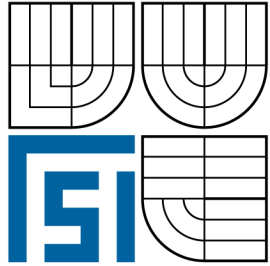


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYHODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ VYMĚNITELNÝCH
BŘITOVÝCH DESTIČEK PŘI SOUSTRUŽENÍ**
**ANALYSIS OF INSERTS WEAR PHENOMENA IN CONDITIONS OF TURNING
TECHNOLOGY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Kružík

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kružík Petr

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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:

Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení.

v anglickém jazyce:

Solution wear of tool with inserts in condition technology of turning.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teoretická část se zaměřením na soustružení (opotřebení ostří, vlivy technologických parametrů, nástroje různých výrobců, metody vyhodnocení). Experimentální část zpracovaná pro zvolené vzorky (obrobek, technologie, nástroje). Vyhodnocení experimentu (přístrojové vybavení, naměřené hodnoty VB a Ra, formulace závěrů k použitému nářadí, základní ekonomika).

Cíle bakalářské práce:

Doložení teoretických vztahů k trvanlivosti ostří nástrojů experimentálními výsledky ze soustružnických operací. Vyhodnocení (porovnání) sestavených kombinací obrobků a nástrojů, zaměřené na sledované parametry VB a Ra.

Seznam odborné literatury:

1. CIHLÁŘOVÁ, P., HILL, M. and PÍŠKA, M. Fundamentals of CNC Machining. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cnc.fme.vutbr.cz>>.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje a jejich programování. 1. vyd. Praha: Technická literatura BEN, 2007. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.
4. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
5. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.


V Brně, dne 20.11.2009

L.S.





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce sleduje vznik opotřebení u vybraných typů vyměnitelných břitových destiček při soustružení tepelně zpracovaného válcového obrobku. Destičky jsou vybrány z oblasti slinutých karbidů a cermetů povlakovaných i nepovlakovaných s ohledem na materiál obrobku. Dále se zabývá možností jejich použití za řezných podmínek z horní části z doporučeného rozmezí hodnot a to především za režimu bez použití procesních kapalin. Pro získání dalších informací jsou podmínky experimentu dále modifikovány. Výsledky jsou dále vyhodnoceny i z hlediska nákladů, tedy komerčních cen destiček pro možné použití při výrobě .

Klíčová slova

Soustružení, vyměnitelné břitové destičky, slinuté karbidy, opotřebení, trvanlivost nástrojů.

ABSTRACT

This bachelor thesis analyzes wear occurrence at chosen tool inserts in the process of turning of a heat treated cylindrical workpiece. Inserts for turning have been chosen from the area of coated and non-coated cemented carbides and cermets with respect to the used type of workpiece material. The work further deals with the possibility of their use under cutting conditions that are set to the upper cutting limits from the recommended range, especially without cooling. To obtain detailed information, the conditions of the test are further modified. Then, the results are also evaluated from the point of view of costs, i.e. market prices of inserts for possible application in the manufacturing process.

Key words

Turning, Cemented Carbides Inserts, Cemented Carbides, Wear Mechanisms, Tool Life.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRUŽÍK, P. *Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s., 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vyhodnocení opotřebení vyměnitelných břitových destiček při soustružení vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 26. 05. 2010

.....
Petr Kružík

Poděkování

Děkuji tímto pracovníkům Střední školy technické v Jihlavě na dislokovaném pracovišti odborného výcviku ve firmě BOSCH Diesel za provedení testů obrábění, panu Aleši Polákovi z firmy SANDVIK Coromant za maximální flexibilitu při dodávkách rezných materiálů, nástrojů a informací, ing. Pečtovi z firmy BOSCH Diesel za podporu při studiu a ing. Kalivodovi z FSI VUT Brno za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	7
1 NÁSTROJE S VYMĚNITELNÝMI BŘITOVÝMI DESTIČKAMI.....	8
1.1 Materiály pro výrobu VBD.....	8
1.1.1 Slinuté karbidy (SK).....	8
1.1.2 Řezná keramika (ŘK).....	9
1.1.3 Cermety.....	10
1.1.4 Ostatní řezné materiály	10
1.2 Druhy povlaků a metody povlakování VBD.....	11
1.2.1 PVD (Physical Vapor Deposition).....	11
1.2.2 CVD (Chemical Vapor Deposition).....	12
1.2.3 Vyhodnocení a měření povlaků na nástrojích.....	12
1.3 Fyzikální základy třískového obrábění.....	13
1.4 Použití procesních kapalin při obrábění.....	14
1.5 Opatření VBD	15
1.5.1 Abrasivní opotřebení	17
1.5.2 Adhezivní opotřebení.....	17
1.5.3 Difúzní a oxidační opotřebení.....	17
1.5.4 Tepelně-mechanické vlivy na opotřebení.....	17
1.5.5 Způsoby vyhodnocení opotřebení	18
1.6 Vlivy třískového obrábění na vlastnosti povrchu obrobku.....	20
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	21
2.1 Cíle experimentu	21
2.2 Materiálová charakteristika zkušebního tělesa	21
2.3 Použité nástroje pro experiment.....	22
2.3.1 Nožový držák.....	22
2.3.2 Charakteristika použitých VBD	23
2.4 Použité stroje a přístroje v rámci experimentu.....	24
2.5 Technologické podmínky experimentu	24
2.5.1 Limitující faktory experimentu.....	25
3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	26
3.1 Test destičky QM 4215.....	26
3.2 Test destičky QM 5015.....	27
3.3 Test destičky QM 2015.....	28
3.4 Test destičky QM 1115.....	29
3.5 Test destičky H13A.....	31
3.6 Vliv řezných podmínek experimentu na integritu povrchu.....	32
3.7 Technicko-ekonomické zhodnocení	33
3.8 Zhodnocení možných dopadů na životní prostředí.....	33
Závěr	34
Seznam použitých zdrojů.....	35
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	37
Seznam příloh.....	38

ÚVOD

Technologie třískového obrábění a řezný proces obecně vystavuje funkční plochy řezných nástrojů namáháním vysokých hodnot. Efekt tření spojený s řezným procesem zvyšuje teplotu materiálu nástroje, která dále zvyšuje účinek fyzikálních a chemických jevů, které pak souvisejí s opotřebením nástroje.

Protože pro oddělení materiálu v podobě třísek je síla a pohyb nutnou veličinou, je opotřebením nástrojů vynucenou ekonomickou ztrátou, se kterou je třeba při požadavku na obrobení výrobku počítat. Velikost této ztráty pak lze redukovat pomocí kontroly řezného procesu na základě znalostí procesu opotřebením a jeho souvislostí s řeznými podmínkami jako je hloubka řezu, řezná rychlost, rychlost posuvu atd.

S požadavky na neustálé zvyšování produktivity výroby a častým nasazováním tepelně zpracovaných materiálů s vyššími hodnotami mechanických vlastností dochází ke zvyšování nákladů na nástroje a také k ovlivnění některých vlastností opracovaných ploch, které se později negativně projevují v životnosti výrobku.

Tato práce se zabývá případem, kdy zušlechtěný výrobek z běžné legované oceli kruhového profilu je opracován vnějším soustružením nástroji s vyměnitelnými břitovými destičkami (dále VBD) z různých materiálů a povlaků v horní oblasti doporučených řezných podmínek. Jsou analyzována vzniklá opotřebením v souvislosti s použitými VBD a řeznými podmínkami, jevy v povrchové vrstvě obrobku související s řezným procesem a na základě výsledků navržena z předloženého výběru optimální volba nástroje. Při volbě jsou zohledněny i ekonomické a ekologické aspekty volby.

1 NÁSTROJE S VYMĚNITELNÝMI BŘITOVÝMI DESTIČKAMI

Vývoj řezných nástrojů následuje požadavky na podmínky řezných procesů, které jsou stále více ovlivňovány požadavky na produktivitu, ekonomickými faktory, požadavky na kvalitu obráběných povrchů a celkovou flexibilitu konstrukce nástrojů. Následkem tohoto vývoje u řezných nástrojů je koncepce nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). U nástrojů pro soustružení byla původní koncepce VBD vpájených do nožových držáků nahrazena mnohem flexibilnějším systémem mechanického upínání (McKenna) do držáků z konstrukčních ocelí.

Výměna VBD s mechanickým upínáním je velmi efektivní – rychlá, poloha nevyžaduje složitého seřízení a řezné odpory směřují do okolí vybrání držáku pro VBD a nenamáhají tak zásadně upínací mechanismus. Některé aplikace jsou ve stavitelném provedení – to umožňuje pomocí speciálních vložek nastavit polohu špičky destičky.

Vysoká efektivita VBD je také dána možností využívat destičky jako vícebřité nástroje, které se dají různě otáčet, nebo měnit polohu do neotupené části bez nutnosti měnit celý nástroj (čtvercová, či kruhová provedení, triangulární, atd). Další výhodou je možnost měnit stejný typ destičky pouze s jiným utvářečem třísky v jednom držáku a tak okamžitě přizpůsobovat řezné podmínky.

VBD ze slinutých karbidů (SK) používají normalizované označování dle ISO, které jsou dodržovány všemi výrobci VBD a nástrojových materiálů. Toto označování se používá i pro VBD vyrobené z cermetů, keramické destičky se liší od tohoto systému pouze v detailech a použité supertvrdé materiály většinou přebírají systém označování od SK.

1.1 Materiály pro výrobu VBD

Vývoj a aplikace moderních materiálů pro řezné nástroje lze datovat od počátků 20. století dodnes a to především s rozvojem rychlořezných ocelí, nasazením keramiky a cermetů pro řezné nástroje a s rozvojem práškové metalurgie. Oblast aplikace jednotlivých materiálů je pak dána svými vlastnostmi a to především fyzikálními, mechanickými a chemickými. Pro výrobu VBD jsou nejčastěji zastoupeny slinuté karbidy povlakované, nebo bez povlaku, řezná keramika, cermety a další, zejména supertvrdé materiály na bázi diamantu (PD,PKNB). Tyto materiály budou popsány v následujících podkapitolách a použity i pro experimentální část.

1.1.1 Slinuté karbidy (SK)

Se změnou upínání VBD z pájení na mechanické upínání získaly destičky SK na významu. Podstatou výroby VBD ze slinutých karbidů je využití práškové metalurgie. Tato technologie představuje postup několika kroků, a sice přípravu prášků z karbidů a pojiv (odpovídající aplikaci nástroje), lisování směsí a následné slinování výlisku. Jako základní materiál pro výrobu SK se používá karbid wolframu (WC) a titanu (TiC) a kobaltového (Co) prášku jako pojícího materiálu. Jako další složky prášku se používají karbidy tantalu (TaC),

niobu (NbC) a chromu (CrC). Podle složení se tak dělí SK na jedno- (skupina K), dvou- (skupina P) a více-karbidové (skupina M)^{2,5}.

Použití SK je stanoveno dle označení (ČSN ISO 513) do skupin P (obrábění materiálů na bázi Fe, dlouhá tříška), M (obrábění materiálů na bázi Fe, neželezné kovy, dlouhá a krátká tříška), K (obrábění materiálů na bázi Fe, krátká tříška, neželezné kovy, nekovy), S (obrábění materiálů na bázi Ti, Co, Ni), N (obrábění materiálů na bázi Al, Cu, Mg, plasty, kompozity, dřevo).

Většina VBD vyrobených ze SK se v současnosti povlakuje (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Povlakovaný SK umožňuje vzhledem k termochemickým vlastnostem povlaku vysoké řezné a posunové rychlosti, velké úběry třísek a přerušované řezy.

V dostupné literatuře se uvádí 4 generace vývoje SK²:

Tab. 1.1 Vývoj použití slinutých karbidů^{1,2,3}

Povlak	1. generace	2. generace	3. generace	4. generace
Popis	jednovrstvý povlak	jednovrstvý povlak bez etakarbidu na přechodu podklad - povlak	vícevrstvý povlak (dvě, tři, i více vrstev) ostře ohraničené přechody mezi vrstvami	speciální vícevrstvý povlak (i více než 10 vrstev s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivým vrstvami)
Povlakovací materiál	TiC	TiC, TiCN, TiN	TiC-Al ₂ O ₃ , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN;	jako u 3. generace
Dosahovaná tloušťka	7 μm	až 13 μm	dle aplikace vrstev	dle aplikace vrstev
Vlastnosti	horší soudržnost podkladu - povlaku	bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje	poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, požaduje se zejména vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení	více či méně výrazné přechody mezi vrstvami. Cílené řízení atmosféry v povlakovacím zařízení.

1.1.2 Řezná keramika (ŘK)

Rozvoj řezné keramiky byl podpořen potřebou materiálu pro extrémní podmínky, kde se při zachování potřebné pevnosti a tvrdosti požaduje nízká měrná hmotnost a vysoká odolnost proti opotřebení. Keramiku lze charakterizovat jako převážně krystalický materiál, jehož hlavními složkami je anorganický nekovový materiál.

Základní dělení materiálu řezné keramiky:

- ŘK bázi oxidu hlinitého (Al₂O₃),
- ŘK čistá (oxidická) - 99,5 % Al₂O₃,
- ŘK směsná - Al₂O₃ + ZrO₂, Al₂O₃ + ZrO₂ + CoO,

- ŘK vyztužená - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$...,
- ŘK na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) - $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}$, sialony,
- ŘK vyztužená whiskery.

Keramické materiály mají řadu výhod, z nichž se pro řezné nástroje nejvíce využívají a úspěšně používají pro výrobu řezných nástrojů pro třískové obrábění². Např.:

- odolnost vůči vysokým teplotám, stabilita tvaru při tahu a tlaku i za vysokých teplot, odolnost proti náhlým změnám teploty,
- vysoká tvrdost, vysoká odolnost mechanickému namáhání a opotřebení dobré kluzné vlastnosti, nízká měrná hmotnost,
- vysoká trvanlivost a řezivost, vysoká přesnost tvaru,
- chemická odolnost / inertnost, odolnost vůči korozi a erozi,
- dostupnost základních surovin,
- ekologická nezávadnost,
- příznivá cena.

