



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV POVLAKŮ NA TRVANLIVOST VBD PŘI PODÉLNÉM SOUSTRUŽENÍ

INFLUENCE OF COATINGS ON DURABILITY OF CUTTING INSERTS DURING LONGITUDINAL TURNING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Balíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Martin Balíček
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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 povlaků na trvanlivost VBD při podélném soustružení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je zaměřené na teoretický rozbor technologie soustružení a povlakovaných slinutých karbidů ve formě VBD. Součástí práce je provedení experimentálních řezných zkoušek a jejich vyhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

1. Charakteristika technologie soustružení
2. Charakteristika slinutých karbidů
3. Charakteristika povlakovacích metod
4. Experimentální část

Závěr

Seznam literatury:

PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN: 80-7204-283-1.

FOREJT, M., PÍŠKA, M.: Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A.: Materiály pro řezné nástroje. 1.vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.

MATTOX, M.: Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing. 2.vyd. Albuquerque (USA): APR, 2010. 917s. ISBN: 978-0-8155-2037-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem nanesených povlaků na trvanlivost a opotřebení nástroje při podélném soustružení oceli ČSN 41 1600 a vlivem opotřebení na jakost povrchu. Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na charakteristiku technologie soustružení, použití, výrobu a metody povlakování slinutých karbidů a opotřebení bříty nástroje. Experimentální část bakalářské práce zahrnuje vyhodnocení naměřených hodnot, popis obráběného materiálu, použitého nástroje a obráběcího stroje. Z hodnot naměřených při experimentu vyplývá, že nejvhodnějším z testovaných VBD je WNMG 3-1-NF s naneseným povlakem TiAlN+TiN. Jakost povrchu klesá s rostoucím opotřebením bříty nástroje.

Klíčová slova

soustružení, povlakování, VBD, opotřebení, trvanlivost, slinuté karbidy

ABSTRACT

This thesis deals with the influence of deposited coatings for durability and tool wear during longitudinal turning of steel CSN 41 1600 (E335) and influence of wear and surface quality. The theoretical part is focused on characteristics of turning technology, application, manufacturing and methods of coating cemented carbide and tool wear. The experimental part of the thesis includes the evaluation of the measured values, a description of the material, used tools and machine tool. The values measured in the experiment imply that the most suitable of the tested tool inserts is WNMG 3-1-NF with applied coating TiAlN + TiN. Surface quality decreases with increasing wear of the tool.

Keywords

turning, coating, cutting inserts, tool wear, durability, cemented carbides

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BALÍČEK, M. *Vliv povlaků na trvanlivost VBD při podélném soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

.....
Datum

Martin Balíček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu panu Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji panu Milanu Rusiňákovi za pomoc při provádění experimentu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ	9
1.1 Kinematika obráběcího procesu.....	9
1.2 Průřez třísky.....	10
1.3 Řezné síly.....	11
1.4 Řezný výkon	12
1.5 Jednotkový strojní čas při podélném soustružení	12
2 CHARAKTERISTIKA SLINUTÝCH KARBIDŮ	14
2.1 Historický vývoj	14
2.2 Rozdělení slinutých karbidů	15
2.3 Výroba slinutých karbidů.....	16
2.4 Povlakované slinuté karbidy	16
3 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD	19
3.1 Metoda PVD	19
3.2 Metoda CVD.....	20
3.3 Příprava nástroje před povlakováním	21
3.4 Stripping (odstraňování starých povlaků).....	21
4 CHARAKTERISTIKA OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	23
4.1 Základní mechanismy opotřebení	23
4.2 Formy opotřebení.....	25
4.3 Hodnocení opotřebení.....	26
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
5.1 Obráběcí nástroj.....	27
5.2 Obráběcí stroj.....	28
5.3 Obráběný materiál.....	29
5.4 Podmínky a průběh experimentu	30
5.5 Vyhodnocení experimentu	32
ZÁVĚR	42
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	45

ÚVOD

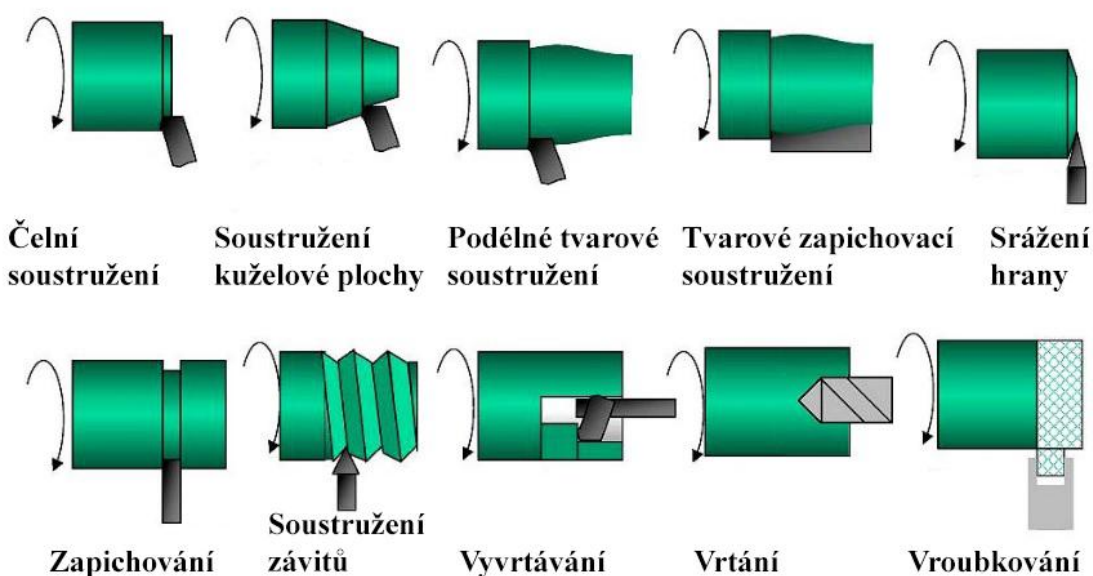
Soustružení je jedna z technologií třískového obrábění. Pomocí soustružení se vyrábí součásti rotačních tvarů. Hlavním pohybem je rotační pohyb a koná jej obrobek. K odebrání materiálu dochází za pomoci nástrojů, které jsou většinou jednobřité, ať už v podobě monolitních nástrojů nebo ve formě vyměnitelných břitových destiček (VBD). Pro nástroje jsou používány různé řezné materiály, jako rychlořezná ocel, cermety, řezná keramika nebo slinuté karbidy. Právě slinuté karbidy patří mezi velmi využívané. Mají vysokou tvrdost, pevnost, houževnatost a dobrou odolnost proti opotřebení. Jsou používány pro obrábění za vyšších posuvových rychlostí a také pro přerušované řezy.

Metody povlakování jsou určeny pro zvýšení řezných vlastností, odolnosti proti opotřebení a zvýšení trvanlivosti řezného nástroje nanášením tenkých vrstev povlaků. Mezi hlavní metody povlakování patří PVD a CVD metoda. Metodu PVD charakterizují její nízké pracovní teploty a schopnost povlakování ostrých hran řezného nástroje. Vzhledem k nízkým teplotám metoda neovlivňuje podkladový materiál. Pro metodu CVD jsou charakteristické vysoké teploty a lepší adheze povlaku a podkladu. Dají se nanášet povlaky o větší tloušťce, než u metody PVD. Pomocí této metody nelze povlakovat ostré hrany.

V experimentální části byly vyhodnocovány řezné zkoušky pro tři vybrané povlakované VBD. Na každé VBD byl nanesen povlak metodou PVD. Řezné podmínky, mimo řeznou rychlost, byly po celý proces testování konstantní a byly nastaveny tak, aby vyhovovaly pro každou použitou VBD. Konstantní řezné rychlosti nebylo možné docílit vzhledem k použitému obráběcímu stroji. Při testování nebyly použity procesní kapaliny a chlazení probíhalo pouze okolním vzduchem. Hlavním monitorovaným parametrem bylo opotřebení VBD pomocí kritéria VB – šířky fazetky na hřbetě nástroje, měřené pomocí dílenského optického mikroskopu, současně byla měřena jakost povrchu obrobené plochy.

1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je metoda třískového obrábění, pomocí které se zhotovují součásti rotačních tvarů. Nejčastěji se k tomuto účelu používají jednobřité nástroje odlišného provedení. Z mnoha aspektů představuje soustružení nejjednodušší, a také nejužívanější metodu obrábění ve strojírenské praxi. Pomocí soustružení je možné obrábět vnější a vnitřní válcové plochy, kuželové i tvarové plochy, rovinné čelní plochy a zápichy. Mimo tyto operace lze na soustruzích také vrtat, vyvrtávat, řezat závity, vystružovat, vroubkovat, leštit, hladit (obr. 1.1) a mimo jiné podsoustružováním vyrábět hřbetní plochy tvarových fréz [1].



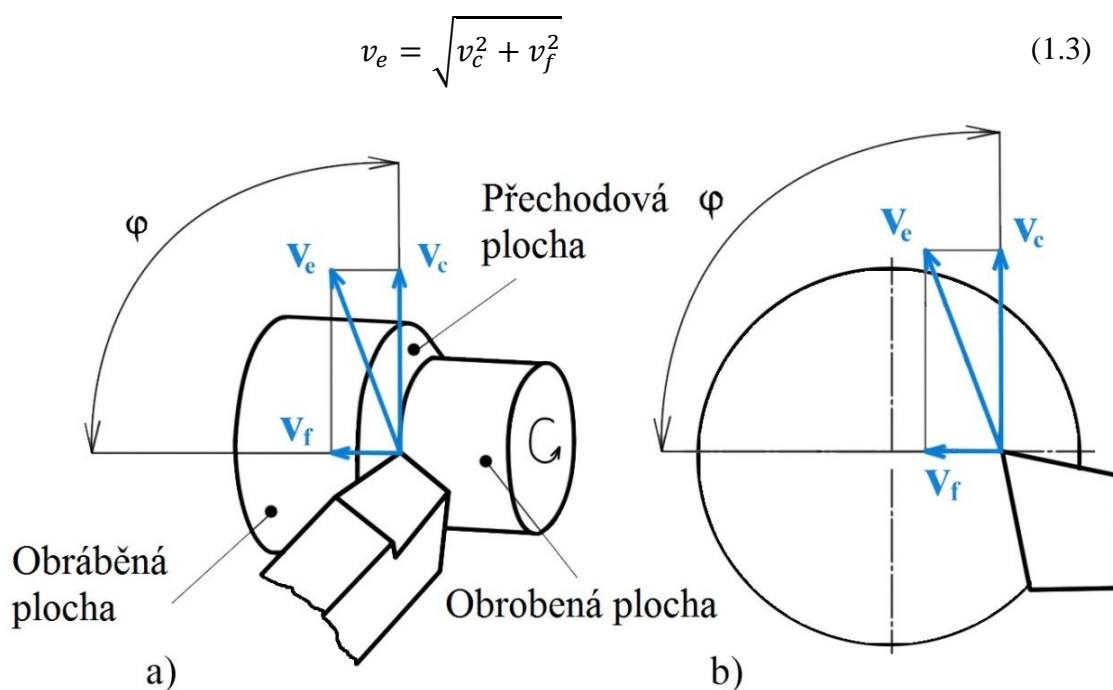
Obr. 1.1 Základní práce na soustruhu [1].

1.1 Kinematika obráběcího procesu

Hlavním pohybem při soustružení je rotační pohyb a koná jej obrobek. Obrobek je obvykle upnut ve sklíčidle obráběcího stroje. Rychlost hlavního pohybu je zároveň řeznou rychlostí v_c , která se vyjádří na základě vztahu (1.1) a je obvykle udávána v m/min [2]. Dalším pohybem je posuvový pohyb, který je přímočarý nebo obecný a je vykonáván nástrojem vůči obrobku, který je standardně upnut v nožovém suportu obráběcího stroje. Rychlost posuvového pohybu v_f se stanoví ze vztahu (1.2) [2]. Při soustružení válcových ploch je řezný pohyb realizován po šroubovici. Při soustružení čelních ploch kopíruje nástroj trajektorii Archimédovy spirály. Při soustružení rotační plochy obecného tvaru je pohyb realizován po obecné prostorové křivce. Rychlost efektivního řezného pohybu v_e lze vyjádřit ve skalárním tvaru dle vztahu (1.3) [2]. Směry vektorů v_c , v_f , v_e při čelním a válcovém soustružení jsou znázorněny na obrázku 1.2 [2, 3].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (1.1)$$

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



Obr. 1.2 Vektory pohybů při soustružení: a) válcové plochy, b) čelní plochy [2].

1.2 Průřez třísky

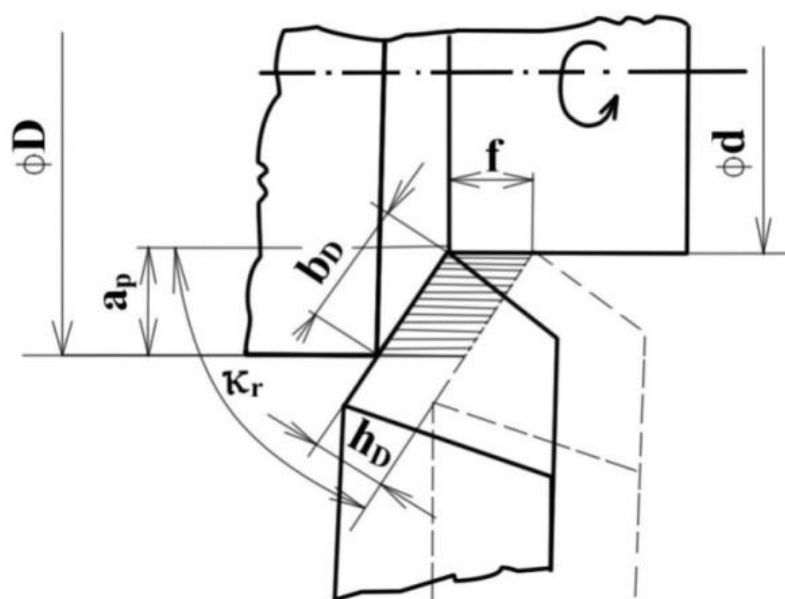
Jmenovitý průřez třísky A_D (1.4) pro podélné soustružení se stanoví dle vztahu [1]:

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

Jmenovitá šířka třísky b_D (1.5) a jmenovitá tloušťka třísky h_D (1.6) jsou znázorněny na obrázku 1.3 a jsou stanoveny dle vztahů [1]:

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

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



Obr. 1.3 Identifikace průřezu třísky při podélném soustružení [1].

