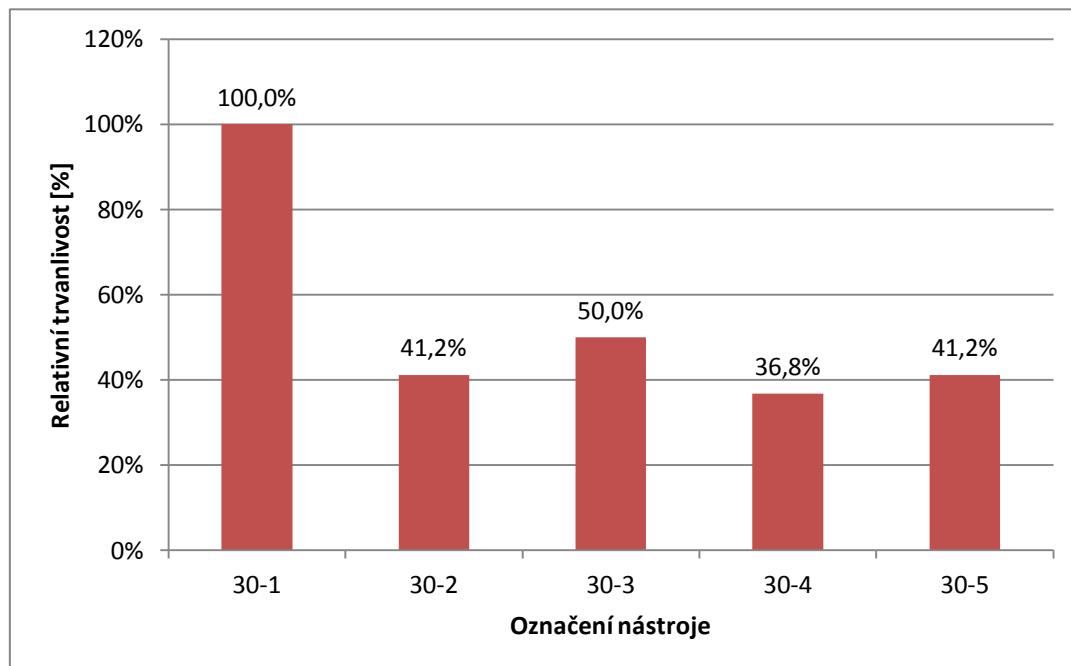
Důležitým parametrem hodnocení je také průběh a tvar otupení. Pokud se porovnají hodnoty  $VB_{krit}$  u jednotlivých nástrojů, tak je vidět jiný průběh závislosti. Výsledky jsou shrnuty v grafu Graf 16. Referenční nástroj 30-1 s velmi výrazným opotřebením  $VB_{krit}$  dosahuje v celkovém srovnání podobných výsledků jako ostatní nástroje. Nástroje s chemicko-tepelným zpracováním mají výrazně menší rozdíly mezi opotřebením VB a  $VB_{krit}$ , opotřebenění je rovnoměrnější, a tím má břit vyšší stabilitu. Snímky otupení jsou v předchozích kapitolách. Nástroj 30-4 vykazuje ve všech vyhodnoceních nejhorší výsledky. Tato skutečnost je dána nedobroušeným ostřím, které je zřetelně vidět na obrázku Obr. 33. Díky tomu se tvořil velký nárůstek, docházelo k nerovnoměrnému otupení, což vedlo k vyšší kumulaci tepla a degradaci řezné hrany.





