

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TESTOVÁNÍ ŘEZIVOSTI VYBRANÝCH DRUHŮ PVD POVLAKŮ PRO FRÉZOVÁNÍ TESTING OF CUTTING PERFORMANCE OF NEW PVD COATINGS FOR MILLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Skrbek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Cílem práce je popsat postup návrhu metodiky a realizace experimentu řezné zkoušky frézováním. Zadavatelem zkoušky je výrobce PVD povlaků. Požadavkům zadavatele odpovídá i volba parametrů zkoušky. V práci je popsána volba materiálu zkušebního obrobku a geometrie nástroje.

Klíčová slova

PVD, fréza, trvanlivost, opotřebení.

ABSTRACT

This work is focused to the cutting tests. There is a description of cutting test designed for PVD coated cemented carbide end mills. Cutting conditions are chosen according to orders, other subjects of choice are cutting tool geometry and workpiece material.

Key words

PVD, endmill, tool life, wear.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKRBEK, Jan. *Název: Testování řezivosti vybraných druhů PVD povlaků pro frézování.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 56s., Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Testování řezivosti vybraných druhů PVD povlaků pro frézování vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jan Skrbek

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc a cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Nástrojové materiály	10
1.1 Slinuté karbidy	11
1.1.1 Postup výroby	11
1.1.2 Dělení a značení slinutých karbidů	13
1.1.3 Fyzikální vlastnosti	14
1.1.4 Mechanické vlastnosti slinutých karbidů	14
1.1.5 Hodnocení slinutých karbidů	15
1.2 Rychlořezné Oceli	16
1.3 Cermety	16
1.4 Polykrystalický diamant	17
1.5 Kubický nitrid bóru	17
1.6 Metody zvýšení trvanlivosti nástrojů	17
1.6.1 Vlastností povlaku	18
1.7 Metody úpravy aktivních částí řezného nástroje	22
2 Materiál obrobku	23
3 měření a vyhodnocování opotřebení nástrojů	24
3.1 Mechanismy opotřebení	24
3.1.1 Abraze	24
3.1.2 Adheze	24
3.1.3 Difúze	25
3.1.4 Oxidace	25
3.1.5 Plastická deformace	25
3.1.6 Křehký lom	25
3.2 Formy opotřebení	25
3.2.1 Opotřebení hřbetu nástroje	25
3.2.2 Vyštipování bříty	25
3.2.3 Opotřebení čela nástroje formou žlábků	26
3.2.4 Hřebenové trhliny	26
3.3 Metody měření	26
3.3.1 Optické (mikroskopické) metody	26
3.3.2 Metody založené na měření sil	26
3.3.3 Měření parametrů obrobeného povrchu	27
4 Experiment	28
4.1 Zařízení použitá při experimentech	29
4.1.1 Obráběcí stroj	29
4.1.2 Světelný mikroskop	29
4.1.3 Zařízení pro měření radiálního házení nástrojů	31
4.1.4 Zařízení pro úpravu břitů před povlakováním	34
4.2 Provedené experimenty	35
4.2.1 Volba materiálu obrobku	35
4.2.2 Volba geometrie nástroje	43
5 Shrnutí experimentů	51

Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam použitých zkratk a symbolů	54
Seznam obrázků tabulek a grafů	55
Seznam příloh	56

ÚVOD

Řezné zkoušky jsou nezbytné jak pro výrobce nástrojů, tak i pro výrobce povlaků. Přinášejí totiž výsledky z reálných aplikací oproti laboratorním zkouškám mechanických vlastností materiálu substrátu a povlaku. Laboratorní zkoušky vlastností povlaku jako jsou mikrotvrdost, scratchtest, kalotest apod. jsou používány zejména v prvních fázích vývoje povlaku, jejich výhodou je rychlost získání výsledků. Tyto jsou k dispozici téměř okamžitě. Naproti tomu výsledky řezné zkoušky v dalších fázích vývoje jsou nezbytné pro optimalizaci výroby povlaku a jeho použití. Další využití výsledků řezných zkoušek spočívá v průběžné kontrole výroby povlakovacích procesů. V tomto případě je nezbytné, aby zkouška probíhala v co možná nejkratším čase, aby bylo možné rychle reagovat na její výsledky. Proto by tento požadavek měl být zohledněn při návrhu metodiky řezné zkoušky. Rychlost provedení řezné zkoušky se projeví i v nákladech na její provedení, kdy je logické, že s klesajícím časem na provedení zkoušky budou klesat i náklady a to jak na pracovníka provádějícího zkoušku, na provoz stroje, tak i náklady na pořízení zkušebního materiálu.

Při vlastním návrhu metodiky je nutné zvažovat všechny parametry ovlivňující řezný proces v souladu s požadavky na výsledky a to nejen na rychlost zpracování, ale zejména na mechanismu a formě opotřebení nástroje.

Průběh a výsledky řezné zkoušky jsou ovlivněny zejména těmito prvky:

- Nástrojem (materiál, geometrie, povlak, způsob úpravy řezných hran a aktivních ploch před a po povlakování, atd.),
- obrobkem (materiál, tepelné zpracování, atd.),
- strojem (tuhost konstrukce, přesnost polohování, možnosti a příslušenství – chlazení, MQL apod.),
- řeznými podmínkami (řezná rychlost, posuv, hloubka a šířka třísky, chlazení),
- způsobem vyhodnocení (měření velikosti řezných sil dynamometrem, měření velikosti opotřebení mikroskopem s použitím vhodného programového vybavení, atd.)

Většina předchozích parametrů vyplývá ze zadání řezné zkoušky a z možností zadavatele nebo zpracovatele, ostatní je nutné pečlivě zvolit.

1 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Materiály pro řezné nástroje musí splňovat několik základních požadavků:

- tvrdost – tvrdost materiálu nástroje musí být vyšší, než tvrdost materiálu obrobku. Tvrdost materiálu nástroje musí být zachována za zvýšených teplot. V rámci optimalizace řezných procesů dochází ke zvyšování řezné rychlosti a rychlosti posuvu. Zvyšováním řezné rychlosti dochází k nárůstu teploty v místě řezu, z tohoto důvodu je nezbytná tepelná stabilita mechanických vlastností, zejména tvrdosti.
- houževnatost – stanovení optimální houževnatosti je vždy spojeno s kompromisem. Je prokázáno, že s rostoucí houževnatostí klesá odolnost materiálu proti otěru. Vysoká houževnatost materiálu má opodstatnění z důvodu eliminace křehkého lomu nástroje při zvyšování nároků na efektivitu obráběcího procesu, jedná se o nárůst průřezu třísky související s požadavky na vyšší hodnoty posuvu a nárůst tvrdosti obráběných materiálů
- tepelná vodivost – napomáhá zamezení vzniku koncentrovaného tepelného zatížení nástroje a tím i plastické deformaci a následnému lavinovitému opotřebení nástroje,
- odolnost proti opotřebení,
- spolehlivost
- cena.

Standardně používané materiály řezných nástrojů:

- slinuté karbidy – nejčastěji používaný materiál,
- rychlořezné oceli – vysoká houževnatost, ve srovnání s SK nízká tvrdost, ta je většinou závislá na zušlechtění materiálu nástroje, z toho plyne nestabilita tvrdosti v závislosti na teplotě řezu,
- cermety –,
- řezné keramiky - vysoká tvrdost, vysoká tepelná stabilita mechanických vlastností, nízká hustota, nízká tepelná vodivost, z důvodu nízké houževnatosti nevhodné pro použití v aplikacích s přerušovaným řezem,
- kubický nitrid bóru,
- polykrystalický diamant – používán pro obrábění neželezných kovů, nevhodný k obrábění oceli vzhledem k vysoké afinitě uhlíku k železu.

1.1 Slinuté karbidy [1]

V současné době jsou nepoužívanějším nástrojovým materiálem při obrábění slinuté karbidy. Materiál je vyráběn práškovou metalurgií. Podstata výroby slinutých karbidů spočívá v přípravě prášků karbidů a pojících kovů, dále v jejich mísení, lisování a následném slinování při teplotě blízké bodu tavení pojícího kovu (1350 – 1650 °C), čímž dojde k obklopení zrn karbidu pojícím kovem. Takto vyrobený materiál má tvrdost blízkou výchozím karbidům a relativně vysokou pevnost.

1.1.1 Postup výroby

Obecně lze postup výroby slinutých karbidů rozdělit do následujících základních operací:

- výroba práškového wolframu
- výroba práškových karbidů, ty jsou připravovány některou z následujících metod:
 - litím,
 - karbidizací práškových kovů pomocí uhlíku v pevném skupenství,
 - karbidizací práškových kovů pomocí plynů obsahujících uhlík,
 - usazováním z plynné fáze,
 - chemickým vylučováním z nauhličených feroslitin,
 - usazováním při elektrolýze odpovídajících solí,
- příprava směsi karbidů a pojivového kovu (míchání, homogenizace, mletí, v případě mokrého mletí je v procesu zařazeno sušení a granulace).

Účelem je vytvoření homogenní směsi, kde jsou zrna karbidů obalena práškem pojícího kovu.

Podstata mletí spočívá v třecím a rázovém účinku mlecích kuliček na směs v průběhu rotačního pohybu.

Výhodou mokrého mletí je zjednodušené rozptýlení zrn, dále pak ve snížení pracovní teploty a ochranném účinku použité inertní kapaliny proti oxidaci. Nevýhoda spočívá v nutnosti sušení, tato je však minimalizována použitím kapaliny s nízkou teplotou varu (např. etylalkohol, trichloretylen, aceton aj.)

Zásady maximalizace účinku mletí jsou – otáčky mlýnu mají být na úrovni 60% kritických otáček, objem vsázky by měl být v rozmezí 40-50% celkového objemu mlecího zařízení, poměr hmotnosti mlecích kuliček a směsi 3/1-5/1, v případě nutnosti velmi intenzivního mletí až 10/1, průměr koulí 5-10mm.

- *formování směsí* - směs je před formováním z důvodu nízké plasticity nutné doplnit 0,2-5 hmotnostními procenty tzv. plastifikátoru. Jedná se o látku snižující tření mezi nástrojem a lisovanou směsí, usnadňující vzájemný skluz částic směsi, zvyšující pevnost polotovaru a zaručuje tvarovou stálost polotovaru po ukončení formování. Požadavkem na plastifikátor je především snadná odstranitelnost při sušení nebo předslinování za nízkých teplot a zachování čistoty polotovaru. Nejčastěji používané plastifikátory jsou syntetický kaučuk rozpuštěný v benzínu a parafín rozpuštěný v tetrachlormetanu nebo benzenu.

Při výrobě vyměnitelných břitových destiček je používána metoda izostatického lisování za studena, kdy je směs uzavřena v pružné formě (latex, silikonový kaučuk). Podle zdroje tlaku je možné rozeznávat dvě metody. V případě použití mechanického pístu se jedná o tzv. suchou metodu, v případě použití tlaku kapaliny se jedná o tzv. mokrou metodu. Vlastní proces lisování je možné rozčlenit do etap:

- nárůst tlaku (neovlivňuje vlastnosti polotovaru),
- setrvání na maximálním tlaku (důležité pro dosažení optimálního a průřezu polotovaru) rovnoměrného tlaku v celém
- snižování tlaku (největší vliv na vlastnosti formovaného polotovaru).

Při výrobě polotovarů pro monolitní (osové) nástroje je používána technologie vytlačování. V této fázi výroby jsou v polotovaru připravovány kanálky pro přívod procesní kapaliny

- *předslinováním zformovaných směsí* – v této fázi výroby dochází k odstranění plastifikátoru (700-850°C)

- *úprava tvaru předslinovaného tělesa*

- *slinování* – provádí se ve slinovacích pecích, kde je polotovar ohříván a ochlazován definovaným způsobem v řízené atmosféře nebo vakuu. Materiál je zhutňován a vytváří se hranice mezi zrny. Teplota slinování závisí na fázovém diagramu dané směsi.

Pro systém WC-Co – jedná se o příklad systému, kde ke slinování dochází v důsledku přítomnosti tekuté fáze, představované kobaltem.

Proces je charakterizován těmito znaky:

- vytváření skeletu tuhé fáze
- částečné zhutnění materiálu v počátečním období vzniku skelné fáze
- úplné smáčení tuhé fáze tekutou fází
- částečné rozpouštění těžkovatelných tuhých komponent v tavenině, s následnou krystalizací nových tvrdých fází z tvořících se roztoků.

- *vysokoteplotní izostatické slinování*

1.1.2 Dělení a značení slinutých karbidů

Slinuté karbidy jsou dle ČSN ISO 513 rozděleny do šesti skupin, které se dále dělí pomocí čísel do podskupin. Rostoucí číslo podskupiny označuje rostoucí obsah pojící fáze, tím dochází k nárůstu houževnatosti, pevnosti v ohybu a poklesu tvrdosti a odolnosti proti otěru. Z pohledu podmínek obrábění rostoucí číslo podskupiny označuje doporučené snížení řezné rychlosti, zvýšení posuvové rychlosti a průřezu třísky.

Skupina P

– Zpravidla označena modrou barvou, dělí se na podskupiny P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50.

- Obvyklé složení: WC (30-82)%+ TiC (8-64)%+ Co (5-17)%+ TaC.NbC

- Určení - obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku (uhlíkové, slitinové a feritické korozivzdorné oceli.

- Charakteristické znaky procesu obrábění jsou velké řezné síly, velké opotřebením na čele nástroje v podobě výmolu.

Skupina M

- Většinou označena žlutou barvou, dělí se na podskupiny M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40.

- Obvyklé složení: WC (79-84)%+TiC (5-10)%+TaC.NbC (4-7)%+Co (6-15)%

- Určení – obrábění materiálů tvořících dlouhou a střední třísku (lité, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny), těžké hrubovací operace a přerušované řezy.

- Charakteristické znaky procesu obrábění jsou střední až velké řezné síly, opotřebením formou vydrolení ostří.

Skupina K

- Zpravidla označena červenou barvou, dělí se na podskupiny K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40.

- Obvyklé složení: WC (87-92)%+ Co (4-12)%+ TaC.NbC

- Určení – obrábění materiálů tvořících krátkou, drobivou třísku (šedá litina, neželezné kovy a nekovové materiály)

- Charakteristické znaky procesu obrábění jsou nízké řezné síly, opotřebením formou abraze a adheze.

Skupina N

- Označována zelenou barvou, podskupiny N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30

Skupina S

- Označována hnědou barvou, podskupiny S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30

Skupina H

- Označována šedou barvou, podskupiny H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30

1.1.3 Fyzikální vlastnosti

Měrná hmotnost – měrná hmotnost slinutých karbidů typu WC-Co ($12,3\text{--}15,2\text{ g.cm}^{-3}$) je vyšší než u typu WC-TiC-Co ($5,2\text{--}14,7\text{ g.cm}^{-3}$) v souvislosti s vysokou měrnou hmotností wolframu ($15,7\text{ g.cm}^{-3}$) a nízkou měrnou hmotností titanu ($4,9\text{ g.cm}^{-3}$).

Tepelná vodivost – tepelná vodivost slinutých karbidů typu WC-Co se pohybuje v rozsahu $50\text{--}105\text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$. Do obsahu kobaltu 30% není na jeho obsahu výrazně závislá. Tepelná vodivost slinutých karbidů typu WC-TiC-Co je nižší než u typu WC-Co a klesá s rostoucím obsahem TiC.

Délková roztažnost – Hodnota tepelné roztažnosti slinutých karbidů se u typu WC-Co pohybuje v rozmezí $3,4\text{--}7,1\text{ [10}^6\text{.K}^{-1}\text{]}$, u typu WC-TiC-Co $5,5\text{--}7,9\text{ [10}^6\text{.K}^{-1}\text{]}$.

Elektrická vodivost – Hodnota měrného odporu se u slinutých karbidů typu WC-Co pohybuje v rozsahu $17\text{--}24,3\text{ }\mu\Omega\text{.cm}$, u typu WC-TiC-Co $20\text{--}85\text{ }\mu\Omega\text{.cm}$.

1.1.4 Mechanické vlastnosti slinutých karbidů

Tvrdost – Tvrdost slinutých karbidů závisí především na velikosti karbidových zrna a obsahu kobaltu. Tvrdost karbidu roste s klesající velikostí zrn a s klesajícím obsahem kobaltu ve struktuře karbidu. Tvrdost slinutých karbidů se pohybuje v rozmezí $780\text{--}1900\text{ HV}$ (2100 HV). Důležitou vlastností nástrojových materiálů je závislost tvrdosti na teplotě. Slinuté karbidy vykazují rapidní pokles tvrdosti s rostoucí teplotou, při teplotách odpovídajících použití slinutých karbidů jako funkčních částí řezných nástrojů je však jejich tvrdost dostačující (vyšší než např. tvrdost rychlořezných ocelí). Submikronové slinuté karbidy, u kterých zrna o velikosti menší než $1\text{ }\mu\text{m}$ zaručují vysokou tvrdost, mají velmi strmý pokles tvrdosti s rostoucí teplotou, tvrdost vyhovující pro obrábění si však uchovávají až do $700\text{--}800^\circ\text{C}$. Tvrdost slinutých karbidů typu WC-TiC-Co je relativně vyšší než tvrdost karbidů typu WC-Co a WC-TiC-TaC.NbC-Co. Všechny typy vykazují pokles tvrdosti při nárůstu obsahu kobaltu. Tvrdost typů WC-TiC-Co a WC-TiC-TaC.NbC-Co roste také s rostoucím obsahem karbidu titanu, s rostoucí teplotou však klesá pomaleji než u typu WC-Co.

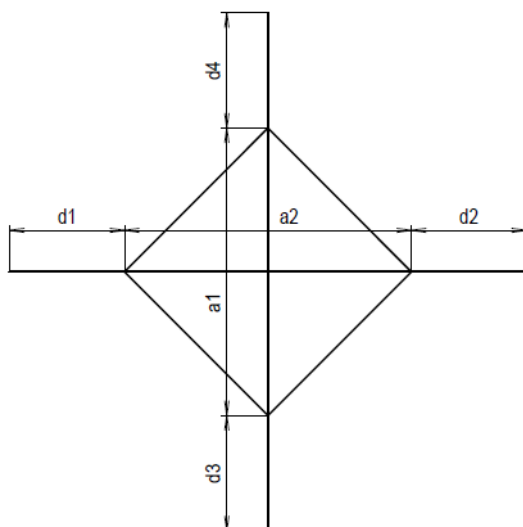
Pevnost v ohybu – pevnost v ohybu slinutých karbidů roste se zvětšujícím se obsahem kobaltu a s rostoucí velikostí zrn karbidu ve struktuře, u typu WC-TiC-Co klesá s rostoucím obsahem TiC, u typu WC-TiC-TaC.NbC-Co klesá s rostoucím obsahem TaC.NbC. Pevnost v ohybu slinutých karbidů se pohybuje v rozsahu $1000\text{--}4500\text{ MPa}$.

Pevnost v tlaku – pevnost v tlaku slinutých karbidů závisí na obsahu kobaltu a velikosti zrn karbidu ve struktuře, závislost je analogická s tvrdostí. Pevnost v tlaku všech typů slinutých karbidů je srovnatelná. Dosahovaná pevnost v tlaku je v rozsahu $3000\text{--}6000\text{ MPa}$ (8000 MPa).

Pevnost v tahu – pevnost v tahu je vzhledem k velké křehkosti a nízké tažnosti slinutých karbidů velmi obtížně měřitelná. Je možné ji odvodit z pevnosti v ohybu, toto odvození je však velmi nepřesné.

Lomová houževnatost – lomová houževnatost je mírou odolnosti tělesa s definovanou trhlinou proti křehkému porušení. Hodnotu K_{IC} je možné stanovit pomocí změřených trhlín v rozích vpichu po provedení zkoušky tvrdosti dle Vickerse, indentorem je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Jedná se o tzv.