1.1.3 Cermety

Základem cermetů je kombinace složek, které přinášejí vlastnosti keramických a kovových materiálů, tvrdost a houževnatost, název vyjadřuje zkratku „CERamics (keramika)“ a „METal (kov)“. Mezi charakteristické vlastnosti patří nízká měrná hmotnost, nízká houževnatost, dobrá odolnost vůči adhezivnímu opotřebení a chemickým reakcím s obrobkem, nižší náklady (neobsahují W a Co). Tyto vlastnosti předurčují cermety především pro dokončovací operace⁵.

Houževnatost materiálu se neustále zlepšuje zmenšováním velikosti zrna hlavních strukturních složek (stejně jako u keramiky a SK). Materiály s jemným zrnem vykazují vyšší tvrdost, lomovou houževnatost a pevnost v ohybu, což ovlivňuje především řezivost a trvanlivost VBD (nové cermety dosahují hodnot houževnatosti a pevnosti srovnatelné se SK).

Pro výrobu cermetů se nejčastěji používá nikl, který se doplňuje kobaltem pro snížení rozpustnosti Ti a Ni a stabilizaci karbonitridů. Dalším doplňkem bývá molybden pro zpevnění pojiva. Pro tvrdou fázi cermetů se využívá karbidů a nitridů titanu, tantalu, niobu, vanadu, zirkonu, molybdenu, wolframu a jiné⁵. Vlastnosti cermetů, především trvanlivost, se zlepšují použitím povlakování a to v tloušťkách 2-15 mikronů. Používá se především metoda PVD (CVD může způsobovat trhlinky v substrátu).

Při použití cermetů je nutné vzít v úvahu jeho vlastnost - vyhnout se přerušovaným řezům, závitům a zápichům soustružit na několik záběrů, čelní plochy soustružit od obvodu do středu, atd².

1.1.4 Ostatní řezné materiály

Mezi další používané řezné materiály využívané pro VBD se řadí polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB nebo CBN), označované také jako supertvrdé materiály.

PKNB je díky velmi vysoké tvrdosti nasazován pro extrémní řezné rychlosti. Vyniká také výbornou tuhostí a tepelnou odolností. Moderní PKNB materiály jsou keramickými kompozity s 40-65 % KNB, keramické pojivo dodává vysokou odolnost vůči opotřebení, ke kterému je v oblasti chemických typů opotřebení KNB náchylný. PKNB je vnesen či vpájen do destiček ze SK (roubík), používá se i v monolitní formě⁵.

Polykrystalický diamant (PD) se aplikuje v podobě slinutého kompozitu s kovovým pojivem. Je výborně odolný vůči abrazi, ale ztrácí při vysokých teplotách chemickou odolnost (rozpouští se v železe). Tyto velmi tvrdé a vysoce odolné materiály mají ovšem vzhledem k obtížnému zpracování a vyšší ceně specifickou oblast použití².

1.2 Druhy povlaků a metody povlakování VBD

K omezení mnoha negativních vlivů při procesu obrábění se především u VBD ze slinutých karbidů skupin K, P a M s výhodou aplikuje povlakování tenkými vrstvami materiálů s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení.

Tyto povlaky neobsahují žádné pojivo, jsou jemnozrné a tvoří méně strukturních defektů, což přispívá k výraznému zlepšení odolnosti vůči difúznímu opotřebení nástroje a tvorby nárůstků na břitu nástroje. Efektivnost použití vyžaduje posouzení všech faktorů ovlivňujících řezný proces, především řezné podmínky, materiál obrobku a zvolení odpovídajících materiálů substrátu a povlaku.

U slinutých karbidů jsou rozděleny povlaky do čtyř generací typů od jednovrstvého TiC povlaku, k vícevrstvýmu a gradientním povlakům, či povlakům s nanokrystalickou strukturou².

1.2.1 PVD (*Physical Vapor Deposition*)

Proces fyzikálního napařování, jak je tato metoda také nazývána, je typická nižšími teplotami procesu (pod 500 °C) a sníženým tlakem 0,1- Pa. To je výhodné nejen pro aplikaci na SK, ale především na rychlořezných ocelích, kde se tímto limituje možné popuštění materiálu nástroje. Proces povlakování je realizován uvolněním zdrojových částic (z terčů, targetů) buď rozprašováním v elektro-magnetickém poli urychlenými atomy argonu (Ar), nebo odpařováním pomocí svazku elektronů, laserem, indukčně či odporově².

Částice jsou následně ionizovány a reagují s použitým plynem v komoře (Ar, N₂). Tento princip nanášení povlaků je prováděn ve dvou variantách a to napařováním a iontovou implantací. Napařování se ještě dělí na evaporaci reaktivní, aktivovanou nebo s iontovým paprskem a sputtering, který využívá doutnavého výboje. Iontová implantace (ion plating) využívá doutnavého výboje nebo iontového paprsku⁵.

Výhodami PVD technologie je nízká teplota procesu, možnost povlakování hran s malým rádiusem, výborná adheze povlaku (v závislosti na použité technice PVD). Nevýhodou je složitost zařízení (vakuový systém) a pohyb dílců pro rovnoměrné nanášení povlaku².

Tab. 1.2 Příklady PVD nanášených povlaků^{2,3}

Materiál povlaku	Dosahované tloušťky (μm)	Tvrdość (HV 0,05)	Max pracovní teplota (°C)	Barva
TiN mono	1-4	2000-2600	600	zlatá
TiCN gradient	1-5	3000	450	fialově šedá
AlTiN mono	1-4	3800	900	tmavě šedá
AlTiN multi	3-7	3500	900	tmavě šedá
AlTiN/γ-Al ₂ O ₃	4-6		720	
TiAlN mono	1-4	3300	800	fialově černá

1.2.2 CVD (Chemical Vapor Deposition)

Povlakování metodou CVD probíhá na základě reakcí chemických sloučenin v plynné formě a prostředí plazmy, která je vytvářena v blízkosti dílců určených k povlakování. Chemické napařování z plynné fáze za vysokých teplot (700-1500 °C) je hlavní metodou povlakování slinutých karbidů. V praxi se používají CVD aplikace aktivované laserem (LICVD), plasmaticky (PCVD, PECVD, MPCVD), žhavicím vláknem (HFCVD), nízkotlaká (LPCVD), za středních teplot (MTCVD) a další⁶.

U plasmaticky aktivované CVD metody je díky využití plazového výboje, který ionizuje reaktivní plyn v komoře, hlavní výhodou nižší teplota procesu 400-600 °C. Rovněž u MTCVD je dosaženo relativně nízkých teplot a to 700-850 °C (jako zdroj uhlíku a dusíku je použit acetonitril nebo metylkyanid, a TiCl₄ jako zdroj titanu)².

Tab. 1.3 Příklady CVD nanášených povlaků^{2,3}

Materiál povlaku	Dosahované tloušťky (μm)	Tvrdość (HV 0,05)	Postup	Barva
TiN+ Ti(C,N)+ TiN	4-6	2800	MTCVD	zlatá
κ-Al ₂ O ₃	4-10	2800-3000	MTCVD	zlatá
α-Al ₂ O ₃	Až 13	3000	CVD	černá
TiN+ TiC+ TiN	3	2600	CVD	zlatá

Hlavními výhodami metody CVD jsou dobré krytí substrátu povlakem (homogenita), teplotní stabilita povlaku, vysoká adheze k substrátu, vysoká hustota povlaku a možnost tvořit složité vrstvy různého složení (Al oxid, DLC, diamant,...).

Mezi nevýhody patří především vysoká teplota a pracovní čas procesu, nelze povlakovat ostré hrany, vysoká spotřeba energie, tahová napětí ve vrstvě a ekologická zátěž v některých procesních médiích.

1.2.3 Vyhodnocení a měření povlaků na nástrojích

Použití metod zkoušení a vyhodnocení parametrů povlaků závisí na požadavcích zadavatele, neboť možných zkoušených vlastností je celá řada a

nelze je postihnout v několika málo krocích nebo jedinou zkouškou. V praxi se zejména zkouší tvrdost a mikro-tvrdost povlakovaných vrstev, tloušťka povlaků, adhezivně - kohezivní vlastnosti, řezivost a trvanlivost povlakovaného břitů, chemické složení, drsnost povrchu, popřípadě mikrostruktura. Pro potřeby vývojově-technologické jsou prováděny ještě testy třecích vlastností, kvantitativní fázová analýza a další.

Tloušťka vrstvy – nejběžnější metodou měření tloušťky povlaku se využívá metody Kalotest, kdy ocelová kulička s diamantovým práškem, suspenzí, či pastou vybrousí do povrchu vrchlík. Na tomto probrusu lze pak pomocí světelné mikroskopie bezpečně odečíst jak počet, tak rozměry vrstev (v případě multi - vrstev). Pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM) lze díky velkým zvětšením změřit povlak na lomovém vzorku, lze využít i opticko emisní spektrometrie s doutnavým výbojem (GDOES), atd.

Tvrdost a mikro-tvrdost - vzhledem k rozměrům povlaků a tvrdosti materiálu, se většina běžně používaných metod nehodí. Pro měření tvrdosti povlaků se tedy volí metody používající relativně velmi malé síly působící na indentor tak aby nedošlo k průniku vrstvou. Zde se nabízí především Vickersova metoda (HV) s použitím malých zatížení (mikro HV), a kde se kromě klasické hodnoty tvrdosti vyhodnocují i křivka odlehčení.

Mikrostruktura – pro určení a vyhodnocení se s výhodou využívá metalografie a světelné mikroskopie, na lomových vzorcích pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM) díky možnosti velkých zvětšení i detaily povlaků i substrátu.

Chemické složení – pro určení chemického složení se běžně využívá opticko-emisních spektrometrů (OES). Pro profilovou analýzu poměru průběhu povlakování, jeho chemického složení a hloubky resp. tloušťky vrstvy spektrometrie s buzením doutnavým výbojem (Glow discharge-OES). S výhodou se pro určení složení fází substrátu a povlaku využívá energo-disperzní analýzy (EDX) a ve výzkumném prostředí i fotospektrometrie (XPS).

Adhezivně - kohezivní vlastnosti – poměrně rozšířenou zkouškou je tzv. Mercedes test (vtisk), který využívá vtisku konvenčním tělesem (kulička, jehlan) a na základě napětí po aplikaci vznikne u hrany vtisku delaminace povlaku, která se vyhodnocuje. Dále je používán Scratch test (vryp), kdy se na určité dráze pohybuje po povrchu Rockwellův indentor s plynule stoupajícím zatížením. Vyhodnocuje se vrypová stopa, resp. adhezivní vlastnosti na testovací dráze.

Testy třecích vlastností (Pin on Disc, Ball on Disc) – tribologické zkoušky, kdy se zkušební těleso (kolík, kulička) pohybuje cyklicky po určité dráze a vyhodnocován je koeficient tření, opotřebení a další.

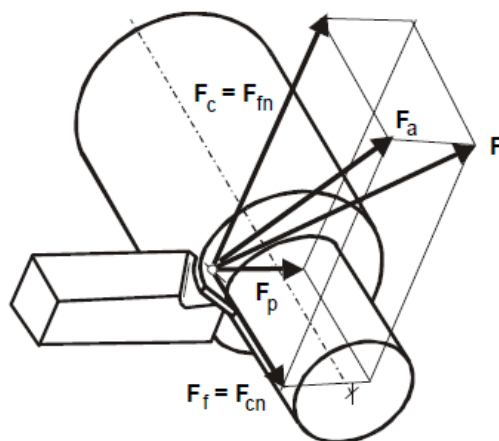
1.3 Fyzikální základy třískového obrábění

Hlavními požadavky na řezný proces jsou požadované vlastnosti obráběné plochy. Při řezném procesu vznikají složky sil (viz obr. 1.1) a působením nástroje na obráběný povrch materiálu složky napětí, které mají výrazný vliv na charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace.

Proces řezání se obecně dělí na ortogonální nebo obecné. Při ortogonálním řezání je ostří kolmo na směr řezného pohybu a proces probíhá v rovině. Typickými procesy ortogonálního řezání je zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování a další. Při obecném řezání proces probíhá v prostoru jako je tomu např. u podélného soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod.

Mechanismus vzniku a oddělování třísky je různý u krystalických a nekrystalických látek. Většina technických materiálů běžně používaných ve strojírenské praxi jsou materiály krystalické. Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky, tedy při vnikání nástroje do materiálu obrobku k elastickým a následně k plastickým deformacím. Elastické deformace jsou rozloženy do celého objemu obrobku, zatímco plastické deformace postihují jen oblast řezání.

Smyková napětí rostou do doby, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje. V průběhu dalšího pohybu nástroje plastická deformace roste, nastává jev pýchování třísky, vrstvy materiálu obrobku se posouvají kolmo na kluzné roviny až do okamžiku, kdy napětí v materiálu dosáhne vyšší hodnoty nad mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení třísky. Houževnatý lom nastává vlivem kluzné síly, křehký lom působením normálové síly ⁶.



Obr. 1.1 Schéma základních sil působících při soustružení⁶

1.4 Použití procesních kapalin při obrábění

Rozsáhlou kapitolou ovlivňující výsledky řezných procesů jsou podmínky řezného prostředí. Toto prostředí je tvořeno především procesními médii – kapalinami, vzduchem, mlhou či pastami. Procesní média mají tři základní funkce chladicí, mazací a čisticí. Při nasazení procesních médií je ale nutné uvážit další faktory, jako odolnost vůči degradaci (stárnutí média), ochranné účinky (koroze), zdravotní nezávadnost a případné ekonomické zhodnocení.

Chladicí účinek má především zajistit odvod tepla z místa řezu, snížit opotřebení nástroje a zvýšit trvanlivost nástroje. Použití některých procesních médií jako např. minerálních olejů nebo přírodních esterů přímo ovlivňuje

vznik typických opotřebení (kráterové, oxidační). Příznivý vliv má i na jakost povrchových vrstev a hodnotu zbytkových napětí⁴.

Mazací účinek vytváří mezi obrobkem a nástrojem vrstvu, která snižuje tření, řezné síly, spotřebu energie a zlepšuje stav povrchu obrobku. Při určité afinitě média k obráběnému materiálu, či chemické reakci obou materiálů může nastat tzv. mezní tření.

Čistící účinek především odvádí třísky z místa řezu, které mohou negativně působit na mazací a chladící účinek média a jiné podmínky řezu.

Základní rozdělení řezných kapalin se uvádí na vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, ekologické rostlinné oleje a syntetické kapaliny.