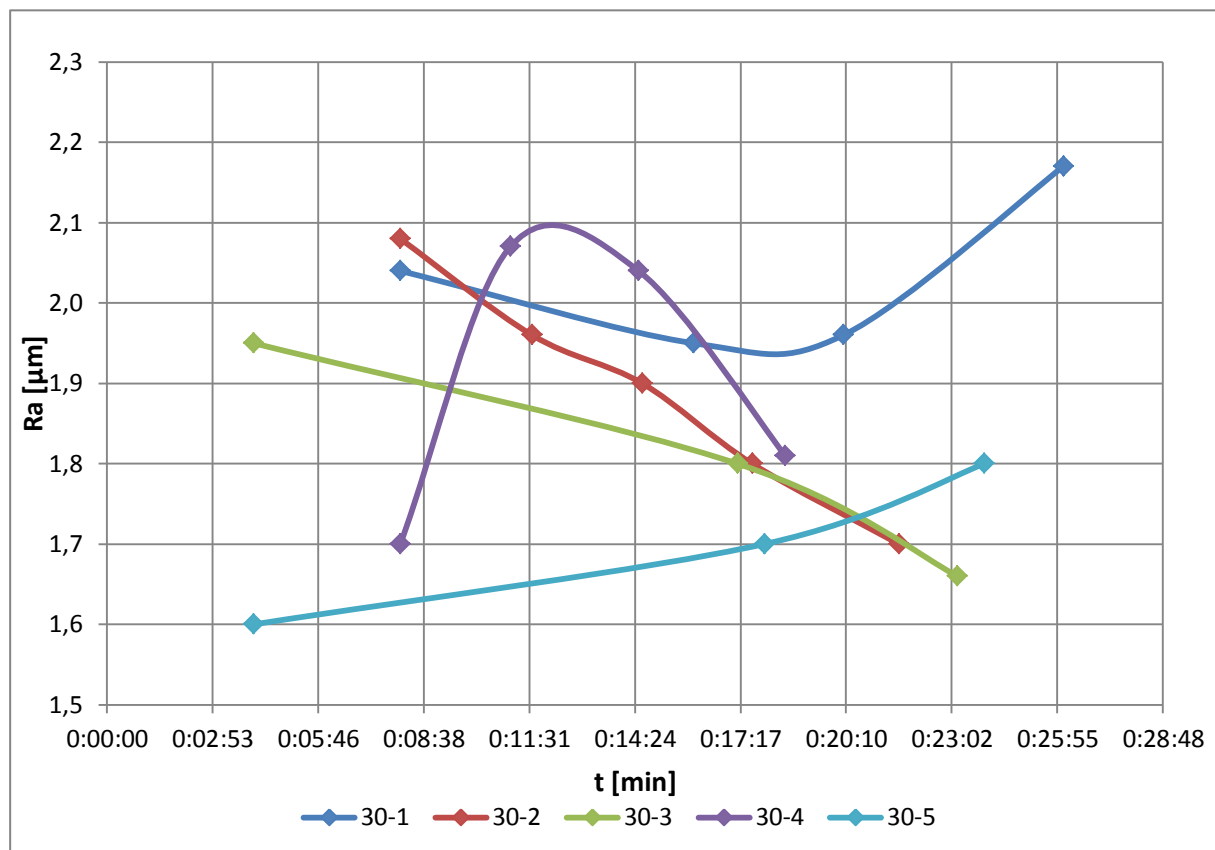
Graf 16 Souhrnný graf opotřebení VBkrit

Bylo provedeno srovnání trvanlivostí po 15 minutách vztažené k referenčnímu nástroji. Ze sloupcového grafu Graf 17 je vidět, že karbonitridované nástroje mají zhruba poloviční trvanlivost v řezu.