1.3 Řezné síly

Velký vliv na proces obrábění při soustružení mají řezné síly. V případě, kdy je nutné kontrolovat zatížení stroje a nástroje, je dobré znát jejich velikost. Pro zjištění velikostí celkové řezné síly F (1.10) a jejích složek, řeznou sílu F_c (1.7), posuvovou sílu F_f (1.8) a pasivní sílu F_p (1.9), se používá empirických (experimentálně zjištěných) vztahů [1, 4]. Vyznačení řezných sil a odporů při podélném soustružení je na obrázku 1.4.

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{X_{F_c}} \cdot f^{Y_{F_c}} \quad (1.7)$$

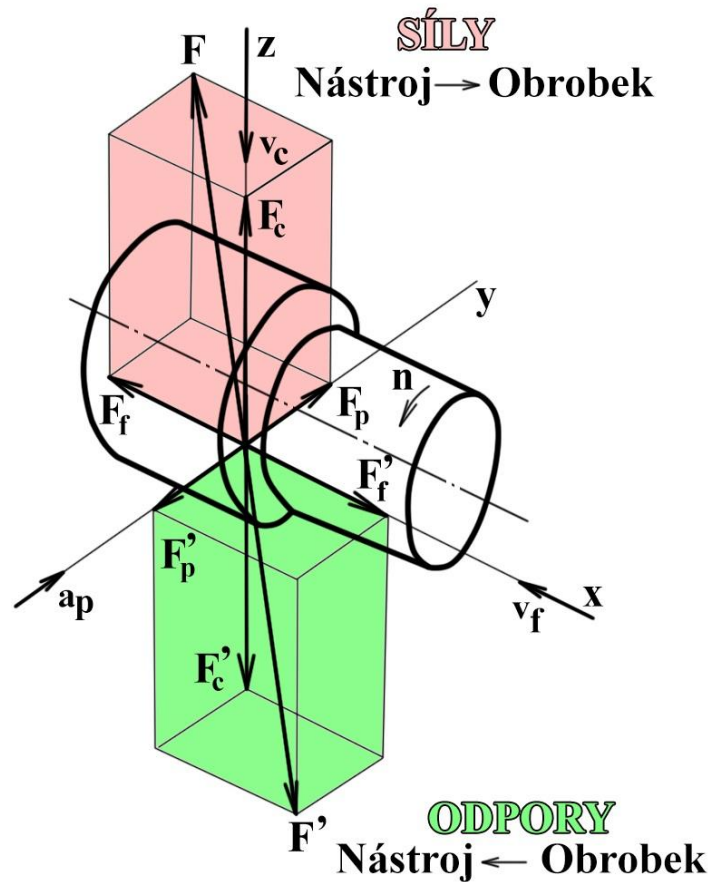
$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{X_{F_f}} \cdot f^{Y_{F_f}} \quad (1.8)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{X_{F_p}} \cdot f^{Y_{F_p}} \quad (1.9)$$

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

Měrná řezná síla k_c je podle vztahu (1.11) definovaná jako poměr řezné síly F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D a její hodnota závisí na mnoha technologických faktorech řezného procesu, jako je pevnost a tvrdost obráběného materiálu, geometrie břitu nástroje a tloušťka odřezávané vrstvy [1, 2].

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



Obr. 1.4 Řezné síly a odpory při podélném soustružení [1].

1.4 Řezný výkon

Energetickou náročnost procesu soustružení určuje efektivní výkon P_{ef} podle vztahu (1.12). Je to výkon potřebný pro vnikání řezného nástroje do obráběného materiálu a oddělování třísky [4].

$$P_{ef} = F_c \cdot v_c \quad (1.12)$$

Potřebný příkon stroje P lze potom určit ze vztahu (1.13) [4]:

$$P = \frac{P_{ef}}{\eta} \quad (1.13)$$

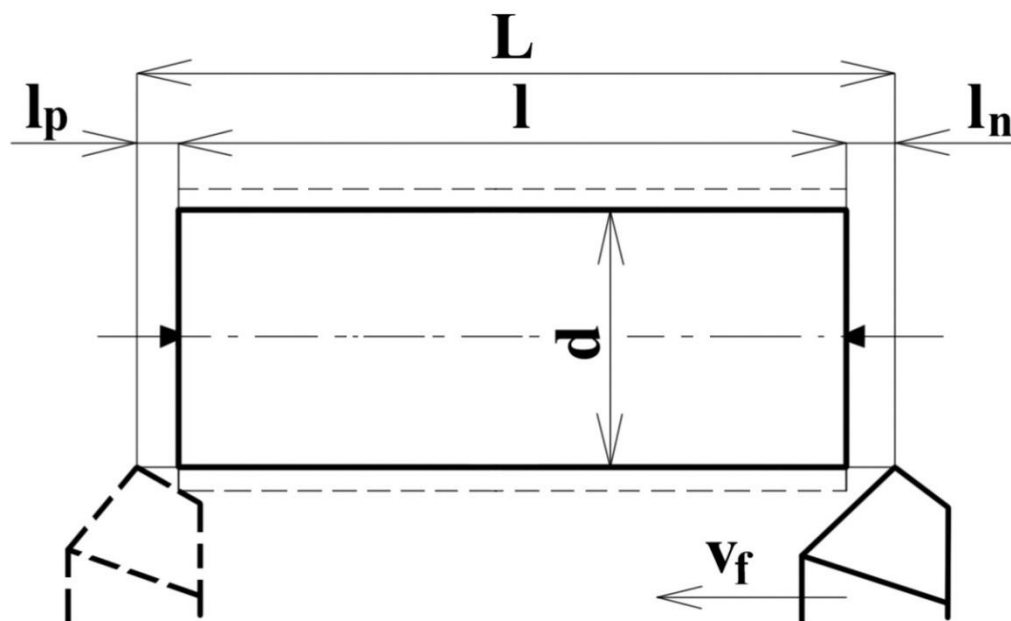
1.5 Jednotkový strojní čas při podélném soustružení

Při stanovení jednotkového strojního času při podélném soustružení se vychází z poměrů uvedených na obrázku 1.5. Pro podélné soustružení válcové plochy se vychází ze vztahu (1.14) [1]:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} \quad (1.14)$$

Kde L (1.15) je dráha nástroje ve směru posuvu a je dána vztahem [1]:

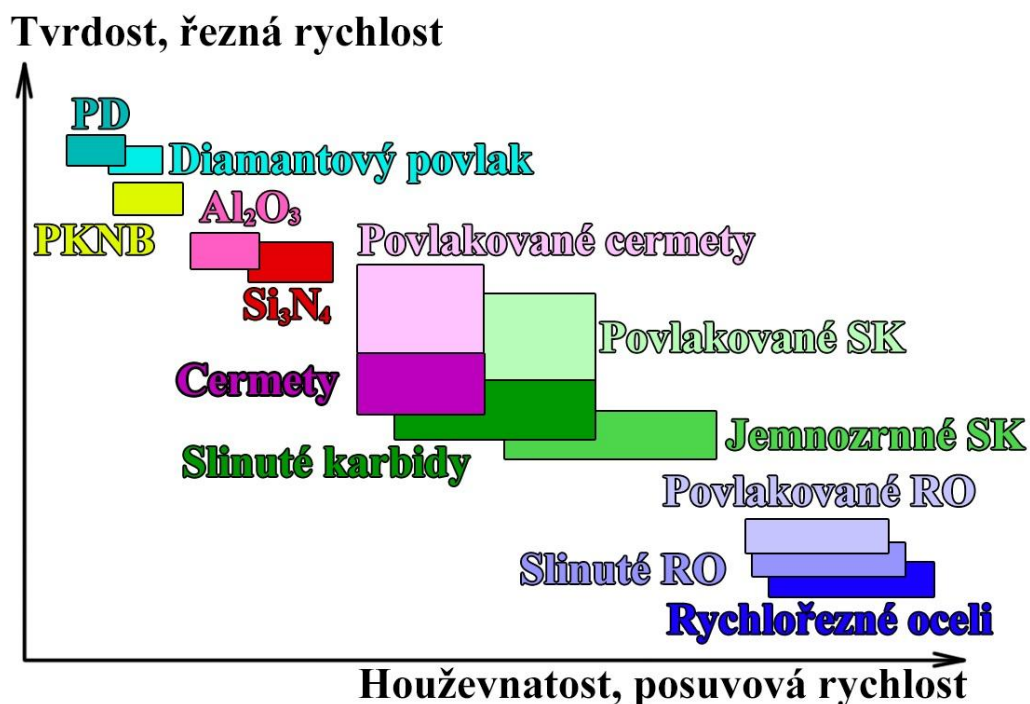
$$L = l + l_n + l_p \quad (1.15)$$



Obr. 1.5 Parametry jednotkového strojního času při podélném soustružení [1].

2 CHARAKTERISTIKA SLINUTÝCH KARBIDŮ

Široký sortiment nástrojových materiálů, jako jsou nástrojové oceli, řezná keramika, cermety, slinuté karbidy (SK) nebo kubický nitrid boru, je výsledkem dlouhodobého celosvětového a intenzivního vývoje, který má částečnou souvislost s vývojem nových obráběcích strojů a konstrukčních materiálů určených pro obrábění. Oblasti aplikace současných materiálů pro řezné nástroje jsou schematicky vyznačeny na obrázku 2.1 [5].



Obr. 2.1 Oblasti použití řezných materiálů [1].

Jedním z nejpoužívanějších kompozitních řezných materiálů, které byly kdy vyrobeny, jsou SK [6]. Jejich unikátní kombinace pevnosti, tvrdosti a houževnatosti zaručuje jejich spolehlivost a odolnost při náročných aplikacích. SK mohou být použity pro obrábění za vysokých posuvových rychlostí, a také pro přerušované řezy. Avšak jejich nízká termochemická stabilita zamezuje jejich použití pro obrábění za vysokých řezných rychlostí. Tento nedostatek se odstraňuje povlakováním, pomocí kterého vzniká tvrdý a termochemicky stabilní povlak na pevném karbidovém podkladu. Takto upravený SK je vhodným řezným materiálem pro obrábění za vysokých řezných a posuvových rychlostí, přerušovaných řezů a pro vysoký úběr materiálu [5, 6].

2.1 Historický vývoj

Látky s vyšší tvrdostí než kalené nástrojové oceli, jsou známy už z dřívějších dob. Mezi ty patří např. diamant a korund (Al₂O₃), které jsou z přírodních materiálů. Tyto látky mohly být používány ve formě volného abraziva nebo jako brousící kotouče pro broušení kovů už na přelomu století. Naopak nemohly být použity jako klasické řezné nástroje pro obrábění kovů. Příčinou nedostatku byla jejich nízká houževnatost. Velký posun

ve vývoji tvrdých materiálů přineslo až využití elektrické obloukové pece, která byla zkonstruována na konci minulého století Moissonem (Paříž, 1897) [7]. Hlavním důvodem pro tento posun byla možnost zvýšení pracovních teplot procesu při výrobě tvrdých materiálů, právě za pomoci elektrické obloukové pece. Nespočet vědců, vynálezců a inženýrů se snažilo využít elektrickou pec k výrobě umělého diamantu, ale přes tehdejší nízkou úroveň znalostí technologie se jim to nedařilo. Co ovšem získali, byly nové karbidy, silicidy a boridy, tj. tvrdé látky s vysokými teplotami tavení. Jedním z nich byl i karbid wolframu, který vykazoval vysokou tvrdost a v mnoha směrech se podobal právě kovům díky jeho charakteristickým vlastnostem. Přesto se této skutečnosti nepřipisovalo mnoho pozornosti a významu [5, 7].

Při zkoumání rychlořezných ocelí (HSS) na počátku 20. století se zjistilo, že jejich výborné řezné vlastnosti jsou zapříčiněny přítomností karbidických částic s vysokou tvrdostí. Tyto částice se nacházejí v kovové matici, přičemž největší význam mají částice karbidu wolframu (WC). Tendencí tedy bylo zvládnutí výroby řezných nástrojů z čistého karbidu wolframu. I přes velké potíže byl za teplot přesahujících 2000 °C materiál připraven. Ukázalo se však, že pro jeho použití v praxi byl příliš křehký [5].

Počátkem 20. století bylo z wolframového prášku vyrobeno žhavicí vlákno, kde velikost zrn byla řádově v jednotkách mikrometrů. Toto byl začátek rozvoje práškové metalurgie, tj. vědní a zpracovatelský obor. Prášková metalurgie definitivně vyřešila problém s výrobou nových řezných materiálů na bázi karbidu wolframu. Tyto materiály se vyznačovaly vysokou tvrdostí a odolností vůči opotřebení [5].

2.2 Rozdělení slinitých karbidů

Nepovlakované slinité karbidy pro řezné nástroje jsou podle použití rozdělovány do šesti skupin – P, M, K, N, S a H, kde každé skupině je přiřazena specifická barva (tab. 2.1). Toto rozdělení určuje norma ČSN ISO 513. Každá skupina je navíc rozdělena do podskupin, které blíže určují vlastnosti materiálu, jako obsah pojícího kovu, tvrdost a otěruvzdornost, pevnost v ohybu a houževnatost, doporučené hodnoty pro posuvovou a řeznou rychlost [5, 7].

Tab. 2.1 Základní rozdělení nepovlakovaných slinitých karbidů [7, 8].

Skupina	Podskupina	Použití
P	P01-P05-P10-P15-P20-P25-P30-P35-P40-P45-P50	Obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku. Uhlíkové oceli, feritické korozivzdorné oceli a slitinové oceli.
M	M01-M05-M10-M15-M20-M25-M30-M35-M40	Obrábění materiálů tvořící dlouhou a střední třísku. Lité oceli, tvárné litiny a austenitické korozivzdorné oceli. Univerzální použití.
K	K01-K05-K10-K15-K20-K25-K30-K35-K40	Obrábění materiálů tvořící krátkou, drobivou třísku. Neželezné slitiny, šedé litiny a nekovové materiály.
N	N01-N05-N10-N15-N20-N25-N30	Obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, mědi nebo hořčíku, kompozitů, plastů nebo dřeva.
S	S01-S05-S10-S15-S20-S25-S30	Obrábění slitin titanu a žárovevých slitin na bázi kobaltu, niklu nebo železa.
H	H01-H05-H10-H15-H20-H25-H30	Obrábění tvrzených slitin, zušlechťených a kalených ocelí.