Palmqvistovu houževnatost. Metodu určování houževnatosti podle Palmqvista popisuje norma ČSN ISO 28079.



Vztah pro výpočet lomové houževnatosti:

$$PQ = \frac{F}{\sum d_i} [N/mm]$$

Obr. 1.1 : Stanovení lomové houževnatosti podle Palmqvista

1.1.5 Hodnocení slinutých karbidů

- *Stanovení mikrostruktury* – provádí se dle ČSN EN 4499-1,2 prostřednictvím metalografických vzorků, u nichž se hodnotí rovnoměrnost rozložení a velikost částic. Strukturu slinutého karbidu je možné rozdělit:

- α -fáze – jedná se o zrna karbidu wolframu, předmětem hodnocení je velikost zrn, rovnoměrnost struktury, výskyt velkých zrn a zrn atypického tvaru.

- β -fáze – pojivo slinutého karbidu, předmětem hodnocení je výskyt oblastí s vyšším obsahem pojící fáze, oblastí s obsahem pouze pojící fáze a případný výskyt pojící fáze na povrchu vzorků.

- γ -fáze – přísadní karbidy (Ta, Nb, Cr, Ti, Va, ...), hodnocení je obdobné jako u α -fáze, rovnoměrnost rozložení a velikost zrn, dále se ještě hodnotí četnost výskytu a oblasti bez přísadních karbidů.

- η -fáze – křehká fáze, důvodem vzniku je nízký obsah uhlíku.

- *Stanovení pórovitosti a volného uhlíku* – dle ČSN EN 24505 se perezita slinutých karbidů dělí na typy dle velikosti:

- A: póry $<10\ \mu\text{m}$,
- B: póry $10\text{-}25\ \mu\text{m}$,
- C: volný uhlík,
- bodovatelná póry $>25\ \mu\text{m}$, pro hodnocení je určující velikost a počet pórů, rozsahy velikostí jsou normou určeny : $25\text{-}75\ \mu\text{m}$, $75\text{-}125\ \mu\text{m}$ a $>125\ \mu\text{m}$.

- *Magnetické sycení* – měrná nasycená magnetizace, hodnota nasycené magnetizace slitin karbidu wolframu a kobaltu závisí na obsahu kobaltu (resp. pojící fáze), množství wolframu, uhlíku a příměsí rozpuštěných v kobaltu – umožňuje rozdělit slinuté karbidy dle obsahu kobaltu a stanovit složení pojící fáze u vzorků bez eta-fáze a volného uhlíku

- *Koercitivní síla* – vypovídá o velikosti zrn karbidu, množství wolframu a uhlíku rozpuštěného v pojící fázi, rozložení kobaltu a napětí v jeho fázi. Metodu stanovuje norma ČSN EN 23326.

1.2 Rychlořezné Oceli

Největší výhodou rychlořezných ocelí použitých jako materiálu pro obráběcí nástroje je jejich nízká cena oproti ostatním. Další výhodou zejména oproti slinutým karbidům je v možnosti snadného odstranění opotřebeného povlaku.

Díky moderním technologiím výroby ocelí s využitím elektrostruskového přetavování, práškové metalurgie, tepelného zpracování atd. dochází ke zvýšení mechanických vlastností a jejich stabilizaci v celém průřezu nástroje, díky vysokému stupni homogenity struktury takto připravených materiálů.

Zejména potom díky povlakování je možné rychlořezné oceli použít v širokém spektru aplikací. Vzhledem k vysoké rychlosti degradace mechanických vlastností rychlořezných ocelí, zejména tvrdosti, je možné je použít pouze v aplikacích s nízkým vývinem tepla, toto omezuje rovněž i možnosti použitých technologií přípravy povlaků. Znemožněno je především použití CVD technologií.

1.3 Cermety

Název CERMET vznikl spojením prvních tří písmen slov Ceramic a Metal. Jedná se o slinuté materiály, kde tvrdá fáze je tvořena Mo_2C , TiN , TiC . Jako pojivo je ve struktuře cermetů použit nikl. Za účelem zvýšení pevnosti pojiva je přidáván molybden, za účelem snížení rozpustnosti titanu v niklu je přidáván kobalt, kvůli zvýšení houževnatosti, odolnosti proti oxidaci a vysokoteplotní pevnosti je přidáván chrom, z důvodu zjemnění mikrostruktury je přidáván dusík.

Technologie výroby cermetů je podobná výrobě slinutých karbidů. Teplota slinování se pohybuje v rozmezí $1400\text{-}1600^\circ\text{C}$.

1.4 Polykrystalický diamant

Z důvodu přeměny krystalické struktury z kubické na hexagonální při teplotách nad 700°C a vysoké afinity uhlíku k železu, není možné použít polykrystalický diamant pro obrábění železných materiálů.

Kvůli vysoké ceně je materiál vhodný zejména pro vysoce produktivní metody obrábění, zejména obrábění vysokými řeznými rychlostmi. PD je vhodný i pro obrábění kompozitních materiálů.

Tvrдость polykrystalického diamantu se pohybuje v rozmezí 8000-10000 HV. Maximální teplota použití je přibližně 500°C. Polykrystalický diamant má v porovnání s ostatními známými materiály nejlepším tepelnou vodivost.

Podobné aplikační omezení jako polykrystalický diamant mají DLC vrstvy. Tvrдость DLC vrstev je přibližně 2000HV a maximální teplota použití 350°C.

1.5 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru je vyráběn syntézou.

Vzhledem k vysoké tvrdosti je materiál vhodné používat pro obrábění kalených ocelí. Kubický nitrid bóru je možné povlakovat za účelem snížení sil při obrábění.

1.6 Metody zvýšení trvanlivosti nástrojů [2]

V současnosti je základní metodou zvýšení trvanlivosti nástrojů tzv. povlakování. Jedná se o technologii depozice tenké vrstvy na aktivní část řezného nástroje. Technologii depozice je možné rozdělit do dvou základních metod. Jedná se o CVD a PVD metody.

Technologie přípravy tenkých vrstev používané pro zvýšení trvanlivosti řezných nástrojů je možné rozdělit na ¹:

- CVD – chemické metody přípravy povlaku – podstatou je chemická reakce převážně plynného prostředí a podkladového materiálu. U této technologie existuje několik modifikací, jejichž předností je většinou snížení teploty procesu. Snižování teploty je však vždy spojeno s použitím buď reaktivnějšího, tedy nebezpečnějšího prostředí např. MTCVD, nebo použití fyzikálních procesů jako aktivátoru chemické reakce např. PACVD.

Výhody technologie CVD jsou například:

- odolnost povlaku proti opotřebení,
- vysoká adheze povlaku k substrátu,
- teplotní stabilita povlaku,
- kapacita.

Mezi nevýhody patří například:

- energetická náročnost,
 - ekologická zátěž – je nutné používat nebezpečné látky a likvidovat nebezpečné produkty reakcí povlakovacího procesu,
 - vnitřní tahová napětí ve vrstvě.
-
- PVD – fyzikální metody přípravy tenké vrstvy – proces aktivován fyzikálními pochody:
 - napařování,
 - naprašování,
 - iontové plátování.

Výhody technologie PVD:

- nižší teplota procesu
- možnost tvorby nanokompozitních vrstev

Nevýhody PVD technologie:

- zaoblení řezné hrany vlivem anténového efektu při depozici – následkem je větší zaoblení řezné hrany při stejné tloušťce povlaku než u CVD technologie
- omezená kapacita

1.6.1 Vlastností povlaku

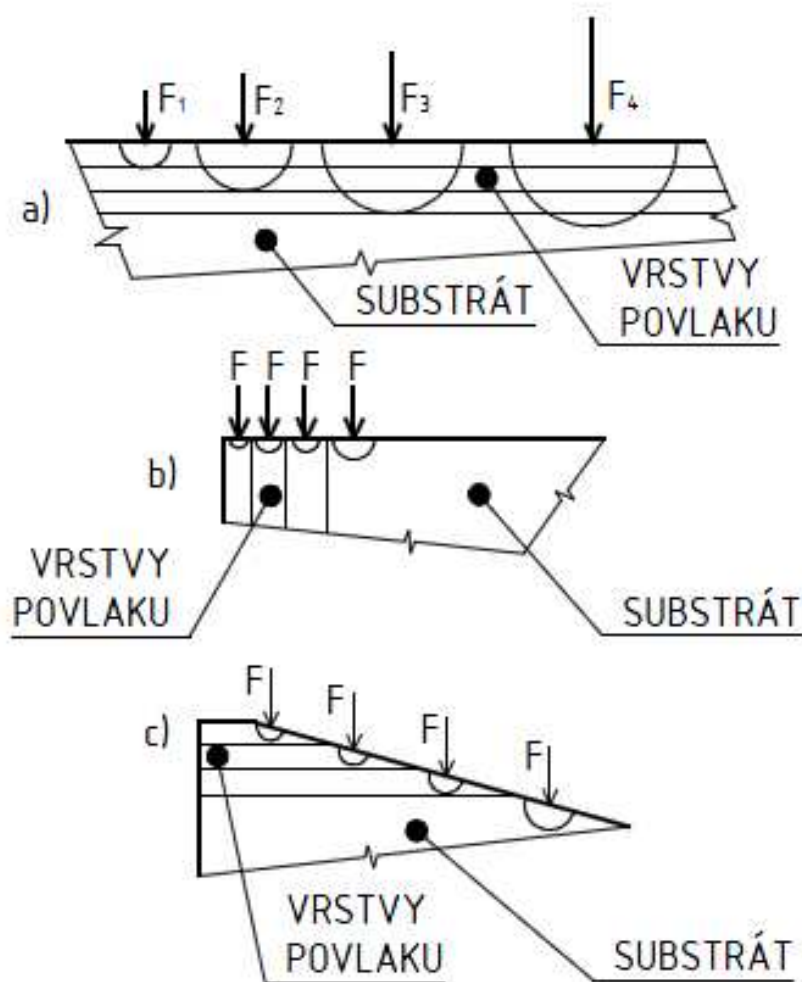
Mikrotvrdost

Tvrdost nástroje, zejména jeho povrchu je určující vlastností pro jeho řezivost. Při měření mikrotvrdosti je možné vyhodnocovat buď jednotlivé vrstvy povlaku nebo i tvrdost jednotlivých zrn substrátu. Měření mikrotvrdosti podle Vickerse a Knoopu popisuje norma ČSN EN ISO 4516. Různé měřicí přístroje používají různé indentory nejčastěji jsou používány:

- Vickers – indenter má tvar čtyřbokého jehlanu se čtvercovou podstavou a vrcholovým úhlem 136° ,

- Knoop – vnikací tělísko má tvar čtyřbokého jehlan s podstavou ve tvaru kosočtverce definovaným úhly $172,5^\circ$ a 130° ,

- Berkovič – indenter má tvar trojbokého jehlanu se stranami skloněnými pod úhlem $65,03^\circ$ nebo $65,27^\circ$.

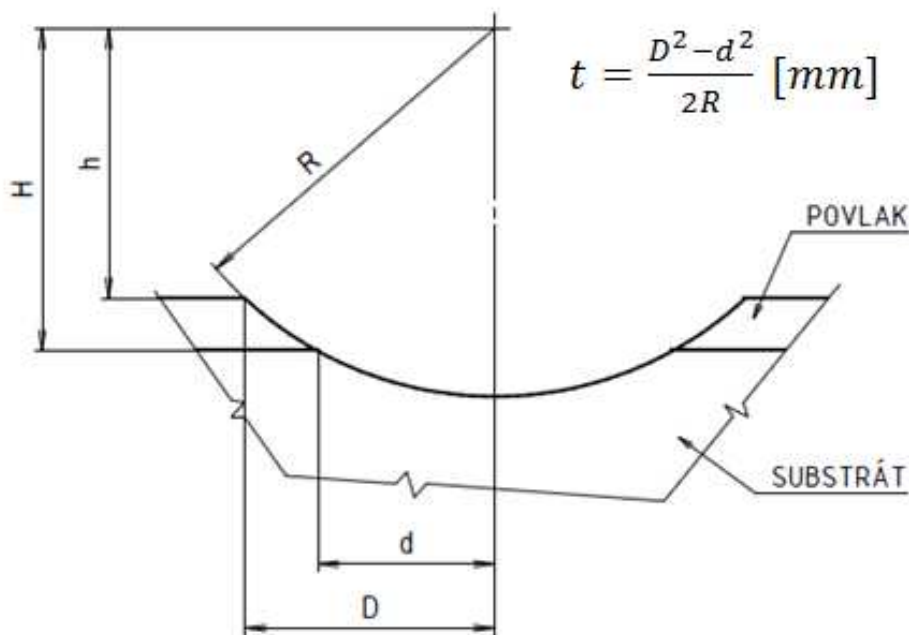


Obr. 1.2 : Možnosti měření mikrotvrdosti vícevrstvého povlaku: a) Měření tvrdosti jednotlivých vrstev proměnným zatížením. b), c) Měření tvrdosti vrstev a substrátu na broušeném vzorku

Měření mikrotvrdosti zobrazené na obr. 1.2 má několik problematických aspektů. Při měření metodou a) je jedním z problémů drsnost měřeného povrchu, měření je výrazně ovlivněno vzájemnou polohou indentoru a povrchu (vliv výstupků a prohlubní), zvláště když musí být dodržena zásada, že hloubka vtisku nesmí přesahovat 1/10 tloušťky měřené vrstvy (běžná tloušťka povlaku je v rozmezí 2 – 4 μm , běžná drsnost povlaku je přibližně R_a 0,15 μm). Dalším problémem je možnost ovlivnění naměřených hodnot kompozitní tvrdosti vrstev povlaku. Při použití metody b) je problematické kohezční zatížení vrstev povlaku a přítomnost volného povrchu na jedné straně vzorku.

Tloušťka povlaku

Tloušťka povlaku je významným parametrem. Stanovení tloušťky povlaku se provádí například tzv. kalotestem. Podstata spočívá v rotaci kalené ocelové kuličky, na jejíž povrch je nanášena brusná pasta, po povrchu vzorku. Tím dojde k obroušení povlaku. Pomocí mikroskopu jsou následně stanoveny průměry vybroušených stop kuličky na povrchu vzorku. Tloušťka povlaku je vypočítána dle vzorce:



Obr. 1.3 : Schéma určování tloušťky povlaku pomocí kalotestu

Adheze

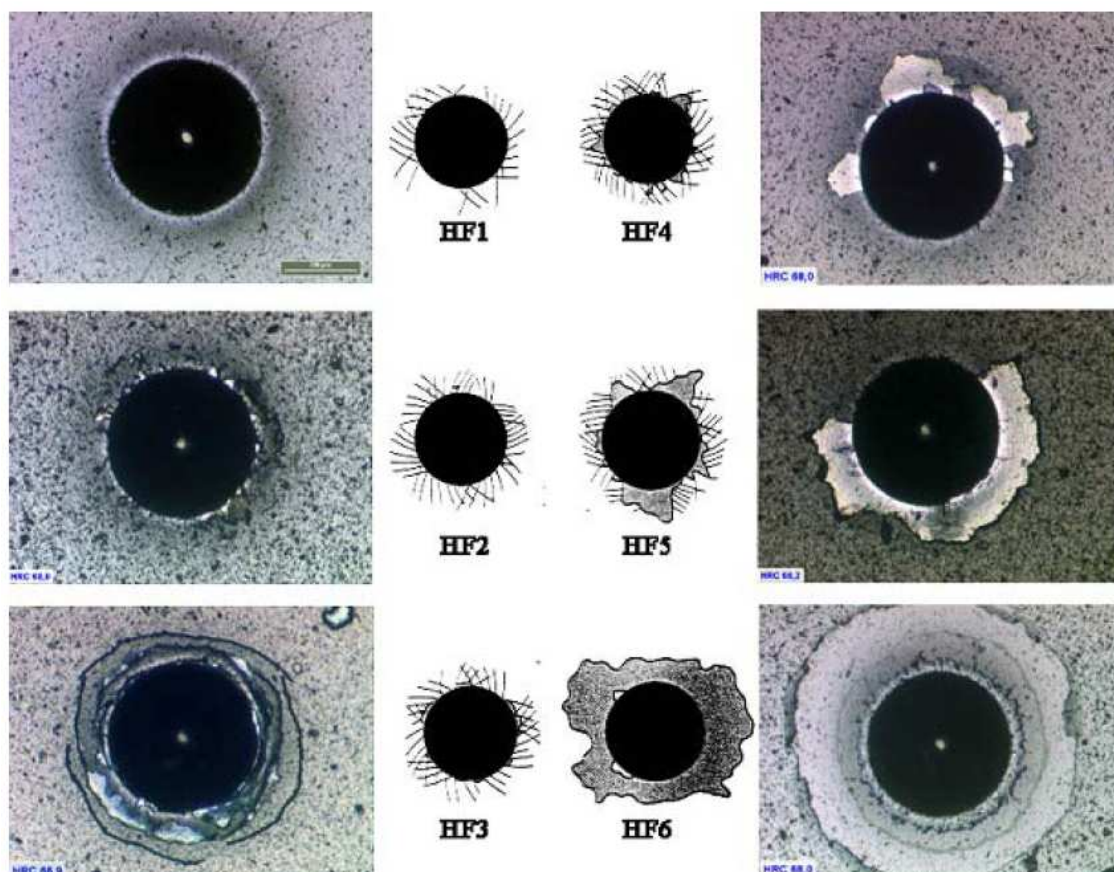
Jev popisující přilnavost povlaku k materiálu substrátu, je jedním z důležitých ukazatelů kvality povlakovacího procesu. Adheze ovlivňuje schopnost povlaku chránit břit nástroje před silovým a tepelným zatížením v průběhu obrábění. Existuje relativně velké množství metod pro zkoušení adhezních vlastností povlaků.

Koheze

Jedná se o jev popisující soudržnost molekul a jednotlivých vrstev povlaku. Například při PVD je povlak na vzorek nanášen pouze v okamžiku, kdy je povrch vzorku přikloněn k aktivní části elektrody, z níž je povlak napařován. Toto je možné zjednodušeně popsat přímou viditelností mezi povrchem vzorku a katodovou skvrnou.

Mercedes test

Metoda zkoušky adhezních vlastností povlaku založená na vyhodnocení tvaru vtisku po indentoru. V tomto případě je indentorem kužel s vrcholovým úhlem 120°, používaný při zkoušce tvrdosti dle Rockwella – metoda C. Na základě porovnání tvaru vtisku se stanoveno číslo adheze.



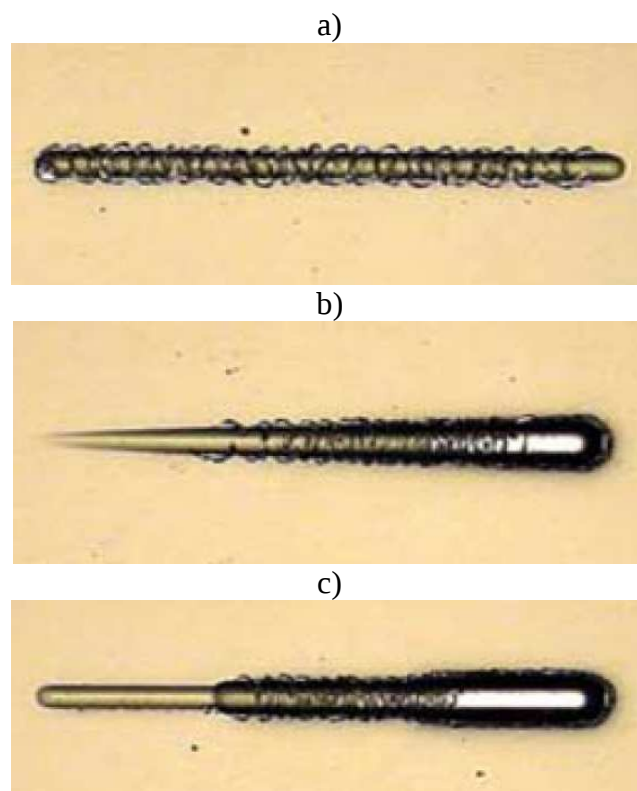
Obr. 1.4 : Mercedes test ^[10]

Další možnosti zkoušení adheze povlaku jsou například:

- Sand-test – podstata této zkoušky spočívá ve vyhodnocení schopnosti povlaku odolávat abrazivními prostředím.
- Pin on disk – podstatou této metody je vyhodnocení opotřebení povlaku při pohybu po spirále na rotujícím disku.

