



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODIKA TESTOVÁNÍ NÁSTROJŮ S BŘITY Z CERMETŮ PŘI SOUSTRUŽENÍ

TOOL WEAR TESTING METHOD OF CUTTING TOOLS WITH CERMET CUTTING EDGES IN TURNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aneta Koppová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Studentka: | Bc. Aneta Koppová |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2019/20 |

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 diplomové práce:

Metodika testování nástrojů s břity z cermetů při soustružení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce bude provést srovnání řezných materiálů na bázi cermetu. Dále provést analýzu opotřebení nástrojů, které budou osazeny břity z cermetu při obrábění uhlíkové oceli. Součástí práce bude návrh metodiky řezných zkoušek, analýza procesu obrábění spojená s realizací řezných zkoušek, které budou zaměřeny na opotřebení břitů nástrojů a analýzu jakosti povrchu. V práci bude proveden rovněž rozbor opotřebení břitů nástrojů s využitím dostupných měřicích zařízení. Práce bude ukončena zpracováním naměřených dat, ze kterých bude patrná trvanlivost jednotlivých testovaných cermetů.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický a technický rozbor řešené problematiky.
- Provedení řezných zkoušek (návrh metodiky, analýza opotřebení břitů a jakosti povrchu).
- Rozbor opotřebení břitů.
- Zpracování naměřených dat (vyhodnocení experimentů).

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou opotřebení nástrojů osazených břity z cermetu. První část je zaměřena na teoretické aspekty řešené problematiky, které jsou uplatněny v části praktické. Cílem bylo provést řezné zkoušky, při kterých byla soustružena uhlíková ocel za zvolených řezných podmínek. Sledováno bylo opotřebení nástroje během soustružení a jakost obrobeneho povrchu. Obrábění probíhalo do okamžiku, kdy zvolené kritérium opotřebení dosáhlo mezní hodnoty. Testovány byly dva různé cermety a naměřená data byla podkladem pro rozbor opotřebení břitů nástrojů a stanovení jejich trvanlivosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cermet, opotřebení, trvanlivost, struktura povrchu.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the analysis of the wear of tools fitted with cermet cutting edge. The first part is focused on the theoretical aspects of the problem, which are applied in the practical part. The aim was to perform cutting tests in which carbon steel was turned under selected cutting conditions. Tool wear during turning and the quality of the machined surface were monitored. Machining continued until the selected wear criterion reached the limit value. Two different cermets were tested and the measured data were the basis for the analysis of the wear of the tool edges and the determination of the tool life.

KEYWORDS

Cermet, tool wear, tool life, surface roughness.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPPOVÁ, Aneta. *Metodika testování nástrojů s břity z cermetů při soustružení* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121566>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Metodika testování nástrojů s břity z cermetů při soustružení* vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Sedláka, Ph.D. a uvedla v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. června 2020

Bc. Aneta Koppová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat firmě FINAL Tools a.s., která mi umožnila zpracovat tuto práci. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu při studiu.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 9 |
| 1 Cermety | 10 |
| 1.1 Historie | 11 |
| 1.2 Výroba | 12 |
| 1.3 Vlastnosti a použití cermetů | 13 |
| 1.4 Povlakování | 14 |
| 1.4.1 Fyzikální napařování (PVD)..... | 14 |
| 1.4.2 Chemické napařování (CVD) | 14 |
| 2 Opotřebení řezných nástrojů | 15 |
| 2.1 Podoby opotřebení..... | 16 |
| 2.1.1 Otěr na hřbetě bříty..... | 17 |
| 2.1.2 Žlábek na čele bříty | 17 |
| 2.1.3 Plastická deformace bříty | 18 |
| 2.1.4 Vrub na hřbetě bříty..... | 18 |
| 2.1.5 Paralelní a hřebenové trhliny..... | 18 |
| 2.1.6 Křehký lom | 18 |
| 2.1.7 Vydrolování ostří..... | 18 |
| 2.1.8 Tvorba nárůstku | 18 |
| 2.2 Kritéria opotřebení..... | 19 |
| 2.3 Trvanlivost nástroje | 20 |
| 3 Struktura povrchu | 23 |
| 3.1 Veličiny drsnosti povrchu..... | 23 |
| 3.1.1 Používané R parametry..... | 23 |
| 3.2 Měření drsnosti | 24 |
| 4 Přehled výrobců cermetových výstružníků a jejich polotovarů | 26 |
| 4.1 Výrobci cermetových výstružníků..... | 26 |
| 4.1.1 August Beck GmbH & Co. KG..... | 26 |
| 4.1.2 DIATool Präzisionswerkzeug GmbH..... | 28 |
| 4.1.3 FINAL Tools a.s. | 29 |
| 4.1.4 Guhring, Inc..... | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1.5 | Kennametal GmbH..... | 31 |
| 4.1.6 | KOMET GROUP GmbH..... | 32 |
| 4.1.7 | MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG | 33 |
| 4.1.8 | Sandvik Coromant | 36 |
| 4.1.9 | Seco Tools CZ, s.r.o. | 36 |
| 4.1.10 | Srovnání výrobců výstružníků..... | 38 |
| 4.2 | Výrobci cermetových polotovarů | 39 |
| 4.2.1 | CERATIZIT Luxembourg S. à r. l. | 39 |
| 4.2.2 | Changsha Langfeng Metallic Material Co., Ltd..... | 39 |
| 4.2.3 | Chengdu Met-ceramic Advanced Materials Co., Ltd..... | 40 |
| 4.2.4 | CY CARBIDE MFG. Co., Ltd. | 40 |
| 4.2.5 | HHT – Hartmetall GmbH & Co. KG | 40 |
| 4.2.6 | Kyocera Precision Tools, Inc..... | 41 |
| 4.2.7 | SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH | 41 |
| 4.2.8 | TUNGALOY CZECH s.r.o. | 41 |
| 4.2.9 | Srovnání výrobců cermetových polotovarů..... | 41 |
| 5 | Praktická část | 43 |
| 5.1 | Obráběcí stroj | 43 |
| 5.2 | Řezné nástroje..... | 44 |
| 5.3 | Řezné podmínky | 45 |
| 5.4 | Zařízení pro měření | 45 |
| 5.5 | Proces měření | 47 |
| 5.6 | Výsledky experimentu..... | 47 |
| 5.6.1 | Řezný materiál cermet SC3 | 47 |
| 5.6.2 | Řezný materiál cermet SC8..... | 53 |
| 6 | Diskuze | 61 |
| | Závěr | 62 |
| | Seznam použitých zdrojů | 63 |
| | Seznam použitých symbolů a zkratk | 68 |
| | Seznam příloh | 70 |

ÚVOD

S rostoucími požadavky na kvalitu, produktivitu, výkon a celkovou hospodárnost výroby rostou také nároky na řezné materiály. Zejména je posuzována tvrdost za tepla, odolnost proti opotřebení a lomu. Lom břitu nebo nadměrné opotřebení způsobuje prostoje, které vedou ke snížení produktivity obrábění. Z toho důvodu je kladen důraz na správnou volbu řezného materiálu podle požadovaného stavu obrobeného povrchu a přesnosti rozměrů.

Během procesu obrábění dochází k opotřebení nástroje, který tak ztrácí schopnost řezat. Doba, po kterou je nástroj schopen řezat v souladu s požadovaným výkonem a kvalitou povrchu je stanovena pomocí trvanlivosti nástroje. Trvanlivost je získána na základě systematického měření opotřebení v závislosti na čase. Znamá délka trvanlivosti břitu je důležitým faktorem pro stanovení četnosti výměny nástroje a jejich zásoby. K výměně břitu tak dochází dříve, než dojde ke vzniku neshodných kusů, což významně ovlivňuje celkové náklady a efektivitu procesu.

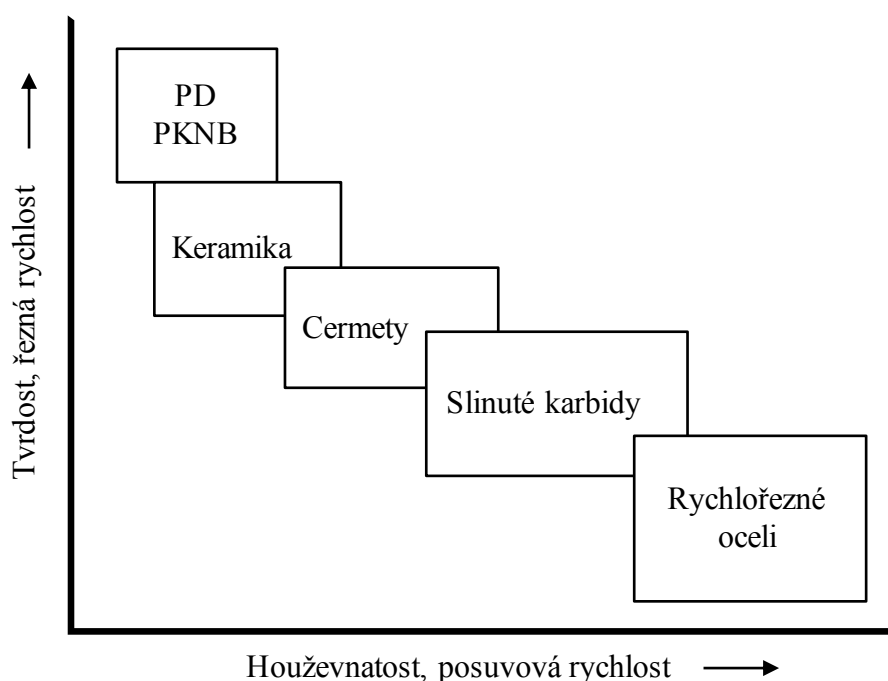
Materiálem s pomalým průběhem opotřebení a vysokou trvanlivostí je cermet. Jedná se o řezný materiál vhodný pro obrábění při vysokých řezných rychlostech, malých posuvech a hloubkách řezu. Aplikací cermetů jsou lehké a střední řezy, kde je kladen důraz na jakost obrobeného povrchu.