Plynné látky se vzhledem k nízkým čistícím a prakticky nulovým mazacím účinkům a vysokým nákladům využívají zřídka a to ve většině případů je ve formě tenkého paprsku stlačeného CO₂.

Samostatnou aplikací plynného řezného prostředí je suché obrábění, kdy je řezným prostředím atmosférický vzduch. Použití suchého obrábění souvisí s novými řeznými materiály, které nevyžadují chlazení a poskytují vysoké výkony⁸.

1.5 Opotřebení VBD

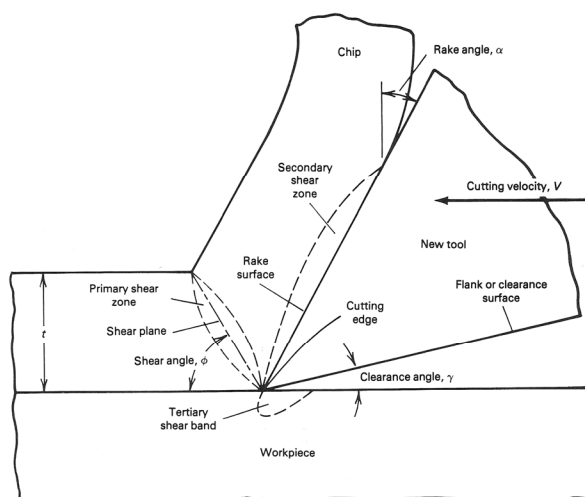
Průběh řezného procesu a vznikající související jevy přímo ovlivňují opotřebení břítů a tím i trvanlivost nástrojů. Průběh oddělování materiálu obrobku je spojen s pružnou a hlavně plastickou deformací, kterou dělíme do tří oblastí⁸.

V primární oblasti (na obrázku 1.2 jako primary shear zone) dochází oddělování materiálu břítem, materiál se pěchuje a jako tříška odchází po hřbetě nástroje. Právě v této oblasti dochází k nejsilnější deformaci.

V oblast sekundární plastické deformace (na obrázku 1.2 jako secondary shear zone) vlivem silného tření třísky o čelo nástroje dochází k silné plastické deformaci tenké vrstvy na třísce, kde na spodní straně vzniká tzv. mezní – zabrzděná vrstva.

K terciární oblasti (na obrázku 1.2 jako tertiary shear band) dochází v povrchové oblasti obrobku jako následek dopružení materiálu obrobku na hřbet nástroje⁶.

Mechanická energie spotřebovaná pro odebrání materiálu a přeměnu v třísku je přeměněna v energii tepelnou (některé prameny uvádějí 95-98 %). Právě tato teplota je určujícím faktorem při vzniku jevů opotřebení. Z tohoto důvodu má největší význam sekundární a terciární oblast deformací, které nejvíce ovlivňují teplotu povrchů čela a hřbetů nástrojů.

Obr. 1.2 Schéma nástroj – obrobek – tříška⁶

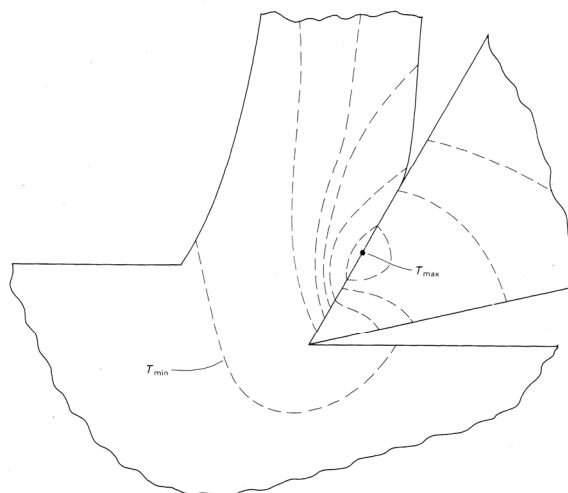
Tepelná bilance řezného procesu zahrnuje teplo vzniklé v oblasti plastické deformace (Q_{pd}), teplo vzniklé třením třísky o hřbet nástroje (Q_v) a teplo z tření hřbetu nástroje a přechodové plochy (Q_α). Pak za předpokladu, že teplo je odváděno nástrojem (Q_n), třískou (Q_t), obrobkem (Q_o) a řezným prostředím (Q_{pr}) platí⁸:

$$Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J] \quad 1.1$$

Vztah se také uvádí ve tvaru výpočtu z řezné síly F_v (N) a rychlosti v_c ($m \cdot mm^{-1}$) za jednotku času t (min):

$$Q_c = F_c \cdot v_c \cdot t \quad [J] \quad 1.2$$

Celkové utváření třísky řeznými procesy je doprovázeno vysokými namáháními a teplotami, což vede ke vzniku povrchu obrobku s tendencí k chemickým reakcím nebo difúzním pochodům. Navíc, většina materiálů obsahuje různé tvrdé částice (např. precipitáty), které v některých případech dosahují oblasti mechanických hodnot (tvrdosti) materiálu nástroje⁸.

Obr. 1.3 Obecné znázornění koncentrace tepla vznikající při procesu řezání⁶

Kombinace těchto faktorů - mechanických, tepelných, chemických a materiálových, vede ke komplexnímu zatěžování částí nástroje a to se projevuje různými efekty opotřebení.

1.5.1 Abrazivní opotřebení

Tvrdé částice v materiálu obrobku, které jsou mnohdy doprovázeny uvolněnými částicemi z materiálu nástroje, vedou k brusnému otěru funkčních ploch. Tento jev se nejčastěji projevuje ve formě opotřebení na hřbetu nástroje (Flank wear) na plochách hlavního a vedlejších hřbetu, poloměru špičky a čelní fazetce, tedy místech, která jsou v procesu utváření třísky nejvíce vystavena vysokým namáháním. Jedná se o nejběžnější a dobře předvídatelný typ opotřebení, ze všech druhů nejvíce žádaný⁶.

1.5.2 Adhezivní opotřebení

Plochy čela nástroje a třísky obsahující nerovnosti doprovázeny vysokými tlaky a teplotou, vhodnou chemickou konfigurací materiálů vedou ke vzniku mikrosvarových spojů, které jsou následně porušeny. Typickými představiteli adhezivního projevu jsou opotřebení ve tvaru vrubu (Notch wear) opotřebení a vznik nárůstku (Built up Edge)^{5,7}.

Opotřebení ve tvaru vrubu může souviset i s oxidací a jsou především výsledkem kontaktu břitu a strany odebírané třísky. Pokud se tento typ opotřebení objeví na vedlejším hřbetu, může souviset s tvrdými součástmi obráběného materiálu. Nárůstek ovlivňuje geometrii nástroje, může způsobit lom materiálu nástroje. Zásadně ovlivňuje kvalitu obráběného povrchu.

Vznik nárůstku souvisí hlavně s řeznou rychlostí a vzniklým teplotám. Vysoké tlaky a nízké teploty podporují vznik mikrosvarového efektu. Někteří výrobci (např. SANDVIK) uvádí tento efekt i u nízkých rychlostí ve spojení s materiály jako nízko- (ne-) legované či korozivzdorné oceli a některé slitiny hliníku. Obrábění moderními materiály při správné aplikaci probíhá mimo oblast nárůstku^{5,13}.

1.5.3 Difúzní a oxidační opotřebení

K jevu difúze dochází migrací atomů materiálu obrobku do nástroje a naopak, což vede ke vzniku nežádoucích sloučenin v mikrostruktuře nástroje. K chemické oxidační reakci dochází v důsledku teploty a přítomnosti kyslíku v okolí (Oxidation/diffusion dominated wear)^{6,5}.

Opotřebení ve tvaru žlábků (Crater wear) je výsledkem difúzních pochodů a abraze. Na exponované místo sice působí tvrdé částice odebíraného materiálu, ale v místě kontaktu třísky s břitem, kde dochází ke vzniku nejvyšší teploty nastává difúzní pochod. Toto opotřebení lze redukovat nasazením materiálu s vyšší tepelnou stálostí nebo použitím materiálů nástroje a obrobku s nižší vzájemnou afinitou^{7,12}.

1.5.4 Tepelně-mechanické vlivy na opotřebení

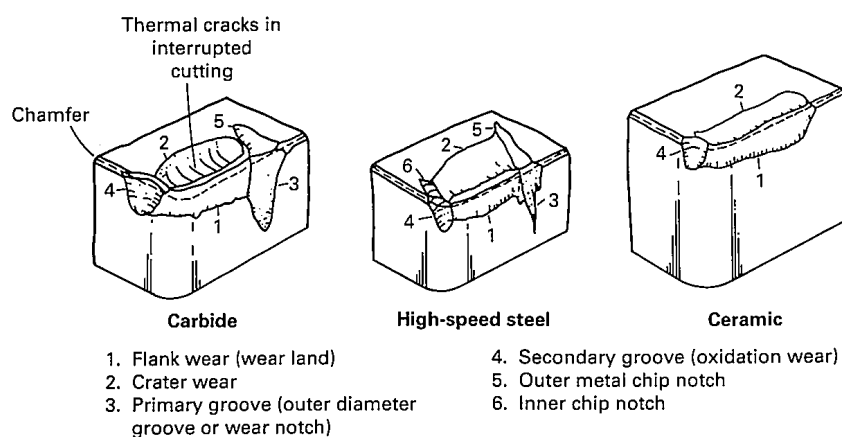
Plastická deformace (Plasticity dominated wear). Tento typ opotřebení je důsledkem vysokého tepelného a mechanického zatížení, které se může ve

svém nejnejpříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení. Jde v podstatě o snížení odolnosti materiálu nižšími mechanickými vlastnosti v důsledku překročení teploty v řezu na určitou úroveň. Tento typ opotřebení lze redukovat změnou řezného materiálu, poloměrem zaoblení, či geometrií nástroje nebo změnou typu povlakování⁷.

Hřebenovité trhlinky (Thermal cracks), vznikají prudkými změnami teplot především u přerušovaných řezů, kolmo na ostří, běžně u frézování. Situaci lze zhoršit špatnými režimy chlazení, které rozdíl teplot ještě znásobí⁵.

Křehký lom vzniká v důsledku skokových změn velikosti mechanického zatížení, např. při přerušovaném řezu, nebo i následkem nehomogenity ve struktuře obráběného materiálu (různé typy vměstků, precipitáty,..) atd. V každém případě toto porušení znamená konec trvanlivosti nástroje⁵.

Únavový lom u nástrojů je iniciován opakovanými značnými změnami v namáháních resp. řezných sil, které nejsou natolik velké, aby způsobily náhlé porušení. Některé zdroje uvádějí jako spolupůsobící faktor při šíření tohoto typu porušení i tahová napětí u (MT)CVD povlakovaných nástrojů⁷.



Obr. 1.4 Charakter opotřebení u VBD⁶

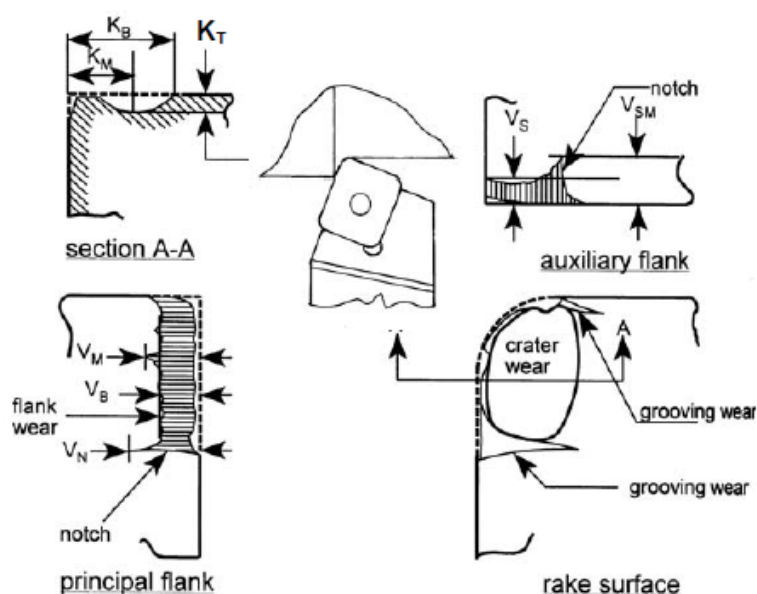
1.5.5 Způsoby vyhodnocení opotřebení

Experimentální měření efektů opotřebení je významným nástrojem při optimalizaci řezných procesů a životnosti nástrojů. Pro vyhodnocení opotřebení se používá řada metod, které jsou využívány podle toho, jaké typy opotřebení jsou monitorovány, jaká přesnost je požadována a konečně jaké jsou možnosti daného pracoviště.

Opotřebení je tedy kvantifikováno pomocí kritérií (viz Obr. 1.5)

- VB – šířka opotřebení na hřbetě,
- KT – hloubka výmolu na čele,
- KV_y – radiální opotřebení špičky.

V literatuře a především v normě ISO 3685 lze najít další řadu označení a parametrů, dle kterých jednotlivá opotřebení lze kvantifikovat.

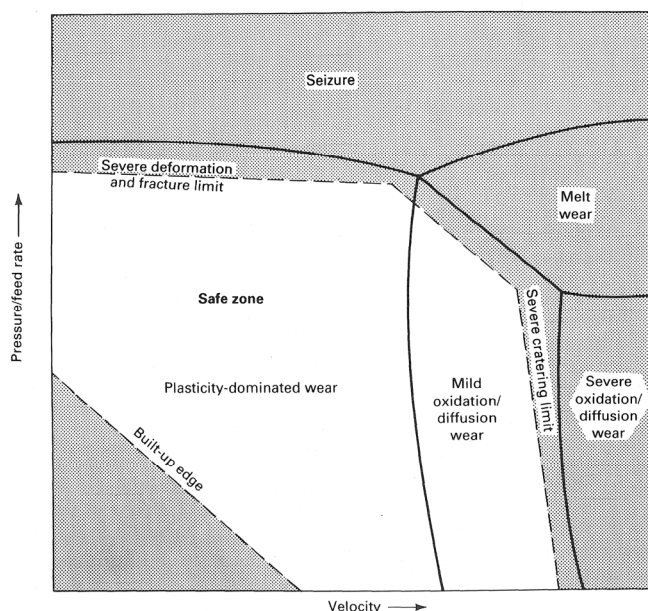
Obr. 1.5 Měřené parametry opotřebení u VBD⁶

Metody používané pro vyhodnocení se dělí na přímé a nepřímé.

