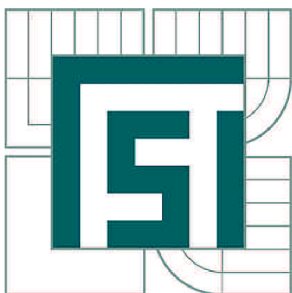


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VLIV ŘEZNÝCH PODMÍNEK NA TRVANLIVOST VBD PŘI SOUSTRUŽENÍ

INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS ON DURABILITY OF CUTTING INSERTS DURING  
TURNING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VOJTĚCH HYNČICA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ JAROŠ

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Vojtěch Hynčica

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

### **Vliv řezných podmínek na trvanlivost VBD při soustružení**

v anglickém jazyce:

#### **Influence of cutting conditions on durability of cutting inserts during turning**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřena na teoretický rozbor technologie soustružení, rozbor slinutých karbidů, povlakovacích metod a teorie opotřebení břitu řezného nástroje. Součástí práce je provedení experimentálních řezivostních zkoušek a jejich vyhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

1. Charakteristika metody soustružení
2. Charakteristika slinutých karbidů
3. Charakteristika povlakovacích metod
4. Opotřebení břitu řezného nástroje
5. Experimentální část

Závěr

Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK,L.a kol.. Nauka o materiálu I. 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2002. 392 s. ISBN: 80-7204-283-1.
- [2] FOREJT,M.,PÍŠKA,M. Teorie obrábění,tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [3] HUMÁR,A. Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s.r.o.,2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [4] MATTOX,M. Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2.vyd.Albuquerque (USA): APR,2010. 917s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Jaroš

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlivem řezných podmínek (řezná rychlost, posuv na otáčku, šířka záběru hlavního ostří) na opotřebení a trvanlivost výměnných břitových destiček při obrábění slitiny Inconel 718. V teoretické části se bakalářská práce zabývá technologií soustružení, slinutými karbidy, jejich výrobou a povlakováním, vznikem a průběhem opotřebení nástroje. Experimentální část bakalářské práce obsahuje popis obráběného materiálu, stroje, nástroje a průběhu experimentu. Z naměřených hodnot vyplývá, že trvanlivost břitu VBD klesá s rostoucí řeznou rychlostí. Opotřebení není přímo úměrné rostoucímu posuvu na otáčku a šířce záběru hlavního ostří.

### **Klíčová slova**

soustružení, řezné podmínky, opotřebení, trvanlivost, VBD

## **ABSTRACT**

The aim of present thesis is to determine the influence of the cutting conditions (the cutting speed, the feed, the depth of cut) on wear and durability of cutting inserts during machining process of the Inconel 718 alloy. In theoretical part thesis describes technology of turning, cemented carbides, their production and coating; it also deal with how the wear of the tool arises and how the tool wear progresses. In experimental part of this thesis we describe the cutting material, the machine, the machine tool and the experiment procedures. Measured values showed, that the durability of cutting inserts decreases depending on the cutting speed. We have determined that there is no direct correlation between the tool wear and the (increasing) level of the feed and the depth cut.

### **Key words**

Turning, cutting conditions, tool wear, durability, cutting inserts

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HYNČICA, V. Vliv řezných podmínek na trvanlivost VBD při soustružení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv řezných podmínek na trvanlivost VBD při soustružení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Vojtěch Hynčica

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Aleši Jarošovi za rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Děkuji Jiřímu Čechovi za pomoc při provedení experimentu. Dále děkuji Ing. Václavu Šlitrovi ze společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. za námět k bakalářské práci, za rady a připomínky k jejímu vypracování a za poskytnutý materiál k provedení experimentu.

Děkuji své rodině a přítelkyni, kteří mě při studiu podporovali.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 SOUSTRUŽENÍ .....	10
1.1 Kinematika procesu soustružení .....	10
1.2 Průřez třísky .....	11
1.3 Řezné síly.....	11
1.4 Řezný výkon .....	12
2 SLINUTÉ KARBIDY.....	13
2.1 Historický vývoj slinutých karbidů.....	13
2.2 Rozdělení slinutých karbidů .....	13
2.3 Výroba slinutých karbidů.....	14
2.3.1 Výroba prášků.....	15
2.3.2 Lisování polotovarů .....	15
2.3.3 Slinování .....	15
2.3.4 Tvarování polotovarů.....	16
3 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD .....	17
3.1 Výhody a přednosti aplikace povlaků na slinuté karbidy .....	17
3.2 Výroba povlakovaných slinutých karbidů .....	17
3.2.1 Metoda PVD – fyzikální nanášení povlaku .....	18
3.2.2 Metoda CVD – chemické nanášení povlaku.....	19
3.3 Vývoj povlakovaných nástrojů .....	20
4 OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÉHO NÁSTROJE.....	21
4.1 Průběh procesu tvorby třísky .....	22
4.2 Mechanismy opotřebení nástroje .....	22
4.3 Typy opotřebení břítu .....	24
4.3.1 Opotřebení na hřbetě břítu .....	24
4.3.2 Opotřebení na čele (výmol na čele).....	24
4.3.3 Opotřebení ve tvaru žlábků na hlavním a vedlejším hřbetě břítu .....	25
4.3.4 Hřebenovité trhliny na ostří .....	25
4.3.5 Vydrolování ostří .....	25
4.3.6 Radiální opotřebení špičky .....	25

4.4 Průběh opotřebení.....	26
5 EXPERIMENT .....	27
5.1 Materiál obrobku.....	27
5.2 Obráběcí nástroj.....	28
5.3 Obráběcí stroj.....	29
5.4 Řezné podmínky a průběh experimentu .....	30
5.5 Rozbor naměřených hodnot, vyhodnocení .....	30
5.5.1 Vliv řezné rychlosti na opotřebení VBD .....	30
5.5.2 Vliv posuvu na otáčku na opotřebení VBD .....	34
6 ZÁVĚR .....	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	40



## ÚVOD

Soustružení je jednou ze základních technologií třískového obrábění. Umožňuje vyrábět součásti rotačního tvaru, takže je využíváno k výrobě mnoha strojních součástí. V dnešní době jsou nejpoužívanějším nástrojovým materiálem slinuté karbidy. Slinuté karbidy vynikají svou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Umožňují navýšení řezných podmínek a napomáhají tak k vyšší efektivitě obrábění. Slinuté karbidy se podle užití řadí do šesti základních skupin. Soustružnický nůž využívající slinuté karbidy je nejčastěji tvořen výměnnou břitovou destičkou (VBD) ze slinutého karbidu a nástrojového držáku, ve kterém je břitová destička mechanicky upnuta.

Pro vyšší odolnost proti opotřebení se slinuté karbidy povlakuje. Ve většině případů probíhá povlakování metodou PVD (Physical Vapour Deposition), která nevyžaduje při nanášení povlaku tak vysokou teplotu jako metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) a tudíž nedochází k poškození struktury slinutého karbidu. Hlavní výhodou metody PVD je dokonalé napovlakování ostrých hran. Moderní nástroje využívají vícevrstvé nebo multivrstvé povlaky.

Pozorováním a analýzou průběhu opotřebení břitu umožňuje optimalizaci řezných podmínek a odstranění nežádoucích vlivů na obrábění, což vede k efektivnějšímu využití stroje, nástroje a k celkové efektivitě procesu obrábění. Optimalizace řezných podmínek a celé výroby má pozitivní ekonomické důsledky.

# 1 SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je metoda obrábění, kterou lze vyrobit součásti rotačního tvaru. Pro samotné obrábění se obvykle používají jednobřité nástroje různých provedení. Soustružení patří mezi nejjednodušší technologie obrábění a je jednou z nejpoužívanějších obráběcích operací ve strojírenství. Soustružením lze vyrobit vnější i vnitřní válcové plochy, dále kuželové, tvarové, rovinné čelní plochy a zápichy [1].

## 1.1 Kinematika procesu soustružení

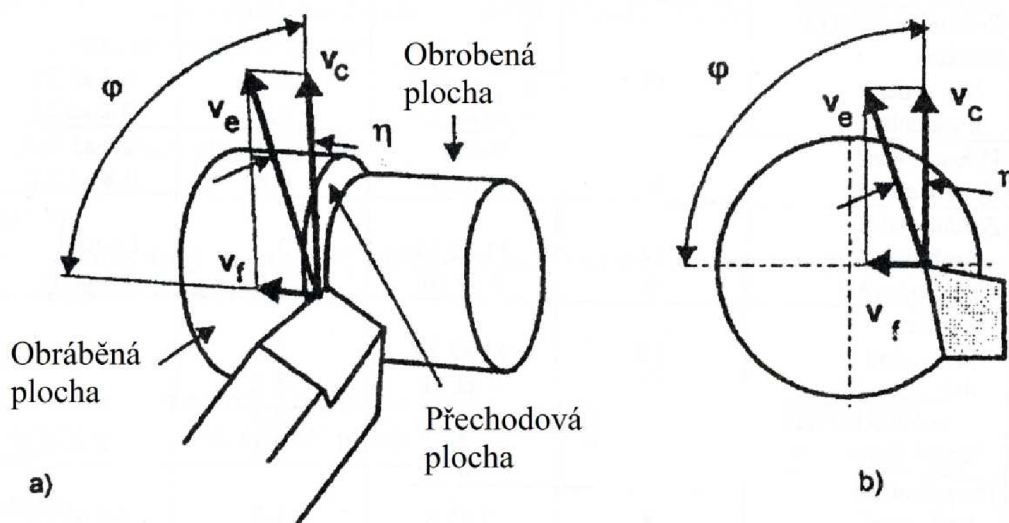
Hlavním pohybem u soustružení je rotační pohyb obrobku, který je upnut k vřetenu stroje. Rychlostí hlavního pohybu je zároveň dána řezná rychlost, která se značí  $v_c$  a vyjadřuje se obvykle v m/min. Pro velikost  $v_c$  platí vztah (1.1). Vedlejším pohybem je u technologie soustružení posuv nástroje. Jedná se o pohyb přímočarý nebo obecný. Velikost posuvové rychlosti  $v_f$  je vyjádřena vztahem (1.2). Řezný pohyb je výsledný pohyb složený z hlavního a vedlejšího pohybu. Při soustružení válcové plochy vede řezný pohyb po šroubovici, u soustružení čelní plochy je trajektorie řezného pohybu Archimédova spirála. Velikost rychlosti řezného pohybu je vyjádřena vztahem (1.3). Vektory rychlostí  $v_c$ ,  $v_f$  a  $v_e$  včetně popisu obrobku jsou znázorněny na obr. 1.1. Uvedené kinematické veličiny jsou vždy uvažovány jako okamžité a jestliže je uváděna střední hodnota veličin, je potřeba uvést časový interval pro danou hodnotu [2].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.1)$$

$$v_f = 10^{-3} \cdot f \cdot n \quad (1.2)$$

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad (1.3)$$

kde:  $D$  [mm] - průměr obrobku,  
 $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky vřetene,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku obrobku.



Obr. 1.1 Znázornění vektorů kinematických veličin [2].

## 1.2 Průřez třísky

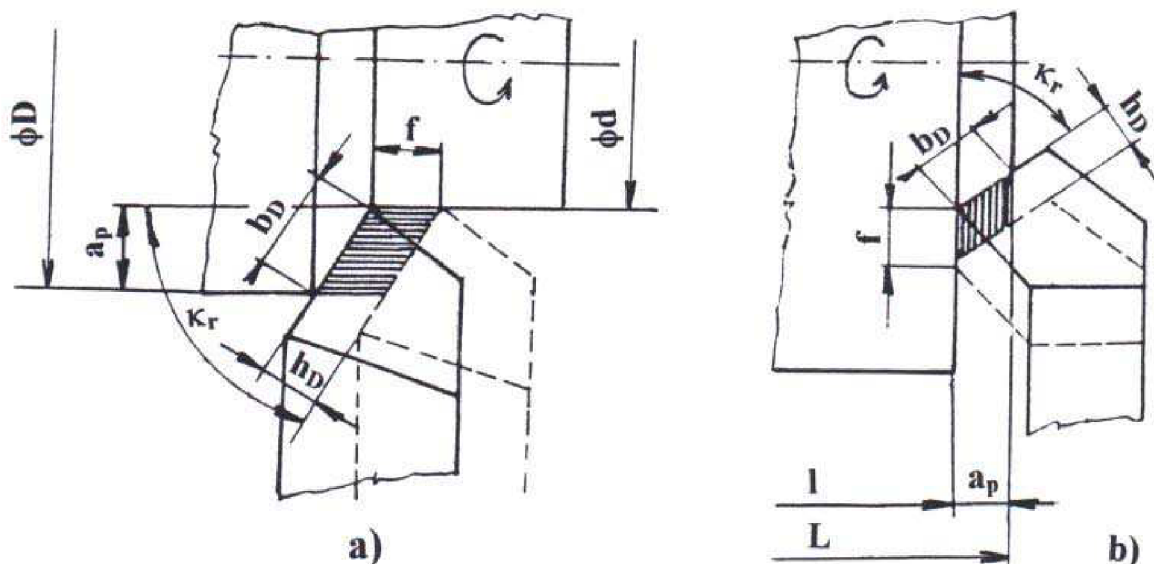
Jmenovitý průřez třísky  $A_D$  označuje plochu průřezu třískou vedeného v rovině řezu v daném okamžiku. Pro jmenovitý průřez při podélném a čelním soustružení platí vztah (1.4) [3]. Rozměry definující průřez třísky jsou znázorněny na obr. 1.2.

$$A_D = h_D \cdot b_D = a_p \cdot f \quad (1.4)$$

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1.5)$$

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \quad (1.6)$$

Kde:  $h_D$  [mm] - jmenovitá tloušťka třísky  
 $b_D$  [mm] - jmenovitá šířka třísky  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru hlavního ostří nástroje



Obr. 1.2 Rozměry definující jmenovitý průřez třísky, a) podélné soustružení b) čelní soustružení [1].

## 1.3 Řezné síly

Výsledné silové zatížení břitu (1.10) při podélném soustružení je dáno vektorovým součtem řezné síly  $F_c$  (1.7), posuvové síly  $F_f$  (1.8) a pasivní síly  $F_p$  (1.9) [4]. Prostorové uspořádání sil a jejich orientace je znázorněna na obr. 1.3.