- Scratch test – zkouška vrypem.

Zkouška adheze povlaku založena na relativním pohybu povlakovaného vzorku a zatíženého hrotu. Vyhodnocuje se tvar stopy hrotu na povrchu povlakovaného vzorku v závislosti na zatížení hrotu, je možné vyhodnocovat i akustický projev testu.



Obr. 1.5 : Stopy scratchtestu: a) Konstantní zatížení, b) Plynule narůstající zatížení, c) Skokově narůstající zatížení ^[9]

1.7 Metody úpravy aktivních částí řezného nástroje

Důvodem všech metod je snížení drsnosti funkčních částí řezných nástrojů, odstranění stop po broušení. Podstatou je účinek abrazivního prostředí na funkční části řezných nástrojů.

Metody:

- Pískování
- Lapování
- Omílání
- Kartáčování

2 MATERIÁL OBROBKU

Volba materiálu zkušebního obrobku jako jeden z významných vstupních parametrů řezné zkoušky vyplývá ze zadání zkoušky. Vlastnosti materiálu ovlivňují průběh a výsledky zkoušky, zejména mechanismus a intenzitu opotřebení. Pro zaručení opakovatelnosti zkoušky je nutné zvážit u zkušebních materiálů i vlastnosti, které při běžném použití nejsou příliš významné. Jedná se o výbornou prokalitelnost při případném tepelném zpracování, rovnoměrné rozložení primárních karbidů ve struktuře a malou tendenci materiálu ke zpevnění povrchové vrstvy v důsledku předchozího obrábění.

Obráběné materiály se dělí do skupin, z tohoto dělení vyplývá i volba vhodného materiálu nástroje, geometrie, povlaku a podmínek obrábění. Skupiny dělení materiálu jsou:

- Ocel
- Korozivzdorná ocel
- Litina
- Neželezné kovy
- Superslitiny
- Tvrzené materiály

Při volbě materiálu obrobku byly vyhodnoceny například následující možnosti:

- ČSN 19 437 (40HRC), další značení: 1.2436, X210CrW12

Chemické složení: 2,1% C, 0,25% Si, 0,3%Mn, 11,5%Cr, 0,7%W.

Kalením je možné dosáhnout tvrdosti materiálu 64 – 66 HRC.

Jedná se o nástrojovou ocel určenou pro práci za studena s vysokou odolností proti otěru. Příklady použití: tlačné, průtlačné nástroje, nože nůžek pro stříhání plechů do tloušťky 4mm, nástroje pro válcování závitů a jiné válcovací nástroje, nástroje pro obrábění dřeva, apod.

- ČSN 19 552 (49 HRC), další značení: 1.2343, X38CrMoV5-1

Chemické složení : 0,38%C, 1,1%Si, 0,4%Mn, 5%Cr, 1,3%Mo, 0,4%V.

Dosahovaná tvrdost materiálu je maximálně 52-56 HRC, mez pevnosti zušlechtěného materiálu je přibližně 1500 MPa.

Jedná se o ocel určenou pro práci za tepla. Vhodná zejména na tvářecí nástroje pro zpracování neželezných kovů. Tento materiál je možné získat i v elektrostruskově přetaveném stavu v tomto případě má ocel vyšší stupeň čistoty, zaručenou rovnoměrnost rozložení primárních karbidů ve struktuře a lepší mechanické vlastnosti. Cena elektrostruskově přetaveného materiálu neodpovídá určení materiálu jako obrobku pro řezné zkoušky.

- ČSN 12 050, další značení: 1.1191, C45

Chemické složení: (0,42-0,5)%C, (0,5-0,8)%Mn, 0,4%Si, 0,4%Cr, 0,1%Mo, 0,4%Ni, maximálně 0,045%P a 0,045%S.

Tvrdost materiálu je 183 – 300 HB, mez pevnosti v tahu $R_m=460-1060$ MPa v závislosti na druhu polotovaru.

Jedná se o etalonový materiál z pohledu obrobitelnosti, která spolu s jeho mechanickými vlastnostmi zaručuje dobré výsledky řezných zkoušek. Menším problémem je rovnoměrnost rozložení struktury, kterou je nutno konzultovat s výrobcem a materiál vhodným způsobem tepelně zpracovat.

- HARDOX 500

Chemické složení (maximální obsah legujících prvků) : (0,27-0,3)%C, 0,7%Si, 1,6%Mn, 0,025%P, 0,01%S, (1-1,5)%Cr, (0,25-1,5)%Ni, (0,25-0,6)%Mo, 0,004%B.

Tvrdost materiálu je 450 – 540 HB a mez pevnosti v tahu $R_m=1550$ MPa.

Jedná se o materiál s vysokou odolností proti otěru vyvinutý švédskou firmou Saab pro zařízení používaná při těžbě hornin a minerálů.

3 MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

3.1 Mechanismy opotřebení

3.1.1 Abrazie

Fyzikální mechanismus opotřebení, k brusnému otěru dochází při styku materiálu nástroje a obrobku, intenzita vzrůstá s jejich drsností, a při přítomnosti volných tvrdých částic v místě dotyku, volné částice mohou pocházet z obráběného materiálu nebo z materiálu nástroje. Karbidy, nitridy, oxidy jsou sloučeniny kovu s uhlíkem, dusíkem nebo kyslíkem, tyto částice mají výrazně vyšší tvrdost než obráběný materiál.

3.1.2 Adheze

Fyzikální mechanismus opotřebení, podstata spočívá ve vzniku a porušení mikroskopických svarových spojů v místech kontaktu výstupků povrchů nástroje a obrobku. Velikost opotřebení závisí na tvrdosti materiálu nástroje a obrobku. K adhezi dochází při splnění podmínek:

- vysoká teplota
- vysoký tlak
- chemická příbuznost materiálů
(rychlořezná ocel – ocel, slinutý karbid – ocel s obsahem kobaltu atd.)
- kovově čisté stýkající se povrchy

3.1.3 Difúze

Chemický mechanismus opotřebení, podstatou je proces migrace atomů z krystalické mřížky nástrojového materiálu do mřížky obráběného materiálu za vysokých teplot, kdy je difúze několikanásobně rychlejší než při teplotě okolo 20°C. Rychlost difúzního procesu je zvýšena také působením vysokého tlaku a stykem chemicky čistých povrchů. Difúzní proces závisí na chemickém složení materiálu nástroje a obrobku. V případě obrábění železných kovů nástroji ze slinutých karbidů se jedná o dva procesy. V prvním případě difunduje uhlík z materiálu nástroje do materiálu obrobku, v druhém případě difunduje železo z materiálu obrobku do materiálu nástroje. V obou případech dochází ke zkřehnutí povrchové vrstvy materiálu nástroje.

3.1.4 Oxidace

Proces, při kterém materiál nástroje reaguje s atmosférickým kyslíkem. V místě kontaktu aktivní části nástroje s obrobkem je tento proces intenzivnější vlivem vysoké teploty v místě řezu.

3.1.5 Plastická deformace

Proces, kdy je vlivem řezných podmínek, geometrie nástroje nebo jeho opotřebením překročena hodnota tepelné stability nástroje v důsledku nakumulování tepelného zatížení, toto může mít za následek změnu tvaru břitu nástroje a lavinovité opotřebení – utavení špičky nástroje.

3.1.6 Křehký lom

Důsledek náhlého mechanického zatížení. K nárůstu dochází při přerušovaném řezu, při obrábění nehomogenního materiálu (vměstky, nerovnoměrně rozmístěné primární karbidy atd.) apod. Důsledkem je vylamování částic nástroje.

3.2 *Formy opotřebení*

3.2.1 Opotřebení hřbetu nástroje

Jedná se o plošku vznikající na hlavním i vedlejším ostří působením abrazivních a adhezivních mechanismů. Ploška může mít tvar:

- rovnoměrný,
- s výrazným opotřebením v místě kontaktu nástroje s obrobenou plochou
- s výrazným opotřebením v blízkosti poloměru ostří.

Nejčastěji se však vyskytují kombinace předchozích forem opotřebení.

3.2.2 Vyštipování břitu

Tato forma je způsobena lokálním nárůstem zatížení břitu. Jedná se o nestabilní formu opotřebení, může být příčinou náhlé destrukce nástroje.

3.2.3 Opotřebenění čela nástroje formou žlábků

Tato forma je způsobena abrazivními a adhezivními mechanismy. Intenzita opotřebenění narůstá s rostoucí teplotou.

3.2.4 Hřebenové trhliny

Jedná se o trhliny kolmé k ostří bříty, vzniklé v důsledku tepelných šoků bříty nástroje při přerušovaných řezech. Hřebenové trhliny jsou příčinou náhlé destrukce bříty nástroje.

3.3 Metody měření

3.3.1 Optické (mikroskopické) metody

Přímé metody měření opotřebenění nástroje, provádí se pomocí mikroskopů. Mikroskop doplněný kamerou a počítačem s vhodným programovým vybavením usnadňuje měření, zvyšuje jeho přesnost a možnost uložení snímků měření dovoluje kontrolu provedených měření.

Další možnost spočívá ve využití zařízení pro měření nástrojů využívající laserový paprsek. V průmyslové praxi je toto zařízení používáno pro stanovení korekcí nástroje, kontrolu upnutí a opotřebenění nástroje. Měření opotřebenění neposkytuje potřebný výstup, zařízení porovnává změnu průměru nástroje s předem nastavenou hodnotou a v případě dosažení nebo překročení této hodnoty vyhodnotí nástroj jako nepoužitelný.

3.3.2 Metody založené na měření sil

K měření sil se používají dynamometry. Podstatou je měření nárůstu sil v závislosti na opotřebenění nástroje a s tím související změně geometrie nástroje. Podle funkční podstaty se dynamometry dělí:

- mechanické – podstata spočívá v měření deformace vyvolané silou působící na pružný element. Měření je možné provádět úchylkoměrem,
- pneumatické – podstatou je měření rozdílu výšky hladin kapaliny způsobené vlivem změny tlaku proudícího plynu v důsledku deformace pružného tělesa, čímž dochází ke změně průřezu vedení plynu,
- hydraulické – podstata spočívá v měření tlaku média vyvolaného zatížením,
- indukční – podstata spočívá v měření změny indukčnosti cívky vyvolané změnou polohy cívky a jádra v souvislosti s deformací pružného elementu,
- kapacitní – u tohoto typu se měří změna kapacity vlivem změny vzdálenosti desek kondenzátoru v souvislosti s deformací pružného členu,
- tenzometrické – podstata spočívá v měření změny elektrického odporu drátu vyvolané jeho deformací v souvislosti s deformací tělesa, jehož povrchem je tenzometr spojen,
- piezoelektrické – podstatou je měření velikosti náboje vzniklého při deformaci piezoelektrického krystalu.

V současnosti jsou pro měření sil při obrábění nejčastěji používány piezoelektrické dynamometry firmy Kistler. Jejich předností je vysoká přesnost měření, velký rozsah měřených hodnot, velká rychlost měření. Velké množství naměřených hodnot relativně ztěžuje jejich zpracování a vyhodnocení. Naměřené hodnoty zachycující změnu i zatížení nástroje v závislosti na změně průřezu třísky, tyto hodnoty rovněž znepřehledňují naměřená data. Tento nedostatek je možné odstranit použitím jednoduchého filtru.

Pro danou aplikaci by bylo možné použít některý z následujících typů dynamometrů:



Obr. 3.1 : Dynamometr Kistler 9123



Obr. 3.2 :Dynamometr Kistler 9257

3.3.3 Měření parametrů obrobeného povrchu

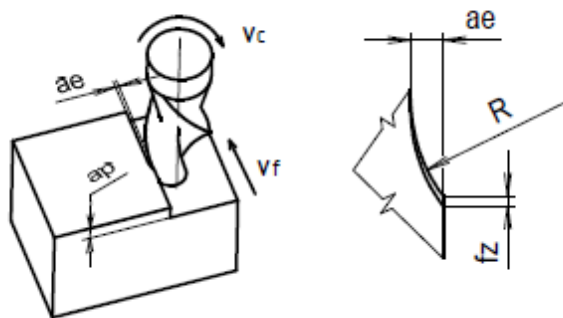
Metoda nepřímého stanovení opotřebení nástroje. Ve strojírenské praxi je určena optimální životnost nástroje v závislosti na drsnosti obrobené plochy a přesnosti obrobených rozměrů. Změna přesnosti obrobených rozměrů je dána změnou průměru nástroje vlivem opotřebení. V souvislosti s rostoucím opotřebením narůstá i drsnost obrobené plochy.

4 EXPERIMENT

Požadavky na řešenou řeznou zkoušku:

- převládající mechanismus opotřebení – abraze (otěr),
- trvanlivost nástroje (doba trvání zkoušky) – cca 30 minut,
- kritérium opotřebení – VB_B = maximálně 0,15mm,
- vysoká citlivost na vlastnosti povlaku,
- průměr nástroje - 10mm,
- počet břitů – 2,
- materiál nástroje – TSM 33,
- metoda vyhodnocení – Optické měření opotřebení pomocí mikroskopu.

Pro řeznou zkoušku bylo zvoleno sousledné frézování při lineárním posuvu stolu stroje. Ze zadání vyplynuly pouze parametry nástroje, průměr a materiál, ostatní parametry obrábění, geometrie nástroje, materiál obrobku a řezné podmínky jsou předmětem provedených zkoušek kromě parametru a_p , který je omezen možnostmi měřicího pracoviště na hodnotu $a_p=2,5\text{mm}$.



Obr. 4.1: Schéma řezného procesu

Při provádění vlastní řezné zkoušky je dodržován následující postup:

- 1) upnutí nástroje
- 2) kontrola upnutí nástroje, měření radiálního házení nástroje
- 3) zakreslení břitů nástroje
- 4) dále se opakuje provedení potřebného počtu řezů, měření opotřebení nástroje a uložení fotografií měření až do dosažení kritéria opotřebení.

Rozměry obrobku stejně jako rozměry nástroje vyplynuly ze zadání resp. ze strojního vybavení a požadavků na provedení zkoušky a měření.

4.1 Zařízení použitá při experimentech

4.1.1 Obráběcí stroj

Experimenty byly provedeny na CNC frézce Fehlmann PICOMAX 60-M vybavené řídicím systémem Heidenhain iTNC 530.



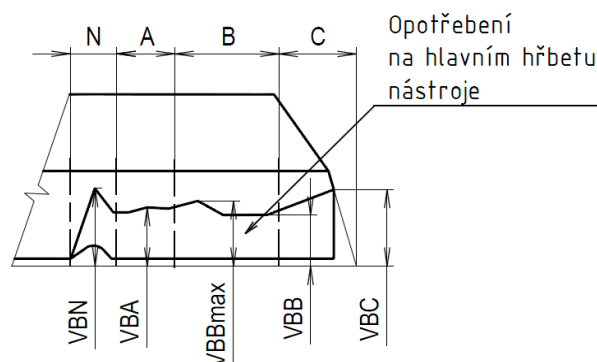
FEHLMANN PICOMAX 60 - M	
Rozsah posuvů [mm]:	
V směru osy X	505
V směru osy Y	355
V směru osy Z	610
Oblast obrábění [mm]:	
Upínací plocha (délka x šířka)	920 x 380
Zdvih vřetena	84 - 694
Vřeteno:	
Výkon [kW]	8,3
Rozsah otáček	50 - 20000
Zásobník nástrojů (pozice)	24
Řídicí systém	
Heidenhain iTNC 530	
Zástavbové rozměry (d x š x v) [m]	
2 x 2 x 2,5	
Hmotnost [kg]	
3200	

Obr. 4.2: Obráběcí stroj ^[10]

4.1.2 Světelný mikroskop

Při měření opotřebení byl použit světelný mikroskop, osazený digitální kamerou. Vlastní měření bylo prováděné na zachycených snímcích bříty pomocí počítače vybaveného měřicím programem.

Podstata měření spočívá v zakreslení charakteristických znaků bříty nástroje tzv. masky podle pořízené fotografie neopotřebovaného bříty. Nakreslené znaky jsou co možná nejvíce vzdáleny aktivní části nástroje, tím je zabezpečena stálost jejich tvaru a tím i přesnost naměřených hodnot opotřebení. Důležité je i přesné zakreslení linie neopotřebovaného bříty, od této čáry je měřena hodnota opotřebení. Dále jsou v masce zakresleny i intervaly pro měření hodnot VB_B , VB_C , VB_N a VB_{Bmax} .

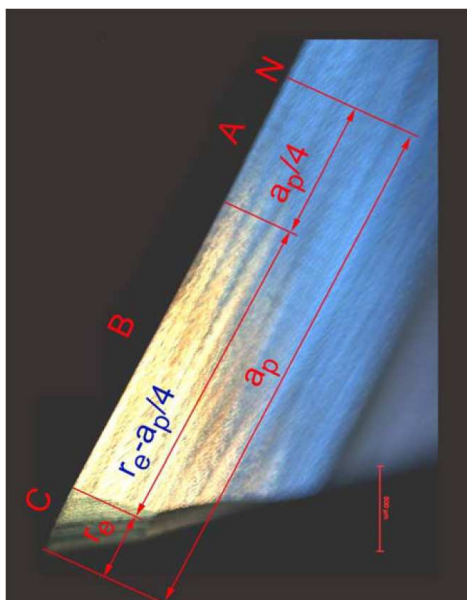


Obr. 4.3: Intervaly a naměřené parametry opotřebení

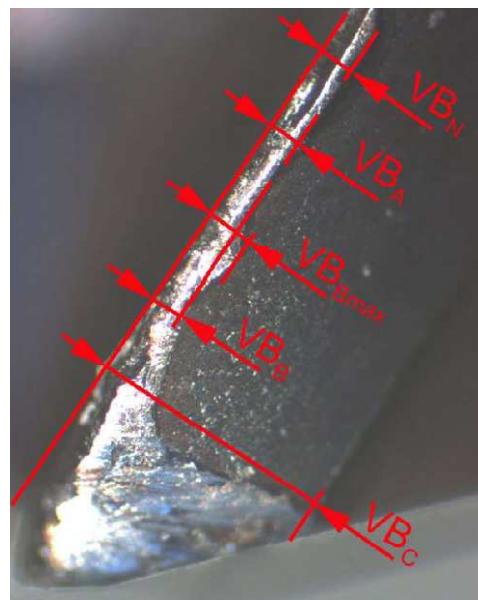
U nástrojů použitých pro konkrétní zkoušku je při správném ustavení nástroje v měřícím přípravku maska shodná pro oba břity. Při zkouškách vícebřitých nástrojů zejména s nerovnoměrným dělením je nutné kreslit masku pro každý břit zvlášť.

Mikroskop byl dále osazen objektivem s pětinasobným zvětšením, tento objektiv jako jediný vyhověl, zejména svými rozměry, následujícím požadavkům:

- zvětšení – při větším zvětšení je snazší identifikovat mechanismy opotřebení a nalézt možné vady nástroje nebo povlaku, s rostoucím zvětšením roste i přesnost měření,
- hloubka ostrosti – břity nástroje jsou umístěny na šroubovici, tím dochází ke změně jejich vzdálenosti od objektivu, což je příčinou různé ostrosti na jednom snímku, hloubka ostrosti klesá s rostoucím zvětšením,
- oblast zachycená na jednom snímku – snahou je zachytit celou měřenou oblast na jednom snímku, to je důležité pro přesné polohování masky a tím i pro přesnost měření, způsob kdy je kvůli velkým hodnotám parametru a_p nutné nástroj měřit na několika snímcích je sice možný, ale polohováním nástroje bez možnosti použití tvaru špičky nástroje k ustavení masky klesá přesnost měření,
- měření nakloněných nástrojů – při sledování opotřebení čela nástroje je nutné, vzhledem k omezené hloubce ostrosti a drážkám nástroje ve šroubovici, nástroj naklonit, což je u některých objektivů znemožněno jejich velikostí (délka, průměr).