Mezi přímé metody patří:

- váhová: měřením rozdílů hmotností lze velmi přesně určit ztráty rezného materiálu v jednom cyklu. Používá se většinou u VBD, ale nevýhodou je ovlivnění při výskytu nárůstku. Využívá se i brusných nástrojů. Pro měření se využívají různé typy vah,
- mikrometrická: přímé měření efektů opotřebení. Jedná se o nejčastější a nejběžnější metodu. Pomocí měřících zařízení nebo mikroskopů s možností mikrometrického měření se odečítají přímo parametry opotřebení. Využívají se různé typy mikroskopů, obrazových analýz, mikrometrická měřidla, 3D stroje...,
- profilové měření: stanovována je charakteristika opotřebení, hojně využívaná metoda např. u kráterového opotřebení. Využívá různé typy profilových měřidel (Talysurf 3D), 3D obrazové zpracování, konfokální a digitální mikroskopy, atd.,
- SEM (Řádkovací elektronový mikroskop) pro detailní studie opotřebení,
- dále se využívají metody jako stínová, radioizotopická, pneumatická apod.

Nepřímé metody měření opotřebení jsou velmi informativní a monitorují např. změnu průběhu rezných sil, teploty řezání, výkon řezání, on-line změny drsnosti, charakter třísky apod.^{8,11}.



Obr. 1.6 Příklad vyhodnocení ve formě mapy oblastí opotřebení (wear map) a bezpečných oblastí pro obrábění⁶

1.6 Vlivy třískového obrábění na vlastnosti povrchu obrobku

Obecně všechny typy třískového obrábění neovlivňují pouze sledované vnější parametry obrobku jako jsou rozměry či geometrická kritéria a přepisy, ale zanechávají velkou stopu i v oblasti blízké povrchu -podpovrchové- a dávají za vznik vrstvě odlišné od základního materiálu. Tento jev se v literatuře označuje jako integrita povrchu. Stav této vrstvy je do značné míry ovlivněn i technickým stavem nástroje resp. mírou jeho opotřebení. Změny povrchu souvisí s výskytem plastické a elastické deformace, přeložek a podobných povrchových defektů, mikrotrhlin, tedy jevů v rámci řezných procesů, které u různých materiálů lze očekávat.

Význam sledování této oblasti materiálu spočívá především u výrobků pracujících za vyšších stavů napjatosti nebo v environmentálních podmínkách, kde se dá očekávat korozní působení apod.

Zásadním vlivem v povrchové oblasti obrobků je vznik zbytkových napětí, které jsou řeznými procesy jako výsledek mechanických, chemických a tepelných vlivů vnášeny. Zde je nutné posoudit typ napětí (tah, tlak), hloubku a maximální hodnotu. Vlastnosti výrobků únavové, korozní a pevnostní mohou být těmito napětími silně ovlivněny¹².

Sledováním mikrogeometrie, textury povrchu i stavu napjatosti v povrchové vrstvě, lze získat informace nejen o procesech utvářejících povrch, ale i o stavu opotřebení nástroje.

Tato sledování dnes lze úspěšně provádět pomocí měření drsnosti a geometrie povrchu, rentgenových difrakčních metod v případě zbytkových napětí, u jevů souvisejících se změnou struktury, pak lze aplikovat metalografické postupy, světelnou fluorescenční či elektronovou mikroskopii¹³.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část byl vybrán případ z praxe, kdy je technologií soustružení obráběno tepelně zpracované těleso tlakového rozvaděče z cementační oceli 20MnCrS5. Při zavádění opatření pro zefektivnění produkce (krácení strojních časů, extrémní technologické parametry), dochází k vysoké spotřebě použitých VBD, narušení povrchové vrstvy obrobku sekundárními jevy, které se následně negativně projevují při únavových zkouškách. V provozu zatím není zaveden systém pro vyhodnocení opotřebení s výjimkou optické kontroly nástrojů a určování trvanlivosti pomocí měření mikrogeometrie povrchu obrobku.

Po specifikaci problému, testovaného materiálu obrobku a požadavků na trvanlivost bylo pro experimentální porovnání nástroje resp. VBD firmou SANDVIK dodáno pět různých VBD s různými doporučenými řeznými podmínkami. Pro ověření trvanlivosti byly zvoleny pokud ne maximální hodnoty doporučených řezných podmínek, tak hodnoty velmi blízké maximu. Z provozních důvodů nebylo možné nasadit test do sériového provozu a proto byl zvoleny CNC stroje určené pro praktické vyučování žáků SOŠ Polenská v dislokovaném středisku při firmě BOSCH Diesel spol. S. r. o. .

2.1 Cíle experimentu

Experiment si klade za cíl vyhodnotit při daných řezných podmínkách v horní části oblasti doporučených řezných podmínek (zejména řezné rychlosti a posuvu) trvanlivost, resp. vznik, typ a rozsah opotřebení doporučených VBD a analyzovat možnosti předložených testovacích VBD pro soustružení daného typu obrobku. Výsledek má být vyhodnocen i z hlediska nákladů na nástroj, popř. stav integrity povrchu obrobku po ukončení procesu.

Experiment bude také v první fázi probíhat bez použití procesních kapalin pro otestování, zda je možné VBD nasadit ve výrobě s menší ekologickou zátěží.

2.2 Materiálová charakteristika zkušebního tělesa

Pro potřeby experimentu byl zvolen materiál zkušebního tělesa stejný, jako se používá při skutečné výrobě rozvaděče. Tím je hladká tyč \varnothing 33 mm (Obr. 2.1), o délce 375 mm. Ten je předepsán podnikovou normou fy BOSCH E28 ES7149 S005, jíž odpovídá materiál dle DIN EN 10084 značky 20MnCrS5 +HH a čísla materiálu 1.7149.



Obr. 2.1 Zkušební těleso materiálu 20MnCrS5

Jedná se o cementační legovanou ocel, která je dodávána v zušlechtěném stavu na pevnost 1050-1150 MPa, tvrdost 330-360 HB 5/750, tažnost min. A5 min. 9 % a mez kluzu min 870 MPa.

Dále norma předepisuje stav mikrostruktury po tepelném zpracování a sice martenzitickou strukturu se stopami feritu a max. obsahem bainitu do 30 %.

Pro zajištění stejných podmínek byly vybrány vzorky tyčí ze stejné šarže (fa. Saarlstahl AG). Chemické složení bylo ověřeno spektroskopickou analýzou na spektrometru s jiskrovým buzením SPECTROLab M (fa. Spectro A.I.).

Tab. 2.1 Předepsané chemické složení obrobku a naměřené hodnoty¹⁰

Prvek	Předepsaný obsah (%)	Naměřený obsah (%)
C	0,18-0,25	0,23
Si	Max. 0,25	0,16
Mn	1,20-1,45	1,33
P	Max.0,020	0,013
S	0,008-	0,009
Cr	1,15-1,35	1,22
Al	0,02-0,06	0,33
Ni	Max.0,30	0,050
Cu	Max.0,30	0,052

Tvrdost materiálu byla změřena metodou dle Brinella (tvrdoměr Wolpert BLD 3000). Naměřené hodnoty tvrdosti na povrchu a v jádře se pohybují v rozmezí 338-342 HB 5/750.

2.3 Použité nástroje pro experiment

Použité nástroje pro provedení experimentu byly zvoleny s ohledem na předpokládané možnosti strojů, na kterých byly experimenty provedeny, zejména velikost držáku a směr řezu.

Dále byly použity VBD dle doporučení výrobce (SANDVIK) s ohledem na specifikace materiálu obrobku (viz Tab. 2.2).

2.3.1 Nožový držák

Pro experiment byl zvolen nožový držák fy Sandvik Coromant DTGNL 2020 K16 uvedený na Obr. 2.2

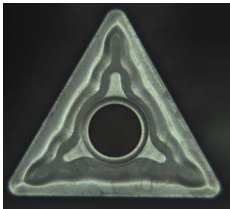
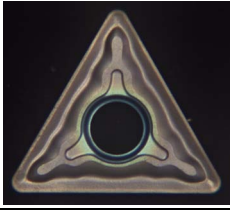
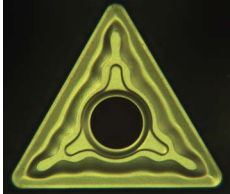
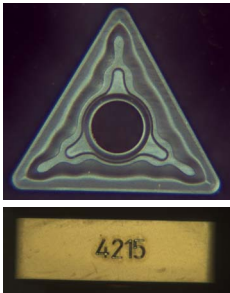
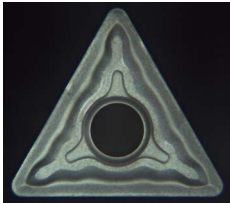


Obr. 2.2 DTGNL 2020 K16

2.3.2 Charakteristika použitých VBD

Po specifikaci řezných podmínek a požadavků na obrábění bylo zástupcem fy SANDVIK Coromant dodáno 5 typů VBD k testům trvanlivosti a analýze opotřebení včetně informací o rozsahu řezných parametrů (Tab. 2.3).

Tab. 2.2 Charakteristika dle řezného materiálu¹

	Označení VBD	Substrát VBD	Povlak, technologie povlakování	Fotografie VBD
1	TNMG 16 04 08 QM H13A	HW Slinutý karbid	Nepovlakovaný	
2	TNMG 16 04 08- QM 1115	HC Slinutý karbid	Oxid Al_2O_3 PVD	
3	TNMG 16 04 08- QM 2015	HC Slinutý karbid	MT-Ti(C,N)+ Al_2O_3 +TiN CVD	
4	TNMG 16 04 08- QM 4215	HC Slinutý karbid	MT-Ti(C,N)+ Al_2O_3 +TiN CVD	
5	TNMG 16 04 08- QM 5015	HT Cermet	Nepovlakovaný	

Tab. 2.3 Charakteristika VBD s doporučeným rozsahem řezných podmínek¹

	Označení VBD	MC kód	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	A_p (mm)
1	TNMG 16 04 08-QM H13A	S15 K20 N15 H20	40	0,15-0,25	1-3,5
2	TNMG 16 04 08-QM 1115	M15 S20 N15	130-265 50-65	0,10-0,4 0,15-0,25	0,15-4 1-3,5
3	TNMG 16 04 08-QM 2015	P25 M15	240-290 240-290	0,12-0,45 0,1-0,4	0,5-4,8 0,15-4
4	TNMG 16 04 08-QM 4215	P15 K15 H15	335-475 215-250	0,2-0,5 0,2-0,43	1-5,6 1-5,6
5	TNMG 16 04 08-QM 5015	P10 K05	295-320 195-210	0,2-0,25 0,2-0,25	1-2,0 1-2,0

2.4 Použité stroje a přístroje v rámci experimentu

Pro test trvanlivosti nástroje byl použit CNC soustruh GILDEMEISTER CTX 210 (výrobce DMG Gildemeister GmbH). Technická specifikace stroje je uvedena v příloze 3. Pro experimentální část bylo použito přístrojů uvedené v tabulce 2.4.

Tab. 2.4 Použité přístroje pro určení materiálových charakteristik a opotřebení

Metoda	Přístroj	Výrobce	SOP
Měření tvrdosti	Tvrdoměr BLD 3000	Instron	2007
Optické vyhodnocení	Stereomikroskop STEMI 3000 (zv.6-50x) Software pro obrazovou analýzu LiM NIS Elements	Carl Zeiss Laboratory imaging	2001 2008
Detailní studie opotřebení	Řádkovací elektronový mikroskop EVO XVP 50	Carl Zeiss	2006
Rozbor materiálu	Opticko emisní spektrometr SpectroLabM	SPECTRO AI	2001

2.5 Technologické podmínky experimentu

Parametry řezného procesu byly s ohledem na cíle experimentu situovány do horní části doporučené tolerance řezných podmínek a to především u řezné rychlosti a posuvu (viz Tab. 2.5). U některých výkonných VBD nebylo možno krajních podmínek dosáhnou s ohledem na průměr obrobku a omezení možného rozsahu otáček použitých strojů, viz kapitola 2.5.1.

Řezné průměry

$D_1=29$ mm (pro úběr třísky $a_p=2$ mm) a
25 mm (pro úběr třísky $a_p=2$ mm)

Řezná délka jednoho vzorku

$l=350$ mm (po odečtení nutného prostoru pro upnutí z obou konců vzorku)

Počet vzorků 136 ks
 Chlazení bez aktivního chlazení. V případě ukončení testu z důvodu destrukce VBD bylo připojeno chlazení CIMSTAR 620 (pro oceli s tepelným zpracováním 8 % směs minerálního oleje a vody)

Použity byly dva výchozí průměry, z důvodu malého počtu dostupných vzorků a potřeby velké řezné dráhy pro experiment, bylo nutné použít zkušební vzorky dvakrát. Pro výpočet otáček z dané výchozí řezné rychlosti bylo použito známého vztahu :

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad 2.1$$

Resp. po úpravě :

$$n = \frac{1000}{\pi \cdot D} \cdot v_c \quad 2.2$$

Tab. 2.5 Použité výchozí řezné podmínky pro VBD

VBD označení	doba záběru (min)	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)
TNMG 16 04 08-QM 5015	1-10	320	0,25	2	3510
TNMG 16 04 08-QM 4215	1-10	360	0,5	2	3950
TNMG 16 04 08-QM 2015	1-10	290	0,4	2	3180
TNMG 16 04 08-QM 1115	1-10	265	0,4	2	2907
TNMG 16 04 08-QM H13A	1-10	40	0,25	2	439

2.5.1 Limitující faktory experimentu

- rozsah testů - byl limitován 126 kusy uvolněnými pro experiment,
- volba řezné rychlosti - řezná rychlost byla u zvoleného stroje omezena max. otáčkami 4000 min⁻¹. Z tohoto důvodu u nejnávýkonnější destičky 4215 nebylo možné ověřit materiál testem v horní části rozsahu řezných podmínek,
- volba rychlosti posuvu – u zvoleného stroje je dle doporučení výrobce při použitém rozsahu 2500-4000 otáček posuv omezen na maximální hodnotu 0,35 mm. Vzhledem k omezenému množství vzorků nebylo možné nastavit maximální posuvy. Při opětovném použití vzorků již s obrobeným průměrem (z \varnothing 33 mm na \varnothing 29 mm a dále na \varnothing 25 mm) by bylo nutné kritický počet otáček 4000 min⁻¹ překročit (viz vztah 2.2),
- volba záběru ostří – při volbě záběru ostří nad 2 mm docházelo k přetížení stroje a ve spojení s vysokým posuvem a řeznou rychlostí k přerušení řezu.