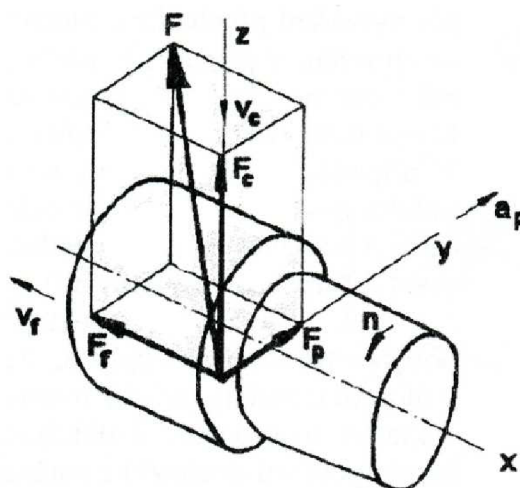
$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad (1.7)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad (1.8)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad (1.9)$$

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (1.10)$$

Kde:  $C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}$  [-] - materiálové konstanty  
 $x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}$  [-] - exponenty vlivu šířky záběru  $a_p$   
 $y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}$  [-] - exponenty vlivu posuvu  $f$ .



Obr. 1.3 Prostorové uspořádání a orientace sil při podélném soustružení. [4].

Další veličinou, charakterizující zatížení břitu během obrábění je měrná řezná síla  $k_c$ , která je definována vztahem (1.11). Jde tedy o řeznou sílu  $F_c$  vztahenou na jednotku průřezu třísky  $A_D$ . Na velikost měrné řezné síly má vliv pevnost a tvrdost obráběného materiálu, jmenovitá tloušťka třísky  $h_D$ , velikost nástrojového úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ , geometrie břitu atd. Hodnoty  $k_c$  se pohybují v řádech stovek až tisíců MPa [3].

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (1.11)$$

#### 1.4 Řezný výkon

Celkový řezný výkon potřebný pro proces řezání a pokrytí mechanických odporů stroje je dán součinem řezné rychlosti a řezné síly, ve vztahu (1.12) je také zahrnuta mechanická účinnost stroje [1].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \quad (1.12)$$

Kde:  $P_c$  [kW] - řezný výkon  
 $F_c$  [N] - řezná síla  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost  
 $\eta$  [-] - mechanická účinnost stroje

## 2 SLINUTÉ KARBIDY

Slinuté karbidy (SK) představují v dnešní době nejvýznamnější skupinu řezných materiálů. Dříve používané nástrojové oceli byly v průběhu 20. století postupně nahrazovány daleko výkonnějšími řeznými materiály a to především díky své všestrannosti, variabilitě a ceně. Dnes se v průmyslové praxi uplatňují především povlakované slinuté karbidy ve formě výměnných břitových destiček (VBD). Ty umožňují snadnou montáž do nožového držáku a jejich rychlou výměnu. Povlakované slinuté karbidy nabízejí především delší životnost řezné hrany, snižují vliv tření na čele a hřbetu nástroje, což má dopad na náklady spojené s procesem obrábění [5, 6].

### 2.1 Historický vývoj slinutých karbidů

Na přelomu 19. a 20. století se vědci a inženýři pokoušeli vytvořit materiál, který by se svými vlastnostmi blížil diamantu. Vzhledem k tehdejšímu metalurgickému znalostem a technickým možnostem to byl velmi obtížný úkol. Ve Francii se v posledním desetiletí 19. století podařilo vytvořit dva velmi tvrdé karbidy  $W_2C$  a  $WC$ , které mají vysokou teplotu tavení cca  $2800^\circ C$ , vysokou pevnost a zároveň vlastnosti kovů. Tyto materiály bylo možné odlévat, což ale nebylo efektivní, odlitky měly hrubozrnnou strukturu a byly velmi křehké [5].

Ve druhé dekádě 20. století se na trhu objevily tzv. slévárenské slitiny, což byly slitiny obsahující okolo 50% karbidů. Obsahovaly především W, Cr, Co. Tyto slitiny s názvem Stellite, Speedaloy Tungaloy vykazovaly vysokou tvrdost za teplot až  $800^\circ C$  a odolnost vůči opotřebení abrazí. Slévárenské slitiny nebyly však pro výrobu řezných nástrojů vhodné a to hlavně díky své křehkosti. Z hlediska složení to však byly materiály podobné později vyvinutým slinutým karbidům vyrobeným práškovou metalurgií [6].

Zkoumáním rychlořezných ocelí bylo zjištěno, že vysoká tvrdost a současně houževnatost je zajištěna přítomností tvrdých karbidů v kovovém pojivu. Toto zjištění bylo aplikováno do výroby nových materiálů na bázi karbidu wolframu  $WC$  a  $W_2C$  smíšených s cca 10% kobaltu. Tento materiál však nemohl být vyroben roztavením a následným odléváním. Proto byla vyvinuta metoda práškové metalurgie. Jde o výrobu velmi jemných částic karbidu wolframu kobaltu ve formě prášku. Směs těchto prášků v příslušném poměru byla slisována a ohřána nad teplotu  $1300^\circ C$  ve vodíkové atmosféře. Takto vzniklý materiál vykazoval malou pórovitost, vysokou tvrdost, dostatečnou houževnatost a rovnoměrné rozložení karbidů v celém objemu. První průmyslově vyráběný slinutý karbid byl vyvinut v roce 1926 v Německu firmou Krupp, na trh byl uveden pod názvem WIDIA (**W**Ie **D**IAmant – něm. Jako diamant). Nástroje ze slinutých karbidů používané na konci 30. let umožnily rapidní nárůst řezných podmínek, především řezné rychlost, která byl v porovnání s řeznou rychlostí nástrojových ocelí daleko vyšší [4, 5].

Vývoj technologie pro výrobu slinutých karbidů byl významným krokem vpřed v technologii třískového obrábění kovů. Aplikace SK znamenala zvýšení řezných podmínek, snížil se čas potřebný pro obráběcí operace, poklesly tak celkové náklady na výrobu a zároveň vzrostla efektivita výroby [6].

### 2.2 Rozdělení slinutých karbidů

Dělení řezných materiálů potažmo slinutých karbidů je dáno normou ČSN ISO 513, která definuje šest základních kategorií, podle druhu obráběného materiálu. Každá kategorie je označena písmenem a je jí přiřazena barva: **P** (barva modrá), **M** (barva žlutá), **K** (barva červená), **N** (barva zelená), **S** (barva hnědá), **H** (barva tmavě šedá). Dále je v označení

karbidů za písmenem dvojčíslí, které definuje způsob použití, respektive druh operace. Například dvojčíslí 01 značí použití pro dokončovací operace, tedy vyšší řeznou rychlost, menší posuv a šířku záběru hlavního ostří nástroje. Naopak dvojčíslí 40 značí využití břitové destičky pro hrubovací operace, nižší řeznou rychlost, větší posuv a šířku záběru hlavního ostří nástroje. Materiály s vyšším číslem mají větší obsah pojiva (Co), jsou houževnatější a mají vyšší pevnost v ohybu [5,7].

Karbidy TiC, NbC a TaC vykazují vyšší odolnost proti ztrátě tvrdosti za vysokých teplot než TiC [5].

Bližší přehled skupin, rozsah doplňkových dvojčíslí a charakteristika jednotlivých skupin je uvedena v tabulce tab. 2.1.

Tab. 2.1 Charakteristika skupin slinutých karbidů [5, 6, 7].

Skupina	Podskupina	Chemické složení	Určení
<b>P</b>	01, 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	WC (30 ÷ 82)%, Co (5 ÷ 17)%, TiC (8 ÷ 64)%, případně TaC, NbC	Obrábění materiálů tvořících dlouhou, plynulou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli, legované oceli), proces obrábění je doprovázen velkým silovým zatížením nástroje
<b>M</b>	01, 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	WC (79 ÷ 84)%, Co (6 ÷ 15)%, TiC (5 ÷ 10)%, TaC a NbC(4 ÷ 7)%	Obrábění materiálu, které tvoří dlouhou a střední třísku (lité oceli, uhlíkové oceli, austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny), použití pro těžké hrubovací operace a operace s vysokým zatížením bříty
<b>K</b>	01, 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	WC (87 ÷ 92)%, Co (4 ÷ 12)%, případně TaC, NbC	Obrábění materiálu vytvářejících krátkou drobnou třísku (šedá litina, nezelezné slitiny a nekovové materiály), při řezném procesu nedochází k příliš vysokému silovému a tepelnému zatížení bříty.
<b>N</b>			Obrábění nezelezných kovů a jejich slitin
<b>S</b>			Obrábění žáruvzdorných a speciálních slitin (Ni, Fe, Co, Ti)
<b>H</b>			Obrábění kalených ocelí nebo vytvrzených slitin s tvrdostí nad 48 HRc a zušlechťených ocelí s mezí pevnosti vyšší než 1500MPa

### 2.3 Výroba slinutých karbidů

Slinuté karbidy jsou materiály vyráběné výhradně metodou práškové metalurgie. Jak již bylo zmíněno, složení slinutých karbidů sestává z cca 90% tvrdých karbidových částic a 10% pojiva (kobalt). Metoda práškové metalurgie umožňuje vyrobit materiál s homogenním rozložením tvrdých částic a optimalizací této technologie je možné vyrobit slinuté karbidy vysoké jakosti.

Proces výroby slinutých karbidů sestává z těchto operací [6]:

-výroba prášků

- lisování polotovarů
- slinování
- tvarování polotovarů
- (povlakování)

### 2.3.1 Výroba prášků

Výchozím materiálem pro výrobu WC jsou rudy obsahující prvek wolfram, je to například scheelit ( $\text{CaWO}_4$ ) nebo wolframit ( $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ ). Zpracováním těchto rud lze získat velmi čistý oxid wolframový ( $\text{WO}_3$ ) ve formě prášku s různou velikostí zrna. Tento oxid se v prostředí  $\text{H}_2$  redukuje na čistý wolfram se současným vznikem vody  $\text{H}_2\text{O}$ . Čistý wolframový prášek dále prochází fází nauhličování, která spočívá ve smíchání wolframu se sazemí a za působení teploty cca  $(1600 \div 2000)^\circ\text{C}$  vzniká karbid WC. Velikost zrna prášku WC určuje vlastnosti konečného slinutého karbidu. Výroba prášku pojiva Co je založena podobně jako u WC na redukci oxidu kobaltu a následném mletí čistého kobaltu [5,6].

Dalším krokem ve výrobě je míchání prášků v potřebném poměru a jejich další mletí, který zaručí jemnozrnnou strukturu a homogenitu směsi. Mletí obvykle probíhá v rotačních mlýnech s horizontální osou rotace, které se plní předpřipravenými prášky a mlecími segmenty v podobě kuliček o průměru 8 – 15mm. Mlecí koule jsou zhotoveny ze stejného slinutého karbidu, jako je výsledný produkt celého procesu. Tím nedochází ke znečištění mleté směsi částicemi vzniklými abrazivním opotřebením koulí. Mlecí zařízení musí rotovat optimální úhlovou rychlostí, která zaručuje maximální účinnost mlecích koulí [5].

### 2.3.2 Lisování polotovarů

Připravená směs prášků karbidů a pojiva je potřeba před slinováním vytvarovat a ztuhnout, tím získá směs prášků soudržnost, požadovanou pevnost a tvar. Lisování se provádí v lisu pomocí nástroje lisovníku a lisovnice. Při tomto procesu nedochází k rovnoměrnému stlačení prášku díky tření o stěny nástroje. Největšího ztuhnutí je dosaženo u čela lisovníku a nejmenší naopak u stěn lisovnice. Tento jev se dá zmírnit užitím mazadla či plastifikátoru. Problém rozdílného stlačení prášku zmírňuje použití metody izostatického lisování (CIP – Cold Isostatic Pressing), u které tlak působící rovnoměrně na celý povrch způsobuje rovnoměrné stlačení polotovaru. Samotným lisováním nelze docílit kompaktní struktury výlisku. Pórovitost po lisování je  $(8 \div 50)\%$  [8,9].

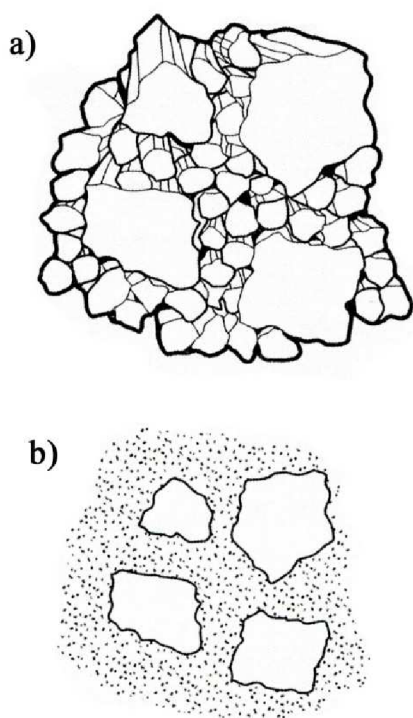
### 2.3.3 Slinování

Slinování je proces, během kterého se ze slisovaného polotovaru, který obsahuje velké množství pórů, stává kompaktní materiál – slinutý karbid (obr. 2.1). Slinování obvykle probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je ohřev polotovaru na teplotu  $(700 \div 850)^\circ\text{C}$ , neprobíhá změna chemického složení ani změna struktury. Účelem je odstranění plastifikátoru z předešlé operace. Druhý krok probíhá za teplot  $1400 \div 1600^\circ\text{C}$ , kdy pojivo Co přechází z tuhé do kapalné fáze, rozpouští se v něm velké množství karbidů, zanikají původní hranice zrn kovových prášků a díky procesu difúze probíhá k vyrovnávání koncentrací jednotlivých látek v objemu tělesa. Nerozpuštěná zrna karbidů hrubnou na úkor menších nestabilních zrn, která zanikají. Reakce a přeměny, které během slinování probíhají, jsou řízeny fázovými diagramy daných soustav (WC-Co, WC-TiC-Co). Hnací silou slinování je tendence snižovat povrchové napětí jednotlivých rozhraní. Platí, že čím

menší je výchozí zrno (větší mezifázové plochy), tím větší je energie mezifázového rozhraní a proces probíhá za nižších teplot. Při ochlazování je většina rozpuštěných karbidů opět vyloučena z pojiva a vznikají tak nová zrna karbidů. Doprovodným jevem slinování je zmenšení rozměrů výrobku o  $(17 \div 20)\%$ , což je způsobeno zánikem pórů a důsledkem je zhutnění slinutého karbidu [5,6].