Obr. 4.4: Intervaly měření opotřebení



Obr. 4.5: Příklad naměřeného opotřebení



Obr. 4.6: Příklad zakreslené masky neopotřebovaného nástroje

Vlivem polohy břítu na šroubovici v kombinaci s omezenou hloubkou ostrosti objektivu je nutné zobrazenou oblast při polohování nástroje (ustavování masky) a vlastním měření přeastřovat. Tím ovšem zaniká možnost zpětné kontroly naměřených parametrů opotřebení.

4.1.3 Zařízení pro měření radiálního házení nástrojů

Následkem radiálního házení nástroje je nerovnoměrné zatížení jednotlivých břitů nástroje, tím je ovlivněn rozptyl opotřebení břitů. Vzhledem k požadavku na opakovatelnost výsledků zkoušky je nezbytné sledovat a kontrolovat radiální házení břitů nástroje. Jako výsledek zkoušky je použit aritmetický průměr opotřebení nástroje, v případě, kdy jeden z břitů je v důsledku radiálního házení opotřebován výrazně více, ovlivní tak významně výsledek zkoušky a téměř znemožní její opakování. Nadměrné opotřebení jednoho z břitů je rovněž možnou příčinou destrukce nástroje.

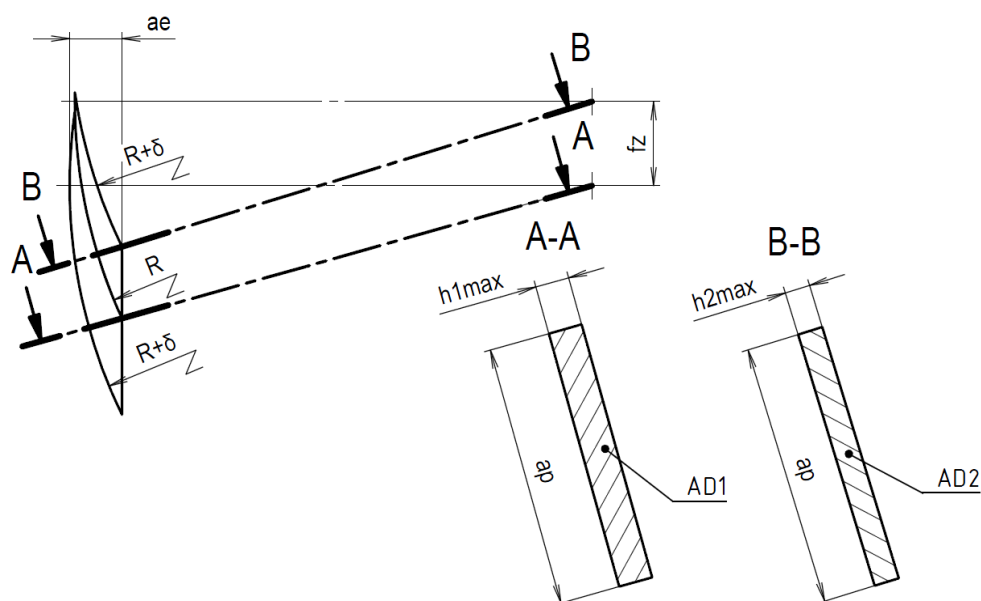


Obr. 4.7: Zařízení pro měření nástrojů Micro Compact NT ^[11]

Pro měření nástrojů je možné použít i zařízení Micro Compact NT. Jedná se o zařízení, které pro měření používá laserový paprsek. Zařízení umožňuje měření nástroje při jakýchkoli otáčkách. Nevýhoda tohoto způsobu měření spočívá v nemožnosti identifikovat jednotlivé břity a tím v nemožnosti zjištění závislosti mezi radiálním házením nástroje a rozptylem opotřebení břitů nástroje.

Při radiálním házení nástrojů dochází vlivem rozdílu poloměrů oběžných kružnic jednotlivých břitů k rozdílu průřezu odebírané třísky. Tento rozdíl je možné procentuálně vyjádřit pomocí vzorce....

$$\Delta = \frac{(fz + \delta) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R - ae}{R}\right)\right) - (fz - \delta) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R - ae}{R}\right)\right)}{(fz + \delta) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R - ae}{R}\right)\right)} \cdot 100[\%]$$



Obr. 4.8: Vliv radiálního házení na průřez třísky

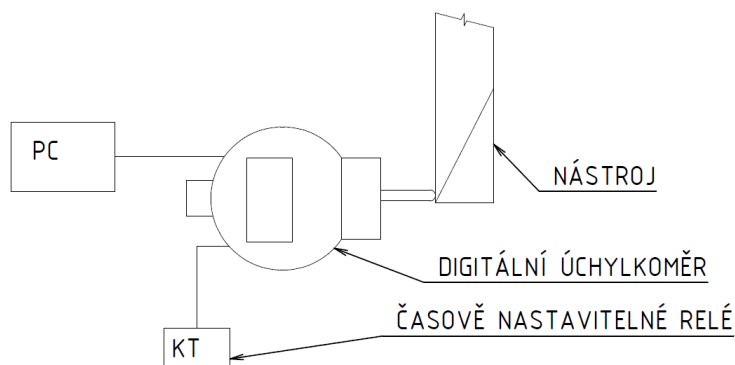
Na výsledném radiálním házení nástroje se nejvíce podílí systém upnutí nástroje. Zpravidla se při frézování stopkovými nástroji jedná o soustavu: Vřeteno stroje (upínací kužel ve stroji) – upínací trn (protikus kužele ve vřeteni stroje) – upínací element – nástroj. K největším chybám upnutí dochází prostřednictvím upínacího elementu.

Z hlediska tuhosti a přesnosti upnutí se jako nejlepší systém upínání jeví tzv. tepelné upínání. Princip spočívá v tepelné roztažnosti upínacího elementu, kdy je zvyšováním teploty zvětšován jeho vnitřní průměr, při následném snižování teploty se tento průměr zmenšuje a upíná stopku nástroje. Výhody tohoto systému jsou zejména v jeho přesnosti, zaručené opakovatelnosti a při použití chladicí jednotky je tento způsob i dostatečně rychlý. Hlavní nevýhodou a zvláště potom v konkrétním případě použití stroje Fehlmann Picomax 60-M, u něhož je pracovní vřeteno standardně osazeno kuželem ISO SK 30, jsou vysoké náklady na zařízení.

Dalším možným způsobem je systém hydraulického upínání. Podstata tohoto způsobu spočívá v deformaci pružného upínacího elementu působením hydrostatického tlaku. Působením tlaku dojde k zvětšení vnitřního průměru upínacího elementu, při následném snížení tlaku dojde ke zmenšení vnitřního průměru upínacího pružného elementu a tím k upnutí nástroje.

V konkrétním případě byl použit systém upnutí pomocí kleštiny. Z hlediska přesnosti upnutí se jedná o nejméně přesný způsob. Vzhledem k opakovatelnosti zkoušky je nutné neustále kontrolovat výsledné házení upnutých nástrojů. Dalším problematickým aspektem je stanovení trvanlivosti upínací kleštiny, u níž přesnost a spolehlivost upnutí s časem a počtem provedených upnutí klesá.

Pro měření radiálního házení nástrojů byl použit digitální úchylkoměr. Data jsou přenášena do počítače, kde je pomocí tabulkového procesoru provedeno jejich vyhodnocení a výpočet hodnoty radiálního házení. Měřicí sestava je dále doplněna o časově nastavitelné relé, protože použitý digitální úchylkoměr je schopen odesílat data pouze při sepnutí spínače, nikoli kontinuálně, jak to umožňují novější typy.



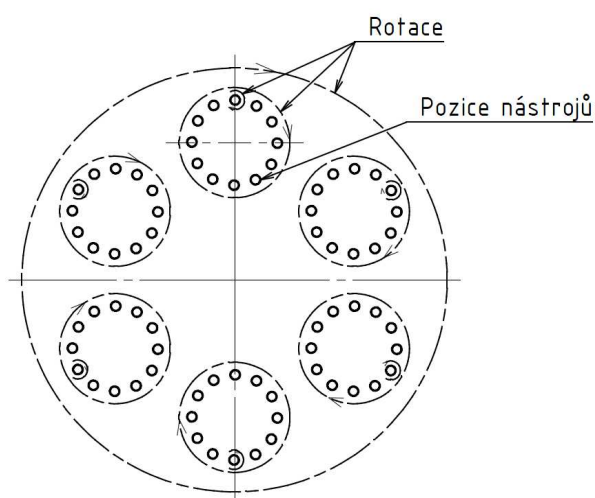
Obr. 4.9 : Schéma sestavy měření

Postup měření

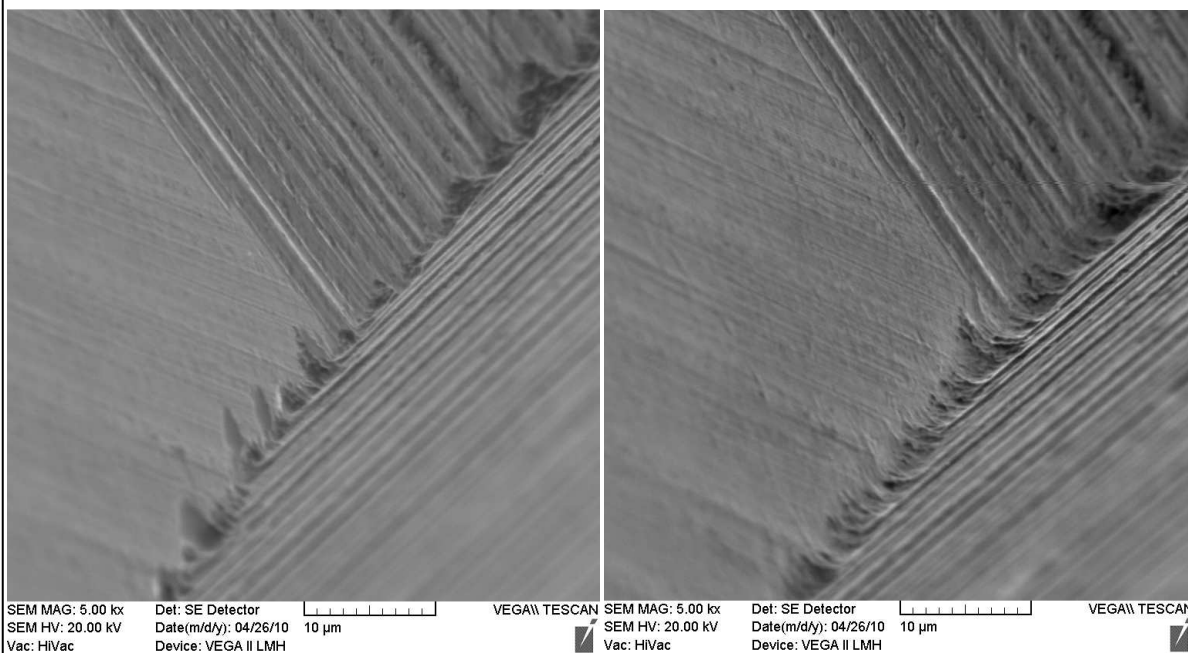
V prvním kroku je upnut upínací kužel s upnutým nástrojem do vřetene stroje. Na pracovní stůl stroje je, do vhodné polohy, pomocí magnetického ramene upnuto měřidlo. Pracovní stůl stroje je nastaven do správné polohy (aktivní část měřidla se kolmo dotýká stopky nástroje), v této poloze je provedeno vynulování měřidla. Provedení kontrolního měření stopky nástroje (odpovídá vyložení nástroje, z upínací kleštiny, přibližně 5mm). Vřeteno stroje resp. špička nástroje je napolohována vzhledem k měřidlu (oblast měření je 1-3mm od špičky nástroje). Po nastavení měřidla do pracovní polohy a sepnutí spínače časově nastavitelného relé, dochází k přenosu aktuálních naměřených hodnot do tabulkového procesoru v počítači (relé je nastaveno na 0,1s impulsy, z toho plyne, že počítač zaznamenává 5 hodnot za sekundu), v této fázi obsluha ručně otáčí nástrojem. Měření je prováděno pětikrát na každém břitu nástroje. V tabulkovém procesoru počítače je provedeno vyhodnocení získaných dat, to spočívá, ve stanovení minimálních odchylek jednotlivých břitů a vypočítání jejich rozdílu v každé sadě měření, jako výsledná hodnota radiálního házení nástroje je použit aritmetický průměr rozdílu z naměřených sad.

4.1.4 Zařízení pro úpravu břitů před povlakováním

Pro nástroje používané při řezných zkouškách byla zvolena technologie úpravy břitu před povlakováním omíláním v granulátu. Omílání je prováděno na zařízení OTEC. Při omílání jsou nástroje upnuty v upínací části stroje, tvořené planetovým soukolím, čímž je docíleno pohybu nástrojů v granulátu znázorněném na obr..... Parametry omílání, jako je velikost zrn granulátu, čas omílání a směr rotace byly stanoveny takto, čas omílání 30s, použitý granulát byla směs drcených skořápek vlašských ořechů o velikosti zrn H1/300 [mesh] (jednotka velikosti zrn udává počet otvorů třídícího síta granulátu na jeden čtverečný palec, v tomto konkrétním případě se tedy jedná o 300 otvorů na ploše přibližně 645,2mm²).



Obr. 4.10 : Schéma pohybu nástrojů v zařízení OTEC



Obr. 4.11 : SEM snímky brusu nástrojů před a po provedeném omílání

4.2 Provedené experimenty

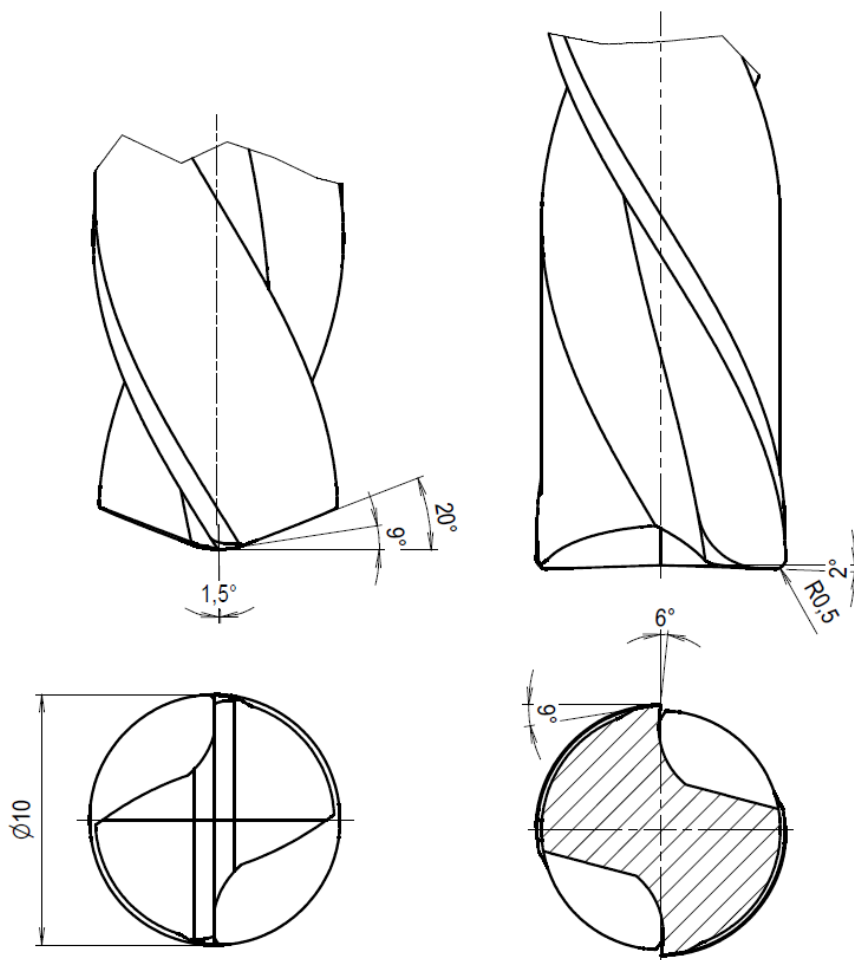
Bylo provedeno několik experimentů, jejichž účelem bylo stanovení geometrie nástroje, materiálu obrobku a jeho případného tepelného zpracování. Tomuto odpovídá uvedení výsledků zkoušek.

4.2.1 Volba materiálu obrobku

V první fázi byly experimenty zaměřeny na volbu materiálu obrobku a případné tepelné zpracování. Bylo provedeno několik zkoušek, povlakovanými nástroji, jejichž účelem bylo ověřit vývoj opotřebení břitů při obrábění vybraných materiálů (viz.kapitola 2).

Experimenty v této části byly provedeny za použití nástrojů, u kterých v minulosti docházelo k nežádoucímu opotřebení špičky nástroje, při zkouškách různých materiálů byl vyhodnocován i tento jev.