1 CERMETY

Cermety se řadí mezi materiály pro řezné nástroje. Každý nástrojový materiál je vhodný pro jiné aplikace, a to podle jejich vlastností mezi které patří [1]:

- fyzikální vlastnosti: měrná hmotnost, velikost zrna, součinitel tření,
- chemické vlastnosti: inertnost, stálost,
- tepelné vlastnosti: teplota tání, pracovní teplota, tepelná vodivost, délková roztažnost,
- mechanické vlastnosti: tvrdost, modul pružnosti, pevnost v tlaku a ohybu, lomová houževnatost.

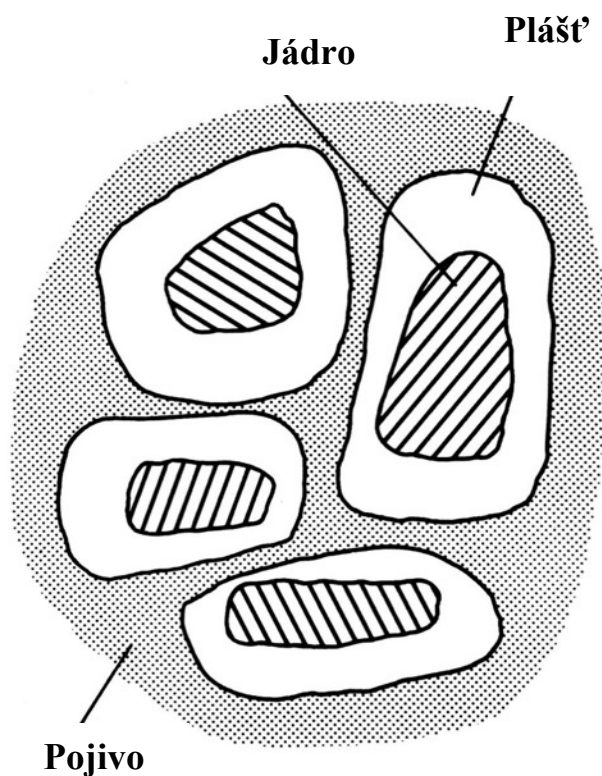
Obecně se tvrdé materiály používají při vyšších řezných rychlostech a malých průřezech třísky, kde je hlavní tepelné namáhání. Naopak houževnaté materiály se použijí při vyšších posuvových rychlostech, kde působí převážně mechanické zatížení. Na obr. 1 je zobrazeno rozřazení řezných materiálů podle jejich vlastností. Druh řezného materiálu má přímý vliv na produktivitu obrábění. Při volbě nástrojového materiálu se však musí také zohlednit geometrie břitu, druh obrábění, materiál a tvar obrobku, obráběcí stroj, řezné podmínky a další [1, 2, 3].



Obr. 1 Zařazení nástrojových materiálů podle mechanických vlastností [1].

Název cermet vznikl kombinací slov keramika (CERamics) a kov (METal), dvou hlavních fází tohoto materiálu. Jedná se tedy o kovokeramický materiál, ve kterém je tvrdá fáze ve formě karbidu titanu TiC , karbonitridu titanu $Ti(C, N)$, nitridu titanu TiN a karbidu molybdenu Mo_2C . Mikrostruktura je tvořena tvrdými fázemi rozmístěnými v pojivu. Zrna tvrdé fáze jsou tvořena jádrem, které je obklopeno pláštěm. Obr. 2 schematicky zobrazuje mikrostrukturu cermetu, tedy jádro α_1 tvořené karbonitridem titanu a plášť α_2 tvořený fází α_1 obohacenou karbidem molybdenu. Požívají se také tuhé roztoky tvrdých složek $Ti(C, N)$,

$(Ti, Mo)C$, $(W, Ti)C$, $(Ti, Ta, Nb, W)C$. Kovová pojivová fáze je složena z niklu, kobaltu, molybdenu nebo jejich kombinací. Základním úkolem kombinování kovu a keramiky je začlenění žádoucích vlastností a potlačení nežádoucích vlastností obou materiálů. Keramická složka cermetu poskytuje vysokou tvrdost a odolnost proti oxidaci, zatímco kovová složka zvyšuje odolnost proti tepelnému šoku [1, 2, 4, 5].



Obr. 2 Struktura cermetu [5].

1.1 Historie

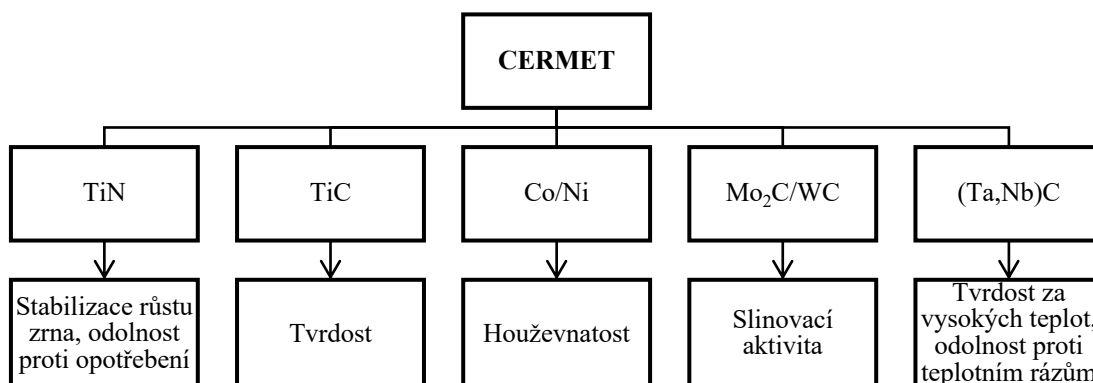
První generace cermetů pro praktické použití byla vyrobena v polovině 50. let 20. století, ale kvůli nízké houževnatosti se v USA ani v Evropě neuchytily. Naopak tomu bylo v Japonsku, kde z důvodu nedostatku wolframu a kobaltu došlo k největšímu vývoji cermetů. Zároveň se potvrdilo, že je cermet jako řezný materiál vhodný pro dokončovací operace při vysokých rychlostech. Největší rozvoj a výroba cermetů na bázi $Ti(C, N)$ nastaly v letech 1968 až 1970. Cermety druhé generace (70. léta 20. století) měly vyšší pevnost a odolnost proti vydrolování díky přidávku TaC a WC . Proto byly používány pro soustružení středními hodnotami posuvové rychlosti a pro lehké frézování. Třetí generaci tvoří cermety s kombinací $TiC - TiN$. Zvýšení obsahu TiN na 25 % došlo ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, snížení velikosti zrn tvrdé fáze a zvýšení tvrdosti. Dalším krokem byl výzkum vlivu dusíku. S rostoucím dusíkem v cermetu se snižuje zrnitost tvrdé fáze a zvyšuje tepelná vodivost. Při obsahu dusíku 3 % a více docházelo při slinování k rozkladu tvrdé fáze. Z toho důvodu byly nové druhy cermetů slinovány v dusíkové atmosféře [1, 6, 7].

1.2 Výroba

Cermetové řezné nástroje se používají jako monolitní nebo ve formě vyměnitelných břitových destiček, které se vyrábí práškovou metalurgií. Výchozím materiálem je prášek TiC/TiN nebo Ti(C, N). Tvrdé sloučeniny jsou důkladně smíseny s pojivem, kterým je niklový nebo kobaltový prášek. V současné době probíhá výroba cermetů na bázi karbonitridu titanu pomocí těchto metod [1]:

- vysokoteplotní lisování,
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP = Hot Isostatic Pressing),
- slinování,
- slinování s kombinací HIP.

Pro dosažení požadovaných vlastností cermetů jako je tvrdost, houževnatost a odolnost proti opotřebení se využívá změny v obsahu jednotlivých základních složek (obr. 3). Např. se zvyšujícím se obsahem TiC a TiN dochází ke zvýšení tvrdosti. Karbid tantalu a niobu (Ta, Nb)C zvyšuje odolnost proti plastické deformaci a tvoření trhlin za tepla. Karbonitrid titanu Ti(C, N) snižuje zrnitost a zvyšuje odolnost proti adhezivnímu a difuzivnímu opotřebení. Rostoucí obsah uhlíku zvyšuje tvrdost a snižuje houževnatost [1, 7, 8].