2.3 Výroba slinutých karbidů

Výroba SK je zrealizována za pomoci metody z oboru, který se nazývá prášková metalurgie. Tento obor se zabývá procesem přípravy SK od přípravy prášků karbidů a pojících kovů, jejich smísením ve správných poměrech až po lisování směsi a slinování výlisků. Celou podstatou výrobního procesu SK je spojení prášků tvrdých karbidických částic a pojících kovů (nejčastěji kobalt) za pomoci lisování. Poté následuje slinování za vysokých teplot, které se blíží tavicím teplotám pojiva. Obecně lze postup výroby SK rozdělit do následujících kategorií [5, 7]:

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC.NbC, VC, Cr₃C₂ atd.) a kobaltu (Co),
- příprava směsi,
- formování směsi,
- předslinování zformovaných směsí,
- upravení tvaru předslinutého tělesa,
- slinování,
- vysokoteplotní izostatické lisování.

Vlastnosti výsledného produktu při výrobě slinutých karbidů výrazně ovlivňuje příprava směsi karbidů s pojícím kovem, kde je velmi důležité dodržení požadovaného poměru jednotlivých složek směsi. V této fázi přípravy je tendencí vytvoření homogenní, jemnozrnné práškové směsi karbidů a pojícího kovu. Toho je dosahováno pomocí mletí směsi za sucha nebo v kapalném prostředí, které obvykle probíhá v kulových mlýnech [5].

Přípravená směs karbidů s pojícím kovem je poté formována lisováním do tvarových tělísek za pomoci např. formovacích lisů, vytlačováním přes trysku do požadovaného tvaru, hydrostatickým lisem nebo litím do pomocných forem. Lisováním je získán požadovaný tvar, nikoliv rozměry. Tlaky pro lisování směsi se pohybují v rozmezí 50 MPa – 150 MPa [5, 9].

Výlisek je porézni (cca až 30 %) a při slinování se póry uzavřou a zrnka prášku se spojí, a to hlavně vlivem difuze. Aby slinutý karbid dosáhl požadovaných vlastností, musí být proces slinování naprosto přesně řízen (teplota i čas). Při procesu slinování probíhá reakce, která se nazývá tavné slinování. Tato reakce nastává, když se při nejvyšší dosažené teplotě 1400 °C až 1600 °C kovové pojivo roztaví a značné množství karbidů se v něm rozpustilo. Konečné podoby vyměnitelných břitových destiček (VBD) může být dosahováno broušením nebo již přesným lisováním v lisovacím nástroji [9].

2.4 Povlakované slinuté karbidy

Důležitým krokem ve vývoji nástrojů ze slinutých karbidů během 60. let 20. století bylo zavedení výroby VBD s tenkými povrchovými vrstvami TiC (1969) za účelem zlepšení vlastností rezného nástroje. První VBD s povlakem se na trhu objevily koncem 60. let. V dnešní době reprezentují slinuté karbidy asi 50 % celkové produkce rezných nástrojů, kde asi 90 % z nich je povlakováno tenkými vrstvami: TiN, TiC, Ti (C, N), Al₂O₃, HfO₂, Si₃N₄ atd. Vzhledem ke stále rostoucím požadavkům jsou každoročně vyvíjeny nebo

vylepšování nové druhy povlakovaných slinutých karbidů. Postupný vývoj povlaků je možné zařadit do následujících vývojových kroků [5, 10, 11]:

- **1. generace:** jednovrstvý povlak (TiC) o tloušťce asi 7 μm . Vzhledem k nedokonalé technologii výroby se kvůli špatné soudržnosti povlaku a podkladu povlak odlupoval, a to vedlo k znehodnocení nástroje.
- **2. generace:** jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN). Zlepšení technologie výroby vedlo k zamezení odlupování povlaku od podkladu a výroby povlaků o tloušťce až 13 μm .
- **3. generace:** vícevrstvý (2 až 3, případně více vrstev) povlak (TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN). Řazení vrstev odpovídalo jejich vlastnostem, kdy jsou jako první nanášeny povlaky s dobrou přilnavostí k podkladu a jako poslední jsou nanášeny vrstvy s menší přilnavostí k podkladu. Vzájemná přilnavost povlaků vyplývá z procesu výroby. Od povlaků, které jsou nanášeny jako poslední, se požaduje vysoká odolnost proti opotřebení a vysoká tvrdost.
- **4. generace:** speciální vícevrstvý povlak, velmi často složený i z více než deseti vrstev a mezivrstev. Využívané materiály pro povlakování jsou shodné jako u povlaků 3. generace.

Do 4. generace povlaků lze také zařadit diamantové, nanokompozitní, gradientní a supermřížkové povlaky. Mezi další druhy povlaků patří např. kubický nitrid boru DLC (Diamond Like Carbon), v doslovném překladu „uhlík podobný diamantu“ [7].

V tabulce 2.2 jsou některé jednovrstvé povlaky, jejich barva a rozsahy použitelných teplot. Některé z těchto povlaků nabízí společnost LISS se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm.

Tab. 2.2 Jednovrstvé povlaky [11, 21].

Povlak	Barva	Maximální použitelná teplota T [°C]
TiN	zlatá	500
CrN	kovově stříbrná	700
ZrN	zlatobílá	550
TiCN	šedá	400
TiAlCN	měděná	500
TiAlN	fialově černá	700 – 900
AlTiN	černá	900
AlCrN	šedomodrá	1100
TiCrN	tmavě šedá	700
AlTiCrN	šedomodrá	900

Rozsahy použitelných teplot a barva některých vícevrstevných povlaků je v tabulce 2.3.

Tab. 2.3 Vícevrstvé povlaky [11].

Povlak	Barva	Maximální použitelná teplota T [°C]
TiN/Ti	zlatá	500
TiN/TiAlN	fialově černá	700 – 800
TiN/CrN	kovově stříbrná	600
TiAlN/AlCrN	modro šedá	>1100

3 CHARAKTERISTIKA POVLAKOVACÍCH METOD

Řezné nástroje ze slinutých karbidů jsou vyráběny nanášením tenké vrstvy materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení na podkladový materiál, kterým je dnes už speciálně upravený slinutý karbid a navyšují tak trvanlivost nástroje. Dříve byly povlaky nanášeny na běžné slinuté karbidy typu K, P nebo M. Povlaky ve formě tenkých vrstev dosahují vyšších hodnot tvrdosti a pevnosti, než stejný homogenní materiál v kterékoli jiné formě. Tato skutečnost vyplývá hlavně z faktu, že povlakovaný materiál neobsahuje žádné pojivo, zrnitost je o jeden i více řádů jemnější a obsahuje méně strukturních defektů, jako jsou póry a dutiny a dále vytváří bariéru, která zabraňuje opotřebení nástroje difúzními mechanismy. V základu lze povlakovací metody rozdělit do dvou základních skupin, PVD a CVD, které se dále dělí na další podskupiny [1, 7].

3.1 Metoda PVD

Metoda PVD (**Physical Vapor Deposition**) fyzikální napařování je metoda, při které je povlakovací materiál odpařován nebo rozprašován z pevného nebo kapalného skupenství v podobě atomů nebo molekul a přepraven skrze vakuum nebo plynné prostředí za nízkého tlaku na povrch povlakovaného substrátu, kde kondenzují [12, 13]. Pro metodu PVD jsou charakteristické nízké teploty pracovního procesu (teploty pod 600 °C). Původně byla metoda PVD vyvinuta pro povlakování HSS právě proto, že nedocházelo k tepelnému ovlivnění vzhledem k nízkým teplotám. V současné době je metoda používána i pro povlakování slinutých karbidů [1]. Rozsah tloušťky nanášených povlaků se pohybuje v rozmezí několika nanometrů až po tisíce nanometrů [12, 14].

Metodou PVD lze povlakovat ostré hrany a nemá nepříznivý vliv na podkladový substrát. Nevýhodou je důkladnější příprava pro proces povlakování před, a také po samotném povlakování, kterou metoda vyžaduje (odmašťování, čištění atd.) [14]. Další nevýhodou je směrový účinek metody, kdy plochy, které jsou odvrácené od místa odpařování povlakovacího kovu, zůstávají zcela bez povlaku [1].

Metody nanášení PVD povlaků [7, 12]:

- **Metoda napařování** – Je depozice částic fyzicky uvolněných z pevného povrchu povlakovacího materiálu za pomoci bombardování plynnými ionty. Tyto ionty vznikají elektrickým výbojem v plynné atmosféře [7, 12]. Uvolněné částice potřebného chemického složení dopadají na povrch povlakovaného substrátu a vzniká požadovaný povlak [1]. Metoda je vhodná pro vytváření tenkých povlaků z těžkotavitelných materiálů bez nutnosti ohřevu na vysokou teplotu. Proces nanášení probíhá ve vakuu, při nízkém tlaku plynu ($< 0,7$ Pa) nebo při vyšším tlaku ($0,7$ Pa – $2,0$ Pa), kdy jsou částice při cestě mezi povrchem substrátu a zdrojem těchto částic „ohřívány“ [7, 12].
- **Metoda napařování** – Je to metoda PVD, při které je zdroj povlakovacího materiálu odpařován tepelným zdrojem. Před tím, než částice odpařeného materiálu kondenzují na podkladovém substrátu, vznikají malé nebo žádné kolize částic s molekulami plynu v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Proces probíhá ve vakuu, při tlaku 10^{-3} Pa až 10^{-8} Pa [7]. Tepelným zdrojem může být cívka wolframového drátu nebo vysokoenergetický elektronový paprsek přímo zahřívající zdrojový materiál. Substrát bývá obvykle umístěn dále od odpařovaného zdroje, aby

nedocházelo k jeho zahřívání [12]. Metoda obloukového napařování využívá vysokého proudu a nízkého napětí k odpařování katodické elektrody (katodický oblouk) nebo anodické elektrody (anodický oblouk) a dochází k uložení odpařovaného materiálu na podkladový substrát [12].

- **Iontová implantace** – Hybridní PVD proces, který využívá souběžné nebo periodické bombardování nanášeného povlaku energetickými částicemi velikosti atomu za účelem modifikace a kontroly vlastností nanášeného povlaku. Zdrojem nanášených složek může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry. Mezi substrátem a zdrojem odpařovaného materiálu je vytvořeno silné elektrické pole, dochází k elektrickému výboji, který ionizuje částice odpařené ze zdrojového materiálu a částice plynu. Reakcí iontů vzniká povlak a ten se usazuje na povrchu povlakovaného substrátu. Pomocí iontové implantace lze nanášet povlaky na tepelně zušlechtnuté materiály a dokonce také plasty [7, 12].

3.2 Metoda CVD

Metoda CVD (**C**hemical **V**apor **D**eposition) může být definována jako nanášení pevné látky na vyhříváný povrch povlakovaného substrátu chemickou reakcí v plynné fázi [15]. Proces chemických reakcí probíhá za vysokých teplot (700 °C – 1050 °C) [16]. Výhodami této metody je výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost nanášení vrstev o větší tloušťce (10 μm – 13 μm) [1]. Pomocí této metody lze povlakovat složitější tvary a je zde také vyšší variabilita povlaků. Mezi nevýhody patří ovlivnění podkladového materiálu a tahová zbytková napětí v povlaku. Metodou CVD, na rozdíl od metody PVD, nelze povlakovat ostré hrany [7, 16].

Chemický proces CVD metody je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti zahřátého povrchu podkladového slinutého karbidu (cca 1000 °C) a následném uložení produktů chemické reakce na tomto povrchu. Výchozí plyny použité v procesu musejí obsahovat stabilní a přitom prchavou sloučeninu (např. TiCl₄, ZrCl₄, AlCl₃). Tato sloučenina se v důsledku přivedení energie (ohřevem, plazmovým obloukem, laserem) rozkládá. Výsledné produkty rozkladu sloučeniny se poté ukládají na povrch ohřátého podkladového materiálu jako katalyzátor. Pro požadovanou reakci vytvoření vrstvy povlaku musí být v plynech obsažen nekovový reaktivní plyn (např. N₂, NH₄, CH₄). V přiváděných plynech jsou také zastoupeny nosné plyny (např. Ar, H₂), které přepravují danou směs plynů k povlakovanému podkladu [5, 7, 9].

Různé typy metody CVD [7, 12, 17]:

- **Metoda PCVD** – Plazmaticky aktivovaná CVD metoda. PCVD se od klasické CVD metody liší hlavně pracovními teplotami (600 °C). Princip metody je ale stejný, tedy vytvoření povlaku z plynné fáze. Metoda je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře. Toho je docíleno pomocí ionizace a aktivace plynné atmosféry v plazmatickém výboji. Plazma může být generována pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, pulzní stejnosměrné napětí) nebo reaktivním plynem (např. NH₃) [5, 17].
- **Metoda MTCVD** – Chemické napařování za středních teplot (**M**iddle **T**emperature **C**hemical **V**apour **D**eposition) je další z metod, která je založena na snížení pracovních teplot metody CVD. Rozsah pracovních teplot MTCVD metody je od

700 °C do 850 °C. Jako vstupní sloučenina se využívá acetonitril (CH_3CN). Zdrojem titanu je chlorid titaničitý (TiCl_4). Vzhledem k nižším reakčním teplotám nedochází k poklesu houževnatosti u podkladového SK [17].

- **Metoda HFCVD** – Metoda, která využívá rozžhavené wolframové vlákno na velmi vysokou teplotu (až 2400 °C). Vlákno je umístěno v blízkosti substrátu (cca 80 mm). Rychlost depozice je vyšší než u klasické CVD metody. Tato metoda může být použita pro nanášení např. diamantových povlaků [7].

3.3 Příprava nástroje před povlakováním

Před každou technologií nanášení povlaků musí být plocha povlakovaného nástroje řádně upravena. Z hlediska povlakování je kvalita ploch velmi důležitým parametrem, protože velmi ovlivňuje adhezi povlaku a podkladu. Předvýrobní operace za účelem zlepšení kvality povrchu a adheze podkladu je broušení, zdrsňení, odmašťování, leštění, mokré čištění, pískování a odjehlování [7, 12].