Použitá geometrie nástroje (dále jen geometrie 1):

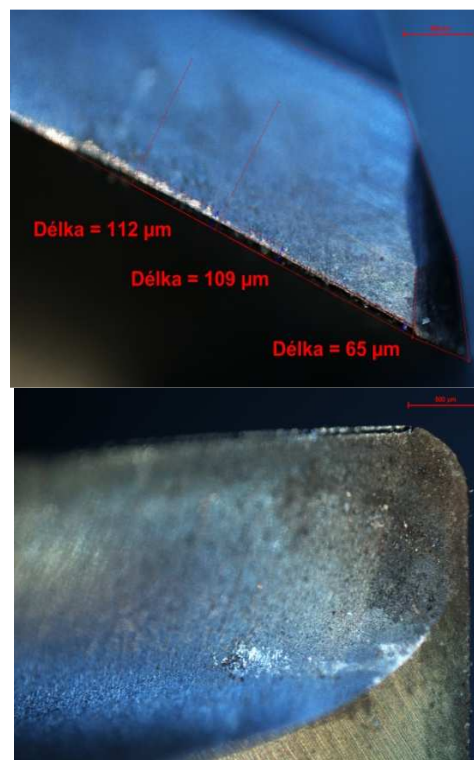
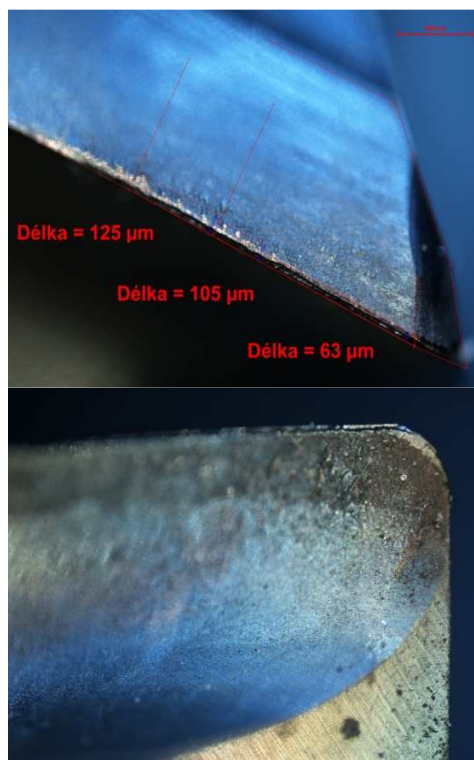
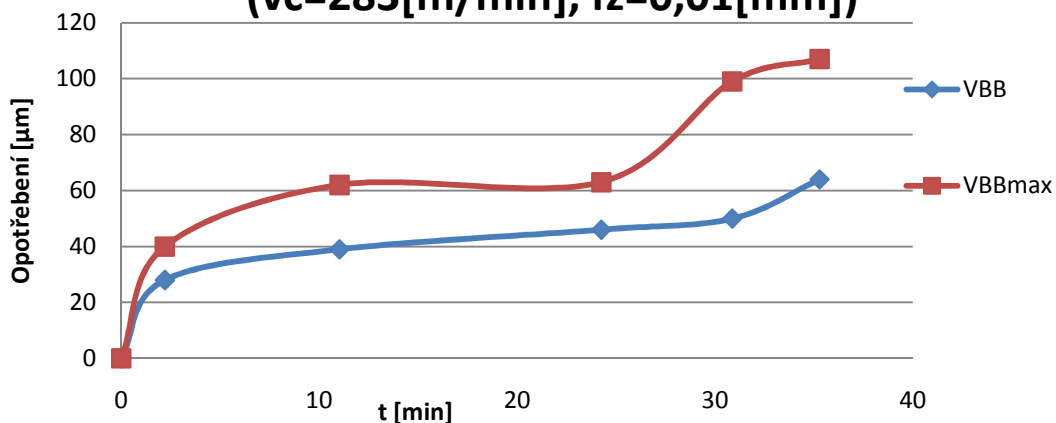


Obr. 4.12 : Geometrie číslo 1

ČSN 12 050.9

ČSN 12 050.1

(vc=283[m/min], fz=0,01[mm])

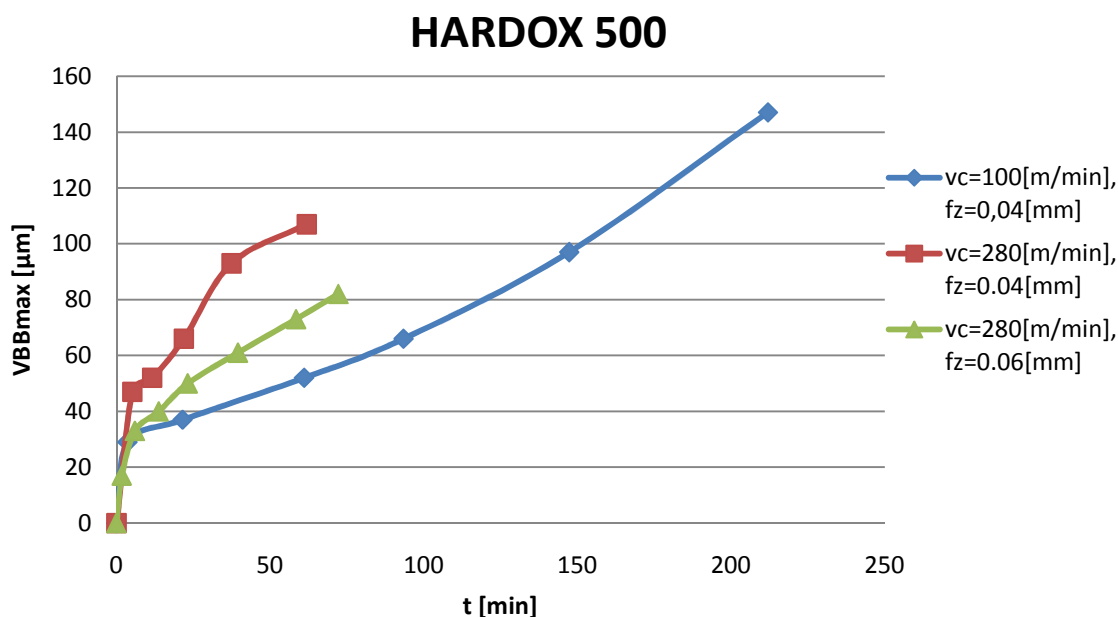
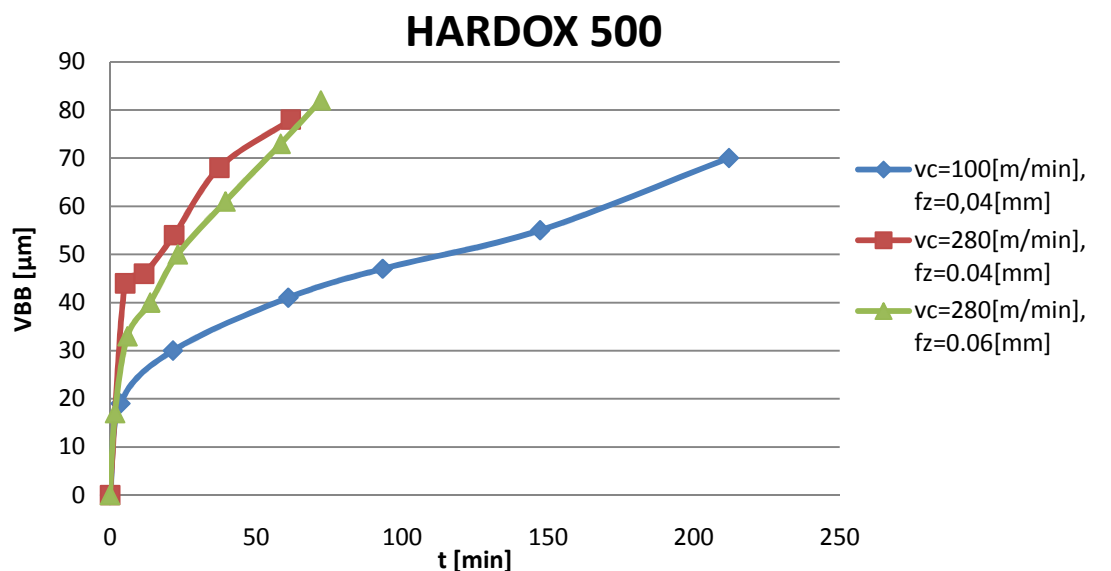


Obr. 4.13 :Výsledek zkoušky provedené na materiálu ČSN 12 050.1

Průběh opotřebení nástroje při obrábění materiálu ČSN 12 050.1 nevyhovuje požadavkům na zkoušku. Vzhledem k dobré obrobitelnosti materiálu byly podmínky obrábění nastaveny tak, aby docházelo k velkému tepelnému zatížení nástroje, čímž mělo dojít k vyšší intenzitě opotřebení. Z grafu je patrné, že pro dosažení kritéria $VB_B=150 \mu m$ by bylo nutné překročit limitní hodnotu pro dobu trvání zkoušky do 30 minut. Vzhledem k relativně nízké tvrdosti a zvolenému parametru $f_z=0,01$ je obrázku dosaženého opotřebení zřejmé, že nedošlo k nevyhovujícímu opotřebení špičky nástroje.

S přihlédnutím k obtížnému dosažení rovnoměrnosti struktury oproti nástrojovým ocelím byl materiál z dalších zkoušek vyřazen jako nevyhovující.

HARDOX 500

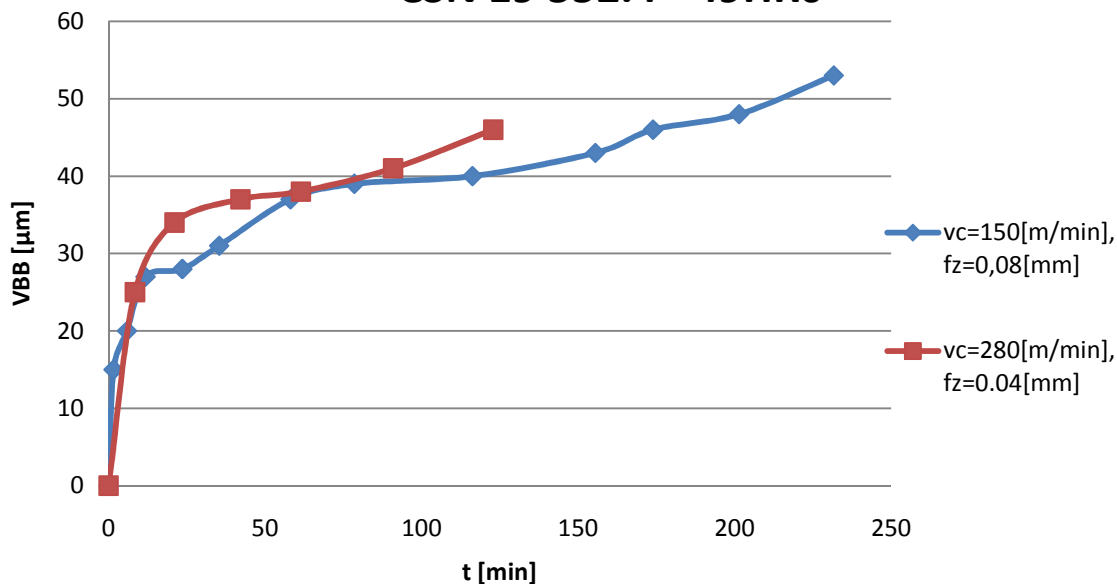
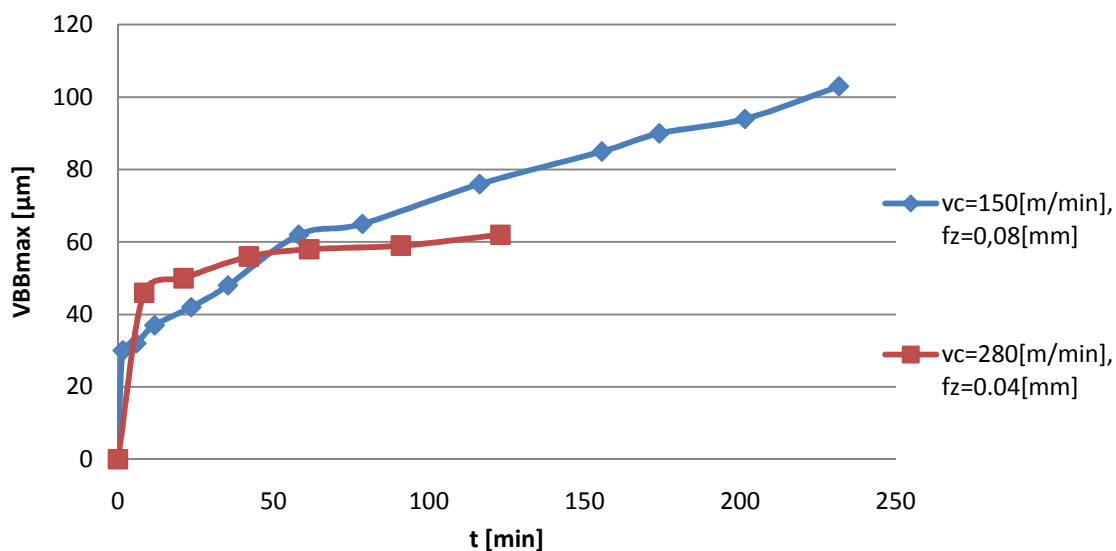


Obr. 4.14: Výsledky zkoušek provedených na materiálu HARDOX 500

Z grafů je patrné, že materiál HARDOX 500 nevyhovuje požadavku na maximální délku zkoušky. Dominantním opotřebením, kterého bylo dosaženo při zkoušce, bylo opotřebení hřbetu nástroje formou abrazivního otěru. I přes vysokou tvrdost obráběného materiálu HB=500 nedocházelo k opotřebení čela nástroje formou vyštipování, které je nežádoucí.

Materiál byl vyhodnocen jako nevyhovující.

ČSN 19 552.3 – 49HRc

ČSN 19 552.4 - 49HRc**ČSN 19 552.4 - 49HRc**

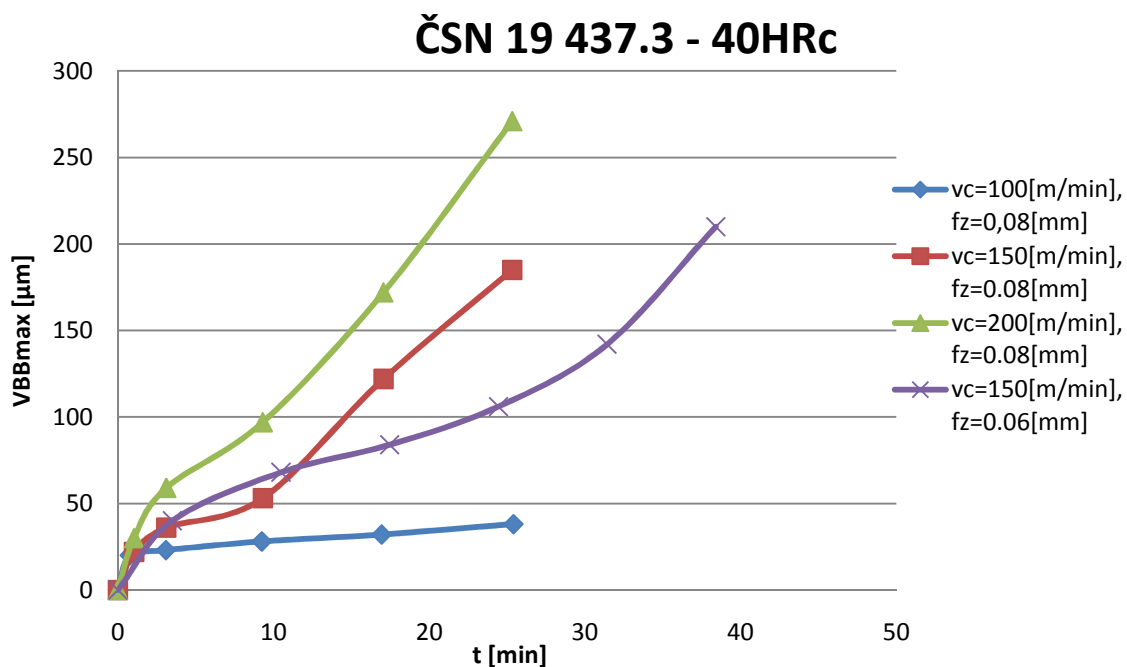
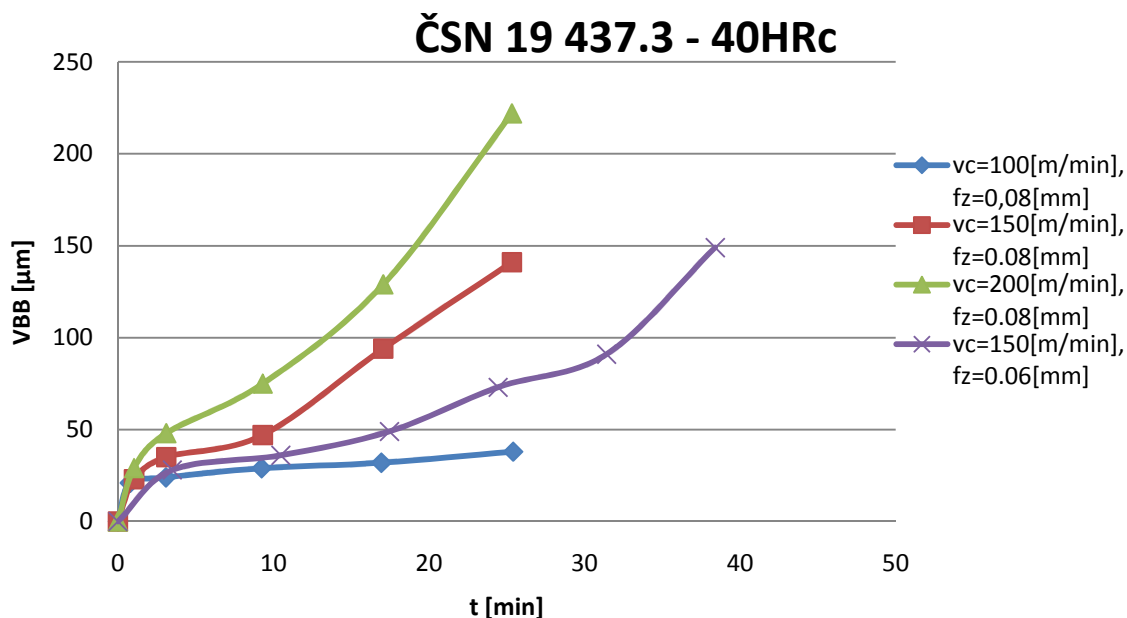
Obr. 4.15: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 552.4 – 49HRc

I přes relativně vysokou tvrdost nedošlo při obrábění materiálu k nevhodnému opotřebení špičky nástroje. Průběh opotřebení nástroje při obrábění vykazuje pomalý nárůst s malým vlivem řezné rychlosti a z toho plynoucí dlouhý čas potřebný k dosažení stanoveného opotřebení.

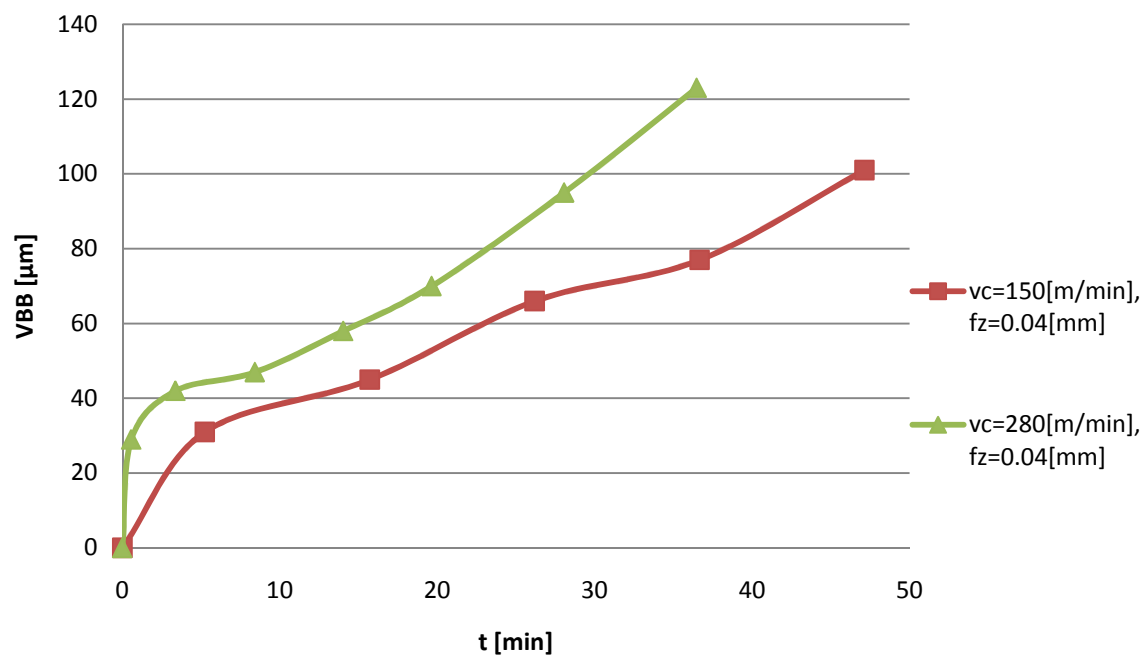
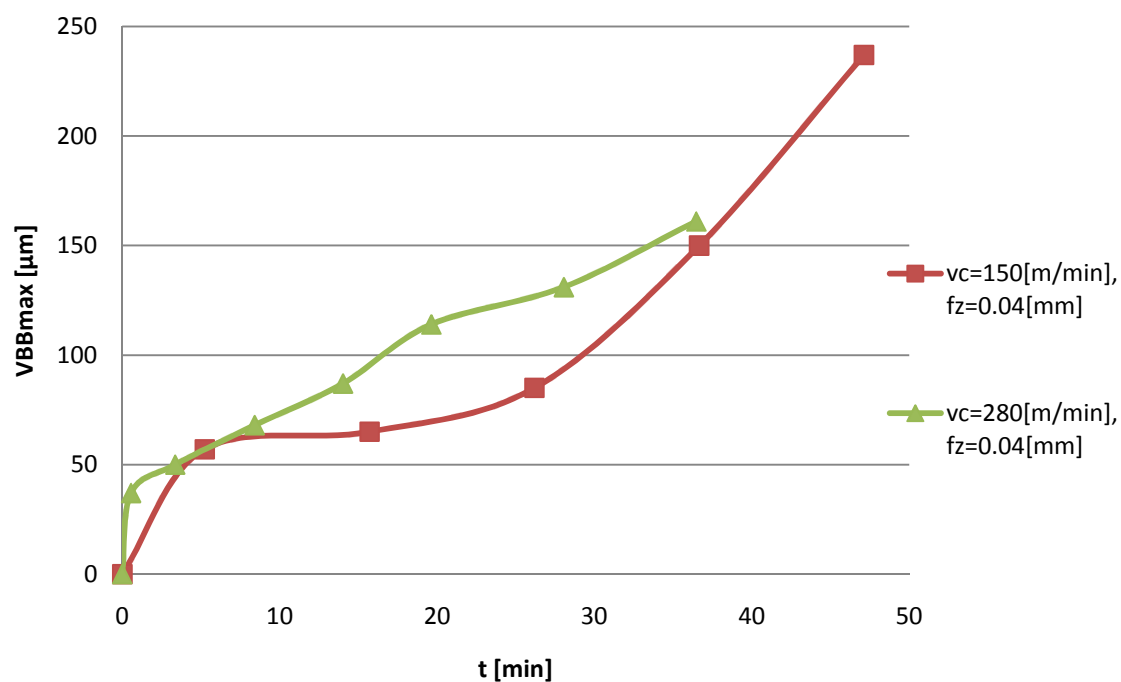
Materiál, byl tak jako předchozí, vyhodnocen jako nevyhovující.