Slinování se provádí ve slinovacích pecích (obr. 2.2) s ochrannou atmosférou ( $H_2$ ,  $H_2/N_2$ , Ar, vakuum). Prioritní je, aby v ochranné atmosféře nebyl přítomen kyslík, který by způsoboval oxidaci slinutých karbidů [5].

Produktem slinování je slinutý karbid, který má konečnou tvrdost a pevnost.



Obr. 2.1 Princip slinování: a) Před slinováním, b) Po slinování [6].



Obr. 2.2 slinovací pec [17].

### 2.3.4 Tvarování polotovarů

Během slinování dochází u některých druhů slinutých karbidů ke zmenšení objemu až o 50%. Proto je potřeba pro dosažení přesnosti tvaru a geometrie nástroje po slinování nástroje přebrousit do požadovaného tvaru. To se týká především výměnných břitových destiček pro frézování, kde je potřeba zajistit rovinnost dosedacích ploch. Jiné nástroje zase potřebují vybrousit fasetku na břitu. Naopak břitové destičky pro soustružení jsou dostatečně přesně vylisovány a po slinování je není třeba tvarovat [6].

Další zpracování probíhá kartáčováním ostří, za účelem dosáhnout požadovaného zaoblení ostří v řádu desítek mikrometrů. Zaoblené ostří je stabilnější a redukuje se vliv mikroskopických vad v ostří [6].



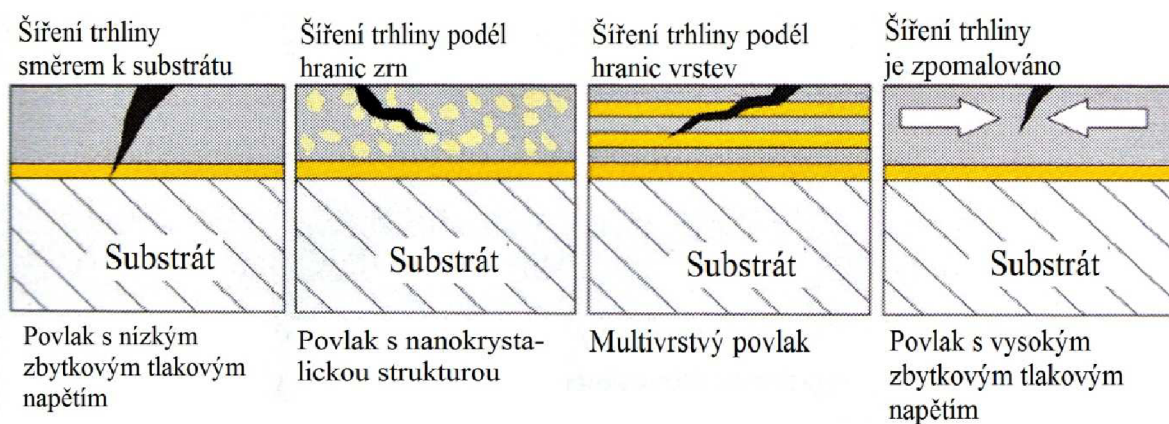
### 3 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD

Trvanlivost břitu nástroje slinutého karbidu je možné prodloužit nanesením jedné či více vrstev velmi tvrdého materiálu na povrch nástroje. Tato inovace byla poprvé aplikována firmou Sandvik Coromant na konci 70. let. Jednalo se o jednovrstvý povlak karbidu titanu (TiC – šedá barva) o tloušťce  $4 \div 5 \mu\text{m}$ . V dalších letech byly vyvinuty povlaky nitridu titanu (TiN – zlatá barva), karbonitridu titanu (TiCN), oxidu hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – černá barva). Díky této inovaci bylo možné další navýšení řezných podmínek, a to především řezné rychlosti [10].

V současné době jsou povlakované slinuté karbidy nejpoužívanějším nástrojovým materiálem a to především díky své všestrannosti, trvanlivosti, spolehlivosti a dobrému poměru ceny k výkonnosti [11].

#### 3.1 Výhody a přednosti aplikace povlaků na slinuté karbidy

Účelem aplikace povlakovaných slinutých karbidů je zvýšení životnosti břitu nástroje. To je dáno nanesením velmi tvrdého a pevného povlaku na houževnatější substrát slinutého karbidu, takže výsledný nástroj je odolnější vůči opotřebení. Vrstva povlaku je termodynamicky stabilní, zachovává si své vlastnosti i za vysokých teplot a vytváří bariéru mezi slinutým karbidem a obrobkem. Některé povlaky (např. TiN) zaručují nižší koeficient tření a usnadňují tak odchod třísky po čele, snižuje se tření mezi hřbetem nástroje a obrobkem [6]. Vícevrstvé povlaky navíc efektivně zabraňují šíření trhlin, v případě odloupení vnější vrstvy přebírá funkci vrstva pod ní. Šíření trhlin a funkce povlaku při jejich eliminaci jsou znázorněny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Šíření trhlin v různých typech povlaků [5].

#### 3.2 Výroba povlakovaných slinutých karbidů

Mezi metody používané pro povlakování nástrojů dnes patří metody:

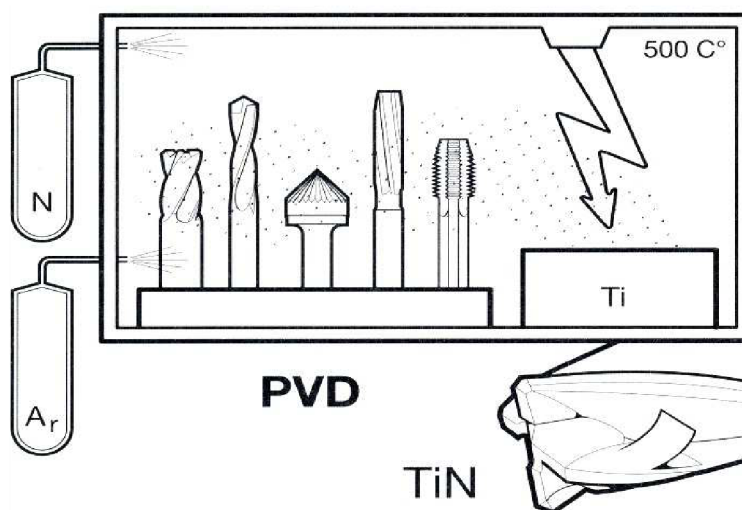
- PVD (**Physical Vapour Deposition**),
- CVD (**Chemical Vapour Deposition**),
- technologické varianty CVD (např. MTCVD - **M**iddle **T**emperature **C**hemical **V**apour **D**eposition, PACVD - **P**lazmaticky **A**ktivovaná **C**VD).

Každá z metod má své přednosti a nevýhody a slouží k vytvoření povlaků s rozličnými vlastnostmi a funkcemi.

### 3.2.1 Metoda PVD – fyzikální nanášení povlaku

Metoda je typická tím, že nanášení povlaků probíhá za teplot 400 až 600°C, tedy za teplot výrazně nižších než u metody CVD. Metoda je vhodná i pro povlakování rychlořezných ocelí, kde za teplot menších jak 500°C nedojde k tepelnému ovlivnění materiálu a ztrátě tvrdosti. Metoda je charakteristická vytvářením tenkých povlaků 3 až 5µm, u vícevrstevných může být tloušťka 0,2 až 0,8µm a u multivrstevných nanopovlaků dosahuje tloušťka hodnot menších než 0,2µm. Touto metodou lze povlakovat i tvarově složité nástroje a ostré břity s poloměrem zaoblení pod 20µm (například stopkové frézy a vrtáky), v povlaku vzniká během výroby vnitřní tlaková pnutí, která zvyšují houževnatost břitu a odolnost vůči vzniku tepelných hřebenových trhlin. Mezi nevýhody patří především směrovost nanášení, povlak ulpívá pouze na plochách natočených proti směru proudění částic budoucího povlaku. S nástroji je tedy potřeba během povlakování neustále pohybovat tak, aby byl povlak nanesen rovnoměrně. Další nevýhodou je složitější příprava substrátu (slinutého karbidu) před povlakováním (čištění, odmašťování) [6,10,11,12].

Samotný proces nanášení spočívá v odpaření nebo odprášení kovu, který vytváří sloučeninu povlaku, elektrickým obloukem nebo pomocí urychlených částic inertního plynu argonu (Ar). Odpařený či odprášený kov (např. Ti) následně reaguje s reakčním plynem (např. N<sub>2</sub>) a je dále urychlován elektrickým napětím (~50 až 400V) k substrátu, na kterém se usazuje (kondenzuje) a vytváří nejdříve shluky částic a postupem času souvislou vrstvu povlaku. Schéma PVD povlakování je na obr. 3.2 [5,6].



Obr. 3.2 Schéma PVD povlakování [6].

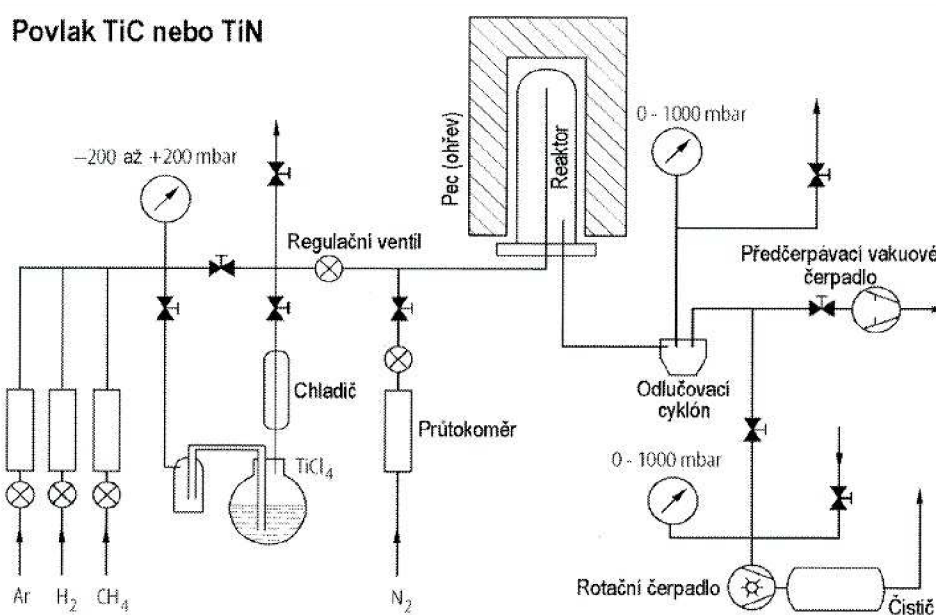
PVD povlaky jsou nanášeny těmi to metodami:

- **Metoda napařování (evaporation)** - Napařování je metoda, při které jsou atomy nebo molekuly ze zdroje povlakovacího materiálu (terče) odpařovány pomocí tepelného zdroje, následně jsou unášeny k substrátu bez srážek s molekulami zbytkových plynů. Tato metoda vyžaduje relativně nízké vakuum. Při těchto nízkých tlacích, je ale střední volná dráha odpařené látky dlouhá a důsledkem je nerovnoměrná vrstva povlaku. Proto se do komory přivádí např. argon (Ar) pod tlakem 0,7 ÷ 26,7 Pa. Odpařené atomy se sráží s tímto plynem, střední volná dráha se snižuje a vytváří se rovnoměrný povlak. Ohřev odpařované látky může probíhat například odporově, indukčně, obloukem, paprskem elektronů nebo laserem [5].

- **Metoda napařování (sputtering)** - Napařování je metoda, u které dochází k mechanickému odnášení (odprašování) částic z povrchu zdroje povlakovacího materiálu pomocí atomů plynů urychlených v elektrickém poli [18]. Odprašené částice jsou unášeny k substrátu, kde vytváří tenký povlak. Výhodou metody je možnost odprašování atomů z povrchu těžkovitelných materiálů. Stejně jako metody napařování i při této metodě je potřeba snížit tlak na cca  $0.7 \div 2$  Pa [5].
- **Metoda iontové implantace** - Tato metoda je hybridní a probíhá jak mechanismem napařování, tak napařování. Na substrát dopadají tyto částice urychlené silným elektrickým polem ( $50 \div 1000$  V), které je vytvořeno mezi terčem (anoda) a substrátem (katoda). V elektrickém výboji jsou částice plynné atmosféry i povlakovacího materiálu ionizovány a jejich vzájemnými reakcemi vzniká sloučenina povlaku, která se usazuje na substrátu. Touto metodou lze Ti v prostředí  $N_2$  vytvořit povlak TiN už při teplotě  $200 \div 450^\circ\text{C}$  [5].

### 3.2.2 Metoda CVD – chemické nanášení povlaku

Druhou základní metodou povlakování je metoda CVD – **C**hemical **V**apour **D**eposition, tedy metoda chemického napařování z plynné fáze. Pro tuto metodu je typická vysoká teplota při povlakování  $1000 \div 1200^\circ\text{C}$ . Tato metoda byla hojně využívána do 90. let 20. století, kdy bylo dosaženo dobrých výsledků metodou PVD. CVD metoda umožňuje nanášení silnějších povlaků o tloušťce 10 až  $13\mu\text{m}$ . Je charakteristická dobrou přilnavostí povlaku k podkladu, možností povlakovat složité tvarované nástroje a velkou variabilitou druhů povlaků a užitím v praxi. K nevýhodám této metody patří ovlivnění substrátu (slnutého karbidu) vlivem vysoké teploty, což má za následek snížení houževnatosti nástroje, není možné povlakovat ostré hrany a během výroby vznikají v povlaku tahová napětí [1,12]. Schéma zařízení pro CVD povlakování je na obr. 3.3.



Obr. 3.3 CVD povlakování [5].

Proces probíhá na bázi chemických reakcí plynných sloučenin v plazmě v bezprostřední blízkosti povrchu zahřátého substrátu. Výchozí plyny, které vstupují do reakce, musí obsahovat stabilní a zároveň prchavou sloučeninu (např.  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{ZrCl}_4$ ,  $\text{AlCl}_3$ ), která se díky vysoké energii plazmy rozkládá, a produkty rozkladu se ukládají na povrchu slinutého karbidu, kde působí jako katalyzátor. Aby proběhla reakce, při které se vytvoří materiál výsledného povlaku, je v přivedených plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn ( $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{CH}_4$ ). Do pece vstupuje také podíl tzv. nosných plynů  $\text{N}_2$  a  $\text{H}_2$ , které dopravují aktivní směs plynů k povrchu substrátu, ovlivňují rychlost růstu povlaku a je díky nim možné řídit celý proces. Tímto postupem lze vytvořit poměrně jednoduše vícevrstvé a multivrstvé povlaky tak, že se řídí složení přiváděné směsi plynů [5,1].