Obr. 3 Vliv základních složek na vlastnosti cermetu [1].

Technologie výroby cermetů [1, 8]:

1. výroba směsného karbidu,
2. příprava směsi karbidů a pojiva,
3. lisování a tvarování směsi,
4. slinování,
5. konečná úprava (broušení, povlakování).

Příprava směsi karbidů a pojiva

Prvním krokem je mletí karbidů a pojiva za sucha nebo v kapalném prostředí, při kterém dochází k vytvoření jemnozrné, homogenní práškové směsi. Pojivo musí mít co nejjemnější strukturu, aby došlo k dokonalému obalení karbidických zrn. K mletí dochází při otáčení válcových mlýnů působením třecího a rázového účinku mlecích kuliček. Třecí účinek má výrazný vliv na promíchání a homogenizaci směsi. Mlecí proces může být podporován vibracemi při pružném uložení mlýnu [1, 8].

Lisování a tvarování směsi

Při výrobě vyměnitelných břitových destiček se prášková směs formuje do požadovaného tvaru pomocí formovacích lisů. Vzhledem k tomu, že se jedná o disperzní směs s nízkou plasticitou, je nutné přidat tzv. plastifikátor v množství 0,5 až 2 %. Tato látka zajišťuje snížení tření mezi lisovacím nástrojem a lisovanou směsí, usnadňuje vzájemný skluz částic, čímž zvyšuje míru zhuštění směsi a zaručuje zachování tvaru po vyjmutí polotovaru z lisovací formy. Plastifikátor musí být lehce odstranitelný (např. při sušení) a nesmí znečistit polotovar. Pro dané podmínky se nejčastěji používá syntetický kaučuk roztavený v benzínu nebo parafín rozpuštěný v tetrachlormetanu (případně benzenu). Tlak při lisování je v rozmezí 50 až 150 MPa. Výlisek musí být rovnoměrně zhuštěný v celém svém objemu. Proto se nejčastěji používá oboustranné lisování. Rozměry výlisku musí být o 20 % větší než rozměry výsledného výrobku, a to z důvodu smrštění při slinování [1, 8].

Vysokoteplotní izostatické lisování (HIP)

Při lisování práškové směsi může vzniknout mikropórovitost. Tento problém řeší metoda vysokoteplotního izostatického lisování (HIP), kdy je směs rovnoměrně stlačována pomocí plynu při vysokých teplotách. Prášková směs je zapouzdřena do kapsle (z měkké oceli), která je plynotěsná, pevná a snadno odstranitelná. Vzniká tak hutný výrobek s homogenní strukturou bez pórů [1, 9].

Slinování

Polotovar ve formě výlisku je umístěn do slinovací pece, kde dochází k ohřevu a ochlazení za řízených podmínek v atmosféře H_2 , H_2N_2 , Ar nebo vakuu. Proces se skládá ze dvou částí – předslinování, tedy odstranění plastifikátoru a slinování. Teplota slinování je v rozmezí 1 400 až 1 600 °C. Při této operaci se tvoří hranice mezi zrny tvrdé fáze a dochází k difuzním procesům, tím je získán zhuštěný výrobek s požadovanou mikrostrukturou, mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Dojde tedy ke změně pórovitého výlisku na soudržný výrobek [1, 8].

1.3 Vlastnosti a použití cermetů

Cermety mají nízkou měrnou hmotnost a vysokou odolnost proti opotřebení hřbetu. Hlavní výhodou je jejich vysoká tvrdost za tepla při stálosti tvaru a otěruvzdornost. V porovnání se slinutými karbidy jsou levnější, mají vyšší chemickou stabilitu, odolnost ke tvorbě nárůstku a oxidaci. Břitové destičky z cermetů jsou charakteristické dlouhou trvanlivostí a po celou dobu trvanlivosti si zachovávají ostrý břit. Mají schopnost vytvořit součásti o vysoké rozměrové přesnosti a jakosti povrchu. Naopak nevýhodou cermetů je jejich nízká houževnatost. Při obrábění se musí zajistit stabilní teplota, aby nedošlo ke vzniku trhlin vlivem tepelného napětí. Pro minimalizaci namáhání břitu je vhodné použít vysoké posuvové rychlosti a malou hloubku řezu, tím se zároveň docílí optimální produktivity při obrábění [2, 4, 5, 8].

Cermety se používají zejména při vysokých řezných rychlostech, malých posuvech a hloubkách řezu, kde požadavkem je vysoká trvanlivost břitu a jakost obrobeného povrchu. Mezi vhodné aplikace patří obrábění na čisto, soustružení, frézování, výroba zápicích a řezání závitů. Hlavním důvodem pro použití při soustružení je jejich dlouhá a neměnná trvanlivost v širokém rozsahu řezných rychlostí [2, 4, 5, 8].

1.4 Povlakování

Na cermetové břitové destičky se nanáší tenké jednovrstvé i vícevrstvé povlaky, které slouží ke zvýšení odolnosti proti opotřebení a prodloužení trvanlivosti břitu. Aplikované povlaky neobsahují pojivo a mají jemnější zrnitost než základní substrát. V současné době dochází k rozvoji multivrstvých povlaků. Na základní povlak Ti(C, N), zajišťující houževnatost, je nanesen vícevrstvý povlak Al_2O_3 , který zajišťuje odolnost proti otěru. Dochází tak ke zvýšení odolnosti proti vzniku mikrotrhlin a jejich šíření. Metody povlakování se dělí na dvě základní, fyzikální napařování (PVD – Physical Vapour Deposition) a chemické napařování z plynné fáze (CVD – Chemical Vapour Deposition) [1, 6, 7].

1.4.1 Fyzikální napařování (PVD)

Povlak je vytvořen napařováním nebo napařováním. Povrch substrátu musí být nejprve očištěn a odmaštěn. Napařování se provádí při tlaku 0,1 až 1,0 Pa a teplotě do 500 °C ve vakuové komoře. Pevná látka se mění v páru a jednotlivé uvolněné atomy reagují s atmosférou komory (Ar, N₂). Atomy jsou urychleny záporným předpětím směrem k povrchu substrátu, kde vytvoří tenkou a tvrdou vrstvu o tloušťce 1 až 5 μm. Při napařování vznikají ionty díky elektrickému výboji v plynné komoře, které ulpívají na povrchu substrátu. Nevýhodou metody je potřeba vakuového systému a rotačního držáku, který zajišťuje rovnoměrné nanesení vrstvy. Výhodou je možnost povlakování ostrých hran [1, 4].

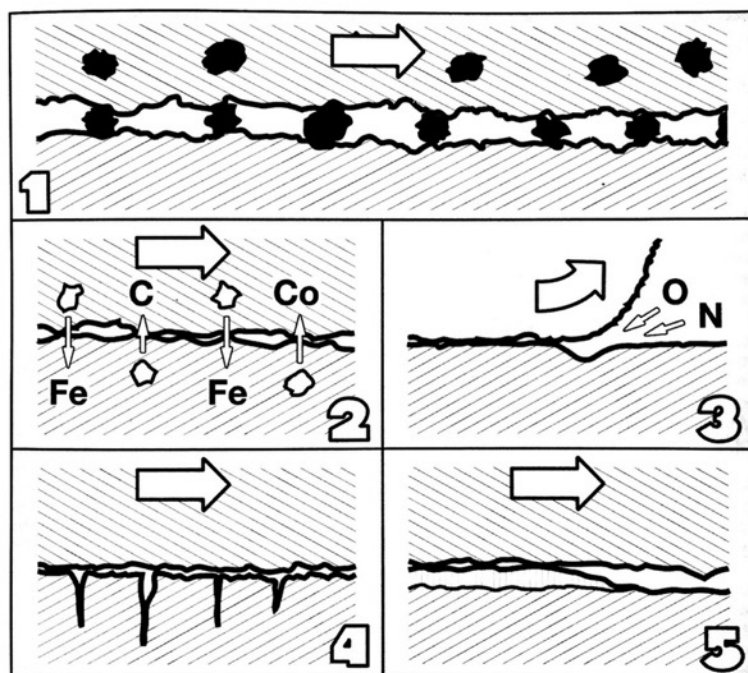
1.4.2 Chemické napařování (CVD)

Povlakování se uskutečňuje při vysokých teplotách (900 až 1200 °C) reakcí plynných sloučenin na horkém povrchu. Plynné sloučeniny, často zředěné inertním nosným plynem (Ar, H₂), obsahují stabilní a zároveň přechavou sloučeninu, která se ohřevem rozkládá a vzniká vrstva povlaku. Plynná směs také obsahuje nekovový reaktivní plyn (N₂, NH₄, CH₄), aby mohla daná reakce proběhnout. Chemické napařování probíhá při vysokém tlaku 10 mbar až 10 bar (1 000 až 1 000 000 Pa). Vysoký procesní tlak odlišuje metodu CVD od PVD, protože základní látkou nejsou atomy, ale molekuly. Výhodou metody CVD je její univerzálnost, možnost tvorby vrstev o tloušťce 10 až 13 μm, povlakování složitých tvarů, teplotní stabilita a homogenita povlaku, vysoká hustota povlaku. Nevýhodou je teplotní ovlivnění základního materiálu a nemožnost povlakovat ostré hrany [1, 4, 7, 10].