- **Leštění** – Leštěné povrchy jsou lepší pro navázání PVD povlaků než drsné povrchy. Běžně se používá mechanického leštění. Při leštění křehkých materiálu mohou na povrchu vznikat vady, jako jsou trhliny. Tyto vady musí být odstraněny chemickým leptáním před tím, než je nanesen povrch [12].
- **Zdrsňení** – Provádí se za účelem zlepšení adheze mezi povlakem a podkladem. Je prováděno mechanickým obrušováním za pomoci brusného papíru nebo brusné „kaše“, která obsahuje brusná zrna [12].
- **Odmašťování** – Proces, při kterém jsou z povrchu substrátu odstraněny konzervační a jiné mastné látky. Pro tento účel jsou používána odmašťovadla na bázi ropných derivátů [7].
- **Mokré čištění** – Je prováděno za pomoci kombinovaných metod s využitím oplachů (bez tlaku i tlakových), ultrazvuku, vakuového sušení, elektro-mechanických metod nebo odstředění, vyhřátí či odpaření těkavých kapalin. Jako pracovní médium jsou použity kapalné čisticí prostředky. Roztoky určené pro čištění obsahují KOH či NaOH. Pro odstranění zbytků čisticích lázní jsou použity oplachy, které zároveň chrání očištěný povrch proti korozi [7].
- **Pískování** – Pomocí pískování se odstraňují nečistoty na povrchu nebo nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu [7].

3.4 Stripping (odstraňování starých povlaků)

Stripping je metoda, za pomoci které jsou staženy staré povlaky z přebrušovaných nástrojů. Může být provedeno chemickou nebo elektrochemickou metodou. Metoda využívá silných oxidačních činidel. Při odstraňování povlaků z nástrojů z HSS je nejčastěji používán roztok peroxidu vodíku, vody a tetranatriumdifosfátu, který je ohřátý na teplotu cca 70 °C. Po odstranění povlaku je nutné povrch opláchnout a krátkodobě pasivovat vhodným činidlem. Složitější je odstranit povlak ze slinutých karbidů, kdy při zvolení nevhodné technologie může dojít k narušení struktury odleptáním kobaltu. Pro slinuté karbidy určené pro řezné nástroje je obsah kobaltu v rozmezí 6 – 12 %. Ten velmi citlivě reaguje na kyselé či zásadité prostředí. Vážné problémy při následném povlakování nebo používání nástrojů

může způsobit odleptání kobaltu do hloubky 5 μm . Pro odstraňování povlaků ze slinutých karbidů je také používán peroxid vodíku, ale ve výrazně nižších koncentracích a za nižších teplot (pokojové teploty) [7, 18].

Pro odstranění DLC povlaků, které jsou při pokojové teplotě chemicky inertní prakticky ve všech rozpouštědlech, se používají metody založené např. na reaktivním plazmovém leptání nebo metody, které využívají pulzní iontový svazek. Obě metody jsou ale velmi nákladné [7].

4 CHARAKTERISTIKA OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE

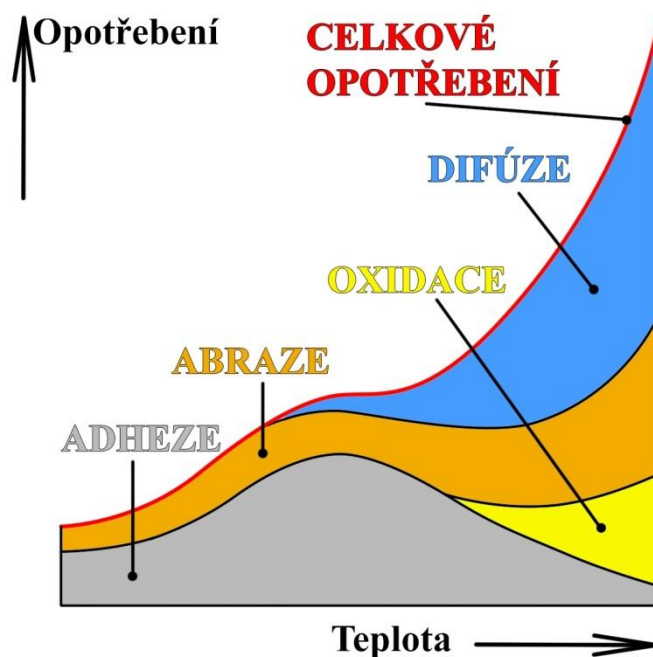
Opotřebení je důsledek vzájemného kontaktu a relativního pohybu. Při procesu soustružení dochází k relativnímu pohybu mezi nástrojem a obrobkem a mezi nástrojem a třískou. Ke kontaktu dochází mezi řezným nástrojem a obrobkem a odcházející třískou, což vede k opotřebení nástroje [1, 20].

4.1 Základní mechanismy opotřebení

Na proces opotřebení má vliv mnoho faktorů, mezi které patří zejména mechanické vlastnosti obráběného materiálu a nástrojového materiálu, geometrie nástroje, řezné prostřední, pracovní podmínky atd. V průběhu procesu opotřebení působí mnoho odlišných mechanismů opotřebení. Mezi základní mechanismy opotřebení patří [1, 9, 19, 20]:

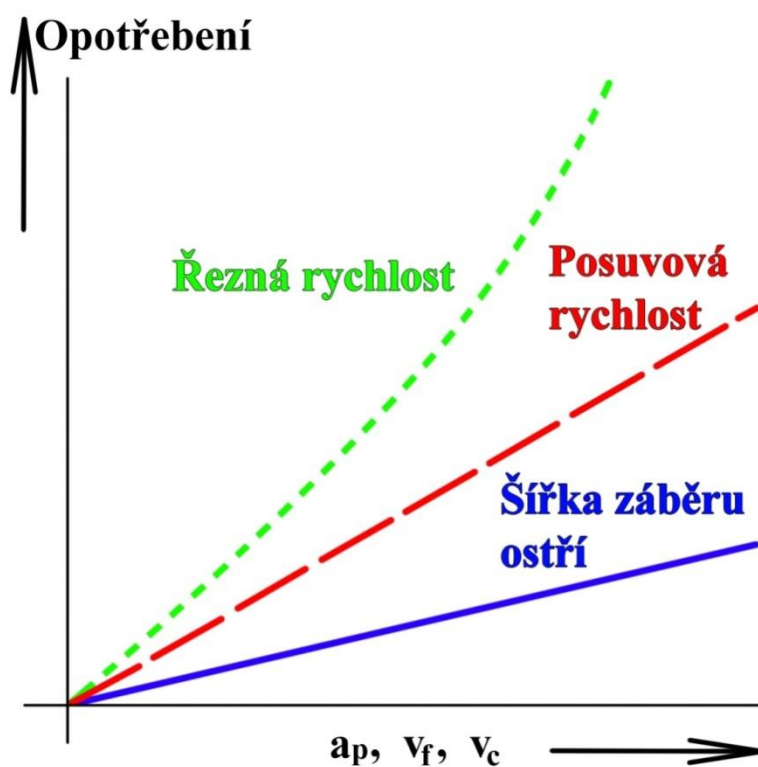
- **Adheze** – Je to jev, při kterém vznikají a okamžitě se přerušují mikrosvarové spoje na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky. Důsledkem jsou vysoké teploty a tlaky, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých povrchů [1].
- **Abraze** – Opotřebení tohoto typu je velmi rozšířené. Vzniká působením tvrdých mikročástic obsažených v materiálu obrobku, a také nástroje. Tyto mikročástice se uvolňují a dostávají se mezi obrobek a nástroj, kde podobně jako při procesu broušení způsobují brusný otěr. Schopnost řezného nástroje odolávat tomuto typu opotřebení závisí z větší části na jeho tvrdosti [9, 20].
- **Difúze** – Typ opotřebení, které vzniká v důsledku působení chemických vlivů při procesu obrábění. Dochází k migraci atomů z materiálu nástroje do materiálu obrobku a naopak. Důsledkem je vznik nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje. Vliv na vznik a průběh difúzního opotřebení mají chemické vlastnosti řezného nástrojového materiálu a jeho afinita k obráběnému materiálu. Tvrdost řezného materiálu nástroje má na tento proces jen nepatrný vliv [1, 9, 20].
- **Oxidace** – Při procesu oxidace vznikají na povrchu nástroje chemické sloučeniny v důsledku vysokých teplot a přítomnosti kyslíku v okolním prostředí. Vzniklé oxidy působí velmi rozdílně pro různé materiály. Wolfram (W) a kobalt (Co) tvoří porézní filmy oxidu, ty jsou ale snadno odnášeny třískou. Naproti tomu oxidy, jako oxid hlinitý, jsou podstatně pevnější a tvrdší [1, 20].
- **Lom** – Vzniká často v důsledku termomechanických příčin, jako kolísání teploty, přerušovaný řez a vměstky v obráběném materiálu [1, 20].

Vliv teploty procesu obrábění a řezné podmínky ovlivňují mechanismy opotřebení různými způsoby a v odlišné míře. Grafické znázornění vlivu teploty na mechanismy opotřebení je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Vliv teploty na mechanismy opotřebení [1].

Řezná rychlost v_c má z řezných podmínek největší vliv na intenzitu opotřebení, menší vliv má rychlost posuvová v_f a nejméně intenzitu opotřebení ovlivňuje šířka záběru ostří a_p [1]. Vliv řezných podmínek na mechanismy opotřebení je na obrázku. 4.2.



Obr. 4.2 Vliv řezných podmínek na mechanismy opotřebení [1].

4.2 Formy opotřebení

Typickou formou opotřebení na břitů nástroje je opotřebení hřbetu břitů, opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitů, plastická deformace břitů, opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitů, hřebenovité trhliny na ostří, únavový lom, vydrolování ostří, lom břitů nástroje a tvoření nárůstku. Ty formy opotřebení mají za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstající tření způsobené změnou geometrie nástroje [1, 9, 20].

Opotřebení hřbetu břitů

Tento druh opotřebení se projevuje na hřbetní ploše břitů a patří mezi abrazivní formy opotřebení. Všeobecně je opotřebení hřbetů obvyklým typem opotřebení. Rovnoměrně zvětšující se opotřebení hřbetů břitů je často považováno za ideální. Příliš vysoké opotřebení způsobuje zhoršení jakosti obrobeného povrchu nebo nedodržení tolerancí. Příčinou vzniku bývá příliš vysoká řezná rychlost nebo posuvová rychlost, a také nedostatečná odolnost proti otěru [9, 20].

Opotřebení ve tvaru žlábků

Je to nadměrné opotřebení, které vzniká na čele břitů a je výsledkem působení mechanismů abraze a difúzního opotřebení. Brousící pochod vyvolaný tvrdými částicemi obsaženými v materiálu obrobené součásti a hlavně difúzí v místě břitů s nejvyšší teplotou, tj. v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitů, vyvolává úběr řezného nástrojového materiálu. Opotřebení ve tvaru žlábků může vést ke změně geometrie břitů, která může ovlivnit tvar třísky, zeslabit břit a změnit působení řezných sil [1, 9, 20].

Plastické deformace břitů

Hlavní příčinou vzniku plastických deformací je působení kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břitů. Vysoké řezné tlaky a teploty jsou vyvolány vysokou řeznou a posuvovou rychlostí a tvrdými materiály obrobené součásti. Při deformaci břitů se ještě více zvyšují teploty procesu a dochází ke změně geometrie nástroje a odchodu třísek. Tento typ opotřebení lze zmenšit správnou volbou zaoblení ostří a geometrie nástroje [9].

Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitů

Patří mezi typické adhezní opotřebení, může ale také souviset s oxidačním opotřebením. Vruby na hlavním hřbetě vznikají v místě kontaktu břitů s bokem třísky. Místem vzniku je zároveň místo, kterým proniká vzduch do místa řezu. Opotřebení ve tvaru vrubu může vznikat i na vedlejším hřbetě břitů, kde má mechanické příčiny. Ty jsou způsobené hlavně tvrdými částicemi obrobeného materiálu [9, 20].

Hřebenovité trhliny na ostří

Hřebenovité trhliny nebo také tepelné trhliny jsou forma únavového opotřebení, které je vyvoláno tepelnými šoky při kolísání přívodu řezné kapaliny nebo při soustružení

přerušovaným řezem. Trhliny vznikají kolmo na ostří, přitom se částice řezného nástrojového materiálu mohou mezi jednotlivými trhlinami vylamovat, a to může vést k náhlému lomu břitu [9, 20].

Vydrolování ostří

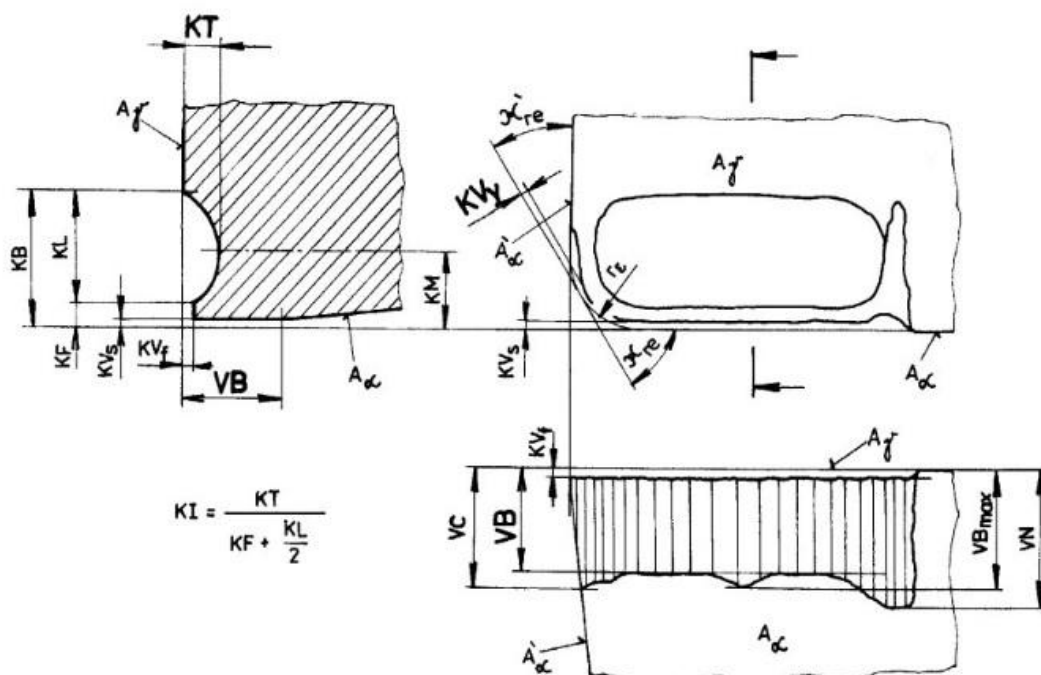
Vydrolování je způsobeno špičkami zatížení, které vede k tomu, že drobné částičky řezného nástroje se začnou oddělovat z povrchu břitu. Nejčastější příčinou vydrolování řezného materiálu nástroje jsou přerušované řezy [9].