### 3.3 Vývoj povlakovaných nástrojů

Na začátku vývoje povlakovaných nástrojových materiálů bylo pouze několik základních typů povlaků, které se aplikovaly v jedné vrstvě. Již tyto povlaky však značně posunuly hranice obrábění dále. Postupem času bylo zjištěno, že kombinací jednotlivých povlaků o různých tloušťkách a vlastnostech a optimalizací procesu výroby lze docílit ideálních vlastností pro daný typ obráběného materiálu a danou technologii obrábění.

Vývojové stupně povlaků byly rozděleny do čtyř kategorií (generací) [5, 6]:

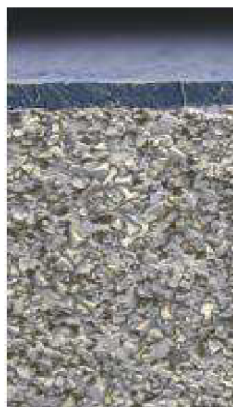
- **1. Generace** - Jednalo se o jednovrstvý povlak (v naprosté většině povlak  $\text{TiC}$ ) o tloušťce cca  $6\mu\text{m}$  (obr. 3.4). Tento povlak neměl dostatečnou přilnavost k podkladu, což bylo důsledkem nedokonalé technologie povlakování (na rozhraní povlak-podklad se vylučoval křehký  $\epsilon$ -karbid). V důsledku přítomnosti  $\epsilon$ -karbidu docházelo k rychlému odlupování povlaku a znehodnocení nástroje.
- **2. Generace** - Užitím jednovrstvého povlaku materiálů  $\text{TiC}$ ,  $\text{TiCN}$ ,  $\text{TiN}$  a optimalizací výroby, kde již nedocházelo k tvorbě  $\epsilon$ -karbidu na rozhraní povlak-podklad, byly vytvořeny povlaky o větší tloušťce  $7 \div 10\mu\text{m}$ . U těchto slinutých karbidů už nedocházelo k odlupování nanesené vrstvy povlaku.
- **3. Generace** - Aplikace vícevrstvého povlaku s dvěma, třemi a více ostře ohraničenými vrstvami (obr. 3.5). Vrstvy jsou nanášeny v pořadí tak, aby vrstva na podkladu (slinutém karbidu) měla dobrou přilnavost a její tvrdost není prioritní, u následujících vrstev je hlavní tvrdost, odolnost proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot. Naopak přilnavost nemusí být tak dobrá jako u první vrstvy. Využívají se tyto kombinace povlaků v pořadí od podkladu k povrchu nástroje:  $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC-TiN}$ ,  $\text{TiC-TiCN-TiN}$ ,  $\text{TiC-AL}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ .
- **4. Generace** - Speciální vícevrstvé povlaky (multivrstvé povlaky), které se skládají i z více než 10 vrstev jednotlivých povlaků (obr. 3.6). Jednotlivé vrstvy jsou odděleny více či méně výraznými hranicemi. Jde o kombinaci stejných druhů povlaků jako u 3. generace. Výroba takovýchto multivrstvých povlaků je umožněna cíleným řízením chemického složení atmosféry v zařízení pro povlakování. Vícevrstvé povlaky mají schopnost minimalizovat šíření trhlin od povrchu směrem k podkladu a zvýšit tak životnost nástroje. Navíc se do 4. generace řadí i diamantové, gradientní, nanokompozitní a supermřížkové povlaky.

**Gradientní povlaky** – u těchto povlaků se složení jednotlivých vrstev mění postupně od substrátu k povrchu řezné destičky.

**Diamantové povlaky** – povrch nástroje je pokryt vrstvou jemnozrnného diamantového prášku.

**Nanokompozitní povlaky** – povlak je tvořen dvěma nebo více složkami, které jsou v sobě navzájem nerozpustné a alespoň jedna ze složek je krystalická.

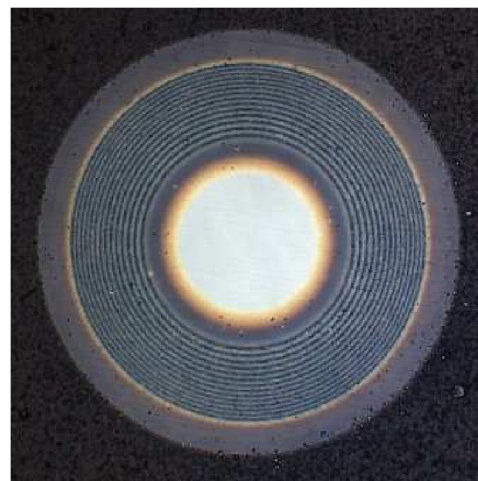
**Supermřížkové povlaky** – u těchto povlaků je základní vrstva nanášena s velmi malou periodou, takže vzniká jednotná mřížka. Složky tohoto povlaku nesmí být krystalické.



Obr. 3.4 Složení povlaku 1. a 2. generace [11].



Obr. 3.5 Složení povlaku 3. generace [7].



Obr. 3.6 Složení povlaku 4. generace (kalota) [15].

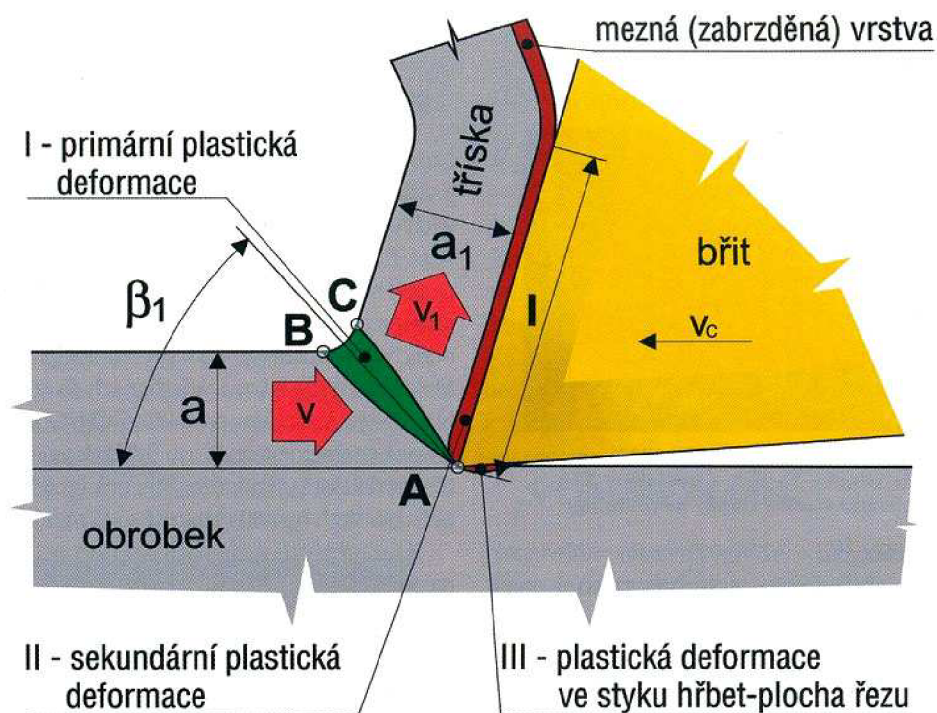
## 4 OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÉHO NÁSTROJE

Proces opotřebení břitu nástroje je nedílnou součástí každého řezného procesu obrábění. Je to důsledek mechanického, tepelného a chemického působení na čelo a hřbet nástroje. Míra zatížení je závislá na aplikovaných řezných podmínkách, typu obrábění, materiálu obrobku a typu obráběcí operace a pro danou kombinaci těchto faktorů je třeba zvolit co nejvýhodnější řezné podmínky tak, aby byl proces efektivní a využil se potenciál řezného materiálu. Také je potřeba znát základní mechanismy opotřebení a tvorby třísky.

#### 4.1 Průběh procesu tvorby třísky

Při vnikání nástroje do materiálu a následné tvorbě třísky vzniká v materiálu obrobku nejdříve pružná a následně plastická deformace ve třech oblastech (oblast I, II a III) znázorněných na obrázku tvorby třísky (obr. 4.1). K primární plastické deformaci I dochází před břitem nástroje, který odděluje vrstvu materiálu o tloušťce  $a_1$ . Tato vrstva je přechována na čele nástroje, a proto platí, že  $a_1 > a$ . Tříška po čele nástroje tedy odchází rychlostí  $v_1 < v_c$ . V sekundární oblasti vzniká plastická deformace vlivem velmi intenzivního tření třísky o čelo nástroje. Tření způsobuje brzdění třísky, vznik tzv. mezní vrstvy. Terciární oblast plastické deformace se nachází v tenké povrchové vrstvě obrobku, vzniká v důsledku tlakového či tahového zatížení povrchu obrobku nástrojem, jehož břit tvoří válcová plocha o poloměru 5 až 20  $\mu\text{m}$  a povrch obrobku nevzniká jen řezáním, ale také tvářením. Tím je povrch deformačně zpevňován [13,1].

Během rezného procesu se téměř veškerá práce vnesená do procesu obrábění přeměňuje na tepelnou energii. Pro opotřebení nástroje má velký vliv sekundární a terciární oblast deformace, která probíhá v malé vrstvě materiálu a na malé stykové ploše. Vzniká zde vlivem tření vysoká teplota, která zatěžuje čelo a hřbet nástroje. Tento jev má zásadní vliv na opotřebení břitu nástroje [13].



Obr. 4.1 Tvorba třísky [13].

#### 4.2 Mechanismy opotřebení nástroje

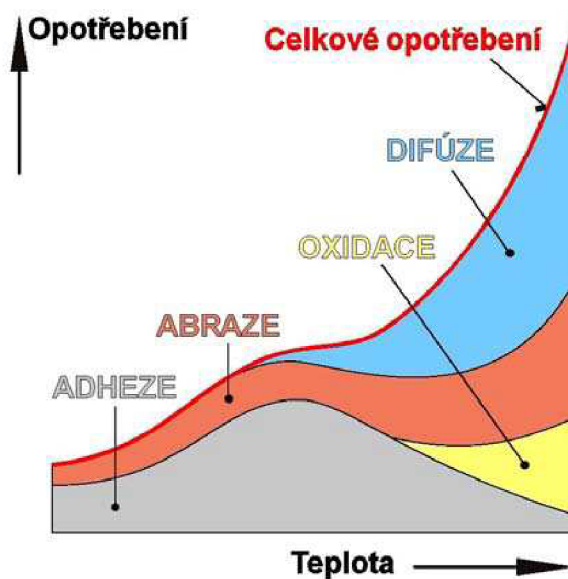
Při vzniku opotřebení nástroje se uplatňují tyto základní mechanismy [1, 6, 14]:

- **Abraze** – neboli obrušování nástroje patří mezi fyzikální mechanismy a je způsobeno třením třísky o čelo nástroje a třením obrobkové plochy o hřbet nástroje. Tvrdé strukturální složky obráběného materiálu, které mohou být stejné povahy jako nástrojový materiál, způsobují mechanické narušování povrchu nástroje. Tento mechanismus se uplatňuje především u legovaných materiálů,

kteří obsahují karbidy legur W, Cr, Ti, tedy stejné karbidy, které jsou obsaženy ve slinutých karbidech nebo jejich povlacích.

- **Adheze** – je dalším fyzikálním mechanismem opotřebení. Tento mechanismus je významný zejména při obrábění při nižší řezné rychlosti, kdy teplota mezi třískou odcházející po čele nástroje a čelem nedosahuje příliš vysokých hodnot. Adhezní opotřebení je umožněno stykem chemicky čistých povrchů a jejich podobnosti. Povrch třísky a nástroje jsou na sebe při řezu tlačeny velkou silou a v místech styku mikrone rovností dochází k plastické deformaci, obnažení chemicky čistého povrchu a teplo vzniklé třením a deformací umožní vznik mikroskopických svarů – adhezních spojů (princip vzniku nárustku). Pohybem třísky dochází k neustálému porušování takto vzniklých spojů. Nejčastěji se odtrhne obráběný materiál, který ulpívá na čele nástroje. Může se ale utrhnout i nástrojový materiál, zejména v okolí poruch a nehomogenit. Adhezní opotřebení nástroje je tedy důsledkem vzniku a následného porušování mikrosvarů na čele nástroje.
- **Difúze** – patří mezi chemické mechanismy opotřebení. Negativní vliv difúze je závislý především na chemické afinitě materiálu obrobku a nástrojového materiálu. Difúze (tedy migrace částic látky na velké vzdálenosti) může probíhat jak ve směru nástroj → obráběný materiál, tak ve směru obráběný materiál → tříska (difunduje W, C, Co). Difúzní mechanismus je dominantní při vysokých teplotách ( $t > 800^{\circ}\text{C}$ ), tedy při vysokých řezných rychlostech a tlacích. Tento mechanismus opotřebení přispívá k tvorbě žlábků na čele nástroje. K procesu difúze výrazně přispívá i styk chemicky čistých povrchů, oxidické povlaky materiálu by výrazně snížily vliv difúze.
- **Oxidace** – chemický mechanismus opotřebení probíhající díky přítomnosti kyslíku obsaženému v atmosféře. Proces oxidace je umocněn vysokými teplotami v řezu. Některé materiály (např. W, Co) vytvářejí porézní filmy oxidů, které jsou snadno odnášeny třískou. Naopak prvky jako je například hliník vytváří tvrdé a odolné oxidy.
- **Lom** – je mechanické poškození bříty. V okamžiku zlomení bříty zaniká funkce bříty a obráběcí proces se musí ukončit. Jedná se o náhlou změnu geometrie bříty vyvolanou jak statickými, tak dynamickými (přerušované řezy, přítomnost vměstků) účinky řezných sil.
- **Plastická deformace** – fyzikální mechanismus opotřebení nástroje, který je způsoben teplotami přesahujícími mez stability nástrojového materiálu (u SK je to teplota cca  $1100^{\circ}\text{C}$ ), a vysokým zatížením bříty. Dochází ke zborcení ostří směrem do břitové destičky. Tento jev podporuje tvorbu výmolu na čele.