2 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Proces opotřebení způsobuje, že nástroj ztrácí schopnost řezat v souladu s jeho předpokládanou efektivitou a spolehlivostí. Vlivem řezného procesu dochází k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška. Během obrábění dochází ke kontaktu řezného nástroje s obráběným materiálem na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje. Dále dochází ke styku nástroje a odcházející třísky na čele nástroje. Zmíněné procesy vedou k opotřebení nástroje, které závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech nástrojového a obráběného materiálu, na geometrii nástroje, pracovních podmínkách atd. Opotřebení má za následek změny v geometrii řezného nástroje, které ovlivňují výsledný povrch obrobku (tolerance, kvalita) a řezný výkon nástroje. Níže jsou popsány hlavní mechanismy opotřebení (obr. 4), na které má vliv mechanické a tepelné zatížení [2, 4, 7, 11].

- Fyzikální:
 - abraze – 1,
 - adheze – 5.
- Chemické:
 - difuze – 2,
 - oxidace – 3.
- Tepelné:
 - plastická deformace.
- Mechanické:
 - křehký lom – 4.



Obr. 4 Mechanismy opotřebení [2].

Fyzikální a chemické opotřebení působí po celou dobu obrábění, tepelné a mechanické opotřebení působí náhle a mají za následek ukončení funkce nástroje. Abraze vzniká působením tvrdých mikročástic obráběného materiálu nebo nástrojového materiálu, což vede ke tvorbě rovinné plochy na hřbetě. Adheze představuje vznik a zánik mikrosvarů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, kde vzniká nárůstkem vytvořený břit, který může vést k vydrolování původního břitu. Difuze je přesun atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, vedoucí ke vzniku nežádoucích chemických sloučenin. Oxidaci způsobuje vysoká teplota a přítomnost kyslíku v prostředí, což vede ke vzniku žlábků. Výsledkem vysokého tepelného a mechanického zatížení je plastická deformace. Ke křehkému lomu dochází při nehomogenitě obráběného materiálu, kolísání teploty procesu a zatížení. Obecně se hřbet opotřebovává vlivem abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difuze, abraze a oxidace. Pro stanovení předpokládaného chování nástrojového materiálu je důležité znát jeho tvrdost, houževnatost, chemickou stabilitu, tepelnou vodivost, tepelnou roztažnost, stav povrchu a přilnavost povlaku [2, 3, 4, 7].

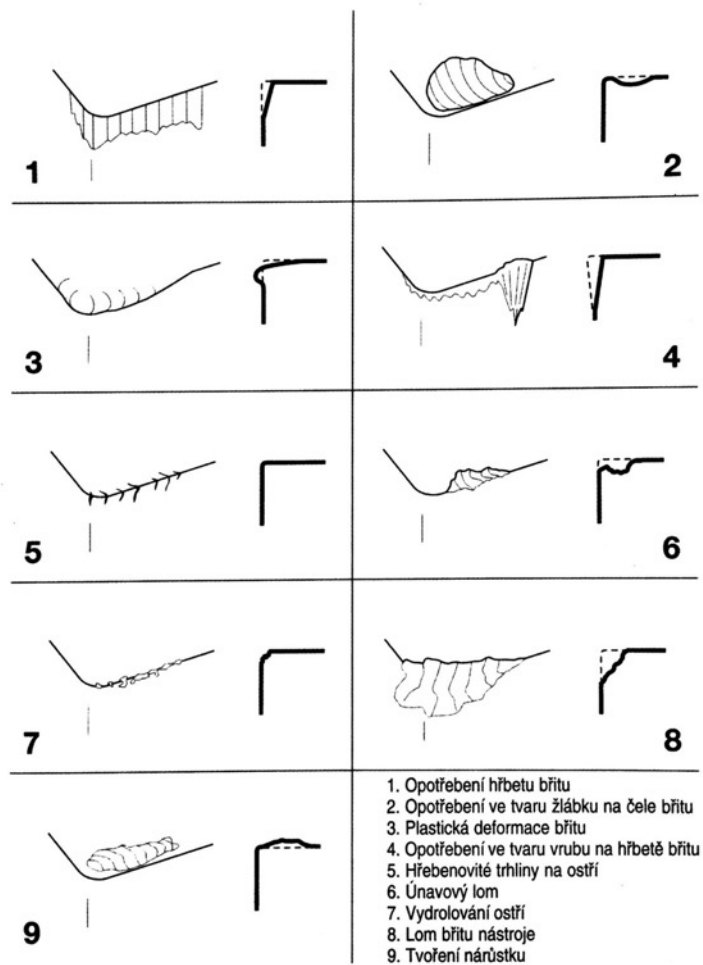
Při procesu obrábění vzniká teplo, které ovlivňuje průběh opotřebení. Dochází k přeměně kinetické energie na tepelnou energii, jejíž největší část je odváděna ve formě třísky. Nejvyšší teplota je na čele nástroje, zbývající teplo je v nástroji a obrobku. Zásadní vliv na teplotu má řezná rychlost, která rovněž ovlivňuje průběh mechanismů opotřebení. Teplo a řezná rychlost se tak podílí na vzniklém typu opotřebení a trvanlivosti břitu nástroje spolu s druhem materiálu obrobku a podmínkami obrábění. Pro každý obráběcí proces je stanoven ideální průběh opotřebení, který je ovlivněn volbou nástroje, řeznými podmínkami a jakostí materiálu obrobku [2].

2.1 Podoby opotřebení

Na obr. 5 jsou zobrazeny hlavní podoby opotřebení. Při zvětšeném pohledu na břit je možné určit typ opotřebení a následně kontrolovat průběh trvanlivosti, spolehlivost a také prodloužit trvanlivost [2].

Podoby opotřebení, které jsou získány na základě vizuálního zkoumání nejsou jedinými projevy. Při procesu opotřebení nástroje lze sledovat i další jevy značící opotřebení nástroje nebo nutnost jeho výměny. Příklady jsou uvedeny níže [11].

- Přítomnost nárůstku nebo vydrolení ostří lze otestovat pomocí doteku nehtem.
- Změna intenzity hluku, ostré a vysokofrekvenční zvuky značí, že obráběcí proces neprobíhá za optimálních podmínek.
- Dalším jevem je změna formy, tvaru nebo barvy odcházející třísky.
- Zhoršení kvality obrobku značí opotřebení nástroje.
- Opotřebení nástroje se může projevit zvýšením spotřeby energie nebo sklonem k vibracím.



Obr. 5 Podoby opotřebení [2].

2.1.1 Otěr na hřbetě břitu

Materiál obrobku působí na hřbet nástroje po celou dobu obrábění a vlivem abraze dochází k opotřebení na hřbetě nástroje. Děje se tak zaříznutím tvrdých mikročástic z obrobku do břitové destičky. Otěr lze pozorovat jako rovnoměrnou stopu, rovnoběžnou se směrem řezné rychlosti. Břit se stává méně ostrým, což vede ke zvýšení řezných sil a vzniku tepla. Pokud se opotřebení rovnoměrně zvyšuje, jedná se o předvídatelný ideální stav. V případě velkého opotřebení hřbetu dochází ke zhoršení jakosti obrobku, rozměrové nepřesnosti a roste tření. Pro zpomalení opotřebení na hřbetu se doporučuje volit tvrdé destičky a používat pozitivní geometrii břitu pro snížení řezných sil a tření [2, 11, 12].

2.1.2 Žlábek na čele břitu

Tvrdé částice nacházející se v materiálu obrobku způsobují abrazi, která má za následek částečný úběr nástrojového materiálu. Dalším mechanismem při tvorbě žlábků je difuze v místě styku třísky a břitu. Teplo vzniklé při obrábění rozkládá zrna karbidu wolframu v substrátu a uhlík difunduje do třísky, což vede ke tvorbě žlábků. Materiály s dostatečnou tvrdostí za tepla a malou afinitou odolávají tomuto typu opotřebení. Žlábek může být příčinou změny geometrie břitu a z toho vyplývající změnu působení řezných sil [2, 11].

2.1.3 Plastická deformace břítu

Při vysokých řezných rychlostech a posuvech dochází ke generování vysokých teplot a tlaků, které způsobují plastickou deformaci břítu. Může se jednat o deformaci pojiva vyvolanou nadměrnou teplotou. Nejprve tlak deformuje ostří a poté může dojít k ulomení špičky nebo opotřebení hřbetu. Projevem plastické deformace může také být změna rozměrů obrobku. Prevencí vzniku a snížení plastické deformace je správná volba geometrie břítu a zaoblení ostří, použití chladicí kapaliny, snížení řezných rychlostí a posuvů [2, 3, 12].