3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vzhledem k vysokým požadavkům na parametry řezného procesu a počet testů, byl vyhodnocován pouze rozsah opotřebení v jednotlivých časových úsecích experimentu (po minutách řezu). Další vyhodnocení, jako zbytková napětí v povrchové vrstvě, jakost povrchu či kvalitativní parametry použitých destiček, nebylo možné v časovém rámci experimentu vyhodnotit.

Pro jednodušší přehled byly označeny materiály karbidů a cermetu VBD během vyhodnocení kódem výrobce VBD (např. QM 4215), bližší údaje k těmto označením jsou v tabulce 2.2.

U naměřených hodnot opotřebení jsou uvedeny výstupy v milimetrech a v mikrometrech. Hodnoty mikrometrech jsou promítnuty do grafického znázornění.

3.1 Test VBD z materiálu QM 4215

Během první minuty testu došlo ke křehkému porušení VBD a ukončení testu. Při opakování testu došlo za stejných podmínek s novým břitem s aktivním chlazením k destrukci při 50 vteřinách v záběru řezu.

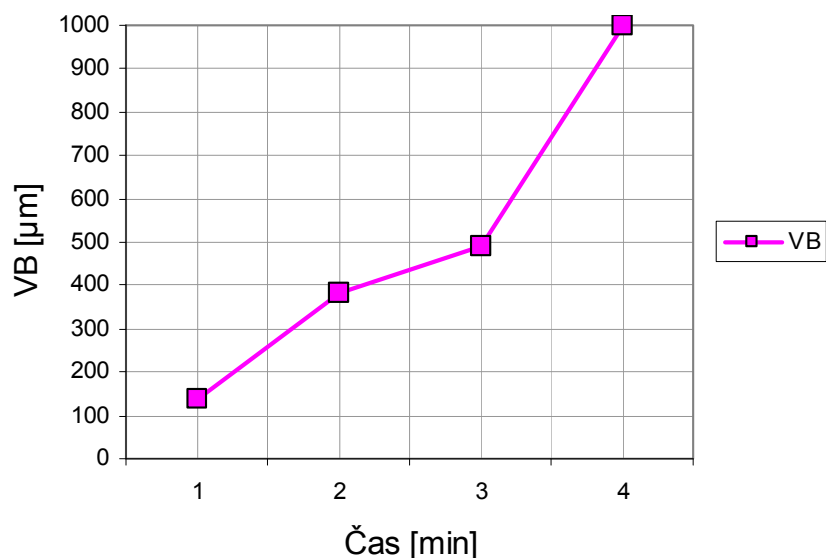
Tab. 3.1 Použité řezné podmínky pro QM 4215

Doba záběru (min)	Strana destičky - břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB (mm)
1	AI	360	0,5	2	3950	neměřeno

Pokus byl opakován se stejnými řeznými podmínkami (na reverzních břitech již použitých VBD), aktivním chlazením a s redukováným posuvem na polovinu (Tab. 3.2). Na konci režimu čtyřminutového cyklu řezu došlo k destrukci destičky. Kromě opotřebení hřbetu (a konečného lomového porušení) nebyl pozorován jiný mechanismus opotřebení, viz příloha 2 (2/4).

Tab. 3.2 Použité řezné podmínky pro QM 4215, redukováný posuv

Doba záběru (min)	Strana destičky - břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB	
						(mm)	(μ m)
1	AI'	360	0,25	2	3950	0,138	138
2	AII'	360	0,25	2	3950	0,381	381
3	AIII'	360	0,25	2	3950	0,492	490
4	BI	360	0,25	2	3950	>1	>1000 Defekt špičky



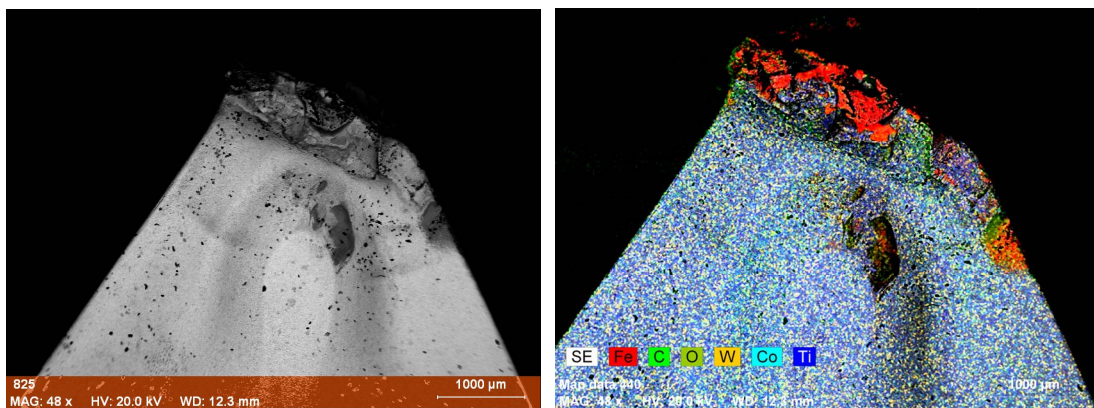
Obr. 3.1 Vývoj opotřeбенí u VBD 4215 s použitím procesní kapaliny a redukováného posuvu 0,25 mm

3.2 Test VBD z materiálu QM 5015

Během první minuty testu bez chlazení došlo k vydrolení ostří, ulomení špičky, křehkému lomu VBD a ukončení testu. Při opakování testu za stejných podmínek s novým břitem a s aktivním chlazením, byl břit nasazen do režimu řezu 1 a 2 minuty, i zde ovšem došlo k částečné destrukci břitu, především vydrolení a deformaci špičky (viz obr.3.2).

Tab. 3.3 Použité řezné podmínky pro QM 5015

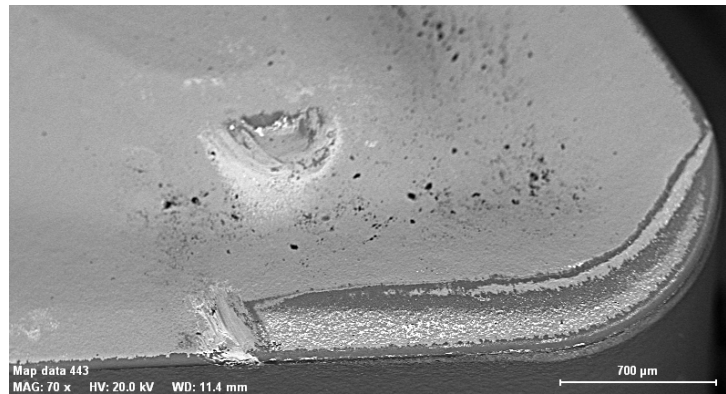
Doba záběru (min)	Strana destičky -břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB (mm)
1	AI	320	0,25	2	3510	neměřeno
2	All	320	0,25	2	3510	neměřeno



Obr. 3.2 Analýza povrchu zničené špičky nástroje pomocí SEM v režimu zpětně odražených elektronů a mikroanalýzy EDX. Části povrchu ocelového obrobku jsou červeně označeny

3.3 Test VBD z materiálu QM 2015

Při nechlazeném řezném procesu došlo k destrukci po třetí minutě v záběru. Při opakování testu s chlazením došlo k ukončení testu také po třetí minutě. U všech vzorků bylo zaznamenáno opotřebení hřbetu, vydrolení ostří až lomové porušení. Snímky opotřebení po dvou minutách s chlazením jsou v příloze 2 (3/4).



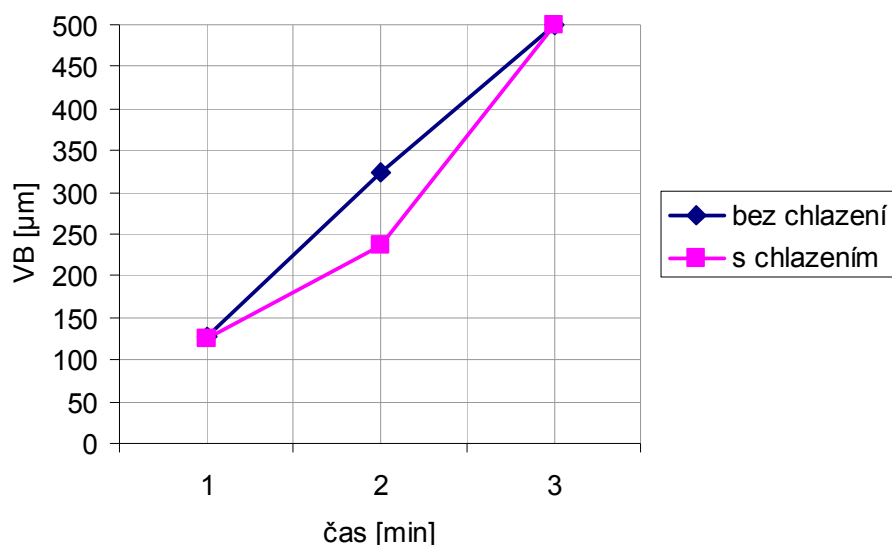
Obr. 3.3 Snímek opotřebení destičky 2015 po 2 minutách v záběru s chlazením. Pořízeno v SEM, v režimu sekundárních elektronů (SE)

Tab. 3.4 Použité řezné podmínky pro QM 2015 bez chlazení

Doba záběru (min)	Strana destičky -břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB	
						(mm)	(μ m)
1	BI	290	0,3	2	3182	0,127	127
2	BII	290	0,3	2	3182	0,323	323
3	BIII	290	0,3	2	3182	1	>1000 ulomení špičky

Tab. 3.5 Použité řezné podmínky pro QM 2015 s aktivním chlazením

Doba záběru (min)	Strana destičky -břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB	
						(mm)	(μ m)
1	CI	290	0,3	2	3182	0,124	124
2	CII	290	0,3	2	3182	0,237	237
3	CIII	290	0,3	2	3182	1	>1000 ulomení špičky



Obr. 3.4 Velikost opotřebení hřbetu destičky 2015 v prvních třech minutách záběru (s a bez chlazení)

3.4 Test VBD z materiálu QM 1115

Po 30 vteřinách došlo k destrukci VBD. Při opakování testu za stejných podmínek s novým břitem a s chlazením došlo k destrukci při 60 vteřinách v záběru řezu.

Tab. 3.6 Použité řezné podmínky pro QM 2015 s aktivním chlazením

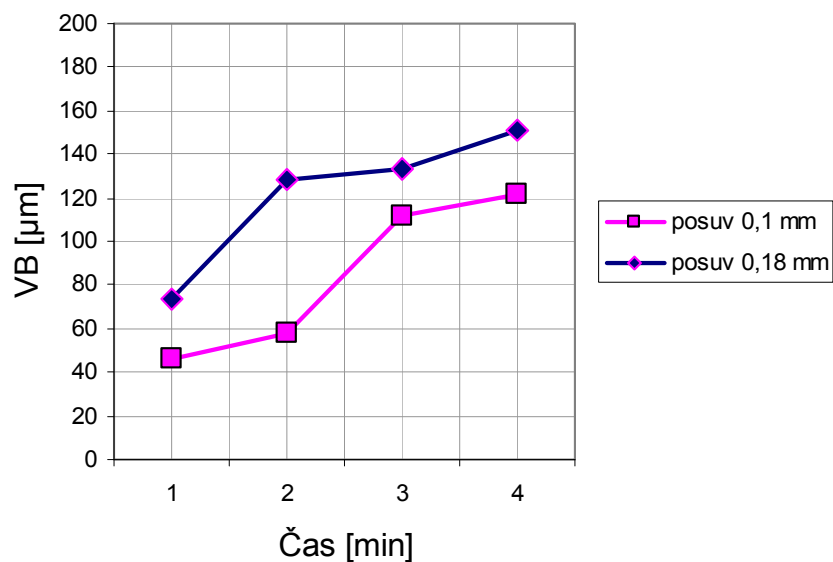
Doba záběru (min)	Strana destičky-břit	v_c ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min^{-1})	VB (mm)
1	AI	265	0,4	2	2907	neměřeno

Experiment byl opakován s chlazením a se sníženým posuvem na 0,25 mm. Zde došlo také k destrukci špičky již po první minutě řezu. Další režim byl nastaven na 0,1 mm, také s chlazením. Zde se výsledky zásadně změnil, nástroj bez problémů došel až ke čtyřem minutám v záběru, bohužel v tímto posuvem nedocházelo k lámání třísky a hrozilo nebezpečí poškození stroje.

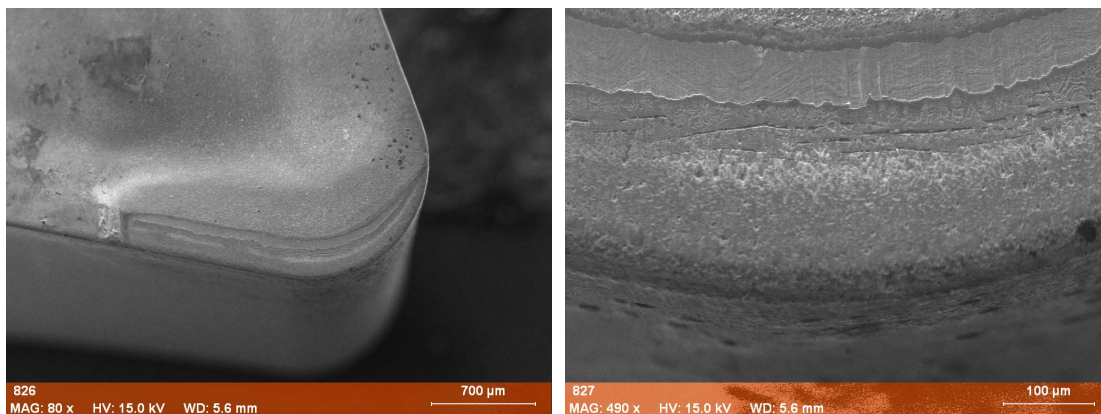
Posuv byl změněn na 0,18 mm, se stejným výsledkem jako u 0,1 mm (Tab. 3.7, Obr. 3.5). Tříska se neláme (stužkovitá, smotaná) a je problematická pro chod stroje, nicméně opotřebení destičky je po čtyřech minutách stále akceptovatelné. Na Obr. 3.6 jsou snímky z řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM) po dvou minutách v řezu při posuvu 0,18 mm, další snímky opotřebení viz Příloha 2 (4/4).