Vliv teploty na výskyt jednotlivých mechanismů opotřebení je znázorněn na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vliv teploty na míru výskytu mechanismů opotřebení [1].

### 4.3 Typy opotřebení břitu [6, 16]

Mechanismy opotřebení zmíněné v předchozím textu mají za následek narušování povrchu břitové destičky, degradaci břitu a zhoršení jeho mechanických vlastností. Důsledkem je zhoršení jakosti obrobeného povrchu, přesnosti obrábění, případně nekontrolovaný odchod třísky z řezu. Proces opotřebení je třeba sledovat, vyhodnocovat a následně optimalizovat řezné podmínky tak, aby docházelo k rovnoměrnému opotřebení. Můžeme tak zvýšit produktivitu a životnost břitu.

#### 4.3.1 Opotřebení na hřbetě břitu

Opotřebení hřbetu břitu je často hlavním parametrem při vyhodnocování opotřebení břitu. Je to typ opotřebení způsobený abrazivními pochody při tření obrobku o hřbet nástroje. Při vyhodnocování tohoto opotřebení se měří šířka fazetky opotřebení na hřbetě **VB** (viz obrázek obr.). Rovnoměrný nárůst parametru **VB** je žádoucí a dokazuje stabilitu řezného procesu. Doporučená hodnota parametru **VB** by měla ležet přibližně v intervalu 0,2 ÷ 0,8mm. Příliš velké opotřebení na hřbetě způsobuje zhoršení jakosti obrobeného povrchu, přesnosti obrábění a zvyšuje se tření na hřbetu. Řešením může být snížení řezné rychlosti nebo použití slinutého karbidu s vyšší odolností proti otěru.

#### 4.3.2 Opotřebení na čele (výmol na čele)

Opotřebení na čele je důsledkem abrazivního a difúzního procesu. V místech tření třísky o čelo vznikají vysoké teploty, tím je urychlen proces difúze a obrušování povrchu nástroje tvrdými částicemi třísky. Parametr popisující toto opotřebení je hloubka výmolů na čele (značka **KT**). Důsledkem tohoto typu opotřebení je změna tvaru utvařeče třísky, což může způsobit zhoršení odchodu třísky z řezu. Dále dochází k oslabování břitu a ke ztrátě jeho mechanických vlastností. Tento jev se dá zmírnit použitím řezného materiálu s malou afinitou k materiálu obrobku (zmírnění difúze), snížením řezné rychlosti nebo použitím slinutého karbidu s větší odolností proti otěru.



### 4.3.3 Opotřebení ve tvaru žlábků na hlavním a vedlejším hřbetě břitu

Tento druh opotřebení je způsoben adhezním a oxidačním mechanismem. Vruby se vytváří v místech boků třísky, tedy v místě, kde se stýká tříska, nástroj a okolní prostředí. Příliš velké opotřebení ve tvaru žlábků oslabuje ostří, může dojít k lomu a mění se tvar utvařeče třísky.

### 4.3.4 Hřebenovité trhliny na ostří

Trhliny na ostří vznikají v důsledku prudkých změn teplot ostří (přerušované řezy). Použití procesní kapaliny podporuje tvorbu hřebenových trhlin, protože dochází k prudkému ochlazení ostří po vyjetí z řezu. Trhliny jsou orientovány kolmo k ostří. Tvrdé částice obráběného materiálu mohou břit s trhlinami snáze narušovat a může dojít k vylamování ostří. Řešením je snížení teplotních rozdílů na břitu během obrábění.

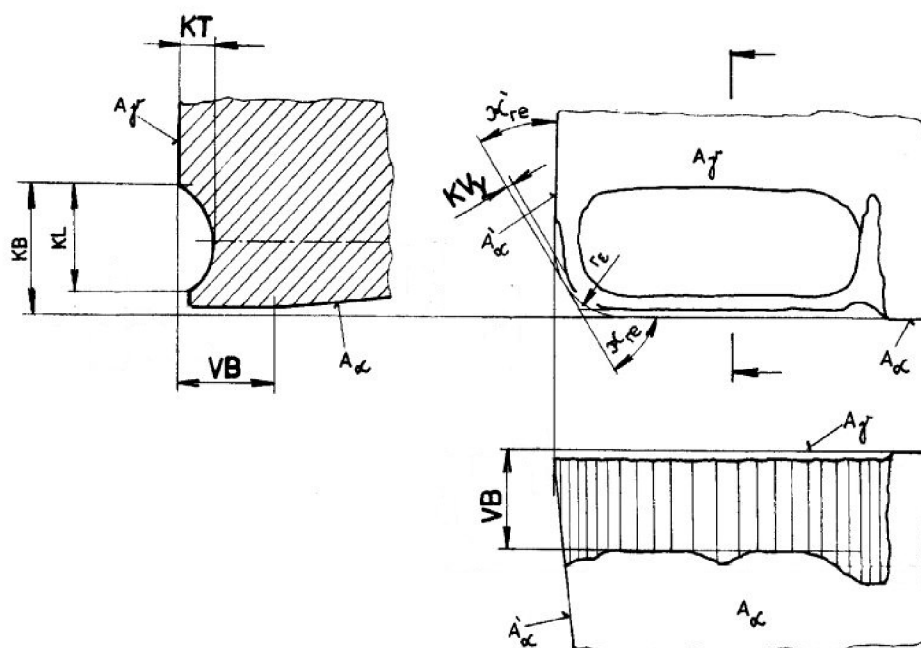
### 4.3.5 Vydrolování ostří

Druh opotřebení, který není způsoben kontinuálním opotřebováváním, ale dochází k odlamování částí ostří. Tento jev je v každém případě nežádoucí, není možné předpovědět, jak bude probíhat další opotřebení břitu. Vydrolování je způsobeno vysokými rázovými zatíženími ostří při obrábění materiálu přerušovanými řezy nebo materiálu obsahujícího tvrdé částice. Vydrolování předchází tvorba trhlin, které je možné pozorovat a předejít tak tomuto typu opotřebení.

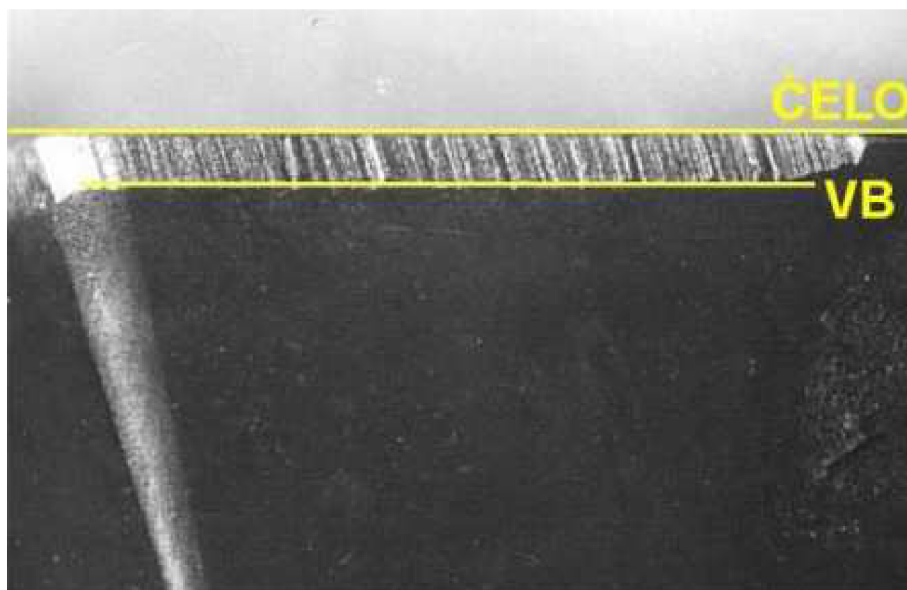
### 4.3.6 Radiální opotřebení špičky

Vlivem abraze je opotřebováván i samotný rádius břitu a dochází tak ke změně rozměrů břitové destičky, což je nežádoucí především u dokončovacích operací, kde je kladen důraz na rozměrovou přesnost. Parametr popisující toto opotřebení je se značí  $KV_y$ .

Jednotlivé parametry opotřebení jsou znázorněny na obr. 4.3. Na obr. 4.4 je snímek nástroje opotřebovaného na hřbetu a zvýrazněn parametr opotřebení VB.



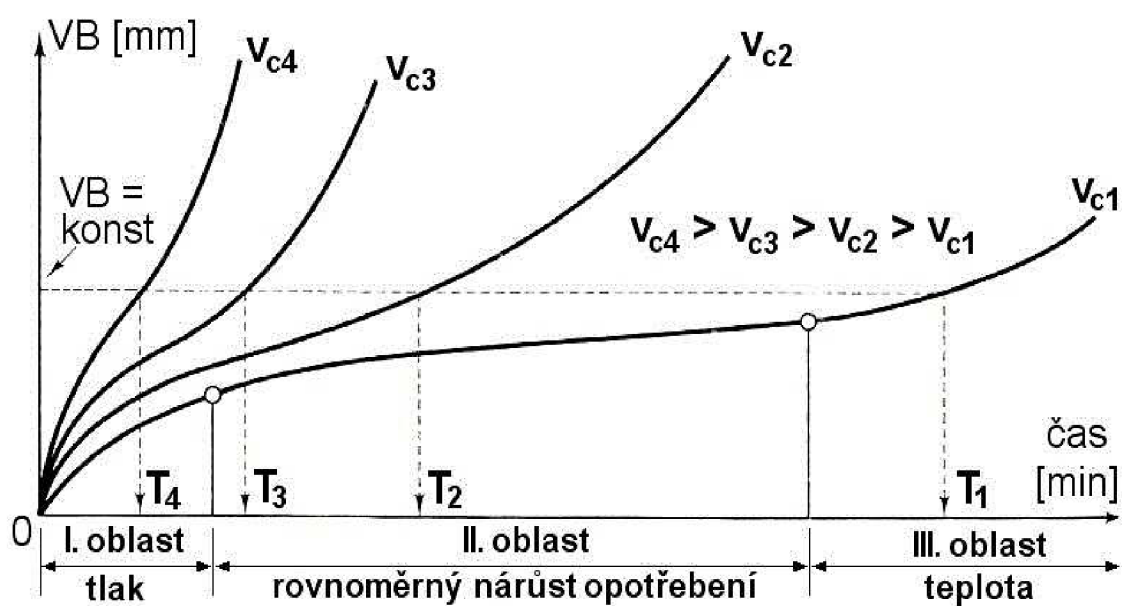
Obr. 4.3 Kritéria opotřebení [1].



Obr. 4.4 Snímek nástroje opotřebovaného na hřbetu, znázornění parametru VB [19].

#### 4.4 Průběh opotřebení

Průběh opotřebení se nejčastěji sleduje pomocí parametru opotřebení na hřbetě bříty VB. Typický průběh je znázorněn na obr. 4.5. Podle obrázku je životnost bříty rozdělena do tří oblastí. V první oblasti opotřebení narůstá rychle vlivem velkého měrného zatížení bříty, které je způsobeno malými stykovými plochami mezi nástrojem a obrobkem. Ve druhé oblasti se nárůst opotřebení ustaluje a je rovnoměrný a pozvolný. Ve třetí oblasti dochází k exponenciálnímu nárůstu opotřebení vlivem únavy řezného materiálu a kumulace opotřebení z předchozího obrábění [1].



Obr. 4.5 Průběh opotřebení na hřbetě bříty VB v závislosti na čase [1].

## 5 EXPERIMENT

Praktická část této bakalářské práce byla zaměřena na stanovení vlivu řezných podmínek na opotřebení břitu vybrané výměnné břitové destičky (dále jen VBD) při soustružení materiálu Inconel 718. Největší pozornost byla zaměřena na řeznou rychlost  $v_c$ , menší pak na posuv na otáčku a na šířku záběru hlavního ostří

Praktická část obsahuje charakteristiku obráběného materiálu, použitého stroje a nástroje, popis průběhu experimentu a vyhodnocení naměřených hodnot.

### 5.1 Materiál obrobku

Obráběný materiál byl Inconel 718, který se řadí mezi tzv. superslitiny. Dominantní složkou tohoto materiálu je nikl (Ni). Superslitiny jsou určeny pro aplikace, kde se vyžaduje odolnost a funkčnost materiálu při vysokých teplotách (70% teploty tavení materiálu). Tyto slitiny jsou vysoce odolné proti oxidaci a korozi a nacházejí tedy využití především v konstrukci leteckých motorů. Důležitá je také dobrá odolnost superslitin proti creepu [20].

Tab. 5.1 popisuje materiálové složení slitiny Inconel 718. Tento materiál vykazuje vysokou pevnost do teplot 700°C, korozní odolnost a zároveň je dobře svařitelný. Inconel 718 je využíván především v leteckém průmyslu, spalovacích turbínách, jaderném a ropném průmyslu [22].

Vybrané mechanické vlastnosti Inconelu 718 jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tab. 5.1 Chemické složení Inconelu 718 [21].

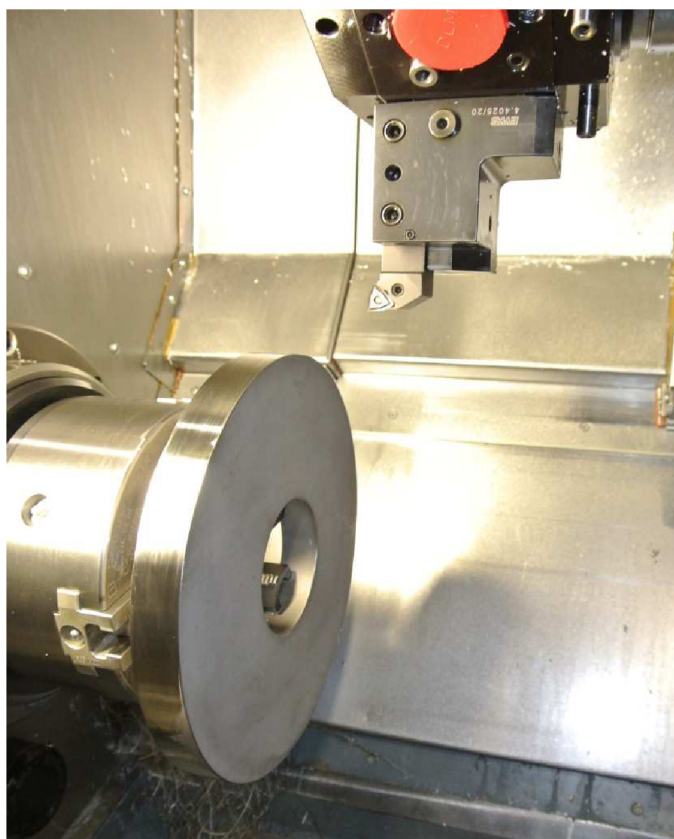
Prvek	Množství [hm. %]
Ni (Nikl)	50 ÷ 55
Cr (Chrom)	17 ÷ 21
Fe (Železo)	zbytek
Nb + Ta (Niob + Tantal)	4,75 ÷ 5,5
Mo (Molybden)	2,8 ÷ 3,3
Ti (Titan)	0,65 ÷ 1,15
Al (Hliník)	0,2 ÷ 0,8
Co (Kobalt)	max. 1,0
C (Uhlík)	max. 0,08
Mn (Mangan)	max. 0,35
Si (křemík)	max. 0,35
P (Fosfor)	max. 0,015
S (Síra)	max. 0,015
B (Bor)	max. 0,006
Cu (Měď)	max. 0,3

Tab. 5.2 Vybraných mechanických vlastností Inconelu 718 [22].