2.1.4 Vrub na hřbetě břítu

Opotřebení ve tvaru vrubu vzniká jak na hlavním hřbetě, tak na vedlejším a výsledkem může být lom břitové destičky. Vrub na hlavním hřbetě vzniká působením adheze nebo oxidace v místě dotyku břítu a boku třísky. Vrub na vedlejším hřbetě je způsoben mechanickým působením tvrdých částic obrobku. Pokud má obráběný materiál tvrdší povrchovou vrstvu (např. deformačně zpevněná povrchová vrstva po předchozích řezech) než jádro, dochází ke vzniku vrubu, a to z důvodu rychlejšího opotřebení v oblasti této vrstvy. Možným opatřením je snížení posuvu a změna hloubky řezu při vícenásobných úběrech, použití houževnatější třídy řezných destiček [2, 13].

2.1.5 Paralelní a hřebenové trhliny

Paralelní trhliny vznikají na hřbetu nástroje a jsou způsobeny únavou materiálu v kombinaci s plastickou deformací. Hřebenové trhliny vznikají kolmo na ostří na čele i hřbetě nástroje a jsou vyvolány kombinací mechanického a teplotního napětí. Částice nástrojového materiálu se mohou mezi trhlínami vylamovat a způsobit lom břítu. Proto je klíčové identifikovat trhliny předtím, než dojde k vydrolování břítu. Samotné vylamování drobných částic neznamená ukončení trvanlivosti nástroje, i když klesají jeho řezné vlastnosti. Trhliny vznikají obvykle při frézování a přerušovaném soustružení. Příčinou jsou tepelné změny způsobené např. změnou tloušťky třísky. Vzniku trhlín lze zabránit např. zamezením chlazení, snížením posuvu a řezné rychlosti [2, 3, 11, 13].

2.1.6 Křehký lom

Křehký lom vzniká vlivem vysokého mechanického zatížení nebo krátkodobého přetížení břítu. Např. se může jednat o náraz břítu na tvrdou fázi nebo vměstek při přerušovaném řezu nebo při neočekávané změně průřezu třísky. Projevuje se vznikem trhlín v řezné části nástroje a ztrátou malých úlomků. Lom značí konec trvanlivosti nástroje a při obrábění je jeho vznik nebezpečný [2, 3, 14].

2.1.7 Vydrolování ostří

Přerušované řezy, vibrace obrobku, nástroje nebo vřetena mohou vést k vydrolování mikročástic nástrojového materiálu, proto nedochází k požadovanému stejnoměrnému opotřebení, ale odlupování materiálu. Předějit tomuto typu opotřebení lze např. použitím houževnatějších břitových destiček a zajištěním tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek [2, 12, 13].

2.1.8 Tvorba nárůstku

Nárůstek je tvořený úlomky obráběného materiálu navařenými na nástroji. Může dojít k odlomení částic nástroje spolu s navařeným nárůstkem, což vede ke změně geometrie břítu.

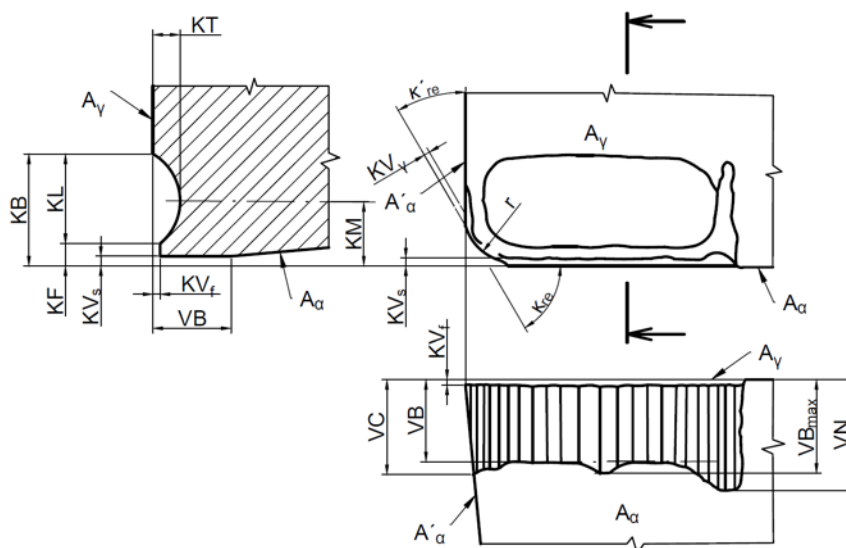
Nízké teploty a vysoké tlaky mohou vést ke tvorbě nárůstku, ale protože jsou tyto hodnoty známy, lze tomuto jevu zabránit. Tvorbě nárůstku lze také předejít zvýšením řezných rychlostí a posuvů, použitím chladicí kapaliny (popřípadě zvýšení koncentrace) a volbou povlakovaných břitových destiček [2, 12].

2.2 Kritéria opotřebení

Projevem opotřebení je obvykle ztráta materiálu na čele nebo hřbetě nástroje. Opotřebení lze hodnotit přímo pomocí mikroskopu jako závislost změny rozměru břitu na čase nebo měřením hmotnostního úbytku nástroje. Další možností je nepřímá metoda, např. stanovení velikosti změny sil, které působí při obrábění, hodnocení změny barvy a tvaru třísky, změna teploty obrobku, nástroje nebo třísek, zhoršení drsnosti povrchu, hlučnosti procesu, analýza vibrací atd. [3].

Opotřebení lze stanovit pomocí následujících kritérií (obr. 6) [4]:

- šířka fazetky opotřebení na hřbetě VB [mm],
- hloubka výmolu na čele KT [mm],
- radiální opotřebení špičky KV_y [mm].



Obr. 6 Kritéria opotřebení [4].

Norma ČSN ISO 3685 označuje opotřebení na hřbetě VB [mm] následovně [15]:

- opotřebení v oblasti špičky nástroje VB_C (odpovídající VC viz obr. 6),
- opotřebení ve formě vrubu VB_N (VN),
- opotřebení přímé části ostří (průměrné) VB_B (VB),
- opotřebení maximální VB_{Bmax} (VB_{max}).

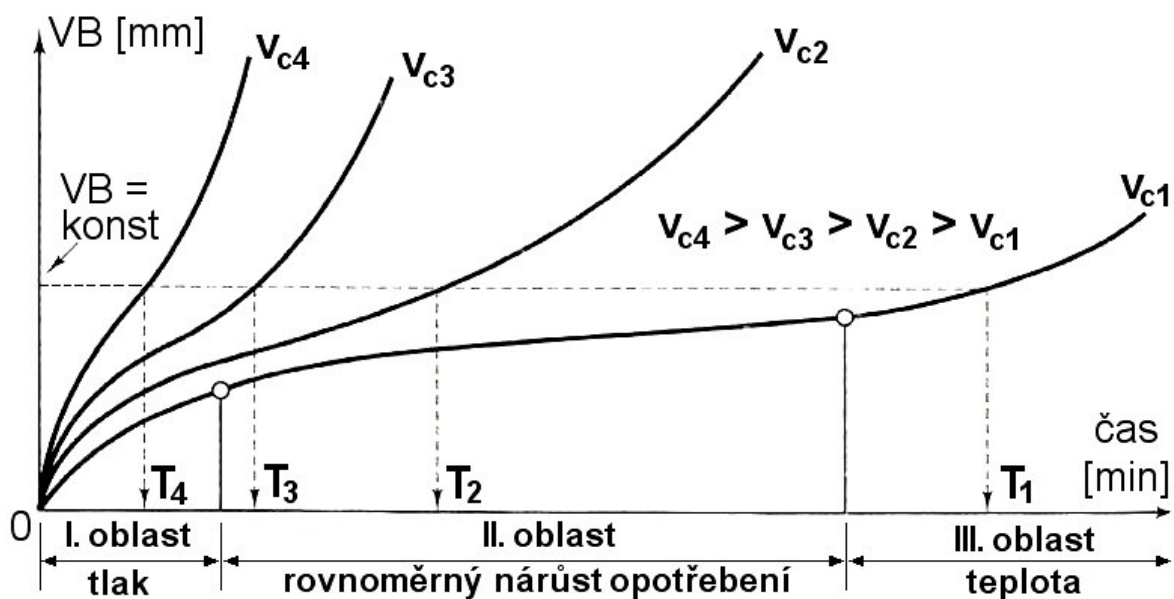
Na volbu kritéria opotřebení má vliv požadavek na kvalitu povrchu, tolerance a specifické vlastnosti obrobku. Zvolené kritérium opotřebení udává, jak velké geometrické změny mohou být tolerovány. Na dokončovací operace jsou kladeny vyšší nároky než na hrubování, aby byly dodrženy předepsané hodnoty kvality obrobku [11].

Důležitým krokem je stanovení mezní velikosti zvoleného kritéria opotřebení. To znamená, kdy je potřeba břit nahradit novým. Z hlediska nákladové efektivity je výhodné používat nástroj, co nejdéle. Je zde však riziko, že se břit neočekávaně zlomí a způsobí vznik neshodných kusů a prostoje stroje. Je tedy nutné nalézt rovnováhu mezi maximálním povoleným opotřebením a spolehlivostí obráběcího procesu. Během praktických zkoušek je možné sledovat různé formy opotřebení nástroje. V takovém případě je důležité rozhodnout, které je přijatelné a které ne. Nepřijatelné formy opotřebení je třeba minimalizovat [11].