ČSN 19 437.3 – 40 HRC

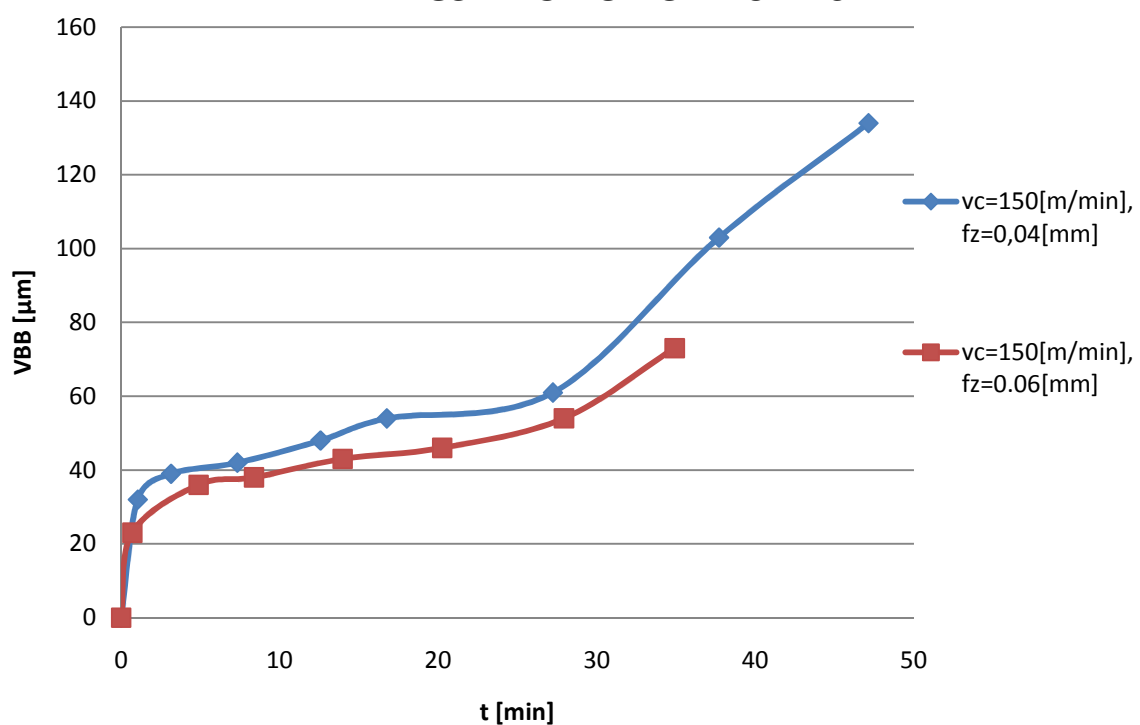
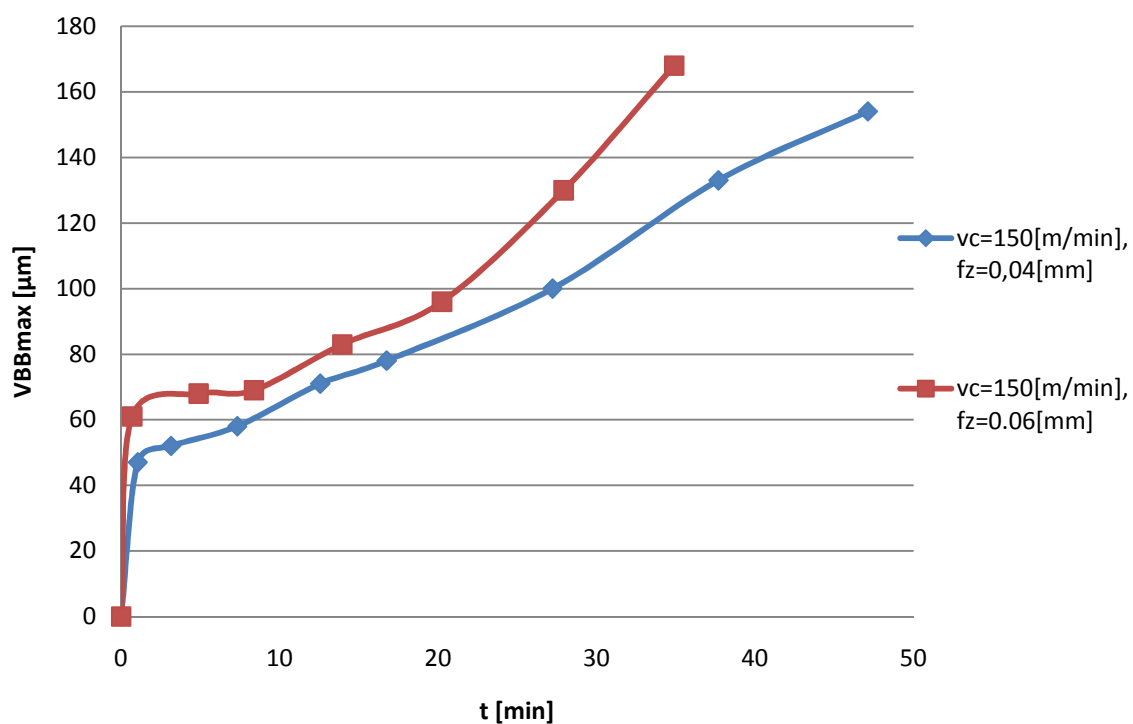
Vzhledem k tomu, že materiál ČSN 19 437.3 – 40HRC byl vyhodnocen jako vhodný materiál polotovaru pro řeznou zkoušku bylo již v této fázi, zároveň s ověřením vlivu jednotlivých parametrů, vykonáno několik zkoušek jejichž účelem je optimalizace řezných podmínek.



Obr. 4.16: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3

ČSN 19 437.3 - 40HRc**ČSN 19 437.3 - 40HRc**

Obr. 4.17 : Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3

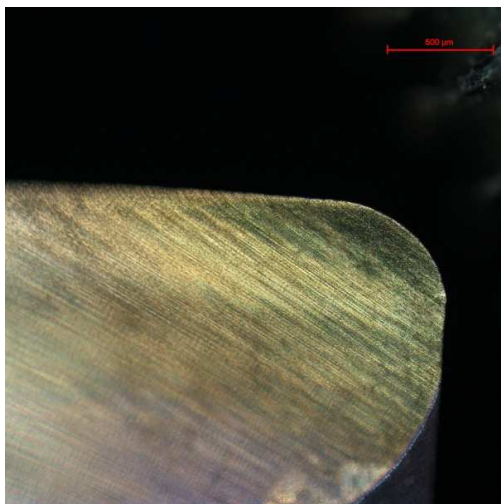
ČSN 19 437.3 - 40HRc**ČSN 19 437.3 - 40HRc**

Obr 4.18: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3

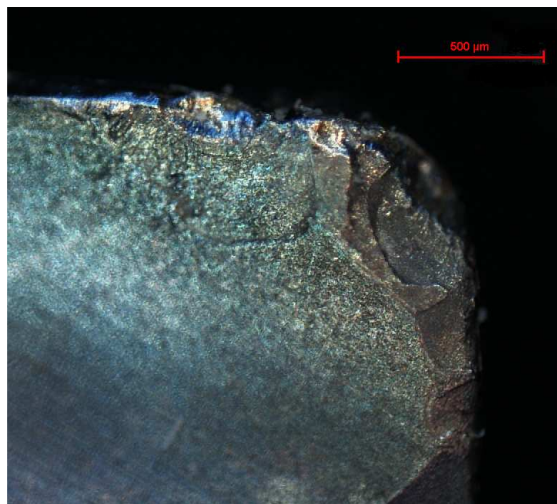
Materiál ČSN 19 437 byl na základě provedených zkoušek vyhodnocen jako vyhovující. Na rozdíl od ostatních testovaných je možné volbou podmínek obrábění dosáhnout kritéria opotřebení $VB_B=150\mu\text{m}$ v požadovaném čase.

V průběhu zkoušek provedených na oceli ČSN 19 437.3 byla ověřena vyšší citlivost průběhu a intenzity opotřebení na změnu parametrů obrábění než u ostatních zkoušených materiálů. Vliv řezné rychlosti na intenzitu opotřebení narůstá s rostoucím posuvem. Snížením parametru f_z , došlo ke snížení zatížení nástroje, čímž se podařilo eliminovat nevyhovující opotřebení špičky nástroje. Tvrdost materiálu, který je v praxi většinou používán s tvrdostí vyšší než je tvrdost zkoušeného obrobku je předmětem dalších provedených zkoušek.

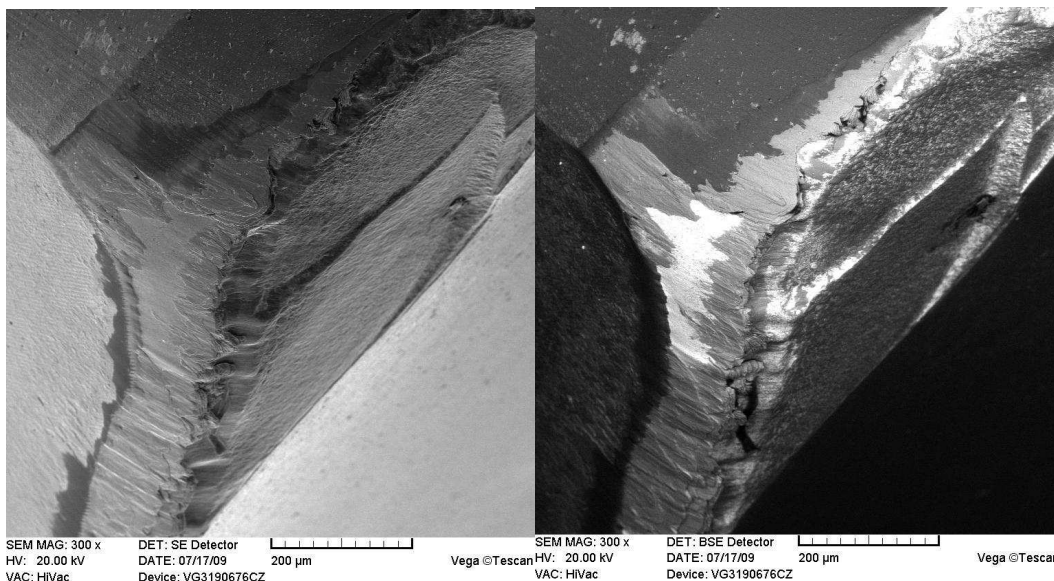
Při zkouškách docházelo v závislosti na velikosti parametru f_z , zejména při $f_z=0,08$, k nevyhovujícímu opotřebení špičky nástroje. Z tohoto důvodu by pro tento posuv bylo nutné změnit geometrii nástroje.



Obr. 4.20: Původní tvar čela nástroje



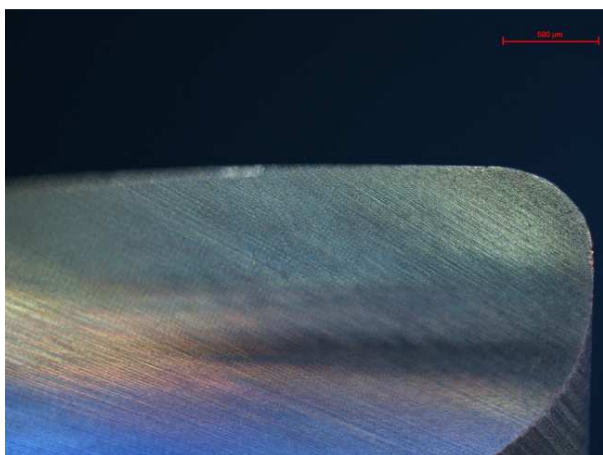
Obr. 4.21: Nevhodná forma opotřebení čela



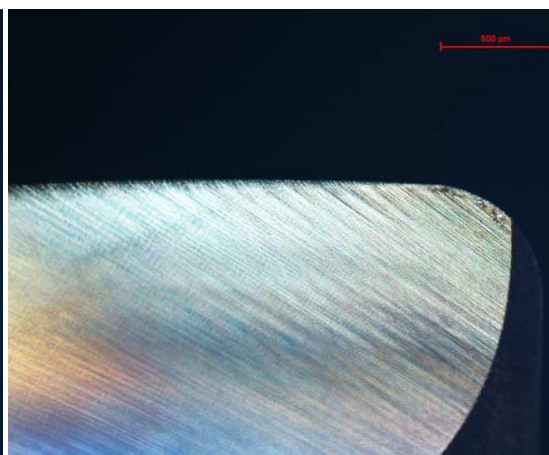
Obr. 4.22: SEM snímky nevhodného opotřebení čela nástroje

4.2.2 Volba geometrie nástroje

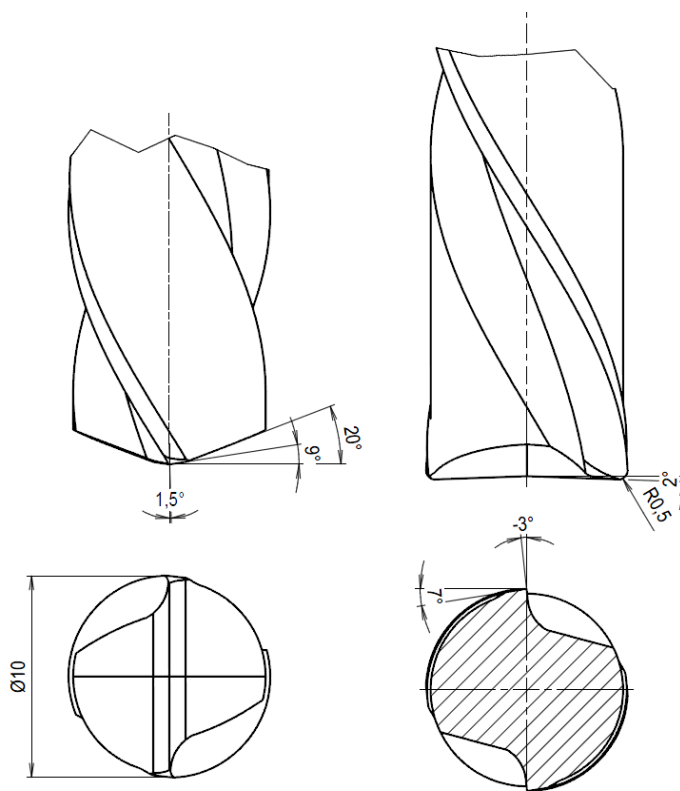
Při výběru optimální geometrie nástroje bylo zvažováno několik variant. Jejich rozdíly nebyly pouze v různých velikostech úhlů, ale byly uvažovány i dvě varianty lišící se tvarem špičky na čele nástroje. Tento rozdíl vyplynul z možnosti, že při zkoušce bude obráběn materiál o tvrdosti 60 HRC. U tohoto materiálu v minulosti docházelo k nadměrnému opotřebení špičky formou vylamování šupin slinutého karbidu.



Obr. 4.23 : Tvar čela geometrií 1 a 2

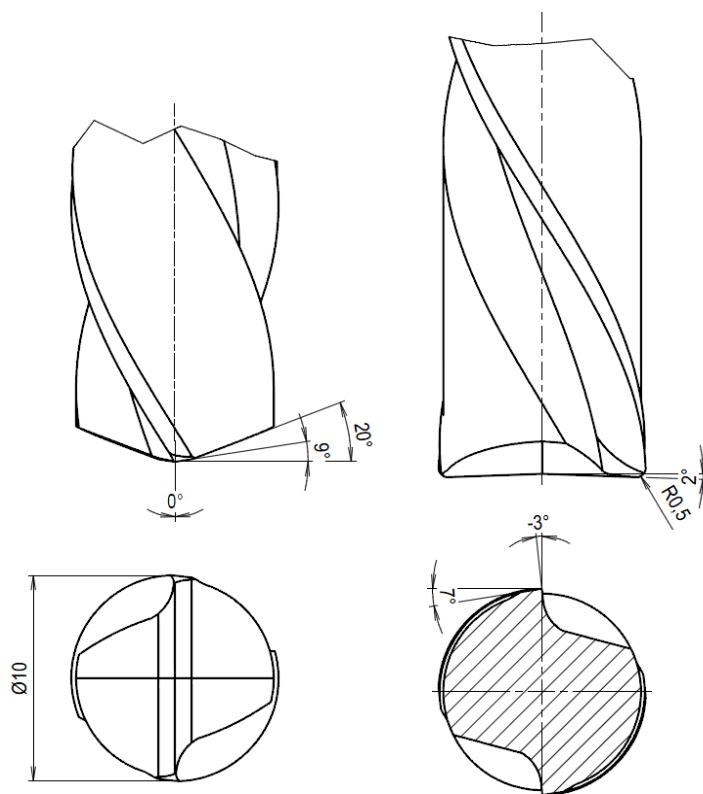


Obr. 4.24 : Tvar čela geometrií 3 a 4

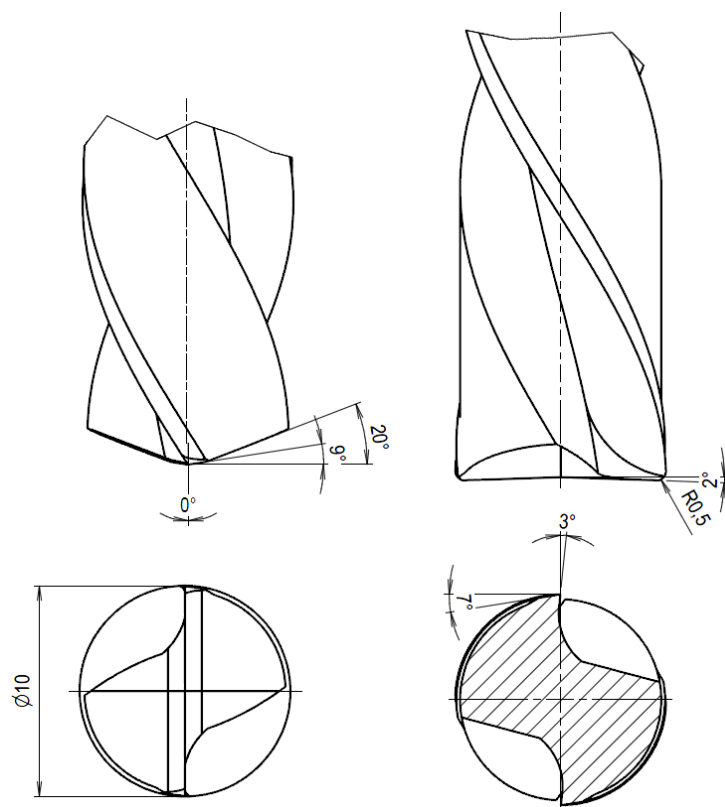


Obr. 4.25: Geometrie číslo 2

U geometrií číslo 3 a 4 byla navržena změna tvaru vedlejšího čela.