Mechanická vlastnost	hodnota
Hustota [ $\text{g.cm}^{-3}$ ]	8,19
Mez pevnosti [MPa]	1413
Mez kluzu [MPa]	1138
Tažnost [%]	20
Tvrдость HRC	43

Materiál byl obráběn ve vytvrzeném (vystárlém) stavu. Tvrdost byla změřena pomocí tvrdoměru Leco LR 300T. Změřená tvrdosti zkušební obrobku byla 41,1HRC. Díky svým mechanickým vlastnostem je Inconel 718 řazen do skupiny těžce obrábitelných materiálů.

Pro experiment byl společností Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. poskytnut materiál Inconel 718 ve formě dvou kotoučů o průměru 280mm a tloušťce 26mm. Na obr. 5.1 je zkušební obrobek upnutý ve sklíčidle soustruhu.



Obr. 5.1 Zkušební obrobek.

## 5.2 Obráběcí nástroj

Pro experiment byly společností Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o poskytnuty tři kusy VBD typu WNMG 080408 MS KCU10 výrobce Kennametal (obr. 5.3).

Jedná se o břitovou destičku z houževnatého slinutého karbidu povlakovanou multivrstevným PVD povlakem. Povrchovou vrstvou povlaku tvoří AlSiTiN, pod kterou následuje vrstva AlTiN. Tyto dvě vnější vrstvy tvoří termomechanicky stabilní povlak a hranice mezi těmito vrstvami zpomaluje šíření mikrotrhlin v povlaku. VBD s označením KCU10 jsou určeny pro všeobecné i dokončovací obrábění ocelí, litin, neželezných kovů a superslitin se zvýšenou pevností [23].

Pro upnutí VBD byl použit nožový držák PWLNL 2525 M 08 značky Pramet Tools. Na obr. 5.2 je vyobrazen nástrojový držák s upnutou VBD.



Obr. 5.2 VBD upnutá v nástrojovém držáku  
PWNL 2525 M 08



Obr. 5.3 VBD WNMG 080408 MS KCU10.

### 5.3 Obráběcí stroj

Experiment probíhal na číslicově řízeném soustruhu MAS SP 280 SY (obr. 5.4). Tab. 5.3 popisuje základní technická data tohoto stroje. Soustruh umožňuje efektivní využití moderních obráběcích nástrojů, řízení zajišťuje systém Siemens Sinumeric. Suport je tvořen nástrojovou hlavou, která je schopna pojmout až 12 nástrojů. Možné je i použití hnaných nástrojů. Stroj je osazen proti-vřetenem o výkonu 7,5kW, které nahrazuje koník.



Obr. 5.4 CNC soustruh MAS SP 280 SY.

Tab. 5.3 Základní parametry soustruhu MAS SP 28 SY [24].

Technická data	Hodnota
Oběžný průměr nad ložem [mm]	570
Maximální délka soustružení [mm]	450
Maximální průměr soustružení [mm]	280
Maximální otáčky elektrovřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]	6000
Výkon elektrovřetene [kW]	20,9
Max. krouticí moment [Nm]	200
Počet poloh nástrojové hlavy [-]	12
Rozměry stroje (DxŠxV) [mm]	3875 x 2122 x 2345
Hmotnost stroje	7900

#### 5.4 Řezné podmínky a průběh experimentu

Hodnoty řezné rychlosti ( $v_c$ ), posuvu na otáčku ( $f$ ) a šířky záběru hlavního ostří nástroje ( $a_p$ ) vycházely z řezných podmínek užívaných při obrábění materiálu Inconel 718 ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. (Tab 5.4). Bylo provedeno celkem sedm měření s různými řeznými podmínkami při podélném soustružení.

Tab. 5.4 Výchozí řezné podmínky.

Řezné podmínky	Hodnota
$v_c$ [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	40
$f$ [mm]	0,1÷0,2
$a_p$ [mm]	0, 2÷0,4

Během experimentu byly nastaveny čtyři různé řezné rychlosti ( $v_c= 30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $v_c= 40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $v_c= 50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $v_c= 60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Pro parametry  $f$  a  $a_p$  byla zvolena střední hodnota  $f=0,15\text{mm}$  a  $a_p=0,3\text{mm}$ , tyto parametry byly po dobu testování konstantní. V průběhu obrábění byla měřena hodnota hřbetního opotřebení VB (šířka opotřebení hřbetu nástroje) a jeho mezní hodnota byla nastavena na 0,3mm. Po dosažení této hodnoty bylo obrábění při daných podmínkách ukončeno. V této části byla po každém průjezdu měřena také jakost  $R_a$  obrobeného povrchu pomocí drsnoměru Time TR 100.

Při testování vlivu posuvu na otáčku na opotřebení byla nastavena konstantní řezná rychlost  $v_c= 40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  a konstantní šířka záběru hlavního ostří  $a_p=0,4\text{mm}$ . Proměnný byl posuv na otáčku  $f$  ( $f=0,1\text{mm}$ ;  $f=0,15\text{mm}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ). V této části byla limitní hodnota VB stanovena na 0,2mm, a to především z časových důvodů.

Hodnota parametru VB byla měřena po jednom až dvou průjezdech v závislosti na nastavených řezných podmínkách a rychlosti růstu opotřebení. K měření opotřebení byl použit dílenský mikroskop.

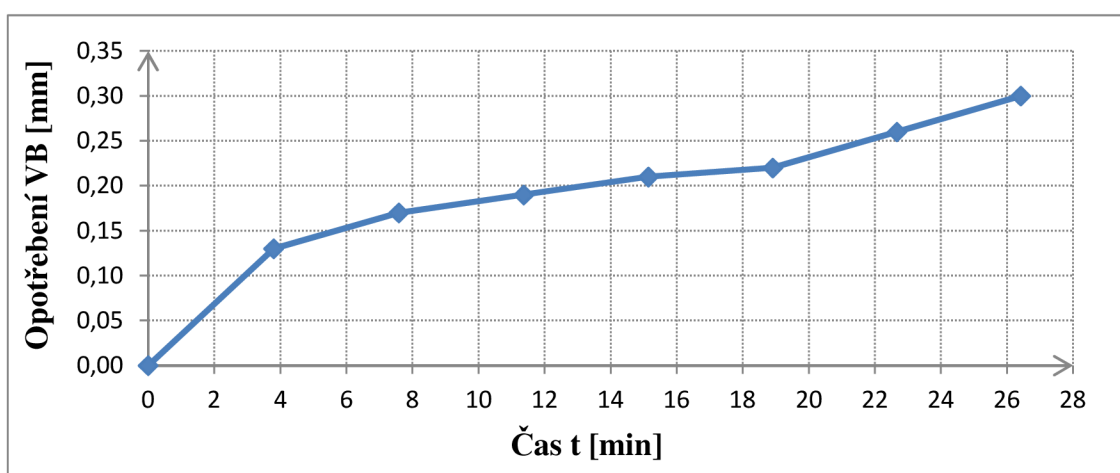
Během obrábění bylo místo řezu chlazeno proudem procesní kapaliny Cimstar 597 firmy Cimcool. Koncentrace emulzní kapaliny byla 9%.

#### 5.5 Rozbor naměřených hodnot, vyhodnocení

##### 5.5.1 Vliv řezné rychlosti na opotřebení VBD

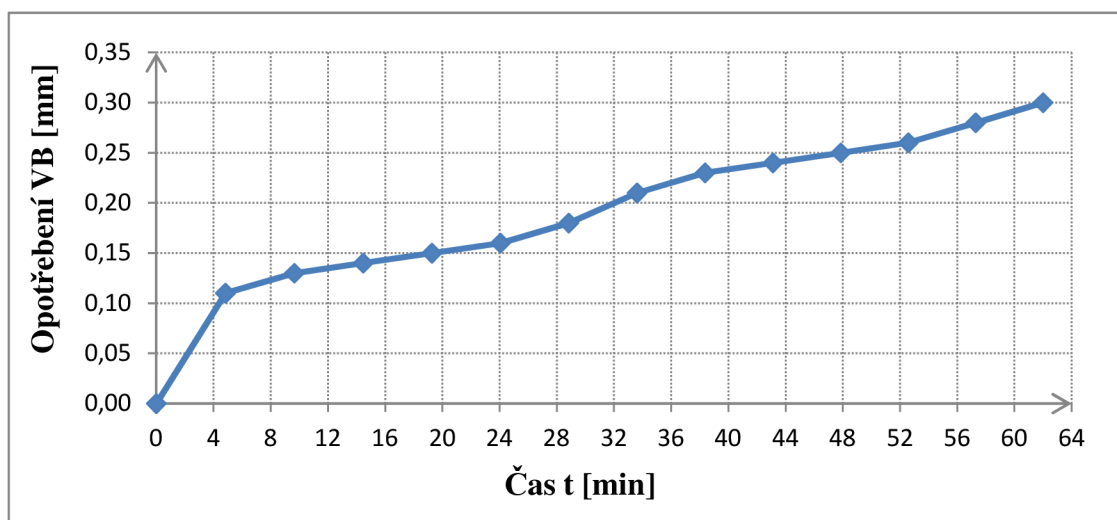
Posuv na otáčku a šířka záběru hlavního ostří jsou konstantní ( $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ ).

Na obrázcích (obr. 5.5 až obr. 5.9) jsou vykresleny naměřené hodnoty parametru opotřebení VB v závislosti na čase pro podélné soustružení materiálu Inconel 718 při použití VBD WNMG 080408 MS KCU10. Všechny průběhy opotřebení vykazují rychlý nárůst opotřebení na počátku, poté se nárůst opotřebení ustálí a není tak výrazný. V poslední fázi opotřebení opět narůstá strměji.



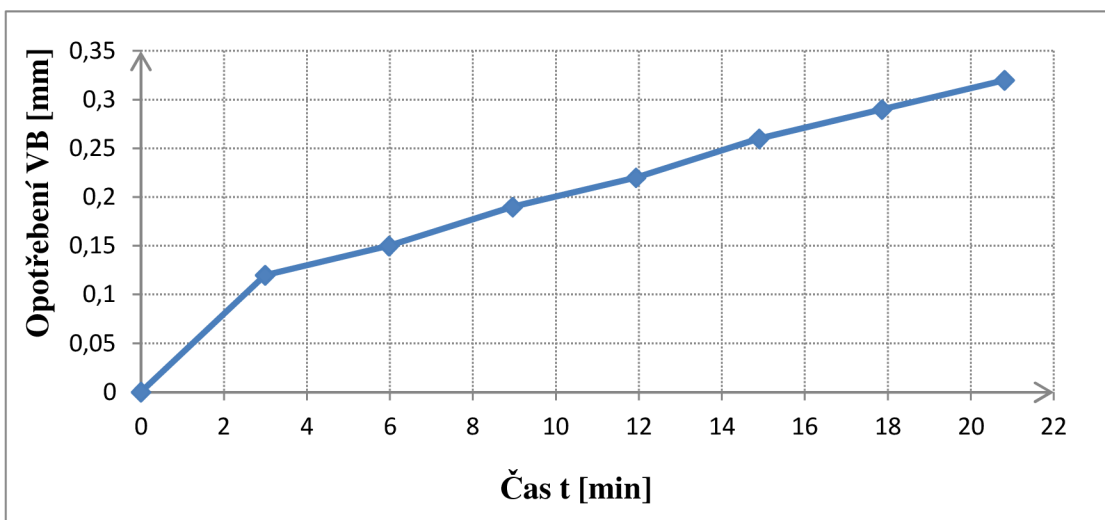
Obr. 5.5 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Obrázek 5.5 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci řezné rychlosti  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , užívané při obrábění materiálu Inconel 718 ve společnosti Honeywell. Trvanlivost nástroje byla  $T=26,5\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,3\text{mm}$ . Drsnost povrchu v tomto případě dosahovala poměrně vysokých hodnot (max.  $R_a=4,41\mu\text{m}$ ).



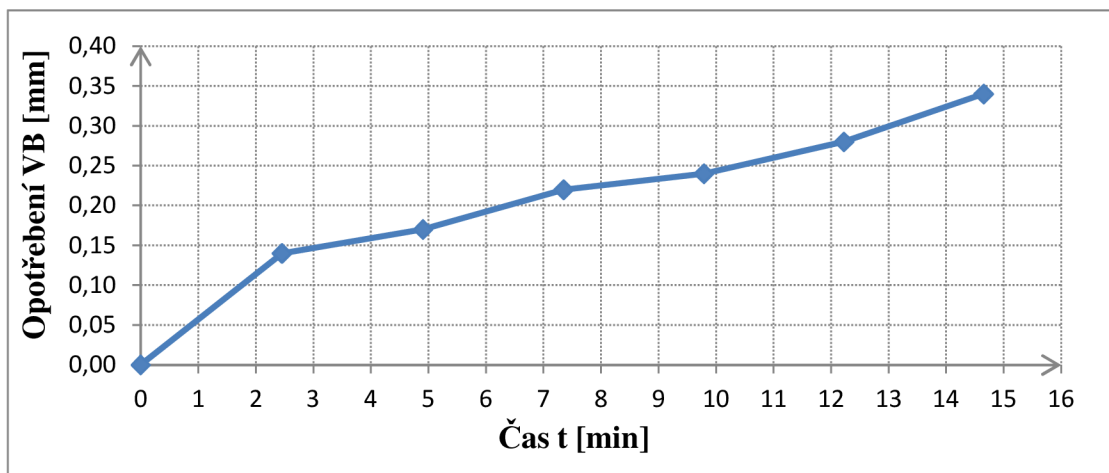
Obr. 5.6 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $v_c=30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Obrázek 5.6 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci řezné rychlosti  $v_c=30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Drsnost povrchu dosahovala v tomto případě výborných hodnot (max.  $R_a=1,41\mu\text{m}$ ). Trvanlivost nástroje byla  $T=63\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,3\text{mm}$ . Z pohledu efektivního využití nástroje a stroje však tuto řeznou rychlost nepovažuji za vhodnou.