2.3 Trvanlivost nástroje

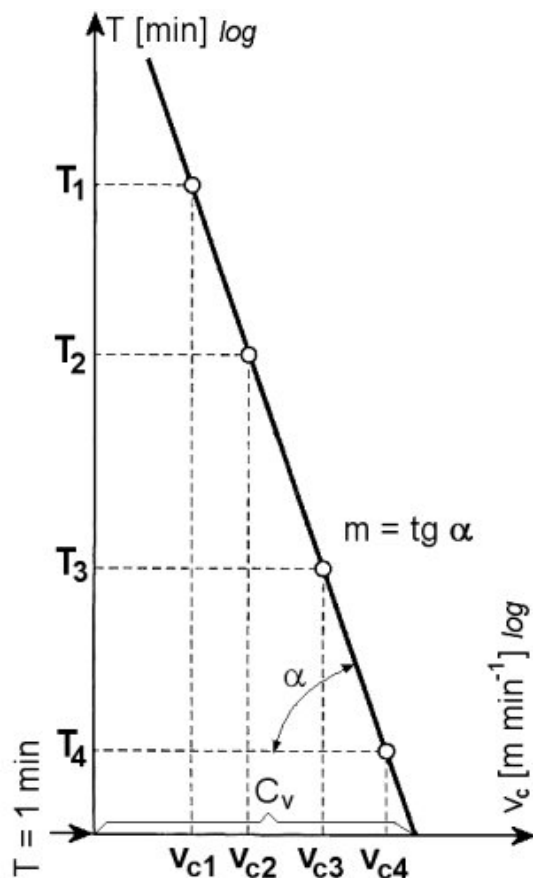
Trvanlivost řezného nástroje je součtem všech čistých časů obrábění, které se počítají od začátku obrábění až po dosažení stanovené hodnoty zvoleného kritéria opotřebení. Kritérium opotřebení a jeho velikost se stanoví tak, aby byla zaručena přesnost rozměrů, kvalita povrchu a tvar po celou dobu trvanlivosti nástroje. V hraničním případě končí trvanlivost nástroje lomem břitu, čemuž je nutné předcházet z důvodu vzniku neshodných kusů. Trvanlivost se tedy týká opotřebení břitu, nikoli jeho lomu. Metoda obrábění, vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu a řezné podmínky mají vliv na trvanlivost [2, 3, 4].

Trvanlivost je nejvíce ovlivněna řeznou rychlostí, což v roce 1905 zjistil F. W. Taylor a odvodil vztah mezi zmíněnými dvěma veličinami. Zkoušky pro stanovení hodnot vybraného kritéria opotřebení a řezných rychlostí jsou mezinárodně normalizované. Prvně je zvolena hodnota kritéria opotřebení, např. VB nebo KT. Následně se měří hodnoty opotřebení při různých řezných rychlostech při konstantní hloubce řezu a posuvu. Stanovení průběhu hodnot VB v závislosti na čase (obr. 7) je nejjednodušší způsob hodnocení opotřebení. Hodnoty VB by dle doporučení měly ležet v rozmezí od 0,2 mm do 0,8 mm. V oblasti I dochází k rychlému růstu hodnoty VB vlivem velkého měrného tlaku. Oblast II reprezentuje působení základních mechanismů opotřebení a v oblasti III dochází ke zvýšení opotřebení v důsledku kumulace tepelného zatížení [2, 3, 4, 11].



Obr. 7 Závislost VB na čase [4].

Ze závislostí na obr. 7 jsou odečteny hodnoty T_1 , T_2 , T_3 a T_4 , které odpovídají zvoleným řezným rychlostem v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} a v_{c4} . Body $v_{c1} - T_1$, $v_{c2} - T_2$, $v_{c3} - T_3$ a $v_{c4} - T_4$ jsou následně zaneseny do digramu (obr. 8) v logaritmických souřadnicích [3].



Obr. 8 Závislost trvanlivosti a řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích [4].

Pro matematické získání závislosti $T-v_c$ slouží Taylorův vztah (1) ve tvaru:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \text{ [min]}, \quad (1)$$

kde: C_T [-] je konstanta,
 v_c [$m \cdot \text{min}^{-1}$] je řezná rychlost,
 m [-] je exponent [4].

Popřípadě dle následujícího vztahu (2):

$$v_c = \frac{C_V}{T^{1/m}} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

kde: C_V [-] je konstanta [4].

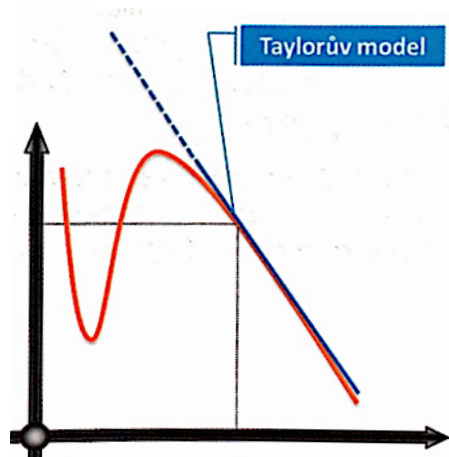
Konstanty C_T , C_V a exponent m jsou ovlivněny množstvím činitelů, z toho důvodu se také mění jejich hodnoty. Byly získány testováním řezných nástrojů při různých řezných rychlostech a při použití kritéria trvanlivosti. Toto kritérium je hranice opotřebení, která by

neměla být překročena. Hodnotu C_T lze odečíst na ose T pro $v_c = 1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a hodnotu C_V na ose v_c pro $T = 1 \text{ min}$. Velikost exponentu m udává citlivost nástrojového materiálu na změnu řezné rychlosti a vyjadřuje směrnici přímky dle vztahu (3) uvedeném níže [3, 4, 5].

$$m = \text{tg } \alpha \quad (3)$$

Změny jednotlivých řezných podmínek mají různý vliv na trvanlivost. Největší význam pro trvanlivost má řezná rychlost. Při jejím zvýšení dochází ke značnému snížení trvanlivosti. Zvýšení hloubky řezu nemá velký dopad na trvanlivost nástroje, proto je možné jej zanedbat. Vliv posuvu je vyšší než u hloubky řezu, se zvyšujícím se posuvem mírně roste opotřebení za jednotku času. Pro ukázkou, při zvýšení hodnot řezných podmínek o 10 % dojde ke snížení trvanlivosti nástroje u hloubky řezu o 5 %, u posuvu o 20 % a u řezné rychlosti o 50 % [11].

Vztah mezi trvanlivostí nástroje a řeznou rychlostí, popsáný v Taylorově modelu, reprezentuje jen jednu část z celku (obr. 9). Při nízkých řezných rychlostech nebo malých posuvech vzniká během obrábění nárůstek, což má negativní vliv na trvanlivost. Naopak při vysokých řezných rychlostech působí na břit vysoké teplotní zatížení vedoucí k tomu, že hlavním mechanismem opotřebení je difuze a plastická deformace. Z toho vyplývá, že původní Taylorův model má svoje limity, s kterými je nutno počítat [11].



Obr. 9 Taylorův model [11].

U moderních řezných nástrojů je potřeba vzít v úvahu řezné podmínky, při kterých jsou tyto nástroje používány. V Taylorově modelu není významně zahrnuto teplotní zatížení působící na břit. Avšak v současné době, při vyšších řezných rychlostech, dochází ke generování deformačního tepla, čímž se zvyšuje tepelné zatížení působící na břit [11].

3 STRUKTURA POVRCHU

Během obrábění vznikají na povrchu obrobku nerovnosti, které tvoří mikrogeometrii (drsnost) povrchu. Povrch po obrábění musí odpovídat určitému rozsahu hodnot, které je možné opakovaně dosahovat. Musí být tedy definovány měřené veličiny a způsob měření, který určí charakter povrchu. Pomocí kolmého řezu k obrobenému povrchu je získán profil povrchu, na základě kterého je možné vyhodnotit veličiny drsnosti vzhledem ke střední čáře. Na tvar profilu obrobeného povrchu a jeho vlastnosti mají vliv materiálové a technologické faktory. Jedná se např. o řeznou rychlost, posuv, geometrii nástroje, chvění nástroje a obráběné součásti, opotřebení řezného nástroje a utváření třísky. Navíc je jakost povrchu ovlivněna statickou a dynamickou tuhostí systému stroj, nástroj a obrobek [2, 16].

3.1 Veličiny drsnosti povrchu

Požadovaná drsnost povrchu se formuluje veličinou drsnosti, číselnou hodnotou a délkou, na které je veličina určována. Charakteristikou mikrogeometrie je R parametr [μm] vypočítaný z profilu drsnosti [16].

3.1.1 Používané R parametry

Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek od střední čáry v rozsahu základní délky (obr. 10). Parametr Ra nevypovídá o velikosti výstupků a prohlubní, což může vést ke zkreslenému posouzení povrchu a zanedbání velkého výstupku nebo prohlubně. Přesto je často používán z důvodu dostupnosti měřicího zařízení a rychlého zjištění hodnot [16, 17, 18].