Obr. 4.26 : Geometrie číslo 3

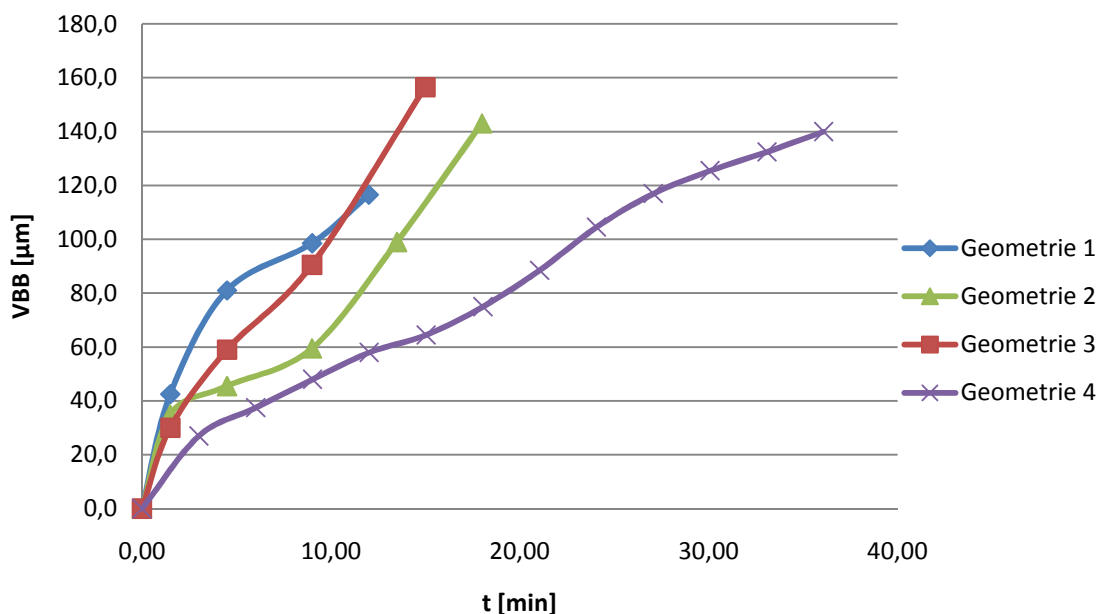


Obr. 4.27: Geometrie číslo 4

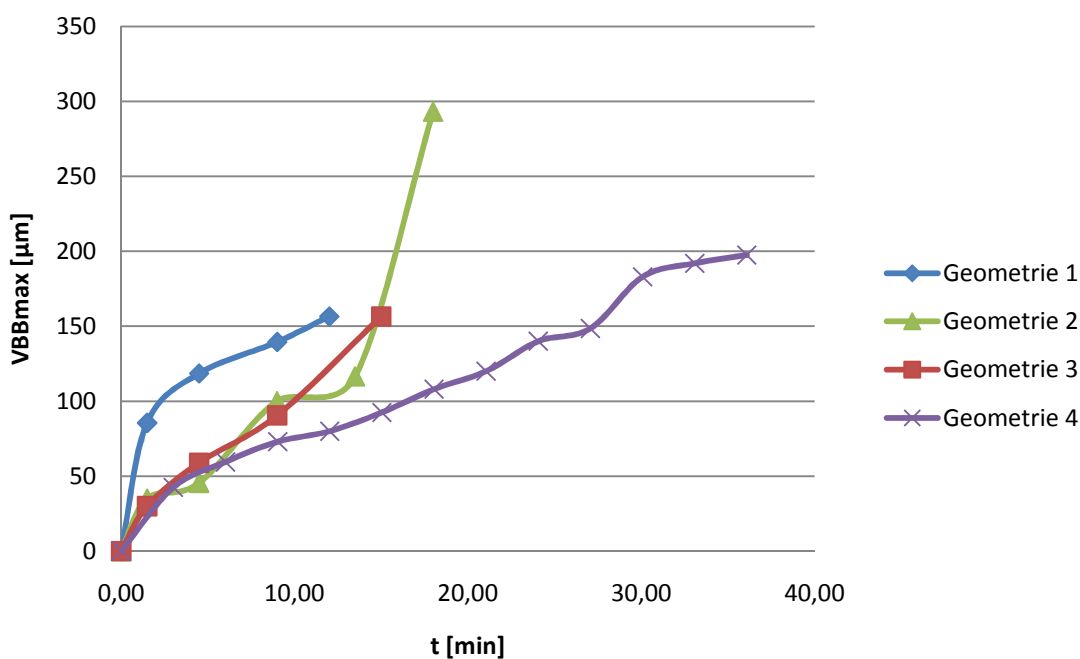
Další zkoušky budou prováděny pouze na materiálu ČSN 19 437.3 - 40 resp. 60HRC. Jejich účelem je volba vhodné geometrie nástroje a stanovení podmínek obrábění.

Zkoušky provedené na materiálu ČSN 19 437.3 – 60 HRC

$vc=100[m/min]$, $fz=0,04[mm]$

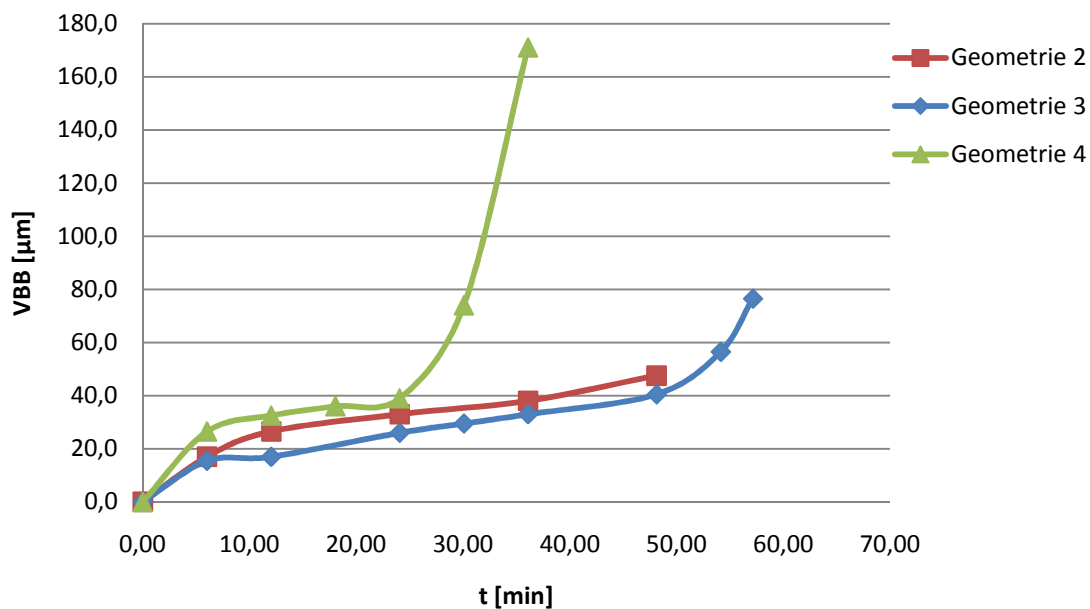


$vc=100[m/min]$, $fz=0,04[mm]$

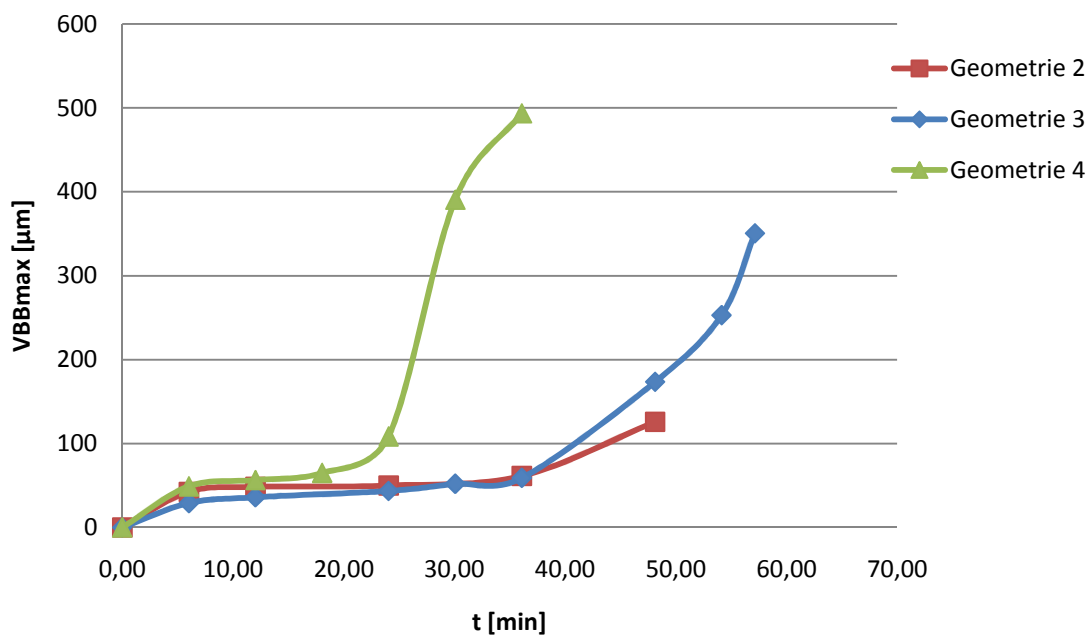


Obr. 4.28: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC

**ČSN 19 437.3 - 60HRC: $v_c=50[m/min]$,
 $f_z=0,04[mm]$**

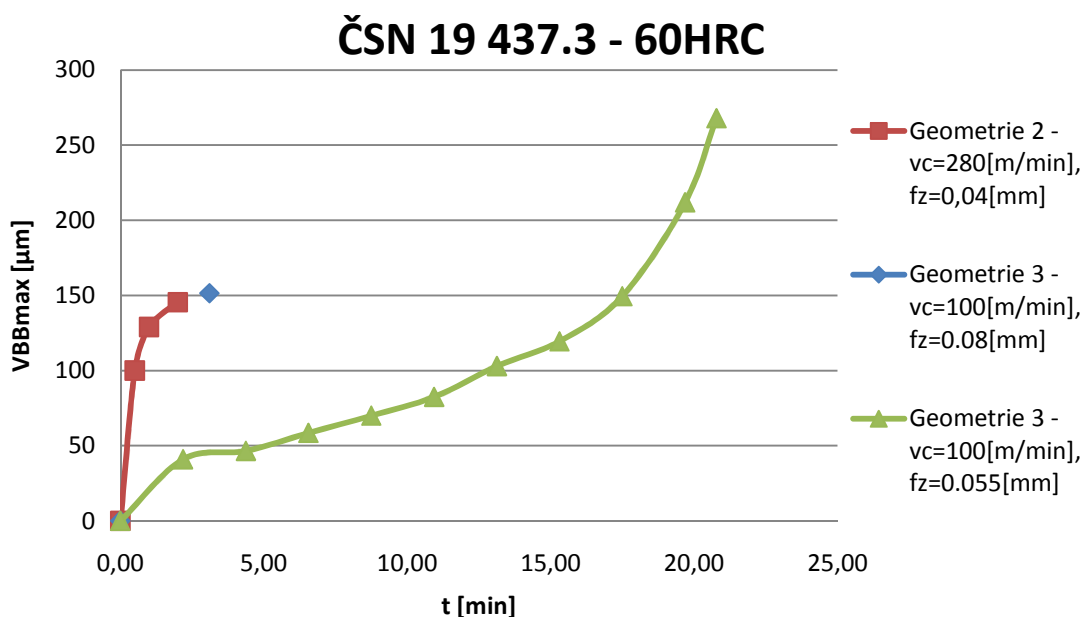
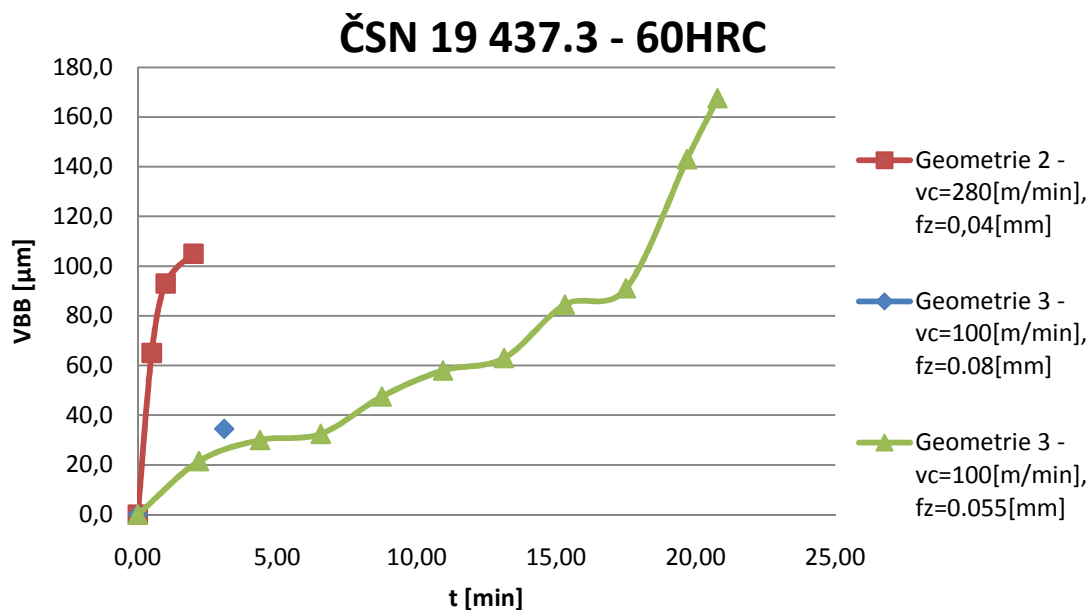


**ČSN 19 437.3 - 60HRC: $v_c=50[m/min]$,
 $f_z=0,04[mm]$**



Obr. 4.29: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC

Dále byly provedeny zkoušky vybraných geometrií nástrojů pro různé řezné rychlosti a parametry fz.

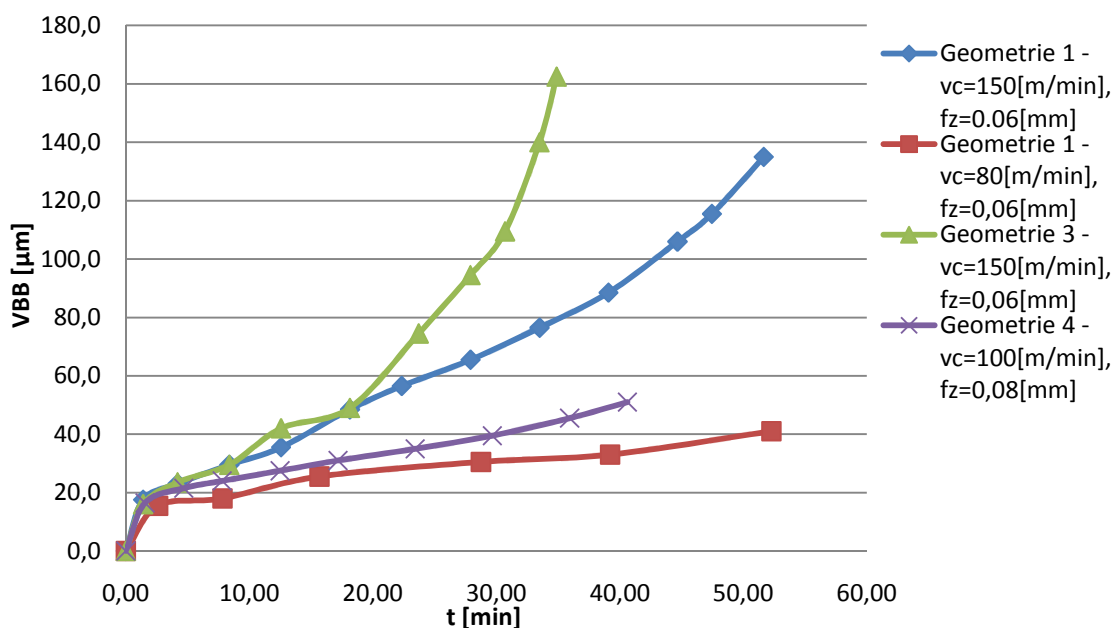


Obr. 4.30: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 60HRC

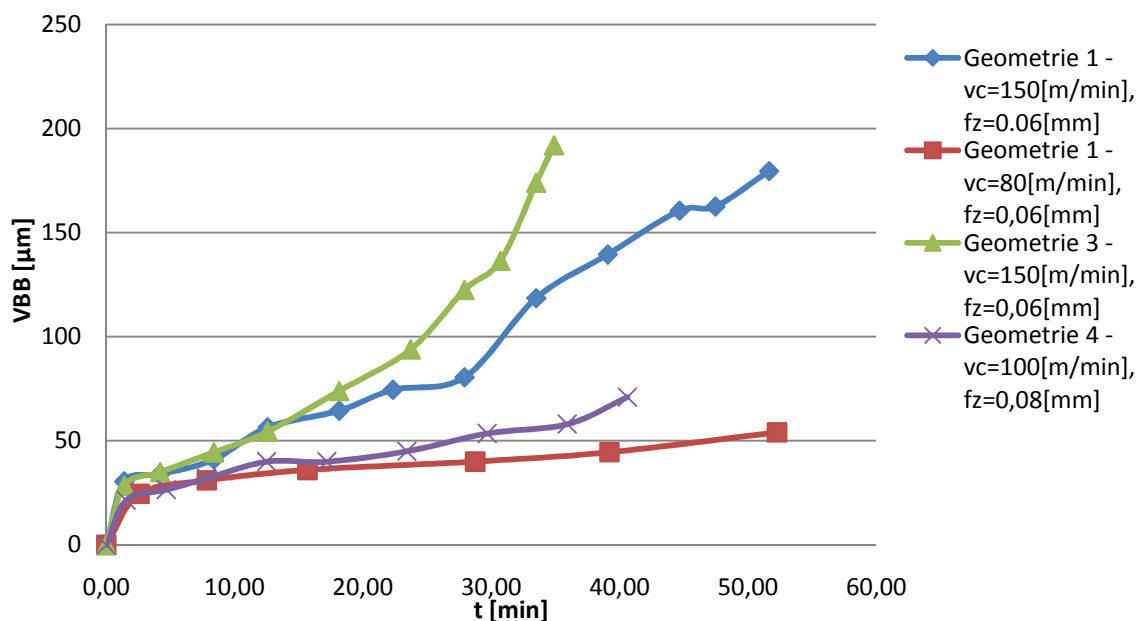
Z provedených zkoušek při rychlostech $vc=50\text{m/min}$ a $vc=100\text{m/min}$ je možné sestavit graf závislosti trvanlivosti nástroje na řezné rychlosti pro jednotlivé geometrie. Z této závislosti je možné vycházet při stanovování optimální řezné rychlosti. Touto metodou stanovené podmínky obrábění je však vždy nutné ověřit experimentem.