Tvorba nárůstku

Vzniká, když je teplota v místě řezu příliš nízká nebo když obráběný materiál snadno ulpívá na břit. Prvním patrným důkazem vniku nárůstku je zhoršení kvality obrobené plochy. V okamžiku, kdy dochází k oddělení nárůstku, může docházet k vylamování břitu. Vzhledem k tomu, že oblasti vzniku nárůstku jsou relativně dobře známé, lze vzniku této formě opotřebení často zabránit [9, 20].

4.3 Hodnocení opotřebení

Na obrázku 4.3 jsou některá kritéria, kterými se hodnotí opotřebení řezného nástroje. Mezi nejčastěji užívaná patří opotřebení na hřbetě **VB** (šířka fazetky). Dalším kritériem pro hodnocení opotřebení je hloubka výmolu na čele **KT** a radiální opotřebení špičky **KV_y** [1].



Obr. 4.3 Kritéria pro hodnocení řezného nástroje [1].

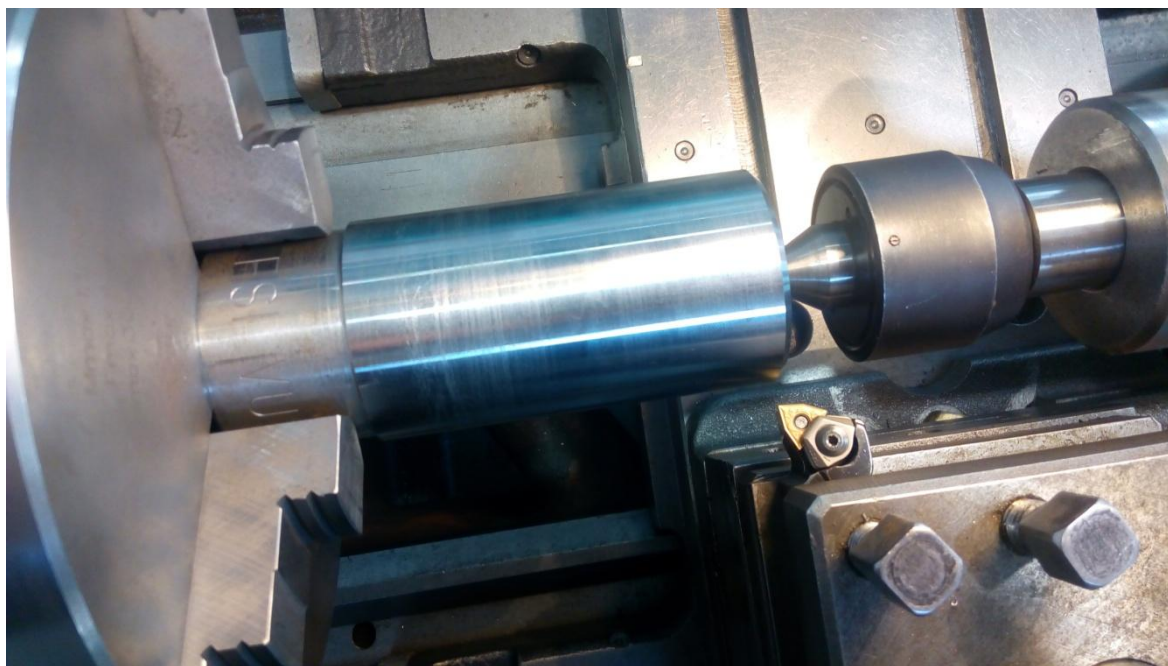
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly testovány tři vybrané VBD se třemi různými povlaky, které byly na nástroj naneseny metodou PVD. Cílem experimentu bylo zjistit, jaký vliv má nanesený povlak na VBD na trvanlivost a opotřebení na hřbetu břitu (zkoumané kritérium **VB**) nástroje při podélném soustružení. Jako doprovodný experiment při testování povlaků bylo měření jakosti povrchu obráběné součásti a zjištění vlivu opotřebení na měřenou jakost povrchu a jejich vztahu mezi sebou.

Experimentální část dále obsahuje popis obráběného materiálu použitého při testování, popis vybraných nástrojů a stroje, průběh experimentu a vyhodnocení experimentu.

5.1 Obráběcí nástroj

Pro experiment byly vybrány tři VBD společnosti ISKAR, kde na každé VBD byl nanesen různý povlak metodou PVD. Specifikace a popis vybraných nástrojů je v tabulce 5.1. Připravený nástroj a materiál pro obrábění je na obrázku 5.1.

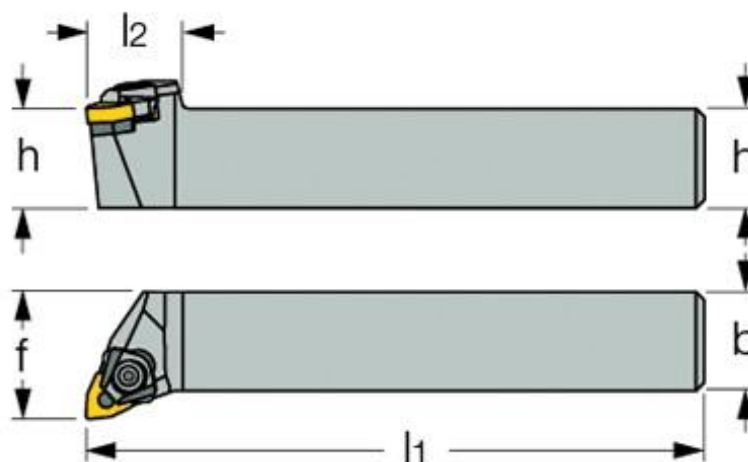


Obr. 5.1 Upnutý nástroj a obráběný materiál.

Tab. 5.1 Specifikace vybraných nástrojů [22].

Název	Jakost	Materiál	Povlak	Metoda
WNMG 3-1-NF	IC907	Povlakovaný SK	TiAlN+TiN	PVD
WNMG 3-0-SF	IC530N	Povlakovaný SK	TiCN+TiN	PVD
WNMG 3-2-VL	IC908	Povlakovaný SK	TiAlN	PVD

Pro upnutí nástroje byl použit držák MWLNR 1616W – 06SW společnosti ISKAR (obr. 5.2). Jeho specifikace jsou uvedeny v tabulce 5.2.



Obr. 5.2 Soustružnický nůž MWLNR 1616W – 06SW [22].

Tab. 5.2 Specifikace použitého soustružnického nože MWLNR 1616W – 06SW [22].

h [mm]	b [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	f [mm]
16	16	100	23	16

5.2 Obráběcí stroj

Pro experiment při obrábění byl použit soustruh TOS SV 18 RD (obr 5.3). Jeho některé specifikace jsou v tabulce 5.3.



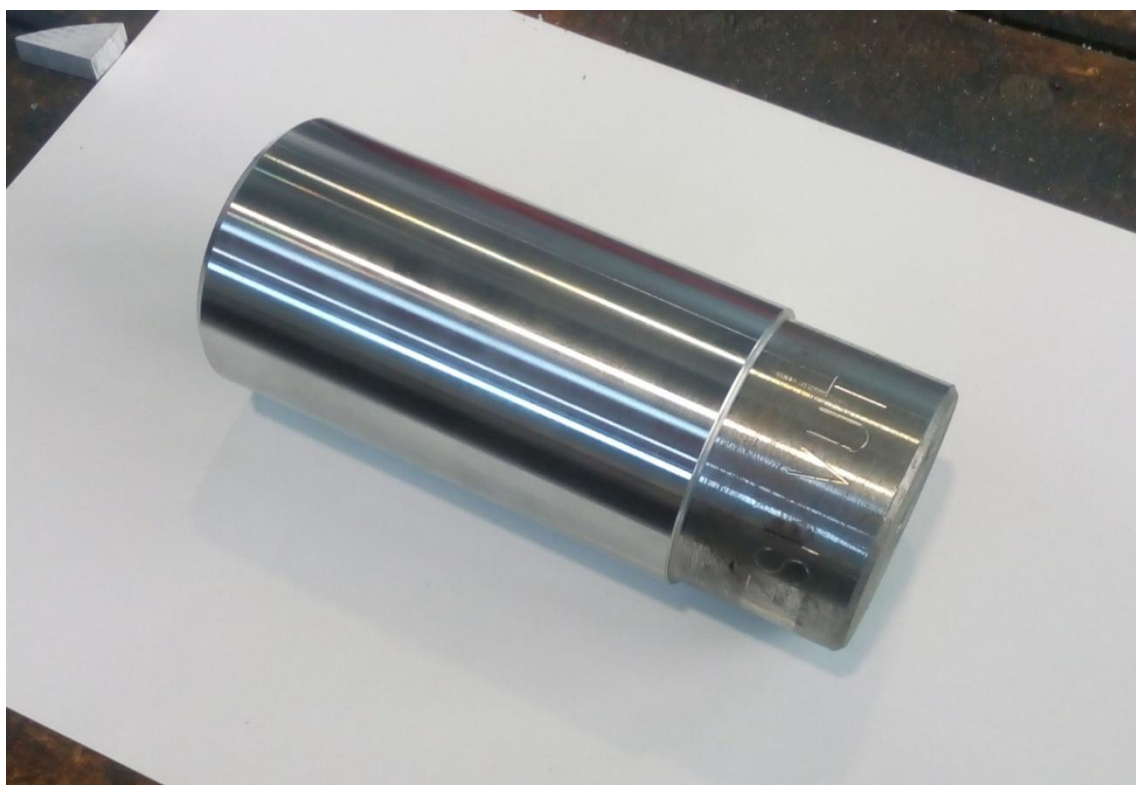
Obr. 5.3 Použitý obráběcí stroj TOS SV 18 RD.

Tab. 5.3 Specifikace použitého obráběcího stroje TOS SV 18 RD.

Technické parametry	Hodnoty
Maximální počet otáček:	2 800 1/min
Oběžný průměr nad suportem:	215 mm
Šířka lože:	340 mm
Průměr upínací desky:	360 mm
Výkon motoru při maximálních otáčkách:	14 kW
Váha stroje:	2 100 kg

5.3 Obráběný materiál

Jako obráběný materiál pro experiment byla zvolena neušlechtilá konstrukční ocel obvyklých jakostí s vyšším obsahem uhlíku ČSN 41 1600 (Ocel 11 600) [23]. U ocelí tohoto typu jsou udávány obsahy síry (**S**) a fosforu (**P**), jejichž hodnoty spolu s vybranými mechanickými vlastnostmi jsou uvedeny v tabulce 5.4. Materiál pro experiment byl připraven jako tyč o průměru 58 mm (obr. 5.4).



Obr. 5.4 Polotovar obráběného materiálu.

Tab. 5.4 Chemické složení a vybrané mechanické vlastnosti obráběného materiálu [24].

Prvek	Hodnota
Obsah síry (S)	max. 0,045 %
Obsah fosforu (P)	max. 0,045 %
Mechanické vlastnosti	
Pevnost v tahu R _m	590 – 710 MPa
Mez kluzu R _e	min. 325 MPa

5.4 Podmínky a průběh experimentu

Řezné podmínky pro experiment byly nastaveny vzhledem k obráběnému materiálu a použitému nástroji. Pro všechny nástroje byly zvoleny stejné podmínky, které spadaly do rozsahu jejich doporučených hodnot. Byly zvoleny otáčky n , které zůstávaly konstantní po celou dobu experimentu. Dále byl nastaven posuv na otáčku f a šířka záběru ostří a_p , také tyto hodnoty zůstávaly konstantní po celý experiment. Naopak řezná rychlost konstantní nebyla vzhledem k tomu, že použitý stroj neumožňuje docílit konstantní řezné rychlosti. Hodnoty řezných podmínek jsou v tabulce 5.5.

Tab. 5.5 Hodnoty řezných podmínek.

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
otáčky	n	1 100	[1/min]
posuv na otáčku	f	0,1	[mm]
šířka záběru ostří	a_p	1	[mm]

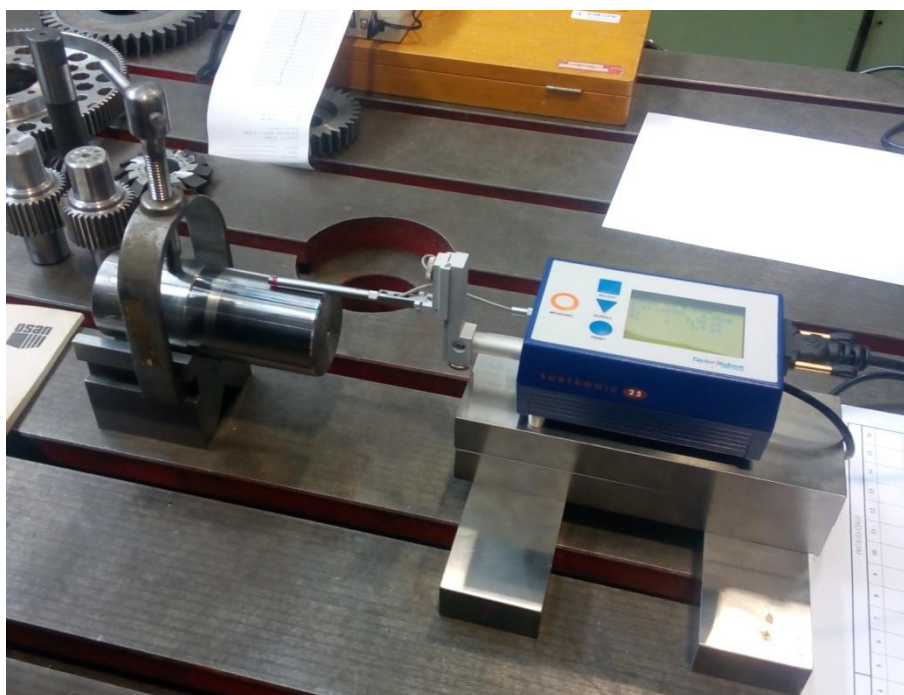
Při obrábění nebyla použita procesní kapalina a chlazení probíhalo pouze okolním vzduchem. Pro každou VBD bylo provedeno 20 průjezdů za daných řezných podmínek v délce $L = 80$ mm. Čistý jednotkový strojní čas obrábění jednoho průjezdu ze zadaných řezných podmínek je podle vztahu (1.14) $t_{AS} = 0,73$ min. Při experimentu proběhlo celkem 5 měření opotřebení na hřbetu břitu (sledované kritérium **VB**) pro každou VBD, které se provádělo na dílenském optickém mikroskopu BM1 V C 332 (obr. 5.5). Opotřebení na hřbetu břitu bylo měřeno po prvním, a poté po každém pátém průjezdu. Současně byla také měřena jakost povrchu obráběné součásti (obr. 5.6) pomocí digitálního drsnoměru. Měření jakosti povrchu probíhalo ve 3 různých místech ve vyhodnocovací délce 4 mm, která byla rozdělena na 5 úseku po 0,8 mm. Byly měřeny hodnoty střední aritmetické úchyly profilu **Ra** a výška nerovnosti profilu z 10 bodů **Rz**.