Tab. 3.7 Destička 1115 s rozdílnými režimy posuvu 0,1 a 0,18 mm
(rozděleno silnou čarou)

Doba záběru (min)	Strana destičky -břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB	
						(mm)	(μ m)
1	AI	265	0,1	2	2907	0,046	46
2	AII	265	0,1	2	2907	0,058	58
3	AIII	265	0,1	2	2907	0,112	112
4	BI	265	0,1	2	2907	0,122	122
1	BII	265	0,18	2	2907	0,074	74
2	BIII	265	0,18	2	2907	0,128	128
3	CI	265	0,18	2	2907	0,133	133
4	CII	265	0,18	2	2907	0,151	151



Obr. 3.5 Porovnání vývoje opotřebení hřbetu destičky 1115 v prvních čtyřech minutách záběru s chlazením a posuvem 0,1 a 0,18 mm



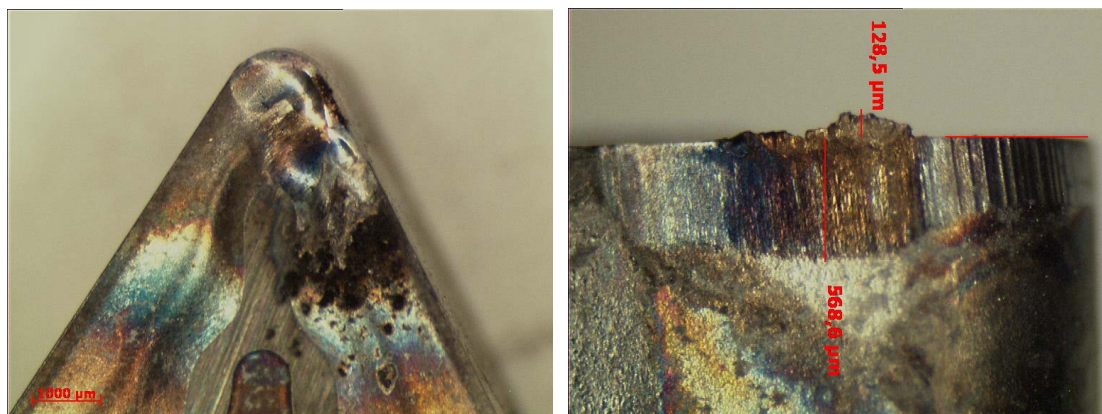
Obr. 3.6 Opotřebení destičky 1115 po dvou minutách v řezu při posuvu 0,18 mm

3.5 Test VBD z materiálu H13A

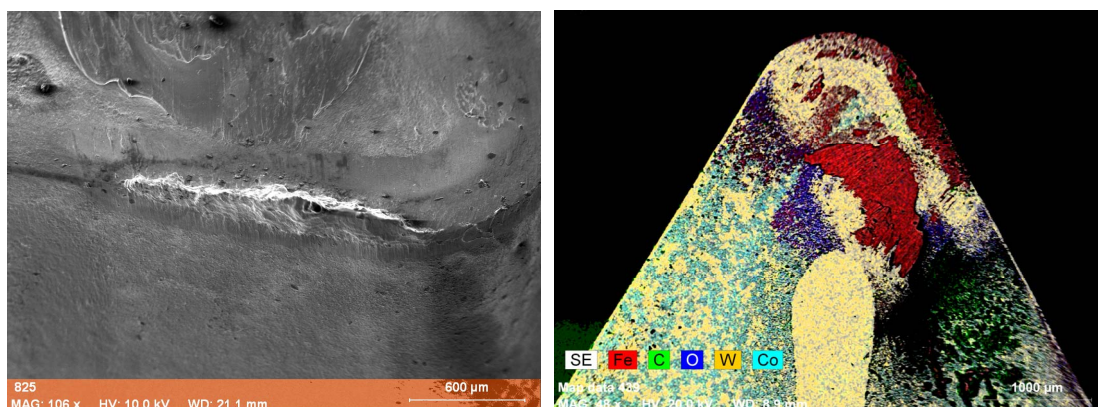
VBD dokončila celý rozsah testu (viz Tab. 3.8). Ihned po minutovém cyklu se začalo projevovat opotřebení hřbetu a nárůstek (Obr.3.7 vpravo). Od dvou minut se začínají projevovat náznaky kráterového opotřebení a od třetí minuty testu je kráter již zcela patrný (Obr.3.7).

Přítomnost materiálu obrobku v podobě nárůstku a v podobě adhezivního opotřebení na čele nástroje bylo provedeno pomocí prvkového mapování mikroanalýzou EDX (X-Ray mapping). Na obr. 3.8 je patrna (zde červenou barvou) přítomnost oceli v oblasti nárůstku, i na čele VBD.

Na závěr byla VBD vystavena více jak čtrnácti minutovému záběru v řezu. Zde se však rozsah kráterového opotřebení začal projevovat odlamováním zeslabeného kraje břitu.



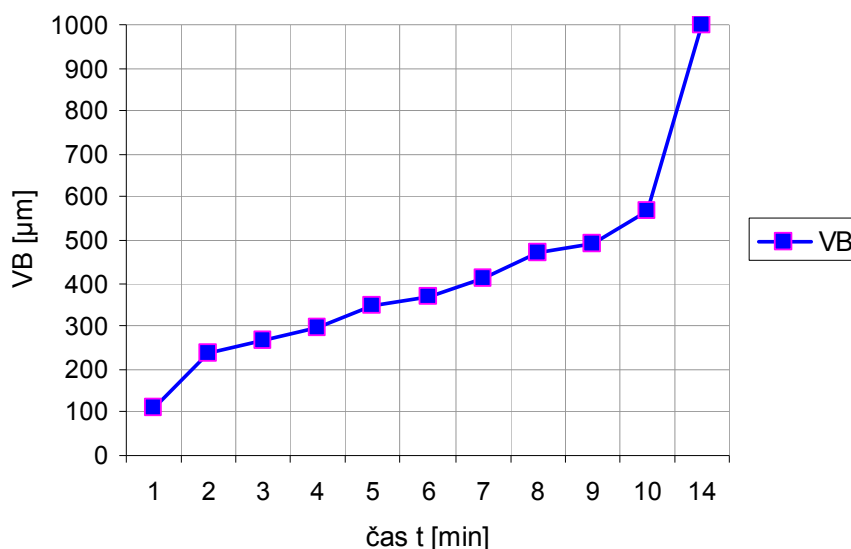
Obr. 3.7 Stav hřbetu a čela VBD H13A do 10 min provozu bez chlazení



Obr. 3.8 Snímek nárůstku po 4 minutách v řezu (vlevo) pomocí SEM v režimu sekundárních elektronů (SE) a chemická analýza povrchu čela destičky pomocí metody EDX (vpravo)

Tab. 3.8 Použité řezné podmínky pro H13A bez chlazení

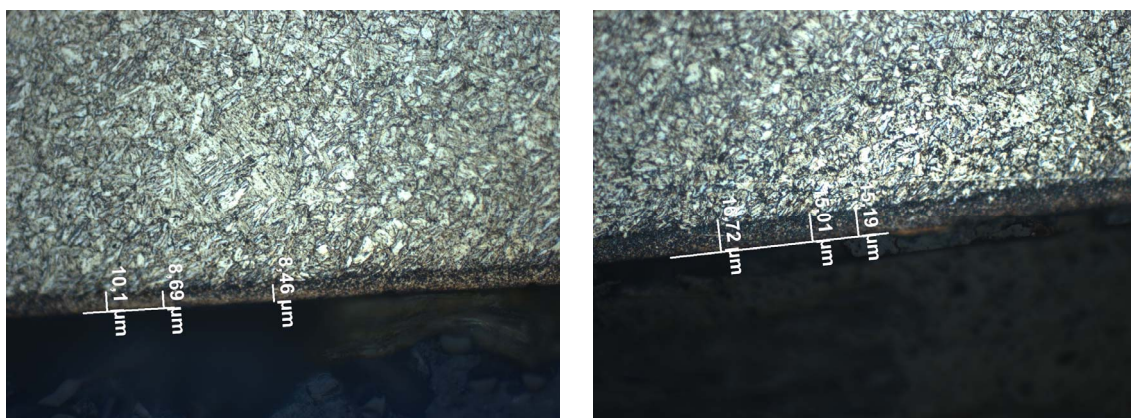
Doba záběru (min)	Strana destičky -břit	v_c (m.min ⁻¹)	f_n (mm)	a_p (mm)	Otáčky (min ⁻¹)	VB	
						(mm)	(μ m)
1	AI	40	0,25	2	439	0,11	110
2	AII	40	0,25	2	439	0,236	236
3	AIII	40	0,25	2	439	0,268	268
4	BI	40	0,25	2	439	0,296	296
5	BII	40	0,25	2	439	0,348	348
6	BIII	40	0,25	2	439	0,370	370
7	CI	40	0,25	2	439	0,411	411
8	CII	40	0,25	2	439	0,469	469
9	CIII	40	0,25	2	439	0,492	492
10	DI	40	0,25	2	439	0,568	568



Obr. 3.9 Průběh vývoje opotřebení v jednotlivých krocích testu, vzorek VBD H13A

3.6 Vliv řezných podmínek experimentu na integritu povrchu

Vzhledem k značně ztíženým řezným podmínkám, především rychlým posuvům a otáčkám, nebyla vyhodnocena mikrogeometrie povrchu. Uvažované stanovení velikosti a typu napětí v povrchové vrstvě obrobku také nebylo provedeno. Při metalografickém rozboru povrchové části je viditelné ovlivnění povrchové vrstvy patrné již v počátečných režimech experimentu. Objevuje se plastická deformace a místy je již materiál povrchu ovlivněn i tepelně. Tyto jevy se stávají viditelnějšími s růstem opotřebení nástroje, jak je tomu na obrázku 3.10 a jsou pozorovatelné po použití všech typů vzorků VBD.



Obr. 3.10 VBD QM 2015 , strana CI a CII (1 a 2 min v řezu)

3.7 Technicko-ekonomické zhodnocení

Technicko ekonomické zhodnocení bylo provedeno s ohledem na dosažené výsledky řezného procesu, resp. zjištěného rozsahu opotřebení během experimentu v horní části rozmezí řezných podmínek uvedených výrobcem.

Tab.3.9 Orientační ceny VBD v Kč za kus

Destička	QM 1115	QM 4215	QM 2015	QM 2015	H13A
Cena (Kč)	420	380	320	290	270

Předepsané výchozí podmínky experimentu jako jediná splnila VBD H13A. Destička QM 2015 vydržela výchozí podmínky necelé tři minuty a u všech ostatních musely být řezné podmínky modifikovány.

Jako nejvhodnější poměr ceny a výkonu byla vyhodnocena destička z nepovlakovaného SK s označením H13A.

3.8 Zhodnocení možných dopadů na životní prostředí

Vyloučení procesních kapalin jako faktoru ovlivňující fluidní a environmentální management a použití těchto VBD v prostředí zhoršených řezných podmínek bez použití procesních kapalin, se neukázalo jako vhodné. Řezné materiály nasazené v experimentální části vyžadují použití procesních kapalin.

ZÁVĚR

S výjimkou VBD s označením řezného materiálu H13A, se ostatní použité řezné materiály pro zvolené řezné podmínky v režimu bez procesních kapalin při experimentu neosvědčily.

Vzorky VBD z povlakovaného slinutého karbidu s označením QM 2015 se v experimentálních podmínkách osvědčily pouze v prvních fázích řezu (1-2 min.), dále však probíhalo opotřebení spontánně a na konci třetí minuty záběru došlo k porušení špičky lomem. Výsledky byly částečně zlepšeny aktivací procesní kapaliny. Lze předpokládat, že další úpravou řezných parametrů (posuv, řezná rychlost) směrem ke středním doporučeným hodnotám se bude opotřebení nástroje snižovat.

U VBD z povlakovaného slinutého karbidu s označením QM 4215, u kterých byly očekávány vysoké řezné výkony nebylo dosaženo ani 75 % rozsahu řezných rychlostí deklarovaných výrobcem a to ani při redukovaném posuvu a aktivním chlazení.

Při obrábění s VBD ze slinutého karbidu s oxidickým povlakem označené QM 1115 nebylo dosaženo při maximálních parametrech žádného výsledku a to ani s chlazením. Při postupném snižování posuvu, opotřebení VBD ustoupilo, avšak lámavost třísky byla natolik nízká, že nebylo možné experiment dokončit bez rizika poškození stroje.

U VBD z nepovlakovaného cermetu s označením QM 5015, nebylo dosaženo žádného výsledku a pro obrábění tepelně zpracované oceli s větším úběrem materiálu a vyšším zatížením je destička vyhodnocena jeho nevhodná.

Dle uvedených výsledků získaných při zkouškách a údajů dostupných u použitých vzorků a materiálů lze konstatovat, že při experimentu, kdy byly zkušební vzorky VBD při řezném procesu vystaveny značné zátěži následkem nastavených procesních parametrů a použitého materiálu obrobku (zušlechťená ocel), dosahovaly nelepších výsledků VBD s označením H13A. To lze vysvětlit použitým řezným materiálem (nepovlakovaný SK) a relativně nízkými řeznými rychlostmi resp. posuvem. Tyto řezné podmínky odráží i nalezené typy opotřebení, především značný nárůstek a opotřebení hřbetu pravděpodobně následkem adhezivního působení nástroj-obrobek.

Vyměnitelnou břitovou destičku H13A má výrobce v nabídce již delší dobu a podle jeho informací, mají dobré zkušenosti s tímto typem VBD i v provozech obrábění náročných materiálů jako jsou INCONELY nebo slitiny titanu. Tento typ VBD je také nejvýhodnější z hlediska ceny, protože ve výběru vzorků reprezentuje nejvyšší trvanlivost a zároveň nejnížší pořizovací cenu.