Při zkouškách na materiálu ČSN 19 437.3 – 60HRC docházelo k nadměrnému opotřebení špičky nástroje. Při nízké řezné rychlosti $vc=50$ m/min došlo k velkému lokálnímu opotřebení VB_{Bmax} . Z těchto důvodů bylo přikročeno ke zkouškám materiálu s nižší tvrdostí ČSN 19 437.3 – 40HRC.

ČSN 19 437.3 - 40HRC



ČSN 19 437.3 - 40HRC



Obr. 4.31: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC

Geometrie 4 (ČSN 19 437 – 40 HRC)

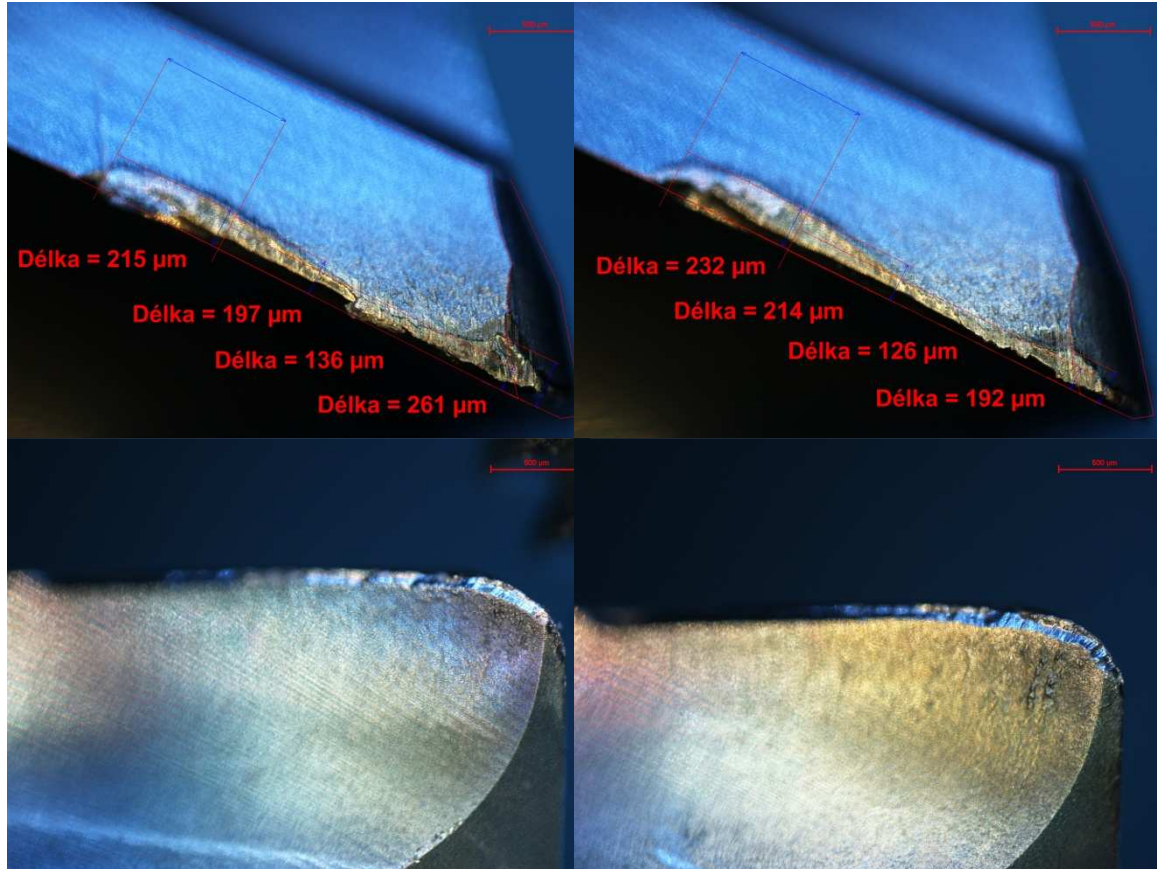
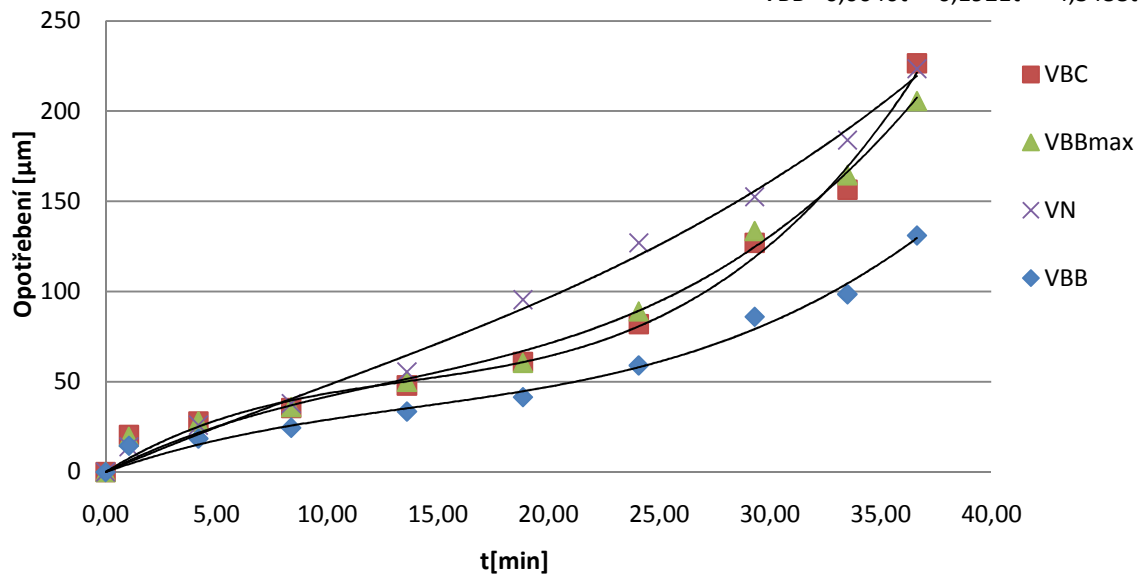
ČSN 19 437.3 - 40HRC
vc=150[m/min], fz=0,08[mm]

$$VN = 0,0025t^3 - 0,0701t^2 + 5,2466t$$

$$VBB_{max} = 0,0071t^3 - 0,2738t^2 + 6,2095t$$

$$VBC = 0,0107t^3 - 0,434t^2 + 7,623t$$

$$VBB = 0,0046t^3 - 0,1921t^2 + 4,3488t$$



Obr. 4.32: Dosažené opotřebení

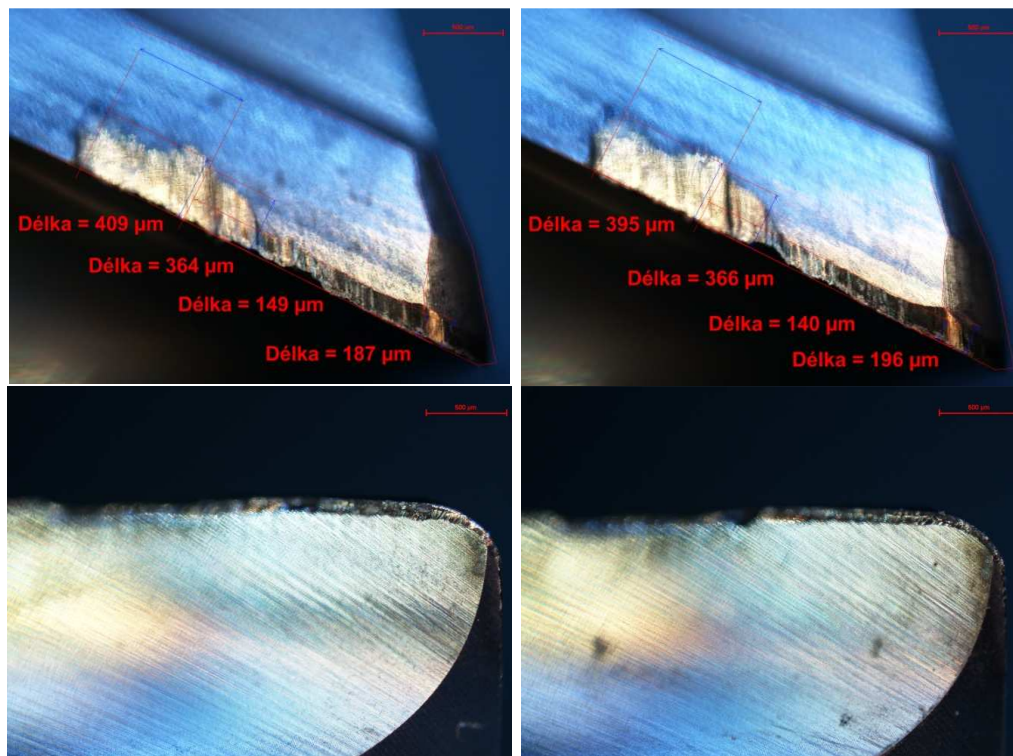
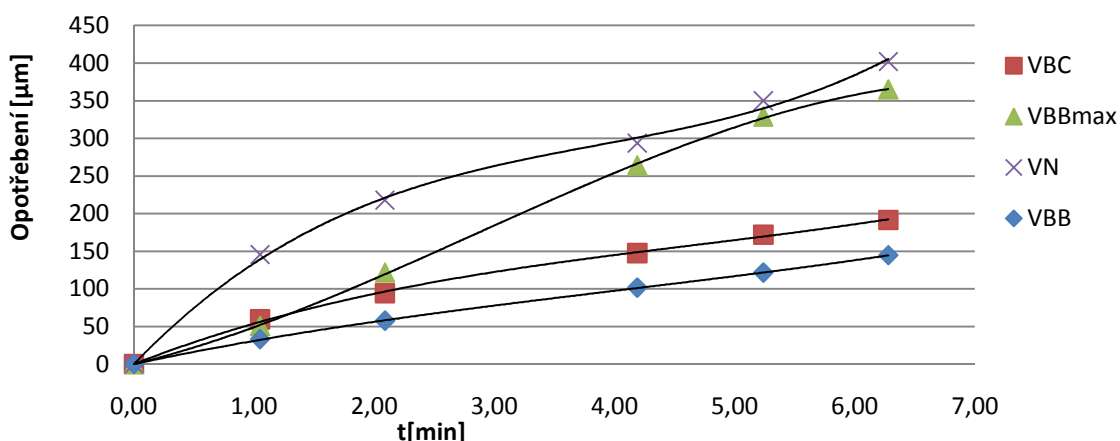
S přihlédnutím k výsledkům provedených zkoušek, průběhu opotřebení a dosažené intenzity opotřebení byla jako optimální geometrie nástroje pro řezné zkoušky vybrána geometrie číslo 4.

Po provedení volby geometrie nástroje, materiálu zkušebního obrobku a parametrů obrábění na základě provedených zkoušek povlakovaných nástrojů je nutné provést zkoušku nepovlakovaného nástroje. Díky výsledkům této zkoušky je možné provést porovnání trvanlivosti a tím určit míru citlivosti zkoušky na vlastnosti povlaku.

Geometrie 4 (ČSN 19 437 – 40 HRC)

ČSN 19 437.3 - 40HRC
vc=150[m/min], fz=0,08[mm]

$$\begin{aligned} VN &= 3,028t^3 - 35,162t^2 + 165,98t \\ VBB_{\max} &= -1,3502t^3 + 11,559t^2 + 38,877t \\ VBB &= 0,3004t^3 - 3,6772t^2 + 34,252t \\ VBC &= 0,6509t^3 - 9,1376t^2 + 62,362t \end{aligned}$$



Obr 4.33: Dosažené opotřebení

5 SHRUTÍ EXPERIMENTŮ

Vybraný materiál zkušebních obrobků ČSN 19 437.3 – 40 HRC umožňuje volbou vhodných parametrů obrábění dosáhnout požadované hodnoty a formy opotřebení ve vyhovujícím čase.

Jako optimální geometrie nástroje pro řeznou zkoušku byla na základě provedených zkoušek zvolena geometrie označená číslem 4. Intenzita a průběh opotřebení vyhovuje požadavkům na řeznou zkoušku.

Jako optimální parametry řezné zkoušky byla zvolena řezná rychlost $v_c=150\text{m/min}$ a posuv na zub $f_z=0,08\text{mm}$. Tomu odpovídají, na stroji programované hodnoty, otáčky $n=4775\text{min}^{-1}$ a posuvová rychlost $v_f=764\text{mm/min}$.

Jako hodnota pomocí níž je možné kvantifikovat výsledky dosažené při řezné zkoušce, byla zvolena trvanlivost nástroje odpovídající opotřebení břitu $VB_B=120\mu\text{m}$. Trvanlivost nástroje povlakovaného zvoleným druhem PVD tenké vrstvy je za daných podmínek $T(VB_B=120\mu\text{m})=35,6\text{min}$. Trvanlivost nepovlakovaného nástroje za stejných podmínek je $T(VB_B=120\mu\text{m})=5,2\text{min}$.

Z dosažených hodnot je patrné zvýšení trvanlivosti povlakovaného nástroje na přibližně 7mi násobek trvanlivosti nepovlakovaného nástroje v dané aplikaci a za daných podmínek. Z rozdílu trvanlivostí je zřejmé splnění požadavku na citlivost řezné zkoušky na vlastnosti povlaku.

ZÁVĚR

Z provedených experimentů vyplynuly optimalizované parametry řezné zkoušky. Z výsledků je patrné, že byly dodrženy požadavky ze zadání. Je třeba provést sérii zkoušek pro ověření výsledků při použití různých druhů povlaků. Pro experimenty byl zvolen pouze jeden povlak z důvodu minimalizace vstupních proměnných parametrů.

Pro další provádění řezných zkoušek v požadovaném měřítku, jak pro průběžnou kontrolu přípravy povlaků, tak pro účely výzkumu a vývoje je nezbytné zajistit dostatečné množství nástrojů a zkušebních obrobků. V průběhu provádění experimentů byla zjištěna možnost nákupu zkušebního materiálu v množství, které by zajistilo zadavateli zásobu na přibližně 3 roky. Z ekonomického hlediska se nejedná o optimální postup, i když v případě nákupu tak velkého množství je kalkulovaná cena nižší než v případě udržování minimální zásoby a průběžného nákupu. Z technologického hlediska, však tento postup nelze než doporučit, protože u takto získaného materiálu je zaručena homogenita vlastností ovlivňujících průběh a výsledky zkoušky. V případě nákupu zkušebních nástrojů jsou výhody a nevýhody podobné.

Další zásadou vhodného zásobování je asymetrie. Dodávky nástrojů a zkušebních polotovarů by se neměly setkávat v krátkém časovém období. V případě, že tato situace nastane, vstoupí do procesu řezných zkoušek velké množství proměnných parametrů a bude obtížné identifikovat zdroj odchylek a chyb.

Je nezbytné připravit jeden druh povlaku na větším množství nástrojů a část těchto nástrojů použít pro získání dostatečného množství výsledků. Druhou část takto napovlakovaných nástrojů bude potom možné použít pro ověření dalších dodávek zkušebních polotovarů a nástrojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1.ed., Praha, MM Publishing s.r.o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
2. BUNSHAH, R.F. Handbook of deposition technologies for films and coatings. New Jersey, USA. Noyes publications, 1994. ISBN: 0-8155-1337-2
3. ČSN EN ISO 4516: Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu
4. ČSN ISO 28079: Zkouška houževnatosti podle Palmqvista
5. ČSN ISO 8688-1, 2: Testování trvanlivosti při frézování.
6. SHAO, H., WANG, H.L., ZHAO, X.M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1503–1509, Science Direct 2004.
7. ČEKADA, M., PANJAN, P., KEK-MERL, D. Microindentation depth profiling of selected hard coatings. Surface & Coatings Technology 200 (2006) 6554–6557. Science Direct 2006
8. CWANJA, J., ROSKOSZ, S. Effect of microstructure on properties of sintered carbides. Materials Characterization 46 (2001) 197–201. Science Direct 2001
9. WAN, M., ZHANG, W.H., QIN, G.H., TAN, G. Efficient calibration of instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for general end mills. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1767–1776. Science direct 2006
10. www.platit.com (cit. 03/2010)
11. www.fehlmann.com (cit. 03/2010)
12. www.blum-novotest.de (cit. 03/2010)

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ae	mm	přísuv
ap	mm	hloubka řezu
CNC		Computer Numeric Control
CVD		Chemical Vapour Deposition
δ	mm, μm	radiální házení břitů nástroje
fz	mm	posuv na zub
KNB		Kubický Nitrid Bóru
MTCVD		Middle temperature CVD
PACVD		Plasma asisted CVD
PD		Polykrystalický diamant
PVD		Physical Vapour Deposition
t	min	čas
T	min, mm, mm^3	trvanlivost
VB_B	mm, μm	průměrná šířka plochy opotřebení na hřbetu nástroje
$VB_{B\text{max}}$	mm, μm	maximální šířka plochy opotřebení na hřbetu nástroje
VB_C	mm, μm	opotřebení špičky nástroje
vc	m/min	řezná rychlost
vf	mm/min	posuvová rychlost
VN	mm, μm	opotřebení hřbetu nástroje v místě kontaktu s obrobenou plochou

SEZNAM OBRÁZKŮ TABULEK A GRAFŮ

Název	Strana
Obr. 1.1 : Stanovení lomové houževnatosti podle Palmqvista	16
Obr. 1.2 : Možnosti měření mikrotvrdosti vícevrstvého povlaku	20
Obr. 1.3 : Schéma určování tloušťky povlaku pomocí Kalotestu	21
Obr. 1.4 : Mercedes test	22
Obr. 1.5 : Stopy Scratchtestu	23
Obr. 3.1 : Dynamometr Kistler 9123	28
Obr. 3.2 : Dynamometr Kistler 9257	28
Obr. 4.1: Schéma řezného procesu	29
Obr. 4.2: Obráběcí stroj	30
Obr. 4.3: Intervaly a naměřené parametry opotřebení	30
Obr. 4.4: Intervaly měření opotřebení	31
Obr. 4.5: Příklady naměřeného opotřebení	31
Obr. 4.6: Příklad zakreslené masky neopotřebovaného nástroje	32
Obr. 4.7: Zařízení pro měření nástrojů Micro Compact NT	32
Obr. 4.8: Vliv radiálního házení na průřez třísky	33
Obr. 4.9 : Schéma sestavy měření	34
Obr. 4.10 : Schéma pohybu nástrojů v zařízení OTEC	35
Obr. 4.11 : SEM snímky brusu nástrojů před a po provedeném omílání	35
Obr. 4.12 : Geometrie číslo 1	36
Obr. 4.13 : Výsledek zkoušky provedené na materiálu ČSN 12 050.1	37
Obr. 4.14: Výsledky zkoušek provedených na materiálu HARDOX 500	38
Obr. 4.15: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 552.4 – 49HRC	39
Obr. 4.16: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3	40
Obr. 4.16: Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3	41
Obr. 4.17 : Výsledky zkoušek provedených na materiálu ČSN 19 437.3	42
Obr. 4.20: Původní tvar čela nástroje	43
Obr. 4.21: Nevhodná forma opotřebení čela	43
Obr. 4.22: SEM snímky nevhodného opotřebení čela nástroje	43
Obr. 4.23 : Tvar čela geometrií 1 a 2	44
Obr. 4.24 : Tvar čela geometrií 3 a 4	44
Obr. 4.25: Geometrie číslo 2	44
Obr. 4.26 : Geometrie číslo 3	45
Obr. 4.27: Geometrie číslo 4	45
Obr. 4.28: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC	46
Obr. 4.29: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC	47
Obr. 4.30: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 60HRC	48
Obr. 4.31: Výsledky zkoušek na materiálu ČSN 19 437.3 – 40HRC	49
Obr. 4.32: Dosažené opotřebení	50
Obr. 4.33: Dosažené opotřebení	51

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Formulář záznamu řezné zkoušky

Příloha 1 – Formulář záznamu řezné zkoušky

[illegible]