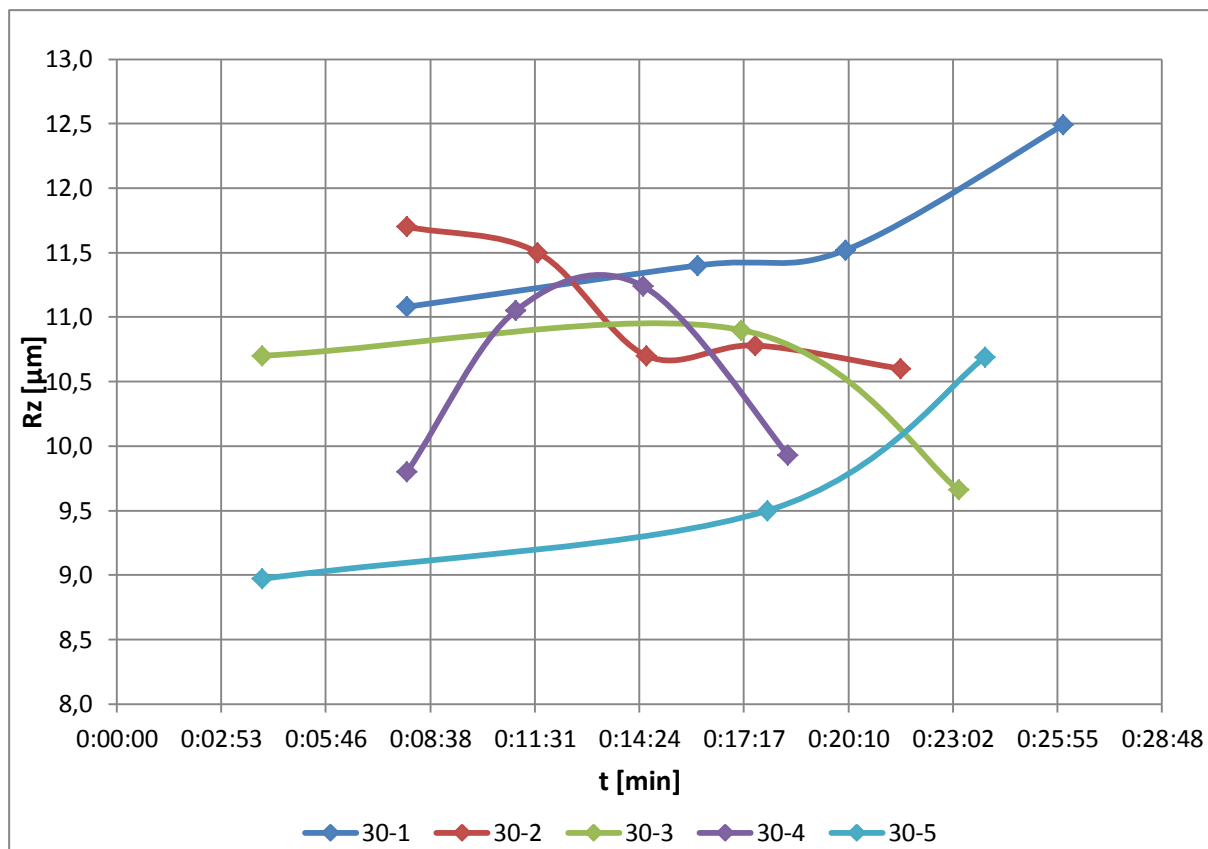


Graf 17 Relativní trvanlivost nástrojů po 15 minutách řezu vztažená k referenčnímu nástroji 30-1

Na následujících grafech Graf 18 a Graf 19 jsou znázorněny drsnosti obroběných ploch po obrábění jednotlivými nástroji. Z grafů lze vyčíst tendence, jak se kvalita obroběného povrchu měnila u jednotlivých nástrojů. U referenčního nástroje 30-1 je téměř stále rostoucí tendence a obdobně tomu je i u nástroje 30-5. Tuto skutečnost mohl způsobit trvale se tvořící nárůstek. Dalším z důvodů by mohla být skutečnost, že nástroje zpracovávané ve fluidním noži vykazovaly v testech lepší hodnoty. U nástrojů 30-2 a 30-3 je vidět jasně se zlepšující kvalita obroběných ploch. Tyto nástroje byly zpracované bez fluidace a v testech vykazovaly většinou horší výsledky. Tyto nástroje však během obrábění vykazovaly rovnoměrnější otupení hřbetu a menší nárůstek. Zlepšování kvality povrchu tudíž je důsledkem zaběhnutí nástroje, čímž došlo k rovnoměrnému otupení špičky a zlepšení povrchu obrobku. Zcela nejasných výsledků dosáhl nástroj 30-4. Nejprve došlo ke zhoršení kvality povrchu a poté ke zlepšení. Tento vývoj značí jistou nestabilitu v řezu, která byla zapříčiněna špatně dobroušenou špičkou nástroje. Díky tomu se při obrábění tvořil velice velký a stabilní nárůstek.