Vliv použitých VBD při použitých řezných podmínkách na integritu povrchu nebyl vyhodnocen, neboť ve všech případech docházelo ke vzniku silné podpovrchové vrstvy plastické deformace.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SANDVIK Coromant. *Technická příručka obrábění*. Sandviken, Švédsko : Elanders, 2005. 601 s. C-2900:3CZE/01.
2. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM Publishing s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
3. BOBZIN, Kirsten, et al. High Performance PVD Tool Coating. In BOBZIN, Kirsten ; FISHER, Alfons. *Friction, Wear and Wear Protection : International Symposium on Friction, Wear and Wear Protection 2008 Aachen , Germany*. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. s. 756. ISBN 978-3-527-32366-1.
4. KLOCKE, Fritz, et al. PVD Coating Sysms for Environmentally Friendly Machining. In BOBZIN, Kirsten ; FISHER, Alfons. *Friction, Wear and Wear Protection : International Symposium on Friction, Wear and Wear Protection 2008 Aachen , Germany*. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. s. 756. ISBN 978-3-527-32366-1.
5. *Technical Guide : Materials* [online]. Sandviken, Sweden : AB Sandvik Coromant, 2010 [cit. 2010-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www2.coromant.sandvik.com/>>.
6. ASM International. *ASM Handbook Volume 18 : Friction, Lubrication and Wear Technology*. Third printing, March 1998. USA : ASM International, 1992. 942 s. ISBN 0-87170-380-7.
7. HOUDEK, Josef; KOUŘIL, Karel. Opatřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2. února 2005, 2005, 1, [cit. 2010-03-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2>>.
8. BRYCHTA, Josef, et al. *Technologie II : I.díl. první*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TL, 2007. 126 s. ISBN 278-80-248-1641-8.
9. KUDAPA, Satya, et al. Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1999, 120, [cit. 2010-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>....
10. N28 ES7149 S005. *Material order specification : Case hardening steel alloyed high-grade steel*. Stuttgart : Robert Bosch GmbH C/CTN, June 2005. 4 s. 4 497 025 214.
11. ASTACHOV, Viktor P. The assessment of cutting tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 6.5.2004, 44, 6, s. 637-647. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4B-4BM69D2-1/2/c0a5d1e0b021996ed8b25f8b7d1bc33a>>. ISSN 0890-6955.
12. LIM, C. Y. H.; LAU, P. P. T.; LIM, S. C. The effects of work material on tool wear. *Wear*. 2001, 250, 1-12, s. 344-348. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V5B-4471T56-1J/2/e0fac68b2c32e18d3ce3e7df759bebae>>. ISSN 0043-1648.
13. GRZESIK, Wit. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools . *Wear* [online]. 31 July 2008, Volume 265 , Issues 3-4, [cit. 2010-03-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>. ISSN 0043-1648.

14. *DMG Machinentechnologien* [online]. 2010 [cit. 2010-05-06]. Gildemeister. Dostupné z WWW:
<<http://www.gildemeister.com/startpage/de/index.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

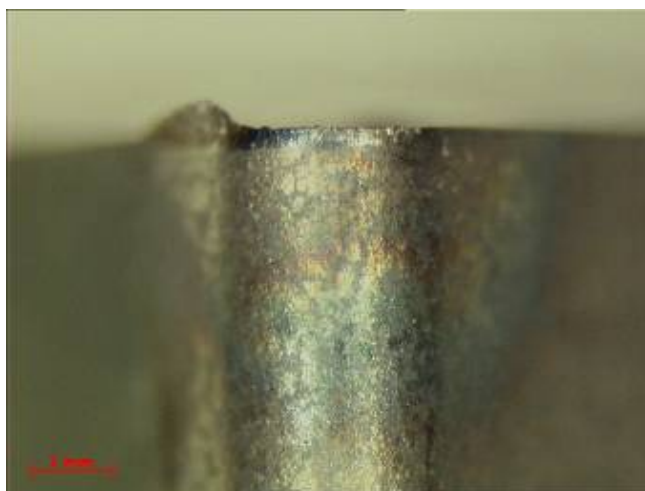
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
GDOES	-	Glow discharge optical emission spectrometry – spektrometrie s doutnavým výbojem
XPS	-	(X Ray photoelectron spectroscopy) rentgenová fotoelektronová spektroskopie
SEM	-	(Scanning electron microscope), Řádkovací elektronový mikroskop
EDX	-	Energy dispersive X-Ray spectrometry, Rentgenově disperzní analýza
SE	-	(Secondary electron), Režim sekundárních elektronů
QBSD	-	(Quick back scattered elektron detektor), detektor urychlených, zpětně odražených elektronů
CNC	-	Číslicově řízený obráběcí stroj
ČSN	-	Česká státní norma-národní standard
ISO	-	Mezinárodní norma-standard
QM	-	Destička pro dokončovací operace
KT	mm	Parametr opotřebení
VB	mm	Parametr opotřebení
v_c	$m \cdot min^{-1}$	Řezná rychlost
f_n	mm	Posuv
a_p	mm	Šíře záběru ostří
F, F_a, F_f, F_c	N	Složky řezných sil
Q_{index}	J	Složky tepla při řezném procesu
VBD	-	Vyměnitelná břitová destička
SK	-	Slinutý karbid
HV	-	Tvrdost dle Vickerse
HB	-	Tvrdost dle Brinella
PVD	-	Fyzikální nanášení povlaku
CVD	-	Chemické nanášení povlaku
DLC	-	(Diamond like Carbon) Vrstva modifikovaného uhlíku
KNB	-	Kubický nitrid bóru
CBN	-	(Cubic Borone Nitride), kubický nitrid bóru
PKNB	-	Polykrystalický kubický nitrid bóru

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Snímky vybraných částí opotřebení břitové destičky H13A
- Příloha 2 Snímky vybraných částí opotřebení břitových destiček 4215, 5015, 2015, 1115
- Příloha 3 Technická specifikace stroje Gildemeister CTX 210

Příloha 1 (1/5)

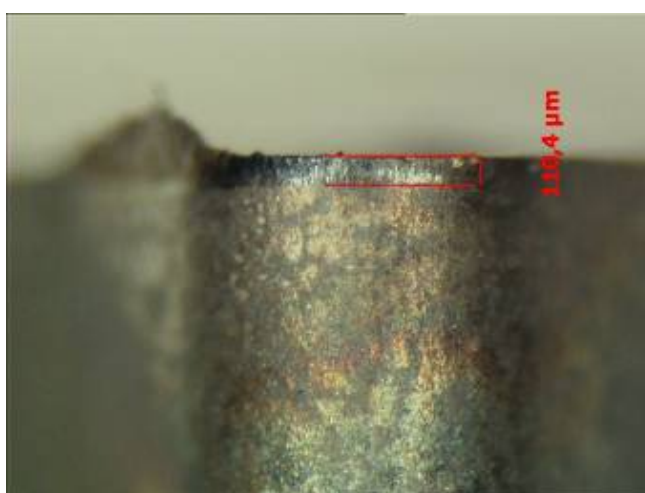
Opotřebení vzorku VBD z materiálu H13A dle časových intervalů



H13A, 1 min. v řezu



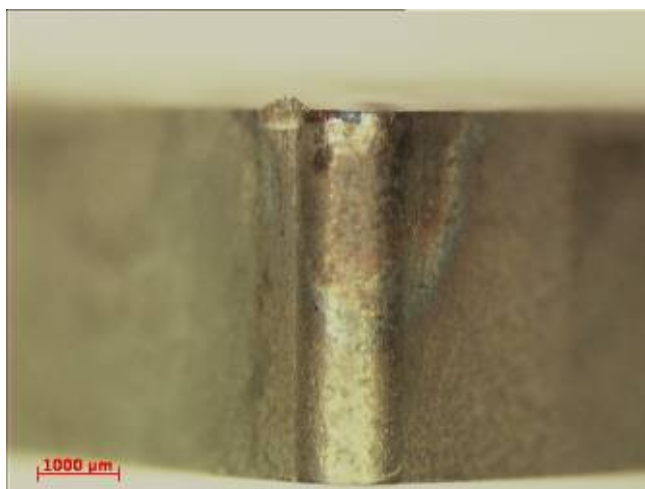
H13A, 1 min. v řezu



H13A, 1 min. v řezu

Příloha 1 (2/5)

Opotřebení vzorku VBD z materiálu H13A dle časových intervalů



H13A, 3 min. v řezu



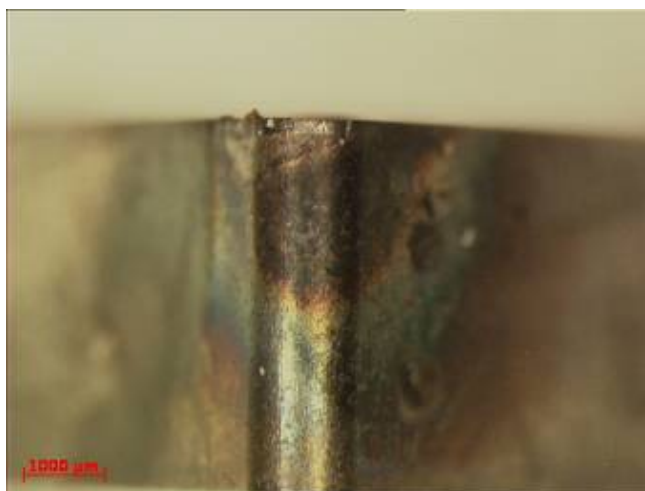
H13A, 3 min. v řezu



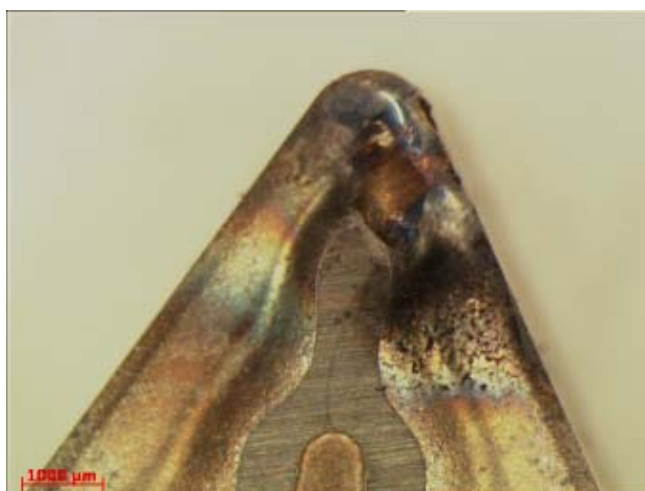
H13A, 3 min. v řezu

Příloha 1 (3/5)

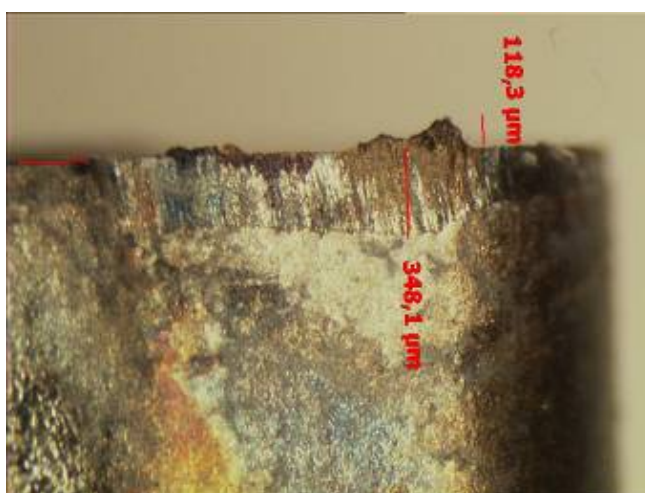
Opotřebení vzorku VBD z materiálu H13A dle časových intervalů



H13A, 5 min. v řezu



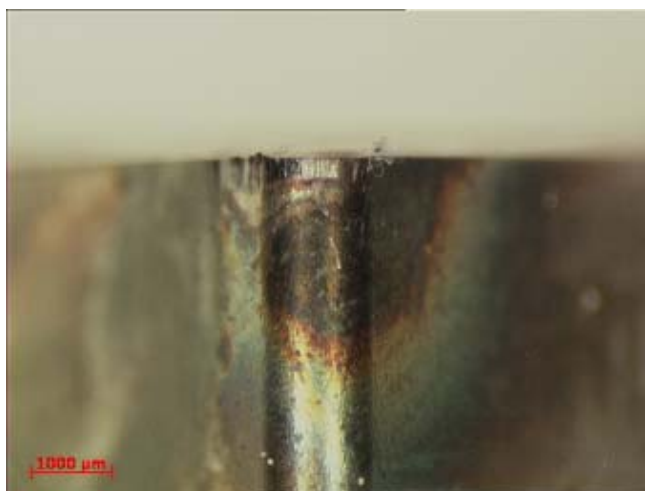
H13A, 5 min. v řezu



H13A, 5 min. v řezu

Příloha 1 (4/5)

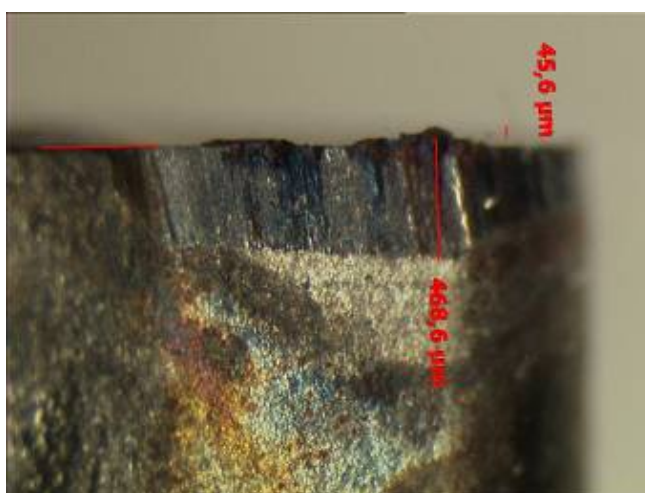
Opotřebení vzorku VBD z materiálu H13A dle časových intervalů



H13A, 8 min. v řezu



H13A, 8 min. v řezu



H13A, 8 min. v řezu

Příloha 1 (5/5)