Obr. 5.7 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Obrázek 5.7 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci řezné rychlosti  $v_c=50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Trvanlivost nástroje byla  $T=20,8\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,3\text{mm}$ . Drsnost povrchu nabývala v tomto případě maximální hodnotu  $Ra=1,85\mu\text{m}$ . Tato řezná rychlost se mi v porovnání s ostatními testovanými řeznými rychlostmi jeví jako nejeftektivnější.

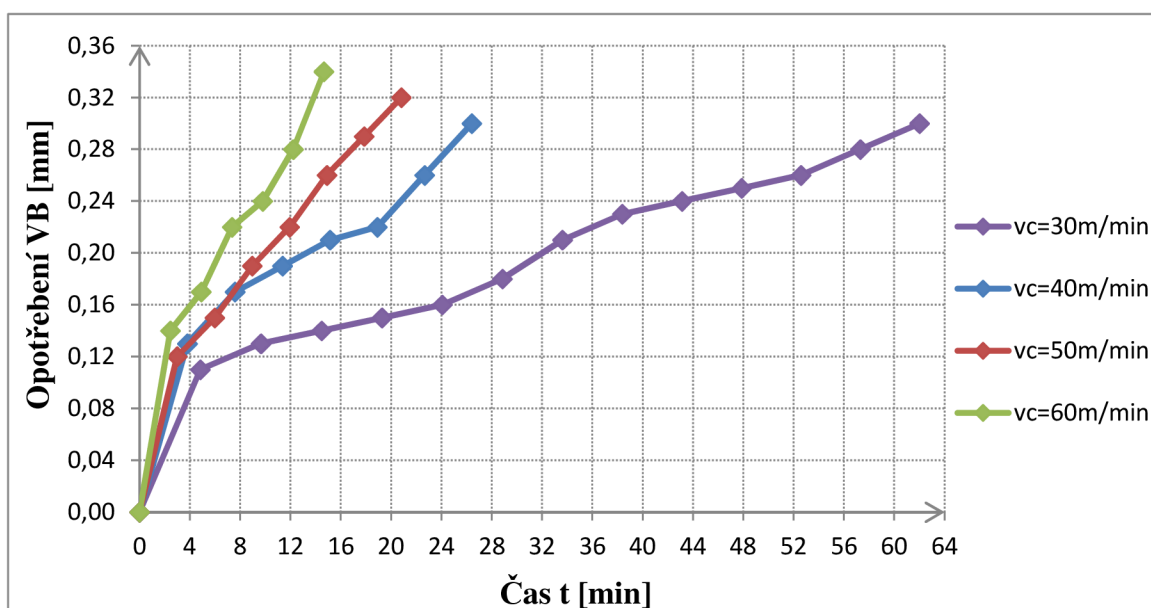


Obr. 5.8 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $v_c=60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Obrázek 5.8 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci řezné rychlosti  $v_c=60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Trvanlivost nástroje byla  $T=14,7\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,3\text{mm}$ . Na břitu byly viditelné známky vydrolování ostří, což je v každém případě nežádoucí jev a nelze předpovídat další vývoj opotřebení. Z tohoto důvodu není tato řezná rychlost vhodná. Drsnost povrchu nabývala v tomto případě maximální hodnotu  $Ra=1,86\mu\text{m}$ .

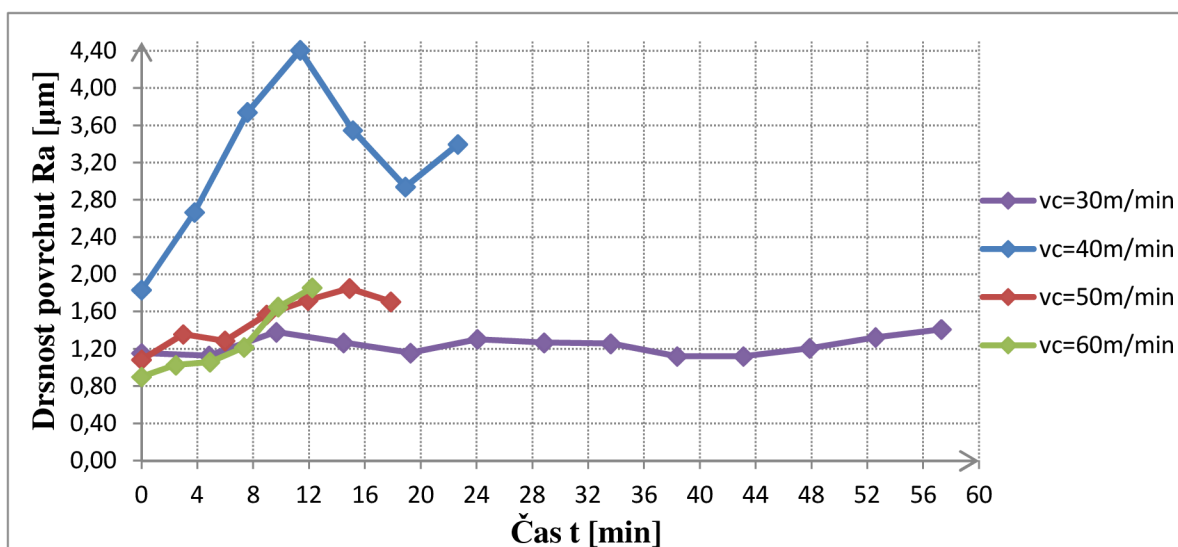


Z obrázku 5.9 vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí se zvyšuje i rychlost opotřebení nástroje.



Obr. 5.9 Porovnání průběhů opotřebení

Na obrázku 5.10 jsou znázorněny průběhy drsnosti obrobeného povrchu v závislosti na čase. Při rychlosti  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  byly naměřené hodnoty drsnosti oproti ostatním řezným rychlostem nevyrovnané a poměrně vysoké (max.  $R_a=4,41\mu\text{m}$ ).



Obr. 5.10 Průběh drsnosti povrchu  $R_a$  v závislosti na čase t.

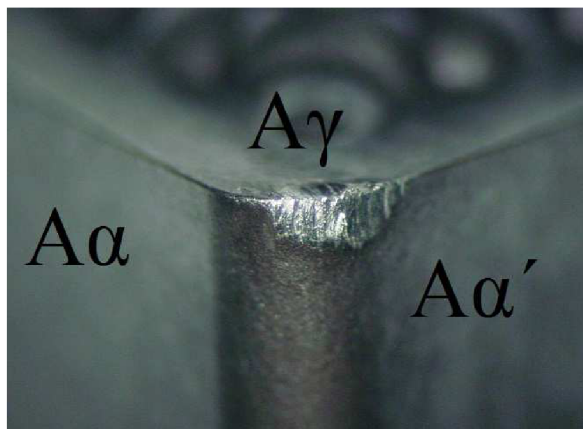
Tab. 5.5 Trvanlivost VBD.

Řezná rychlost $v_c$ [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Trvanlivost T [min]
30	63
40	26,5
50	20,8

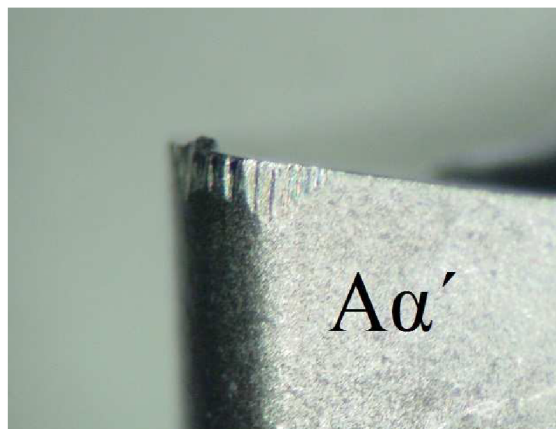
60

14,7

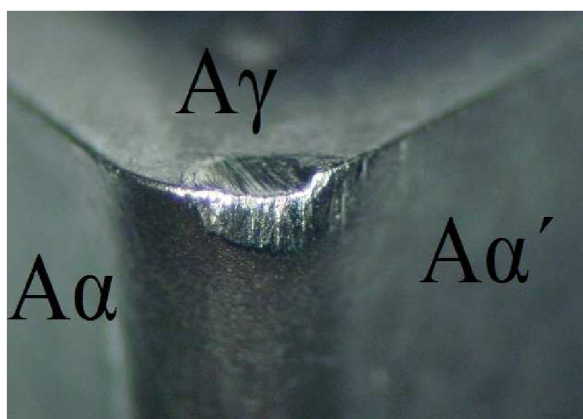
Na obrázcích 5.11 až 5.14 jsou vyobrazeny břity VBD po ukončení testování.



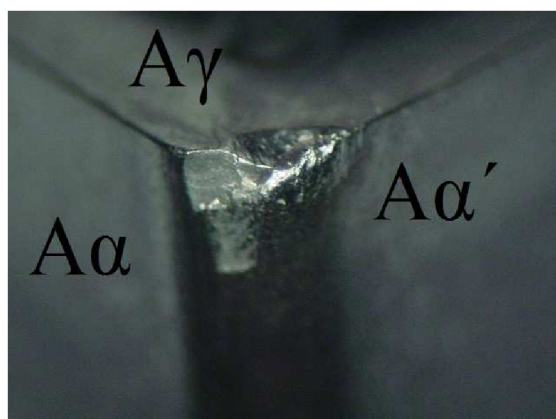
Obr. 5.11 Břit po ukončeném testování ( $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ ).



Obr. 5.12 Břit po ukončeném testování ( $v_c=30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ ).



Obr. 5.13 Břit po ukončeném testování ( $v_c=50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ ).



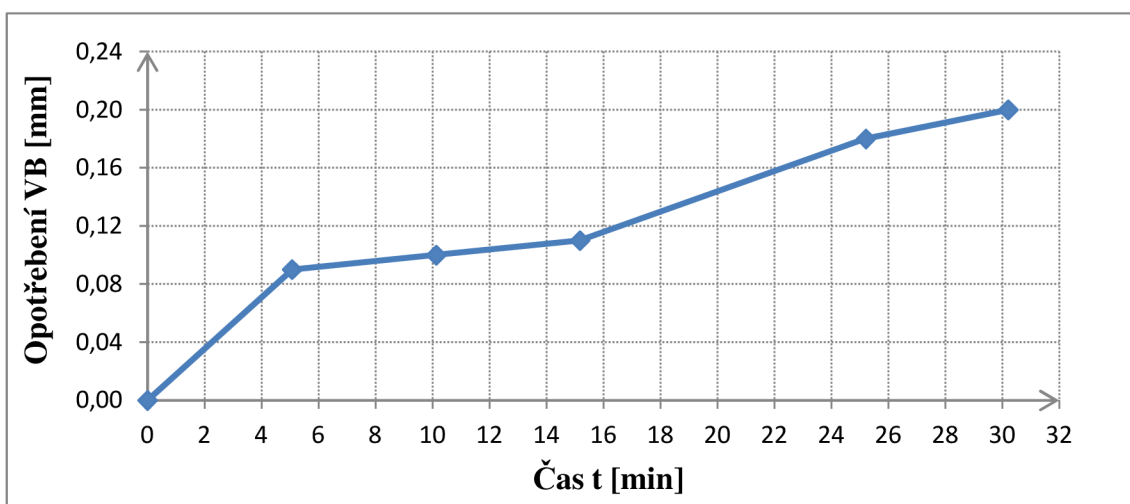
Obr. 5.14 Břit po ukončeném testování ( $v_c=60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ ).

### 5.5.2 Vliv posuvu na otáčku na opotřebení VBD

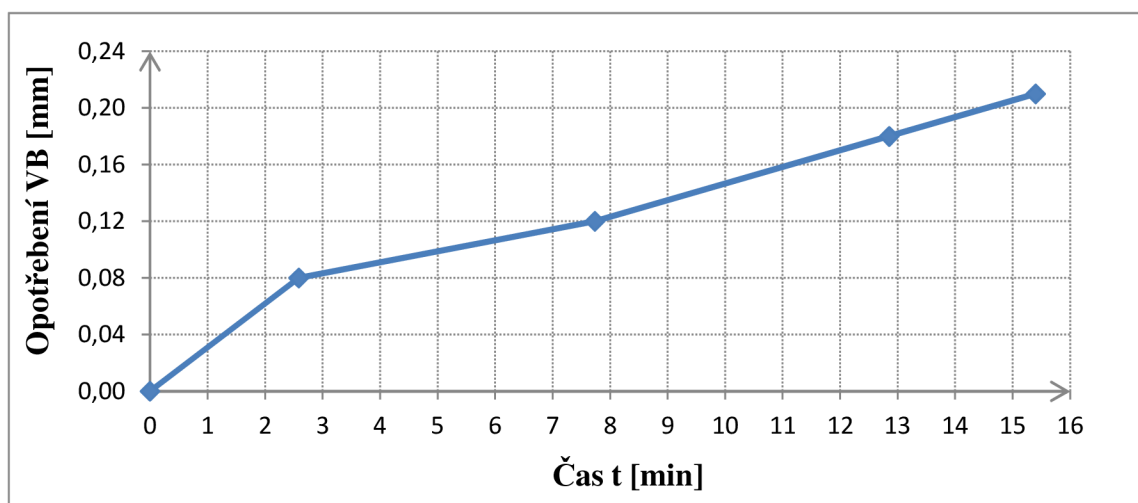
Řezná rychlost a šířka záběru hlavního ostří jsou konstantní ( $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $a_p=0,4\text{mm}$ ).

Na obrázcích (obr. 5.15 až obr. 5.17) jsou vykresleny naměřené hodnoty parametru opotřebení VB v závislosti na čase pro podélné soustružení materiálu Inconel 718 při použití VBD WNMG 080408 MS KCU10. Všechny průběhy opotřebení vykazují rychlý nárůst opotřebení na počátku, poté se nárůst opotřebení ustálí a není tak výrazný. V poslední fázi opotřebení opět narůstá strměji.