Graf 18 Průběh drsnosti Ra obroběných ploch

Graf 19 Průběh drsnosti  $R_z$  obrobeneých ploch

## 6 Závěr

V této práci byl popsán vliv fluidní karbonitridace v aktivním mikroprášku na trvanlivost soustružnických nožů z oceli ČSN 19830. Testováno bylo celkem 5 nástrojů, z nichž jeden byl referenční s běžným zušlechtěním, dva nástroje byly zpracovány karbonitridací s fluidací pouze na začátku procesu a dva nástroje byly zpracovány karbonitridací s fluidací po celou dobu procesu. Na nástrojích bylo provedeno několik testů povrchové vrstvy, které ukazovaly na pozitivní vliv fluidizace. V porovnání s referenčním nástrojem nebyl rozdíl zjištěných parametrů nijak výrazný a v některých případech byly výsledky i horší.

Při testech se nepotvrdilo předpokládané zvýšení trvanlivosti nástrojů oproti referenčnímu nástroji. Všechny karbonitridované nástroje měly přibližně poloviční trvanlivost oproti zušlechtěnému nástroji. Karbonitridované nástroje však měly výrazně rovnoměrnější průběh otupení hřbetu a na obrobku zanechávaly kvalitnější obrobene plochy. Příčin, proč karbonitridace nevedla k lepším výsledkům, může být několik. Nástroje nemusely být zpracované za správných podmínek a zušlechtěný nástroj mohl být před karbonitridací nechtěně popuštěn. Pro ověření této domněnky budou nástroje lehce přebroušeny a na odhaleném substrátu budou provedeny srovnávací testy a následně bude s nástroji dále obráběno. Bohužel v době dokončení této práce nebyly nástroje otestovány a výsledky nemohou být zahrnuty do závěru. Na všech karbonitridovaných nástrojích se objevovaly skvrny na povrchu nástroje, což mohlo být způsobeno nedostatečným očištěním nástrojů před vlastní karbonitridací.

Karbonitridace ve fluidním loži přináší řadu výhod, mezi něž patří intenzivnější difuze částic do materiálů, homogenní vrstva, prodloužení životnosti prášků a celkově nižší náklady oproti běžné karbonitridace díky výrazně kratší době zpracování. Mezi nevýhody patří hlavně vyšší technická náročnost a řízení mnoha parametrů, které přímo ovlivňují výslednou kvalitu vrstvy. Náklady na karbonitridovaný nástroj jsou o cca. 20% vyšší než na nástroj běžně zušlechtěný. Pro ekonomickou výhodnost této technologie je nutné, aby nástroje byly minimálně o dodatečné náklady výkonnější. Předmětem dalšího vývoje by mohla být úprava složení směsi mikroprášků, parametrů fluidace nebo úprava mikrogeometrie nástroje.

Výsledky z testování ukazují, že vlastní fluidace má pozitivní vliv na kvalitu povrchové vrstvy, nicméně je tato technologie v počátcích vývoje. Je nutné pokračovat v testech a vyzkoušet nástroje i za jiných řezných podmínek, například při nižší řezné rychlosti, kde by mohla vyniknout vysoká otěruvzdornost povrchové vrstvy a tím by tato technologie mohla být vhodná například pro protahovací trny.