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} \quad (1.14)$$

$$t_{AS} = \frac{80}{1100 \cdot 0,1} = 0,73 \text{ min}$$



Obr. 5.5 Dílenský optický mikroskop BM1 V C 332.



Obr. 5.6 Měření jakosti povrchu.

5.5 Vyhodnocení experimentu

Pro každou testovanou VBD se specifickým povlakem byl postupně vyhodnocen graf závislosti opotřebení na hřbetu břitu (VB) na čase (t) a graf závislosti jakosti povrchu na opotřebení z naměřených hodnot.

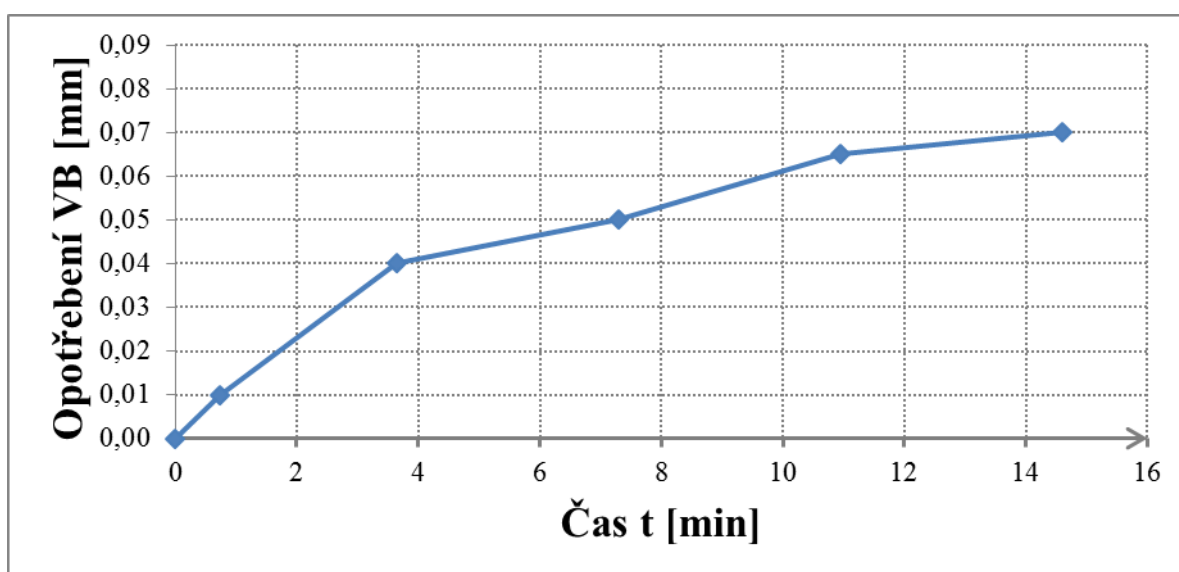
Vyhodnocení opotřebení a trvanlivosti

První testovanou VBD je WNMG 3-1-NF, na které je nanesen povlak **TiAlN+TiN** metodou PVD. Tabulka 5.6 obsahuje naměřené hodnoty opotřebení na hřbetu břitu po vykonání předem stanoveného počtu průjezdů a časové ekvivalenty těchto průjezdů. Ze vztahu (1.14) byla stanovena hodnota čistého strojního času (bez hodnot nájezdů a přejezdů) pro jeden průjezd $t_{AS} = 0,73$ min.

Tab. 5.6 Naměřené hodnoty opotřebení pro WNMG 3-1-NF s povlakem TiAlN+TiN.

Číslo průjezdu	Hodnota VB [mm]	Časový ekvivalent průjezdu [min]
1	0,010	0,73
5	0,040	3,65
10	0,050	7,30
15	0,065	10,95
20	0,070	14,60

Na obrázku 5.7 je znázorněn grafický průběh opotřebení VB v závislosti na čase t pro VBD WNMG 3-1-NF s naneseným povlakem TiAlN+TiN. Při trvanlivosti nástroje $T = 14,6$ min bylo dosaženo celkové opotřebení na hřbetě břitu $VB = 0,07$ mm.



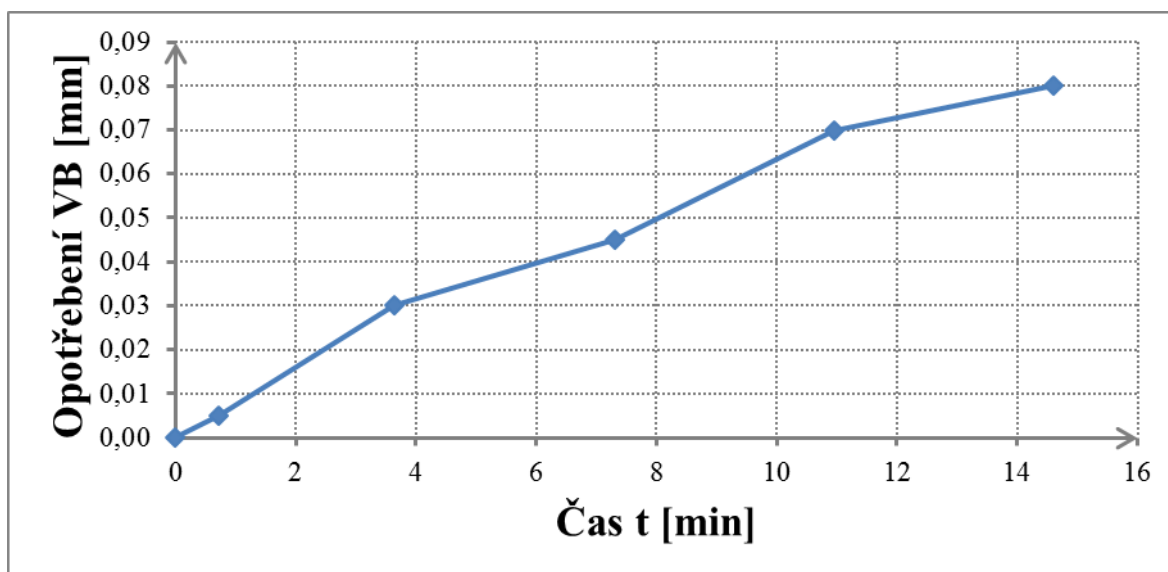
Obr. 5.7 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t pro TiAlN+TiN.

Další testovanou VBD je WNMG 3-0-SF s naneseným povlakem **TiCN+TiN** metodou PVD. Tabulka 5.7 obsahuje naměřené hodnoty opotřebení na hřbetu bříty po vykonání předem stanoveného počtu průjezdů a časové ekvivalenty těchto průjezdů.

Tab. 5.7 Naměřené hodnoty opotřebení pro WNMG 3-0-SF s povlakem TiCN+TiN.

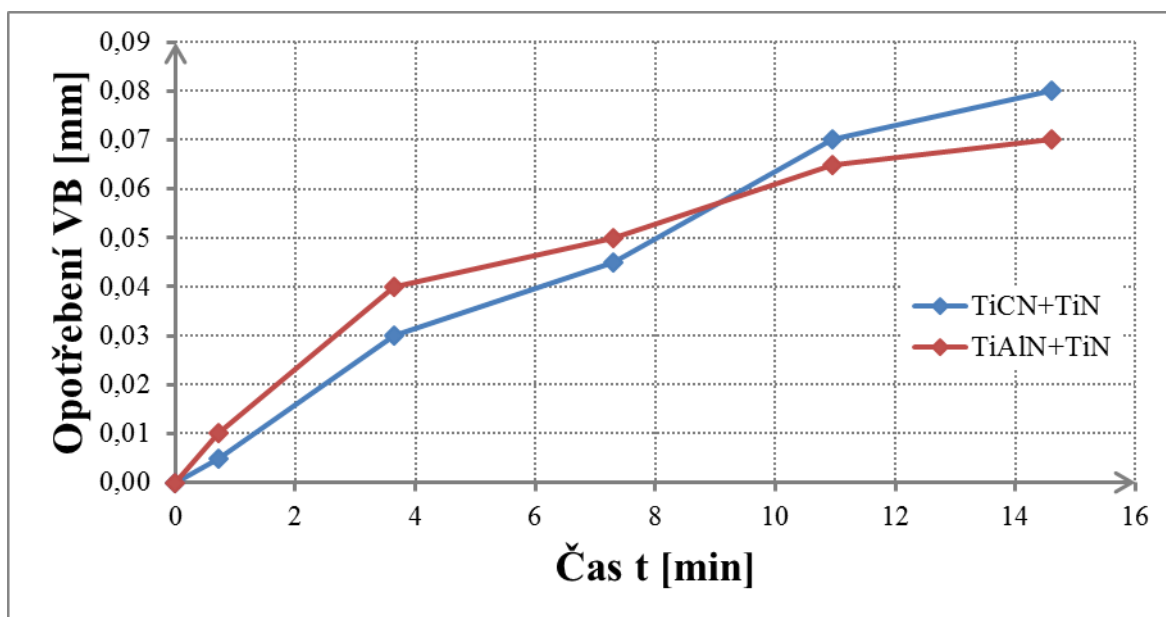
Číslo průjezdu	Hodnota VB [mm]	Časový ekvivalent průjezdu [min]
1	0,005	0,73
5	0,030	3,65
10	0,045	7,30
15	0,070	10,95
20	0,080	14,60

Na obrázku 5.8 je znázorněn grafický průběh opotřebení VB v závislosti na čase t pro VBD WNMG 3-0-SF s naneseným povlakem TiCN+TiN. Při trvanlivosti nástroje $T = 14,6$ min bylo dosaženo celkového opotřebení na hřbetě bříty $VB = 0,08$ mm.



Obr. 5.8 Průběh opotřebení VB v závislosti na čase t pro TiCN+TiN.

Z grafického znázornění na obrázku 5.9 je patrné, že nárůst opotřebení u povlaku TiAlN+TiN byl na počátku experimentu rychlejší než u povlaku TiCN+TiN, ale v konečné fázi rychlost opotřebení u povlaku TiAlN+TiN klesala a na konci experimentu při trvanlivosti nástroje $T = 14,6$ min byla pro povlak TiAlN+TiN dosažena hodnota opotřebení $VB = 0,07$ mm a pro povlak TiCN+TiN byla hodnota opotřebení při stejné trvanlivosti ($T = 14,6$ min) $VB = 0,08$ mm.



Obr. 5.9 Porovnání závislosti opotřebení.

Poslední testovanou VBD je WNMG 3-2-VL, na které je nanesen povlak **TiAlN** pomocí metody PVD. Při testování této VBD došlo k tvorbě stužkových smotaných třísek (obr. 5.10). Z toho důvodu muselo být testování VBD, vzhledem k bezpečnosti experimentu, zastaveno.



Obr. 5.10 Vznikající tříška při testování VBD typu WNMG 3-2-VL.

Vyhodnocení jakosti povrchu

V průběhu experimentu byla také měřena jakost povrchu obráběné součásti. Měření probíhalo současně s měřením opotřebení. Byly měřeny hodnoty střední aritmetické úchyly profilu Ra a výška nerovnosti profilu z 10 bodů Rz. Z naměřených hodnot byl sestaven graf v závislosti na opotřebení pro všechny povlakované nástroje.

Tabulka 5.8 obsahuje naměřené hodnoty aritmetické úchyly profilu Ra, aritmetický průměr hodnot Ra a opotřebení VB pro nástroj WNMG 3-1-NF s povlakem TiAlN+TiN.

Tab. 5.8 Hodnoty Ra pro povlak TiAlN+TiN.

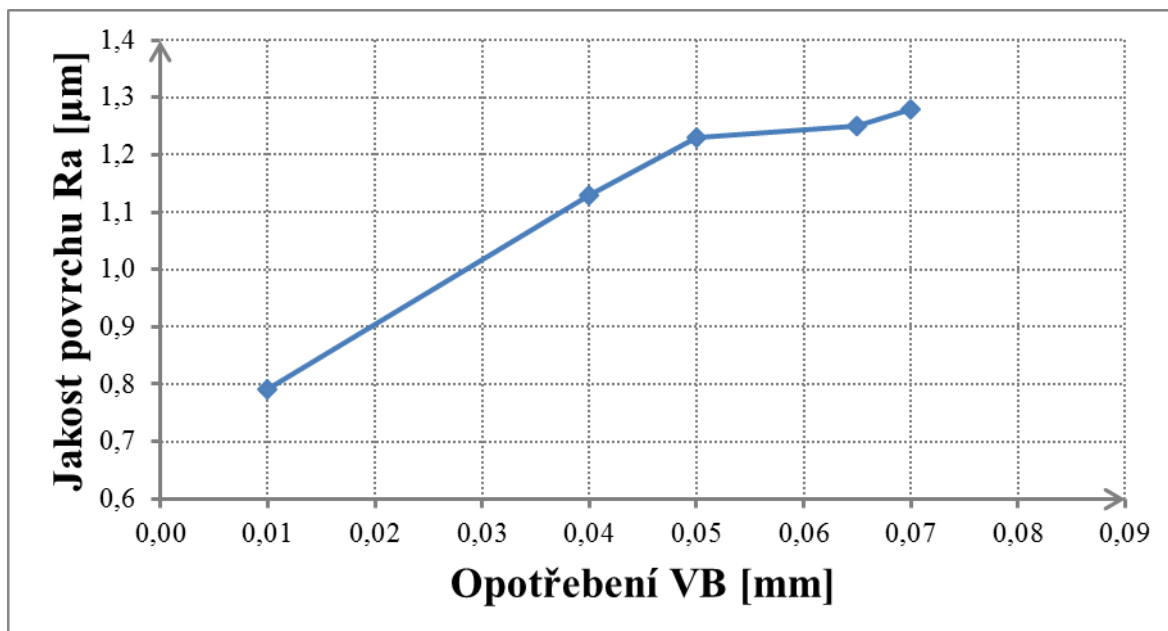
Č. měření	Ra [μm]			Aritmetický průměr [μm]	VB [mm]
1.	1,12	0,08	1,18	0,79	0,010
2.	1,14	1,12	1,12	1,13	0,040
3.	1,22	1,28	1,18	1,23	0,050
4.	1,25	1,24	1,26	1,25	0,065
5.	1,28	1,26	1,3	1,28	0,070

Tabulka 5.9 obsahuje naměřené hodnoty výšky nerovnosti profilu z 10 bodů Rz, aritmetický průměr hodnot Rz a opotřebení VB pro nástroj WNMG 3-1-NF s povlakem TiAlN+TiN.