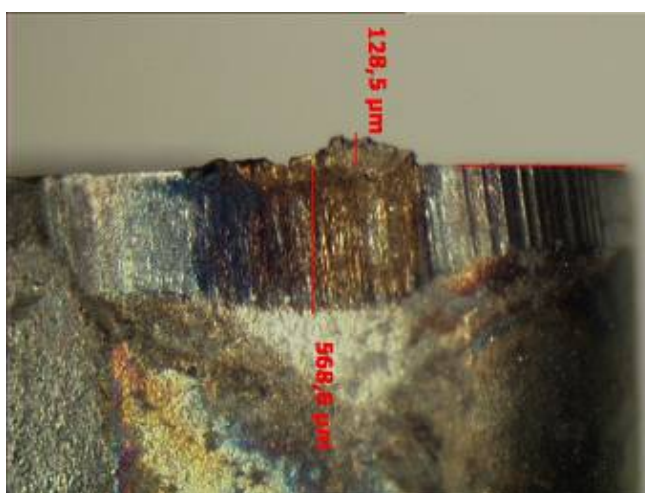
Opotřebení vzorku VBD z materiálu H13A dle časových intervalů



H13A, 10 min. v řezu



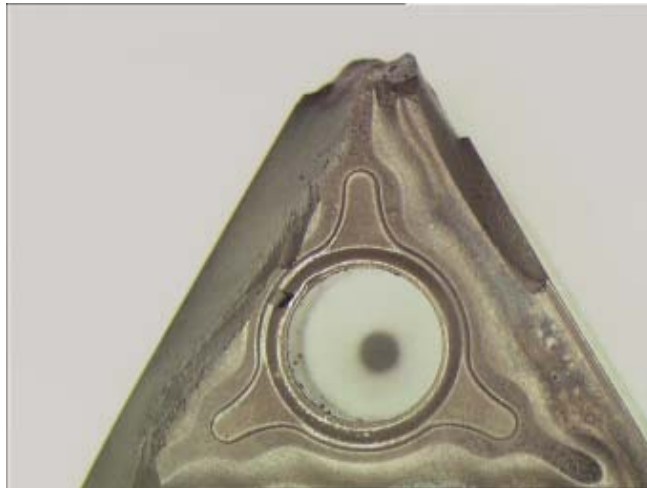
H13A, 10 min. v řezu



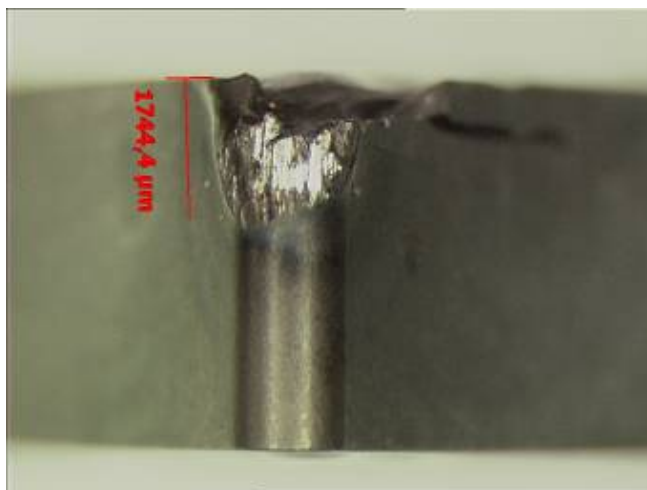
H13A, 10 min. v řezu

Příloha 2 (1/4)

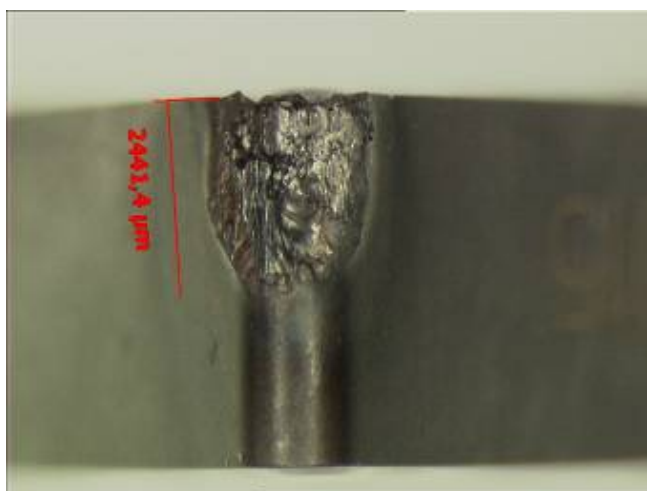
Opotřebení vzorku VBD z materiálu QM 5015 dle časových intervalů



Destička 5015 doba řezu 1 min nechlazená



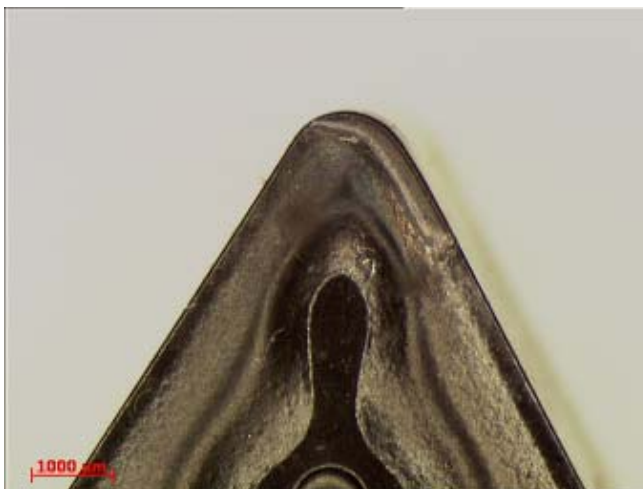
Destička 5015 doba řezu 1 min chlazená



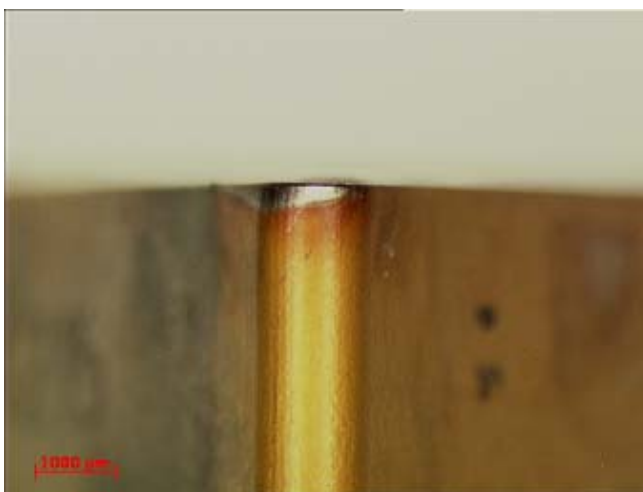
Destička 5015 doba řezu 2 min chlazená

Příloha 2 (2/4)

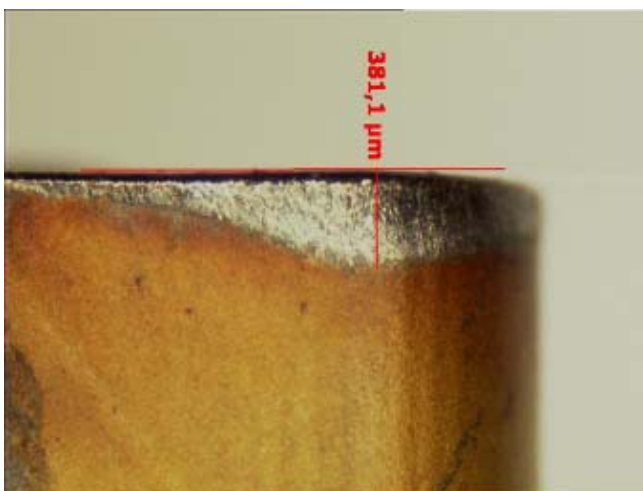
Opotřebení vzorku VBD z materiálu QM 4215 dle časových intervalů



Destička 4215 doba řezu 2 min, chlazená, s redukováným posuvem



Destička 4215 doba řezu 2 min, chlazená, s redukováným posuvem



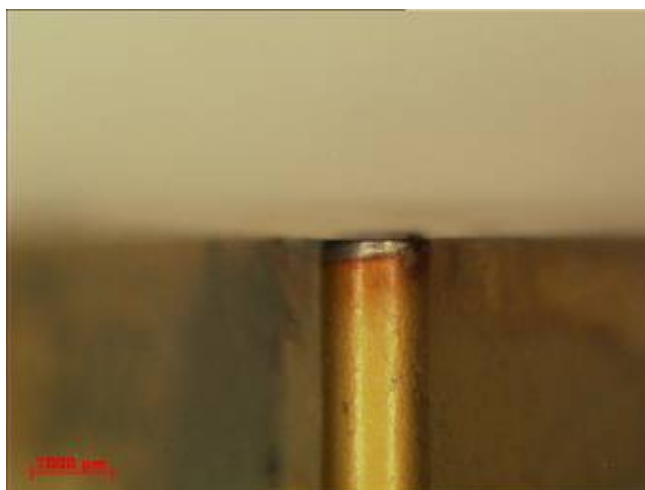
Destička 4215 doba řezu 2 min, chlazená, s redukováným posuvem

Příloha 2 (3/4)

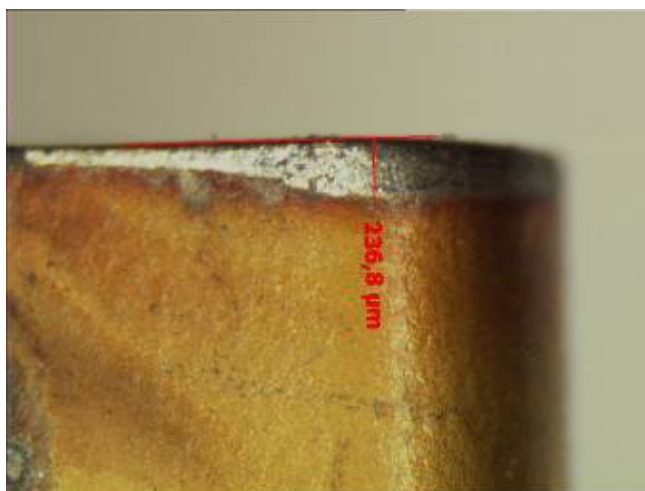
Opotřebení vzorku VBD z materiálu QM 2015 dle časových intervalů



Destička 2015 doba řezu 2 min s chlazením



Destička 2015 doba řezu 2 min s chlazením



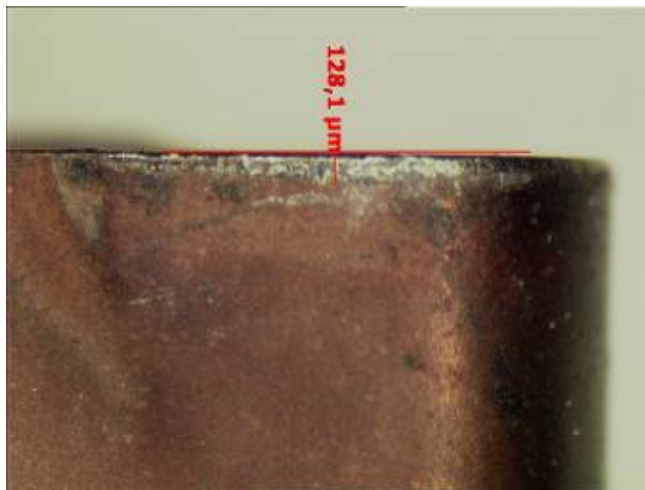
Destička 2015 doba řezu 2 min s chlazením

Příloha 2 (4/4)

Opotřebení vzorku VBD z materiálu QM 1115 dle časových intervalů



Destička 1115 doba řezu 2 min, posuv 0,18mm, s chlazením



Destička 1115 doba řezu 2 min, posuv 0,18mm, s chlazením

Příloha 3

Základní technická specifikace použitého obráběcího stroje Gildemeister CTX 210

Technical Data for CTX 10 series

Machine type		CTX 210	CTX 310
Work area			
Swing diameter, max.	mm	380	505
Swing diameter above cross guideway	mm	290	375
Cross travel (X)	mm	166,5	213 / 140 ²⁾
Vertical travel (Y)	mm	–	± 40
Longitudinal travel (Z)	mm	339	450
Main spindle			
		integr. spindle drive	integr. spindle drive
Spindle head (flat flange)	mm	120h5	140h5
Bar capacity	mm	45	51 / 65 ²⁾
Spindle diameter in the front bearing	mm	90	100
Chuck ²⁾	mm	140 / 165	170 / 210
Drive power (40 / 100% DC)	kW (AC)	10 / 7,5	16 / 12
Max. torque (40 / 100% DC)	Nm	79 / 72	153 / 115
Rotational speed range	rpm	20 – 6,000	25 – 6,000
Counter spindle¹⁾			
		–	integr. spindle drive
Spindle head (flat flange)	mm	–	140h5
Spindle bore	mm	–	44
Spindle diameter in the front bearing	mm	–	90
Chuck ²⁾	mm	–	170
Drive power (40 / 100% DC)	kW (AC)	–	16,2 / 12,6
Max. torque (40 / 100% DC)	Nm	–	62 / 48
Rotational speed range	rpm	–	31 – 6,000
Feed drive AC			
Rapid traverse X / Y / Z	m/min	20 ²⁾ / – / 30	24 / 10 / 30
Tool mount			
No. of tool stations,		12	12
of these, powered tool stations ²⁾	mm	12	12
Shaft diameter (according to DIN 69880)	mm	30	30
Drive power (40% DC)	kW	3,7 ²⁾	9 / 6,7 ²⁾
Max. torque (40% DC)	Nm	23,5 ²⁾	20 / 16 ²⁾
Max. rotational speed	rpm	4,500 / 5,000 ²⁾	4,500 / 4,000 ²⁾
Max. clamping diameter of the powered tools	mm	16	16
Tailstock			
Tailstock stroke (automatically traversable)	mm	370	450
Centre punch fitting	NK	3	4
Quill diameter / stroke	mm	–	–
Max. tailstock power	daN	600	400
Machine weight with chip conveyor	kg	4,000 ²⁾	3,500 / 3,700 ²⁾
Controls			
		DMG SlimLinePanel with 15" TFT-Screen	Siemens 840D, Heidenhain Plus IT, Fanuc 32i