## 7 Použitá literatura

- [1]. **Wikipedia**. Parní stroj. *Wikipedia*. [Online] 7. březen 2014.  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_stroj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_stroj).
- [2]. **Coromand, AB Sandvik**. *Příručka obrábění*. [překl.] Miroslav Kudela. Praha : Scientia s.r.o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [3]. **Wikipedia**. Robert Forester Mushet. *Wikipedia*. [Online] 17. srpen 2013.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Forester\\_Mushet](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Forester_Mushet).
- [4]. **Wikipedia**. Mushet steel. *Wikipedia*. [Online] 20. srpen 2011.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Mushet\\_steel](http://en.wikipedia.org/wiki/Mushet_steel).
- [5]. **Wikipedia**. Frederick Winslow Taylor. *Wikipedia*. [Online] 4. duben 2014.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Frederick\\_Winslow\\_Taylor](http://en.wikipedia.org/wiki/Frederick_Winslow_Taylor).
- [6]. **Kříž, Antonín**. Nové trendy vývoje tenkých vrstev vytvořených PVD a CVD technologií v aplikaci na řezné nástroje. *A Team*. [Online] 5. Leden 2014.  
[http://www.ateam.zcu.cz/Nove\\_trendy.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Nove_trendy.pdf).
- [7]. **Humár, Antonín**. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [8]. **Příbil, Erich**. Technická příručka. *Bolzano*. [Online] 25. březen 2014.  
<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/>.
- [9]. **Jech, Jaroslav**. *Tepelné zpracování oceli - Metalografická příručka*. Praha : SNTL, 1983.
- [10]. **Kraus, Václav**. *Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [11]. **Prokal, AZ**. Prášková nitridace. *AZ Prokal*. [Online] 26. březen 2014.  
<http://www.azprokal.cz/get.php?id=436>.
- [12]. **Podaný, Pavel**. Studium vlivu předdepozičních procesů na vlastnosti progresivních tenkých vrstev. *Ateam*. [Online] 23. březen 2014.  
[www.ateam.zcu.cz/FRVS\\_zprava\\_dalsi\\_studium\\_podany.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_podany.pdf).
- [13]. *Plazmové povlakování*. **Valter, Jan a Vyskočil, Jiří**. 05/2000, Praha : Vogel Publishing, s. r. o., 2000. ISSN 1212-2572.
- [14]. **Kříž, Antonín**. Povrchové inženýrství. *Ateam*. [Online] 25. Březen 2014.  
[http://www.ateam.zcu.cz/download/povrchove\\_inz\\_tretivek.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/povrchove_inz_tretivek.pdf).
- [15]. **Janovec, Jiří a Cejp, Jiří**. Kovové materiály a jejich zpracování. *Ústav materiálového inženýrství ČVUT*. [Online] 25. březen 2014. [http://umi.fs.cvut.cz/files/4\\_2\\_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/files/4_2_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf).

- [16]. *Nízkoteplotní zpracování kovů*. **Žilka, Vladimír**. 4/2011, Praha : MM publishing, s.r.o., 2011. ISSN 1212-2572.
- [17]. **Bodycote**. Tepelné zpracování. *Bodycote*. [Online] 26. březen 2014.  
<http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment.aspx>.
- [18]. **Fajt, Josef**. *Chemicko-tepelné zpracování ocelí ve fluidním mikroprášku*. Plzeň, 14. kveten 2014.
- [19]. *Vytváření tvrdých a otěruvzdorných povrchů pomocí boridování*. **Gerstenberger, Jan**. 3/2010, Praha : MM publishing, s.r.o., 210. ISSN 1212-2572.
- [20]. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. **Šíma, Michal a Janků, Roman**. 4/2007, Praha : MM publishing, s. r. o., 2007. ISSN 1212-2572.
- [21]. Direct Metal Laser Sintering. *DMLS*. [Online] 18. květen 2014. <http://www.dmls.cz/>.
- [22]. Direct Metal Laser Sintering. *Innomia a.s.* [Online] 18. květen 2014.  
<http://www.innomia.cz/>.
- [23]. **ÚNMZ**. Ocel 19 830 rychlořezná. *Úřat pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. [Online] 1967. [Citace: 8. Listopad 2013.]  
<http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=3543>. 3543.
- [24]. —. Ocel 11 523. *Úřat pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví*. [Online] 1. Leden 1994. [Citace: 8. Listopad 2013.]  
<http://seznamcsn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=16084>. 16084.
- [25]. **Kg, Blickle Werkzeuge Gmbh & Co**. Multicheck PC 500. *Brickle Tool*. [Online] Blickle Werkzeuge Gmbh & Co. Kg. [Citace: 8. Listopad 2013.] <http://www.blickle-tools.de/>.
- [26]. **Mahr, spol s.r.o.** MarSurf M 300. *Mahr*. [Online] Mahr, spol s.r.o., 3. duben 2014.  
<http://www.mahr.com/cs/Produkty/Metrologie/Podle-skupiny-produkt%C5%AF/MarSurf/P%C5%99ehled-produkt%C5%AF/P%C5%99enosn%C3%A9-drsnom%C4%Bry/MarSurf-M-300/>.
- [27]. **Staněk, Jiří**. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-363-9.