Rq – průměrná kvadratický úchylka posuzovaného profilu

Rq je střední kvadratickou hodnotou úchylky profilu v rozsahu měřené délky [17].

Rc – průměrná výška prvků profilu

Jedná se o průměrnou hodnotu výšek Z_t prvků v rozsahu základní délky [17].

Rz – největší výška profilu

Je definována jako součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 10) [17].

Rt – celková výška profilu

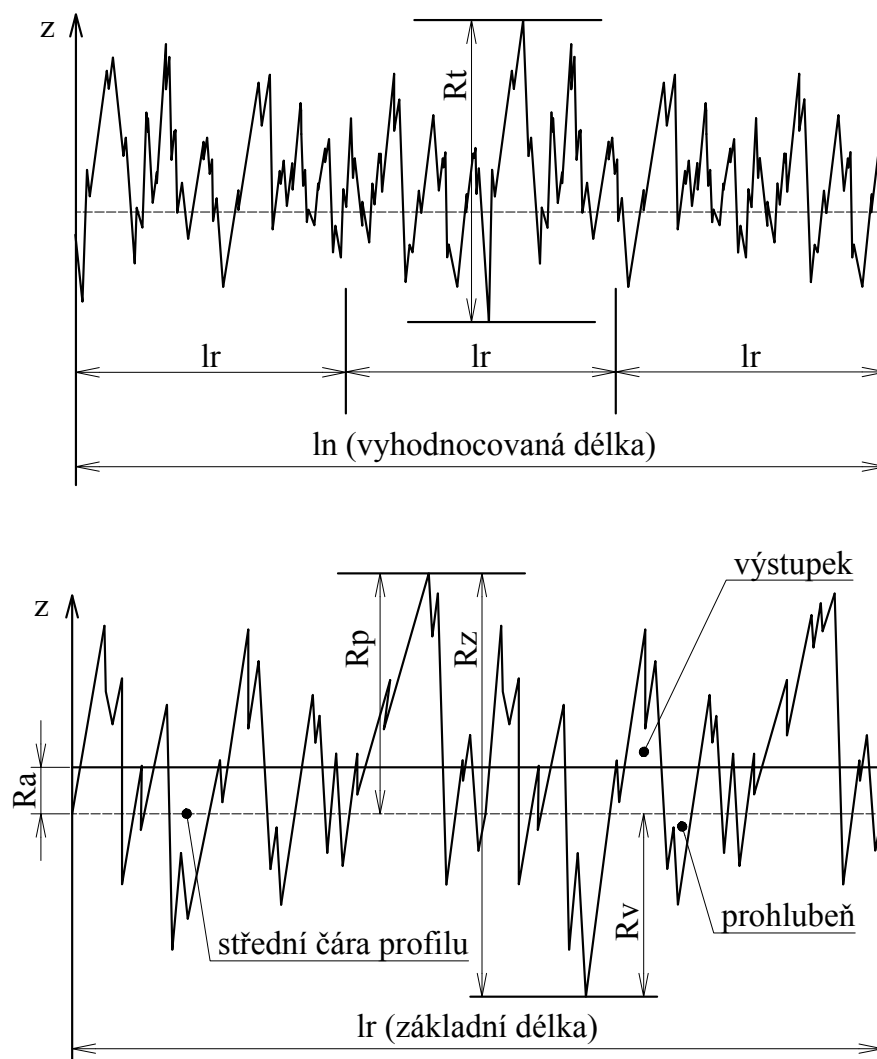
Rt je součtem výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (obr. 10) [17].

Rp – největší výška výstupků profilu

Parametr Rp je roven výšce Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (obr. 10) [17].

Rv – největší hloubka prohlubní profilu

Hodnota Rv je rovna hloubce Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 10) [17].



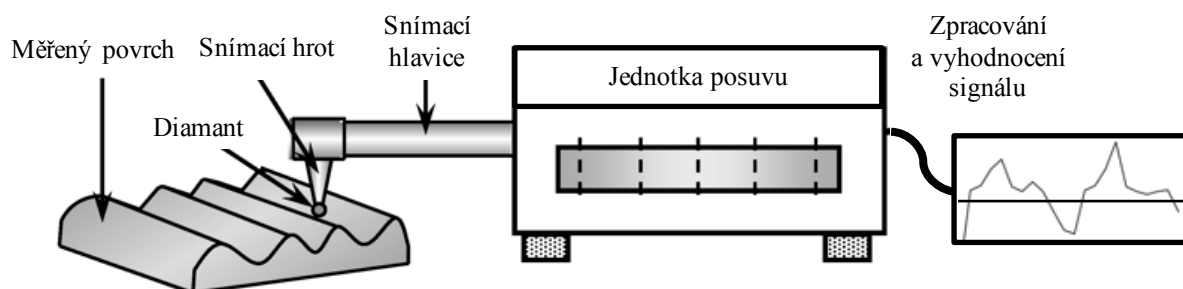
Obr. 10 Schematické zobrazení vybraných R parametrů [17, 19].

3.2 Měření drsnosti

Pro stanovení drsnosti povrchu a měření veličin bylo vyvinuto množství metod a měřicích přístrojů. Obecně existují čtyři kategorie měřicích metod pro vyhodnocení struktury a geometrie povrchu – elektronické, optické, vizuální nebo hmatové a mikroskopické snímací sondy [16, 19].

Elektronický typ měření

Nejčastěji se drsnost povrchu měří dotykem snímacího hrotu profilometru (obr. 11), který se rovnoměrně posouvá po povrchu. Hrot má přesně definovaný poloměr. Změny polohy hrotu, způsobené nerovnostmi povrchu jsou přijímány ve formě mechanického signálu. Tento signál je transformován na elektrický, který je zpracován a vyhodnocen jako číselná hodnota, popřípadě grafický záznam profilu drsnosti. Nevýhodou dotykového profilometru je možnost vyhodnotit pouze 2D povrch (tj. podél vybrané linie) a to s časovou prodlevou mezi měřením a vyhodnocením. Protože se jedná o dotykovou metodu, může dojít ke vzniku mikroškrábnutí na testované ploše. 2D informace zcela nevypovídá o funkčnosti povrchu a může tedy vést k zanedbání podstatných rysů měřeného povrchu [2, 16, 19, 20, 21].



Obr. 11 Schéma profilometru [22].

Optický typ měření

Struktura povrchu je měřena nedestruktivně hodnocením 3D povrchů (tj. na zvolené ploše) v reálném čase. Mezi způsoby optického měření drsnosti povrchu patří metody využívající jev koherenční zrnitosti, fotometrické a interferenční metody [21].

Technologie mikroskopické snímací sondy

Povrch je měřen a zobrazen ve velmi jemném měřítku na molekulární úrovni. Hlavní dva druhy technologie mikroskopické snímací sondy jsou řádkovací tunelová mikroskopie (STM = Scanning Tunneling Microscopy) a mikroskopie atomárních sil (AFM = Atomic Force Microscopy). Nevýhodou STM je, že může být použita pouze pro vodivé nebo polovodivé povrchy. Naproti tomu AFM lze použít na téměř všechny typy povrchů včetně polymeru, keramiky, kompozitu a skla [19].

4 PŘEHLED VÝROBCŮ CERMETOVÝCH VÝSTRUŽNÍKŮ A JEJICH POLOTOVARŮ

V následujícím textu je zpracován průzkum trhu s cermetovými výstružníky a polotovary pro jejich výrobu.

4.1 Výrobci cermetových výstružníků

Níže je představeno 9 nejvýznamnějších výrobců cermetových výstružníků a specifikace jejich výrobků.

4.1.1 August Beck GmbH & Co. KG

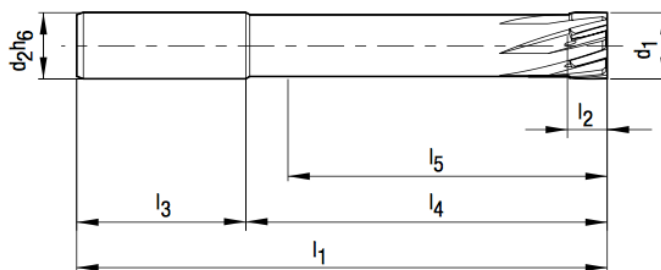
Firma August Beck GmbH & Co. KG byla založena roku 1906 v Německu a postupně se vyvíjela jejich specializace. Zpočátku se jednalo o opravy strojů, v roce 1919 byla zahájena výroba výstružníků a v roce 1953 byly přidány do portfolia firmy nástroje osazené karbidy. V roce 2004 došlo k přesunu společnosti August Beck GmbH & Co. KG do skupiny MAPAL z důvodu zabezpečení stability firmy na trhu. Firma nadále pracuje na vývoji s cílem zvýšit efektivnost s ohledem na životní prostředí [23].

Níže jsou uvedeny výstružníky, které nabízí firma August Beck GmbH & Co. KG. V nabídce jsou varianty pro průchozí i neprůchozí otvory [24].