Tab. 5.9 Hodnoty Rz pro povlak TiAlN+TiN.

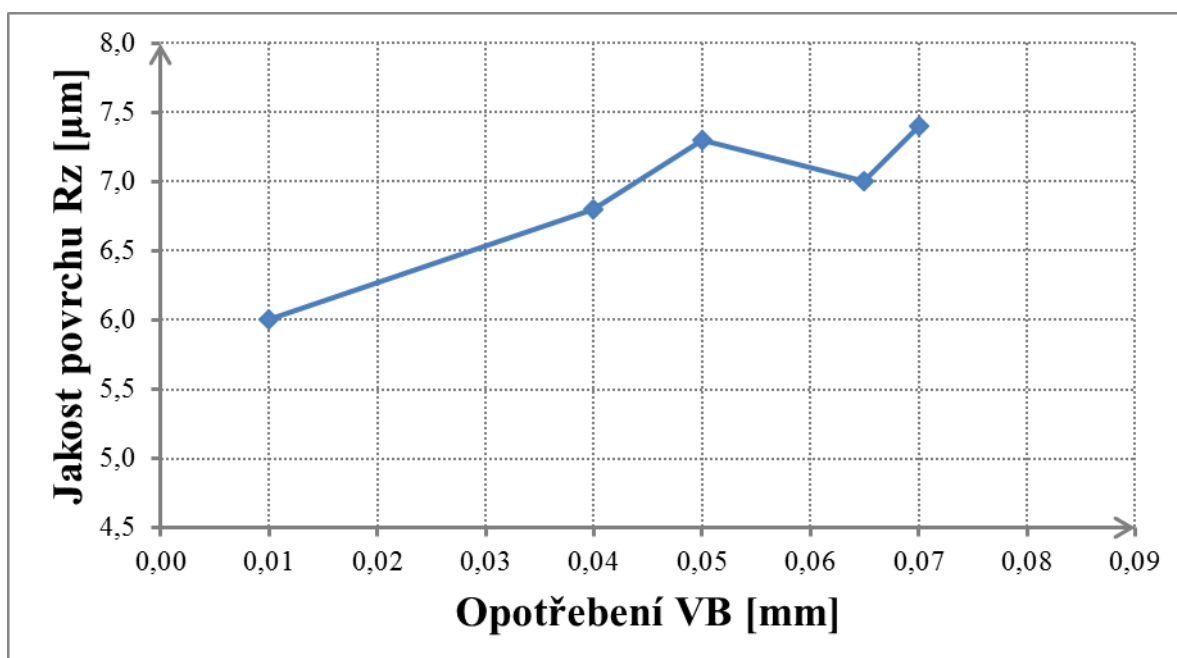
Č. měření	Rz [μm]			Aritmetický průměr [μm]	VB [mm]
1.	6,4	5,4	6,2	6,0	0,010
2.	6,8	6,7	6,8	6,8	0,040
3.	7,1	7,8	7,1	7,3	0,050
4.	6,8	7,0	7,2	7,0	0,065
5.	7,4	7,1	7,6	7,4	0,070

Na obrázku 5.11 je grafické vyhodnocení závislosti jakosti povrchu Ra na opotřebení VB pro povlak TiAlN+TiN.



Obr. 5.11 Závislost jakosti povrchu Ra na opotřebení VB pro TiAlN+TiN.

Na obrázku 5.12 je grafické vyhodnocení závislosti jakosti povrchu Rz na opotřebení VB pro povlak TiAlN+TiN.



Obr. 5.12 Závislost jakosti povrchu Rz na opotřebení VB pro TiAlN+TiN.

Tabulka 5.10 obsahuje naměřené hodnoty aritmetické úchylky profilu Ra, aritmetický průměr hodnot Ra a opotřebení VB pro nástroj WNMG 3-0-SF s povlakem TiCN+TiN.

Tab. 5.10 Hodnoty Ra pro povlak TiCN+TiN.

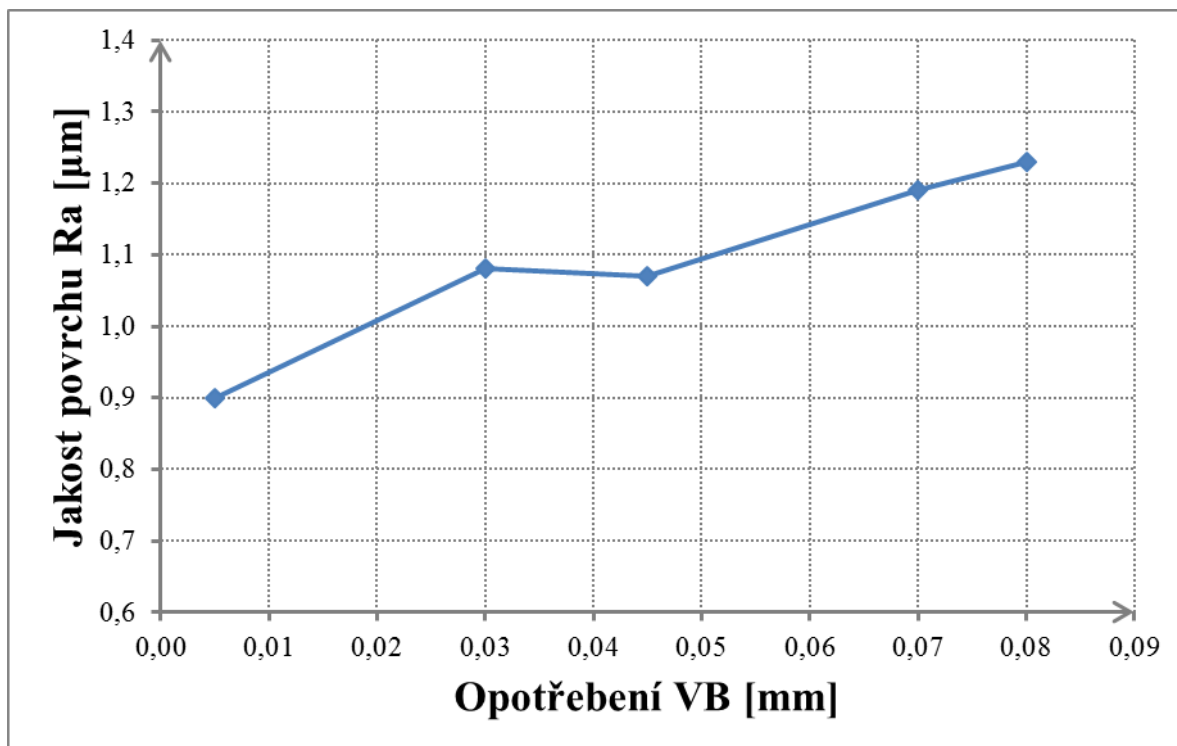
Č. měření	Ra [μm]			Aritmetický průměr [μm]	VB [mm]
1.	0,90	0,94	0,86	0,90	0,005
2.	1,12	1,04	1,08	1,08	0,030
3.	1,02	1,02	1,18	1,07	0,045
4.	1,16	1,22	1,20	1,19	0,070
5.	1,14	1,24	1,32	1,23	0,080

Tabulka 5.11 obsahuje naměřené hodnoty výšky nerovnosti profilu z 10 bodů Rz, aritmetický průměr hodnot Rz a opotřebení VB pro nástroj WNMG 3-0-SF s povlakem TiCN+TiN.

Tab. 5.11 Hodnoty Rz pro povlak TiCN+TiN.

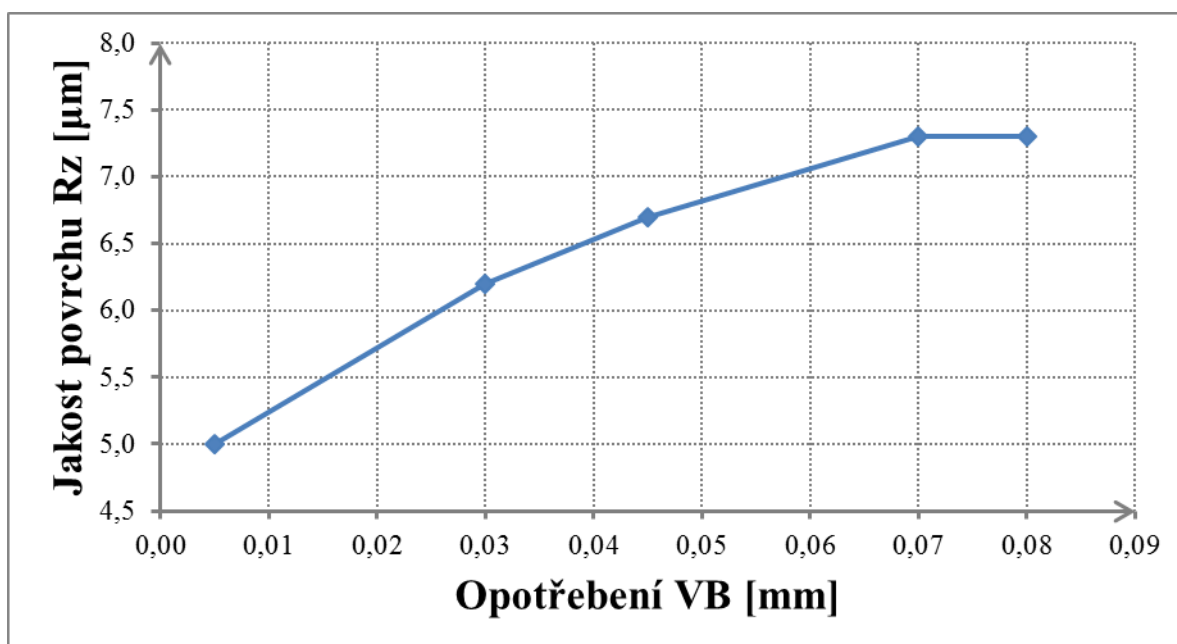
Č. měření	Rz [μm]			Aritmetický průměr [μm]	VB [mm]
1.	4,9	5,2	4,9	5,0	0,005
2.	6,1	6,3	6,2	6,2	0,030
3.	6,5	6,2	7,4	6,7	0,045
4.	6,8	7,7	7,4	7,3	0,070
5.	7,1	7,8	7,9	7,3	0,080

Na obrázku 5.13 je grafické vyhodnocení závislosti jakosti povrchu R_a na opotřebení VB pro povlak TiCN+TiN.



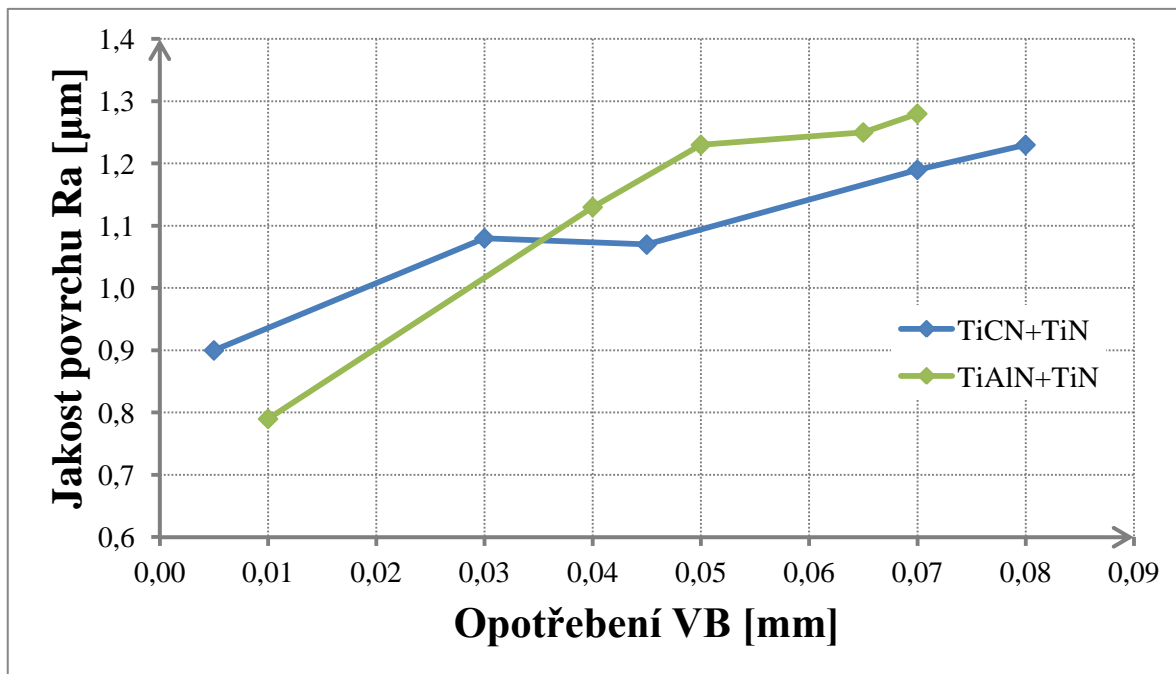
Obr. 5.13 Závislost jakosti povrchu R_a na opotřebení VB pro TiCN+TiN.

Na obrázku 5.14 je grafické vyhodnocení závislosti jakosti povrchu R_z na opotřebení VB pro povlak TiCN+TiN.