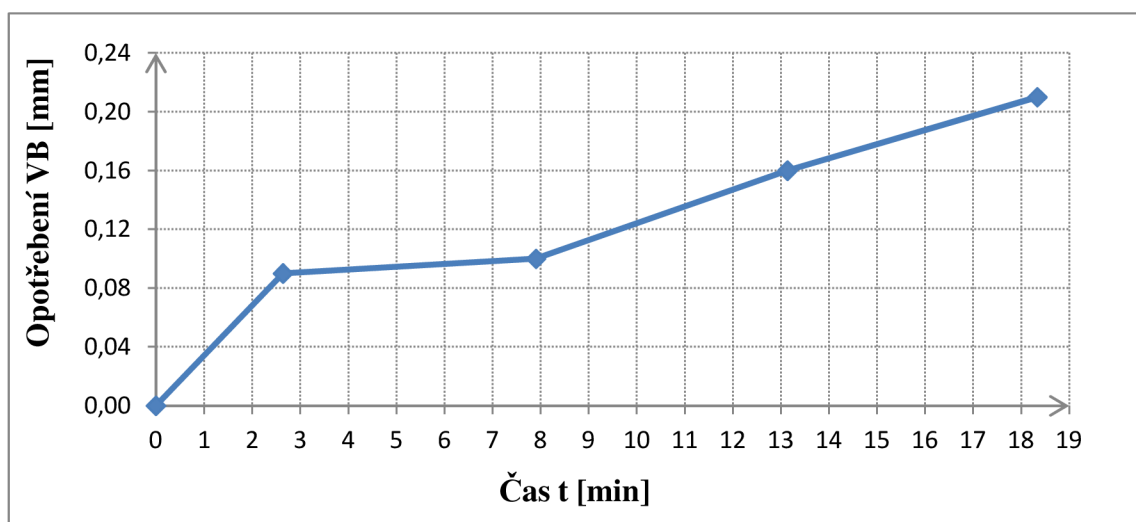
Obrázek 5.15 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci posuvu na otáčku  $f=0,1\text{mm}$ . Trvanlivost nástroje byla  $T=30,2\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,2\text{mm}$ . Obrábění při tomto posuvu však nevyužívá potenciál nástroje a stroje a obrábění není efektivní.

Obr. 5.15 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $f=0,1\text{mm}$ .

Obrázek 5.16 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci posuvu na otáčku  $f=0,15\text{mm}$ . Trvanlivost nástroje byla  $T=15,4\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,2\text{mm}$ . Doba pro dosažení  $VB=0,2$  byla tedy přibližně dvojnásobně kratší oproti užití posuvu na otáčku  $f=0,1$ . Zajímavé je srovnání tohoto průběhu opotřebení s průběhem opotřebení při řezných podmínkách  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $f=0,15\text{mm}$ ,  $a_p=0,3\text{mm}$ , kdy byla hodnota  $VB=0,2\text{mm}$  dosažena během 13. minuty. Efektivnější je tedy obrábět s vyšší šířkou záběru hlavního ostří.

Obr. 5.16 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $f=0,15\text{mm}$ .

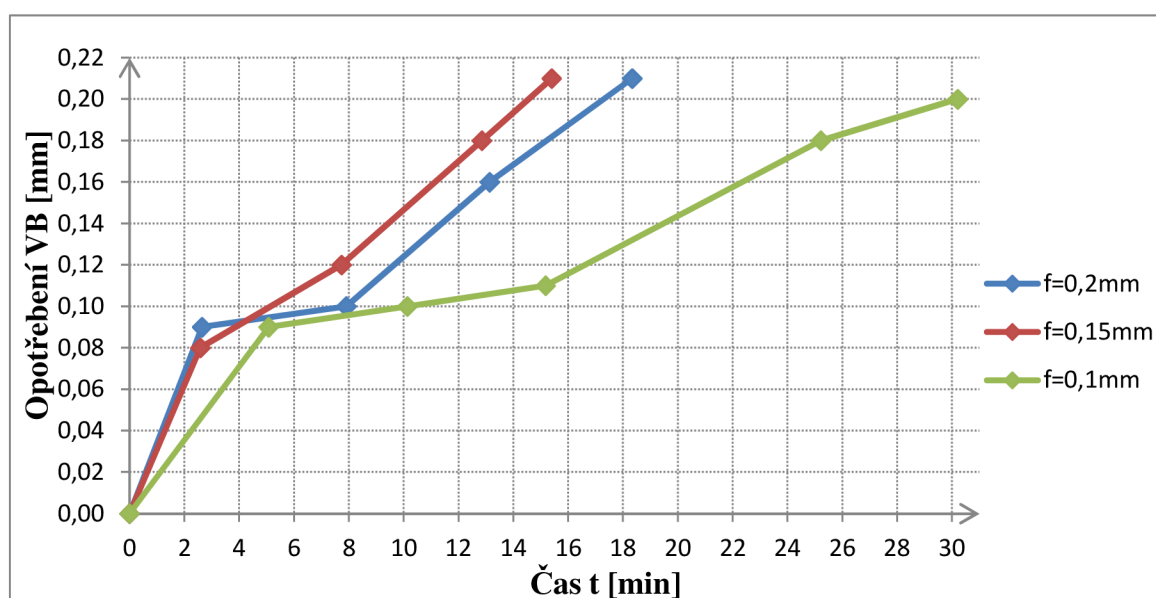
Obrázek 5.17 znázorňuje průběh opotřebení při aplikaci posuvu na otáčku  $f=0,2\text{mm}$ . Trvanlivost nástroje byla  $T=18,3\text{min}$  při dosažení nastaveného kritéria opotřebení  $VB=0,2\text{mm}$ . Efektivnější je využít tuto vyšší hodnotu posuvu na otáčku.

Obr. 5.17 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t,  $f=0,2\text{mm}$ .

Tab. 5.5 Trvanlivost VBD při daných řezných podmínkách.

Posuv na otáčku [mm]	Trvanlivost T [min]
0,1	30,2
0,15	15,4
0,2	18,3

Na obrázku 5.18 jsou porovnány průběhy opotřebení VBD v závislosti na různých posuvech na otáčku.



Obr. 5.18 Porovnání průběhů opotřebení

## 6 ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce obsahuje základní informace o technologii soustružení, slinutých karbidech, metodách a výhodách povlakování slinutých karbidů, základních mechanizmech vzniku a průběhu opotřebení nástroje.

V experimentální části byla použita povlakovaná břitová destička WNMG 080408 MS KCU10, kterou byla obráběna slitina Inconel 718. VBD i materiál obrobku poskytla společnost Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Cílem bylo ověření vlivu řezných podmínek a to především řezné rychlosti  $v_c$  a posuvu na otáčku  $f$  na trvanlivost nástroje. Experiment probíhal ve dvou fázích. V první fázi byl sledován vliv řezné rychlosti na opotřebení a ve druhé vliv posuvu na otáčku na opotřebení.

Z provedeného experimentu vyplynulo:

- s rostoucí řeznou rychlostí narůstala rychlost opotřebení nástroje a zároveň se zkracovala trvanlivost břitu,
- při hodnotě kritéria hřbetního opotřebení  $VB=0,3\text{mm}$  bylo dosaženo nejdelší trvanlivosti  $T=63\text{min}$  při řezné rychlosti  $v_c=30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ , naopak nejkratší životnost břitu byla  $14,6\text{min}$  při řezné rychlosti  $v_c=60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- řezná rychlost  $v_c=60\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  nebyla za daných podmínek vhodná z důvodu vydrolování ostří,
- drsnost povrchu dosahovala vyrovnaných nízkých hodnot (max.  $Ra=1,41\mu\text{m}$ ) při řezné rychlosti  $v_c=30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- při řezné rychlosti  $v_c=40\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  bylo dosaženo nevyrovnaných a poměrně vysokých hodnot jakosti povrchu (max.  $Ra=4,41\mu\text{m}$ ),
- jako optimální se jeví z hlediska rychlosti opotřebení a jakosti obrobku povrchu řezná rychlost  $v_c=50\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- při šířce záběru hlavního ostří  $a_p=0,3\text{mm}$  bylo za konstantní řezné rychlosti a posuvu na otáčku dosaženo opotřebení  $VB=0,2\text{mm}$  o 2min dříve než při  $a_p=0,4\text{mm}$ ,
- při posuvu na otáčku  $f=0,15\text{mm}$  bylo za konstantní řezné rychlosti a šířce záběru hlavního ostří dosaženo opotřebení  $VB=0,21\text{mm}$  o 3min dříve než při užití  $f=0,2\text{mm}$ ,
- není možné říci, že rychlost opotřebení břitu je přímo úměrná šířce záběru hlavního ostří nástroje  $a_p$  nebo posuvu na otáčku  $f$ .

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A. *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část*. [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [cit. 28. ledna 2015]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
3. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2011, ISBN 978-80-7204-722-2.
4. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
5. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook.
7. BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje (2)*. [online]. [cit. 29. ledna 2015]. Dostupné z World Wide Web: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-2\\_8514.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-2_8514.html).
8. DVOŘÁK, M. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, ISBN 80-214-2683-7.
9. Sandvik Hard Metals. *All about Cemented Carbide* [online]. 2008 [cit. 3. února 2015]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.allaboutcementedcarbide.com>.
10. HUMÁR, A., HAI, D. V. *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum. Červenec 2001. s. 43-45. ISSN 1212-2572
11. AB SANDVIK COROMANT. *Povlakovaný slinutý karbid*. [online]. [cit. 3. února 2015]. Dostupné z World Wide Web: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/coated\\_cemented\\_carbide/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx).
12. BORO VAN, P. *Řezné nástroje (3)*. [online]. [cit. 4. února 2015]. Dostupné z World Wide Web: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3\\_8515.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3_8515.html).
13. HOUDEK, J., Kouřil, K. *Opatřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů (1)*. MM Průmyslové spektrum. Prosinec 2004. s. 20-22. ISSN 1212-2572
14. HOUDEK, J., Kouřil, K. *Opatřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů (2)*. MM Průmyslové spektrum. Leden 2005. s. 71-72. ISSN 1212-2572
15. Šíma, M., HANTEK, T. *Progresivní PVD povlaky pro frézování kolejnič*. MM Průmyslové spektrum. Červen 2014. s. 64. ISSN 1212-2572

16. AB SANDVIK COROMANT. *Typy opotřebení*. [online]. [cit. 10. února 2015]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/wear-and-troubleshooting/wear-types/Pages/default.aspx>.
17. Refrac System. *Powder Metal Compaction Sinterin*. [online]. [cit. 20. února 2015]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.refrac.com/services/compactionSintering.html>.
18. MATTOX, Donald M. *Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing*. Albuquerque. Noyes Publications. 1998. 917s. ISBN: 0-8155-1422-0.
19. FOREJT, J., HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANÍČEK, L. *Experimentální metody* [online]. SYLABUS pro magisterský studijní program 23-01-T Strojní inženýrství obor strojírenská technologie – obrábění – tváření, svařování - management, II. stupeň. 2. ročník magisterského studia. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003 [cit. 30. března 2015]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_\\_cviceni\\_\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf)
20. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
21. SPECIAL METALS CORPORATION. *Inconel Alloy 718*. [online]. [cit. 19. dubna 2015]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>
22. Bibus Metals s.r.o. *Niklové slitiny*. [online]. [cit. 19. dubna 2015]. Dostupné z World Wide Web: [http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/Niklove\\_slitiny.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf)
23. Kennametal Inc. *New Beyond Grades from Kennametal Add Productivity to Turning Hard Alloys*. [online]. [cit. 20. dubna 2015]. Dostupné z World Wide Web: <https://www.kennametal.com/en/about-us/news/new-beyond-grades-from-kennametal-add-productivity-to-turning-h.html>
24. Kovosvit MAS a.s. *SP Line – číslicově řízené soustruhy*. [online]. [cit. 20. dubna 2015]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.kovosvit.cz/upload/products/pdf/sp-280-1415364895.pdf>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>CIP</b>	[-]	Cold Isostatic dressing – izostatické lisování
<b>CVD</b>	[-]	Chemical Vapour Deposition – chemické napařování
<b>HRC</b>	[-]	tvrdost dle Rockwella
<b>KCU10</b>	[-]	Typ povlakovaného slinutého karbidu výrobce Kennametal
<b>MTCVD</b>	[-]	Middle Temperature Chemical Vapour Deposition
<b>PACVD</b>	[-]	Plazmaticky Aktivovaná CVD metoda povlakování
<b>PVD</b>	[-]	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid
<b>VBD</b>	[-]	výměnná břitová destička
<b>WNMG</b>	[-]	typ výměnné břitové destičky
<b>KCU10</b>	[-]	Typ povlakovaného slinutého karbidu výrobce Kennametal
<b>CIP</b>	[-]	Cold Isostatic dressing – izostatické lisování

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A<sub>D</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	jmenovitý průřez třísky
<b>C<sub>Fc</sub>, C<sub>Ff</sub>, C<sub>Fp</sub></b>	[-]	materiálové konstanty pro výpočet silového zatížení břitu
<b>D</b>	[mm]	průměr obrobku
<b>F</b>	[N]	výsledné silové zatížení břitu
<b>F<sub>c</sub></b>	[N <sup>1</sup> ]	řezná síla
<b>F<sub>f</sub></b>	[N]	posuvová síla
<b>F<sub>p</sub></b>	[N]	pasivní síla
<b>KT</b>	[mm]	hloubka výmolu na čele
<b>KV<sub>v</sub></b>	[mm]	radiální opotřebení špičky
<b>P<sub>c</sub></b>	[kW]	řezný výkon
<b>T</b>	[min]	trvanlivost nástroje
<b>Ra</b>	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
<b>VB</b>	[mm]	šířka hřbetního opotřebení nástroje
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru hlavního ostří nástroje



$b_D$	[mm]	řezná rychlost
$f$	[mm]	posuv na otáčku
$h_D$	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
$k_c$	[MPa]	měrná řezná síla
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky vřetene
$t$	[min]	čas
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$v_e$	[m.min <sup>-1</sup> ]	rychlost řezného pohybu
$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
$x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}$	[-]	exponenty vlivu šířky záběru $a_p$
$y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}$	[m.min <sup>-1</sup> ]	exponenty vlivu posuvu $f$ .
$\kappa_r$	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
$\eta$	[-]	mechanická účinnost stroje