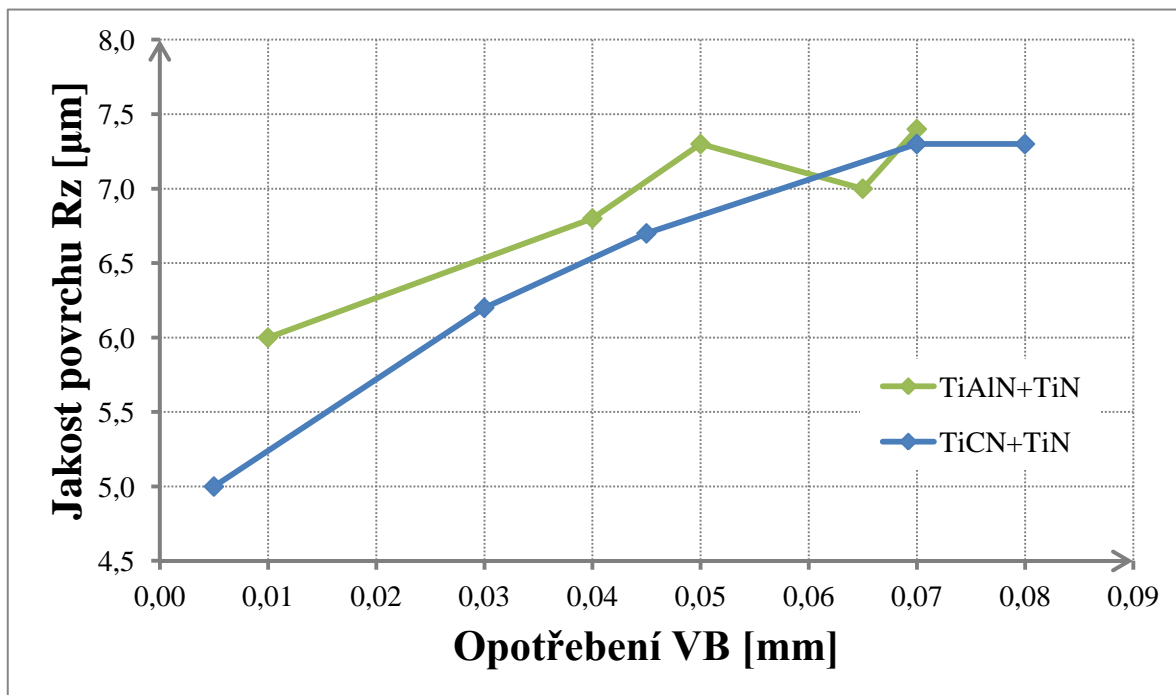
Obr. 5.14 Závislost jakosti povrchu R_z na opotřebení VB pro TiCN+TiN.

Na obrázku 5.15 je porovnání obou závislostí jakosti povrchu Ra na opotřebení VB. Z obou závislostí je patrné, že s rostoucím opotřebením roste taky jakost povrchu Ra. Mezi zvyšujícím se opotřebením a jakostí povrchu Ra je tedy přímá závislost.



Obr. 5.15 Porovnání závislostí jakosti povrchu Ra a opotřebení VB.

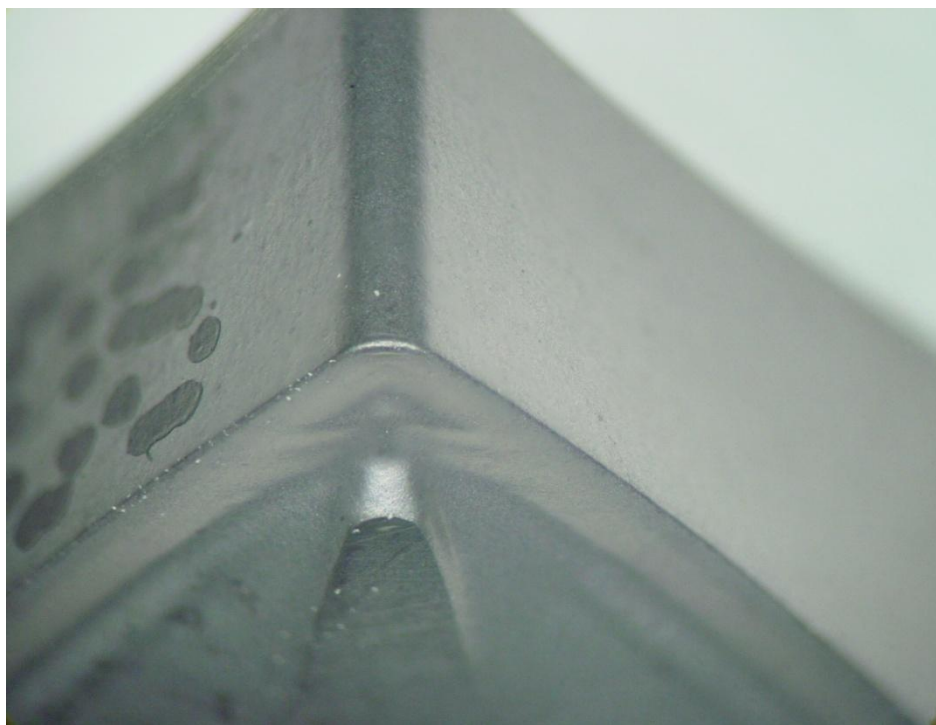
Na obrázku 5.16 je porovnání závislostí jakosti povrchu Rz na opotřebení VB. Také pro výšku nerovnosti profilu z 10 bodů Rz platí, že s rostoucím opotřebením její hodnota roste.



Obr. 5.16 Porovnání závislostí jakosti povrchu Rz a opotřebení VB.

Porovnání VBD před a po experimentu

Na obrázku 5.17 je fotografie stavu VBD před experimentem a fotografie na obrázku 5.18 ukazuje VBD po dokončení experimentu pro VBD WNMG 3-1-NF s naneseným povlakem TiAlN+TiN.

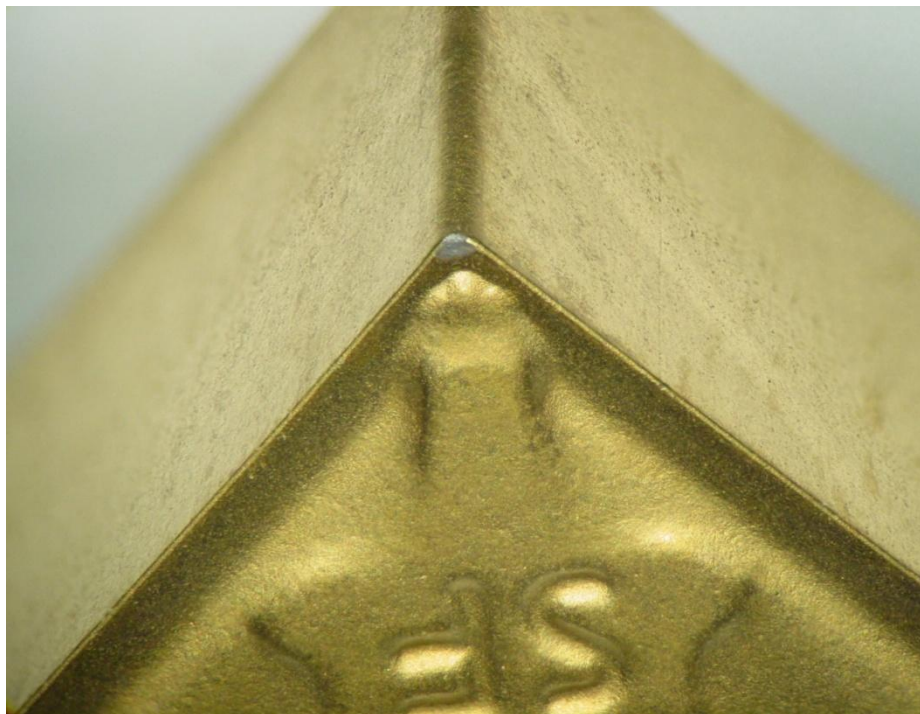


Obr. 5.17 VBD WNMG 3-1-NF před experimentem.



Obr. 5.18 VBD WNMG 3-1-NF po experimentu.

Na obrázku 5.19 je fotografie stavu VBD před experimentem a fotografie na obrázku 5.20 ukazuje VBD po dokončení experimentu pro VBD WNMG 3-0-SF s naneseným povlakem TiCN+TiN.



Obr. 5.19 VBD WNMG 3-0-SF před experimentem.



Obr. 5.20 VBD WNMG 3-0-SF po experimentu.

ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se zabývala charakteristikou technologie soustružení, kde byla popsána kinematika procesu, sílové zatížení při soustružení a jednotkový strojní čas při podélném soustružení. Dále byly v teoretické části popsány slinuté karbidy, jejich historie, výroba a rozdělení, a také metody povlakování slinutých karbidů. Poslední teoretická část se zabývala opotřebením břitu nástroje.

V experimentální části byly testovány tři VBD s nanesenými povlaky metodou PVD. Byla obráběna ocel ČSN 41 1600 a cílem bylo zjistit opotřebení, kterého bude dosaženo při dvaceti průjezdech při podélném soustružení v délce 80 mm. Testování všech VBD probíhalo za konstantních řezných podmínek (a_p , n , f). Při obrábění nebyly použity procesní kapaliny a chlazení probíhalo pouze okolním vzduchem. Vzhledem k použitému obráběcímu stroji nebylo možné docílit konstantní řezné rychlosti. Současně byla měřena jakost povrchu s cílem zjištění souvislosti mezi opotřebením a kvalitou obráběného povrchu.

Z dosažených výsledků vyplývá:

- trvanlivost nástrojů při 20 průjezdech v 80 mm délce je $T = 14,6$ min,
- při testování WNMG 3-1-NF s naneseným povlakem TiAlN+TiN bylo dosaženo hodnoty opotřebení $VB = 0,07$ mm,
- při testování WNMG 3-0-SF s naneseným povlakem TiCN+TiN bylo dosaženo hodnoty opotřebení $VB = 0,08$ mm,
- testování WNMG 3-2-VL muselo být zastaveno kvůli tvorbě nevhodné a nebezpečné třísky,
- povlak TiAlN+TiN dosahoval nižších hodnot opotřebení při stejném čistém strojním čase ($t = 14,6$ min), než TiCN+TiN,
- VBD WNMG 3-0-SF s naneseným povlakem TiCN+TiN dosahovala nižších hodnot jakosti obrobenej plochy R_z a R_a než VBD WNMG 3-1-NF s naneseným povlakem TiAlN+TiN,
- střední aritmetická úchylka R_a roste s opotřebením VB ,
- výška nerovnosti profilu z 10 bodů R_z roste s opotřebením VB ,
- se zvyšujícími se hodnotami opotřebení VB rostou také hodnoty jakosti povrchu R_a a R_z ,
- jakost povrchu je závislá na opotřebením břitu nástroje.

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. 2003 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.
- [2] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-718-3337-1.
- [5] HUMÁR, A., *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-858-2510-4.
- [6] SANDVIK AB. *All about cemented carbide* [online]. 2008 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.allaboutcementedcarbide.com/>.
- [7] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [8] PRAMET TOOLS s.r.o. Šumperk. *Soustružení 2010*. 329 s.
- [9] SANDVIK AB – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. ISBN 91-97 22 99-46.
- [10] SAWKA, A., KWATERA, A., WOŹNICKI, A., ZASADZIŃSKI, J. Cemented carbide cutting tools life with nanocrystalline Al₂O₃ layer deposited by MOCVD. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. Elsevier, May 2016, vol. 16(3), 351-364 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966516000194>.
- [11] STRNAD, G., BUHAGIAR, J. LATEST DEVELOPMENTS IN PVD COATINGS FOR TOOLING. *Scientific Bulletin of the „Petru Maior“ University of Târgu Mureș* [online]. Romania, 2010, vol. 7, no. 1, [cit. 2016-03-29]. ISSN 1841-9267. Dostupné z: <http://scientificbulletin.upm.ro/papers/2010-1/Latest-Developments-in-PVD-Coatings-for-Tooling.pdf>.
- [12] MATTOX, M. *Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing*. 2.vyd. Albuquerque (USA): APR, 2010. 917s. ISBN 978-0-8155-2037-5.
- [13] BOUZAKIS, K., MICHAILEDIS, N., SKORDARIS, G., BOUZAKIS, E., BIERMANN, D., M'SAOUBI, R. Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* [online]. Elsevier, 2012, vol. 61(2), 703-723 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S0007850612002053/1-s2.0-S0007850612002053-main.pdf?_tid=161c63fa-fb5a-11e5-aae4-00000aab0f26&acdnat=1459880184_74361fb02127b5ed350669369f7a6f38.

- [14] PRENGEL, H. G., JINDAL, P. C., WENDT, K. H., SANTHANAM, A. T., HEGDE, P. L., PENICH, R. M. A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology* [online]. Elsevier, May 2001, vol. 139(1), 25-34 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025789720001080X>.
- [15] PIERSON, Hugh O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition*. 2. vyd. New York, U.S.A. Noyes Publications / William Andrew Publishing, LLC Norwich, 1999. ISBN 978-0-8155-1432-9.
- [16] SANDVIK AB. *Povlakovaný slinutý karbid* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx?Country=cz.
- [17] HUMÁR, A., DANG, V. H. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM – Průmyslové spektrum*. 7, 8/2001 s. 43-45. ISSN 1212-2572.
- [18] HOLUBÁŘ, P., ŠÍMA, M., ZINDULKA, O. Technologie úprav nástrojů před a po povlakování. *MM – Průmyslové spektrum*. 9/2005 s. 70-72. ISSN 1212-2572.
- [19] SANDVIK AB. *Opotřebení nástroje* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx?Country=cz.
- [20] PRŮMYSL CZ. *Řezné nástroje: Opotřebení břitu nástroje* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/rezne-nastroje-opotrebeni-britu-nastroje/>.
- [21] LISS. *Katalog povlaků* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.liss.cz/nabidka.php?podskupina=4>.
- [22] ISCAR LTD. Manufacturer of Metalworking Tools. *eCatalog* [online]. 2016 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/>.
- [23] FEROMAT. *Jakosti ocelí* [online]. Feromat Brno s.r.o., 2010 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli.
- [24] CZ FERRO – STEEL, spol. s.r.o. *ČSN 11600 – konstrukční ocel* [online]. Napajedla [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11600.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CVD	[-]	chemické napařování
DLC	[-]	diamant podobný uhlíku
HFCVD	[-]	metoda CVD využívající žhavicí vlákno
HSS	[-]	rychlořezná ocel
MTCVD	[-]	chemické napařování za středních teplot
PCVD	[-]	plazmaticky aktivovaná CVD metoda
PVD	[-]	fyzikální napařování
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	[-]	materiálové konstanty pro výpočet silového zatížení břitu
D	[mm]	průměr obráběné plochy
F	[N]	celková řezná síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_p	[N]	pasivní síla
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
KV_y	[mm]	radiální opotřebení špičky
L	[mm]	celková obráběná délka
P	[W]	příkon stroje
P_{ef}	[W]	efektivní výkon stroje
T	[min]	trvanlivost nástroje
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	výška nerovnosti profilu z 10 bodů
VB	[mm]	šířka hřbetního opotřebení břitu nástroje
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří nástroje

b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
d	[mm]	průměr obrobené plochy
f	[mm]	posuv na otáčku
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
l	[mm]	obráběná délka
l_n	[mm]	délka náběhu
l_p	[mm]	délka přeběhu
n	[1/min]	otáčky vřetene
t	[min]	čas
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_e	[m/min]	rychlost řezného pohybu
v_f	[m/min]	posuvová rychlost
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	[-]	exponent vlivu šířky záběru a_p
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	[-]	exponent vlivu posuvu f
K_R	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
η	[-]	mechanická účinnost stroje