Vysoce výkonné výstružníky s vnitřním chlazením

- Výstružník MR

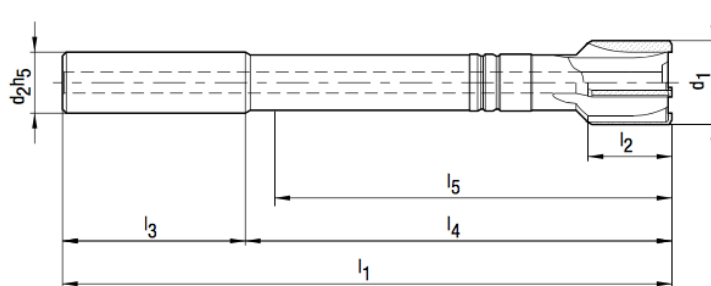
Výstružník s pájenými břity (obr. 12) o průměru d_1 8 až 40 mm, dostupný ve variantě s i bez povlaku. Možnost pevného, roztažitelného nebo nastavitelného provedení [24].



Obr. 12 Výstružník MR [24].

- Výstružník RR

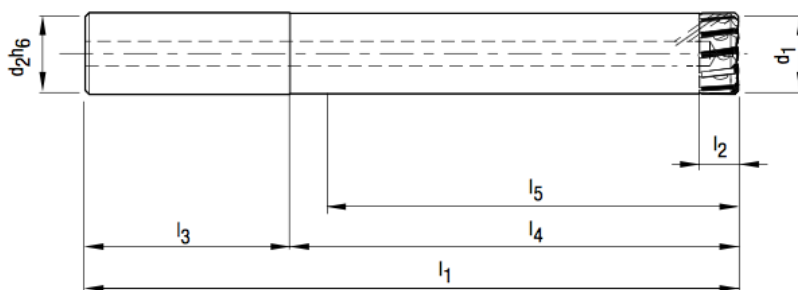
Výstružník monolitický nebo s pájenými břity (obr. 13) o průměru d_1 4 až 40 mm, nepovlakovaný. Vhodný pro obrábění oceli a litiny, dosahuje přesnosti děr H7 [24].



Obr. 13 Výstružník RR [24].

- Výstružník VR

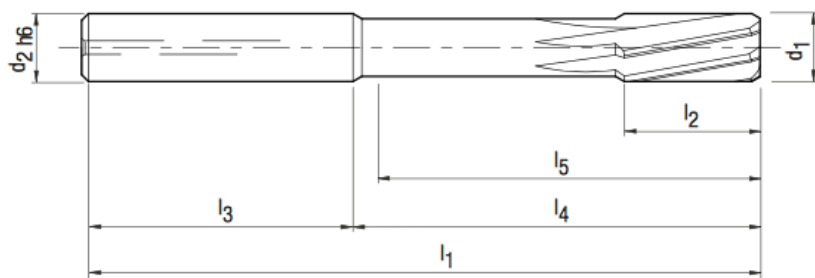
Výstružník s pájenými břity (obr. 14) o průměru d_1 10 až 40 mm. Jedná se o nepovlakovaný cermetový výstružník určený pro průchozí díry s přesností H7. Počet břitů může být v rozmezí od 6 do 18, což zajišťuje optimální kruhovitosť otvoru, vysoké provozní rychlosti a delší životnost nástroje [24].



Obr. 14 Výstružník VR [24].

- Výstružník HNC

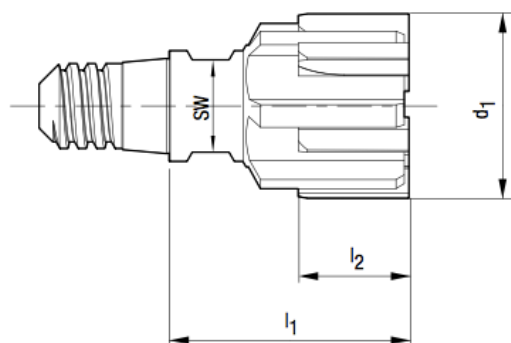
Monolitický výstružník (obr. 15) o průměru d_1 3,97 až 12,03 mm, nepovlakovaný. Vhodný pro průchozí díry, varianta pro neprůchozí díry na vyžádání [24].



Obr. 15 Výstružník HNC [24].

Modulární výstružník XR

Jedná se o vystružovací hlavy, které jsou určeny k umístění do držáku nástrojů ve stroji. Vyznačují se jednoduchou manipulací, vysokými upínacími silami, stabilitou a tuhostí. Systém modulárních výstružníků zajišťuje krátké časy při výměně nástroje. Výstružníky řady XR (obr. 16) mají průměr d_1 8 až 40 mm a jsou nepovlakované [24].



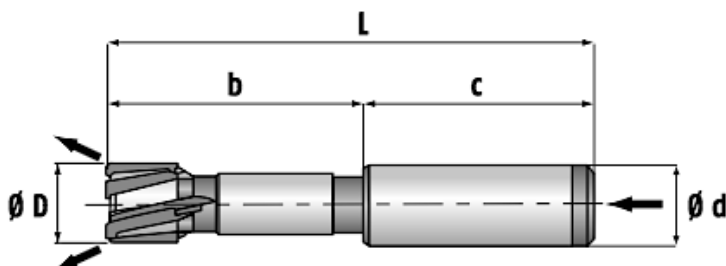
Obr. 16 Výstružník XR [24].

4.1.2 DIATool Präzisionswerkzeug GmbH

Německá firma DIATool Präzisionswerkzeug GmbH má více než 35letou zkušenost s výrobou vícebřitých výstružníků. Nabízí nové technologie, velké množství rezných materiálů a poradenství s aplikacemi. Níže jsou uvedeny nabízené cermetové výstružníky [25].

Monolitické výstružníky

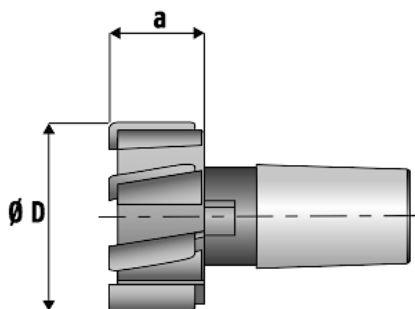
Výstružníky (obr. 17) o průměru D od 5,6 do 60,599 mm se 4 až 8 břity. V nabídce je provedení pro průchozí i neprůchozí díry, s vnitřním chlazením nebo bez. Monolitický design zajišťuje stabilitu, a tím vysokou kvalitu obrobených otvorů. Možnost přepájení břitových destiček nebo přepovlakování [26].



Obr. 17 Monolitický výstružník [26].

Vystružovací hlavy

Modulární vystružovací hlavy (obr. 18) o průměru D od 9,6 do 60 mm s možností rychlé, snadné a přesné výměny. Provedení pro průchozí i neprůchozí otvory [26].



Obr. 18 Vystružovací hlava [26].

4.1.3 FINAL Tools a.s.

Firma FINAL Tools a.s. je česká firma, která se zabývá vývojem, výrobou a prodejem nástrojů pro vystružování, vyvrtávání a obrábění velmi přesných děr. Firma byla založena roku 1991, poté byla v roce 1997 spojena s německou firmou HARTMETALL-WERKZEUGFABRIK ANDREAS MAIER, GmbH a působila pod názvem HAM-FINAL. Do současné podoby se firma dostala v roce 2017, kdy došlo k oddělení od německé firmy a vzniku FINAL Tools a.s. Hlavním zaměřením jsou nástroje s řeznou částí ze slinutých karbidů, cermetů, polykrystalického diamantu (PD) a kubického nitridu boru (PKNB). Firma nabízí standardní nástroje a speciální nástroje vyrobené na zakázku. V současné době pracuje firma hlavně na vývoji a výrobě nástrojů pro použití v automobilovém průmyslu a při výrobě hydraulických komponent. Cílem firmy je pokračovat ve vývoji nástrojů, které budou dosahovat vysoké produktivity a provozní spolehlivosti [27].

Nabídka standardních cermetových nepovlakovaných výstružníků dosahujících přesnost díry H7:

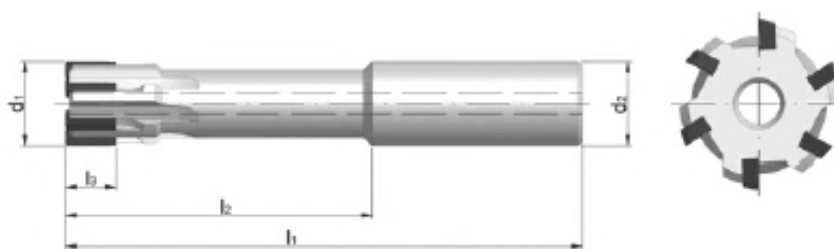
Strojní výstružník z cermetu s válcovou stopkou a s vnitřním chlazením

Výstružník se šesti zuby o průměru d_1 5 až 16 mm (obr. 19 a) nebo o průměru 14 až 25 mm (obr. 19 b) vhodný pro obrábění neprůchozích děr. Určen pro sériovou a velkosériovou výrobu [28].

a)



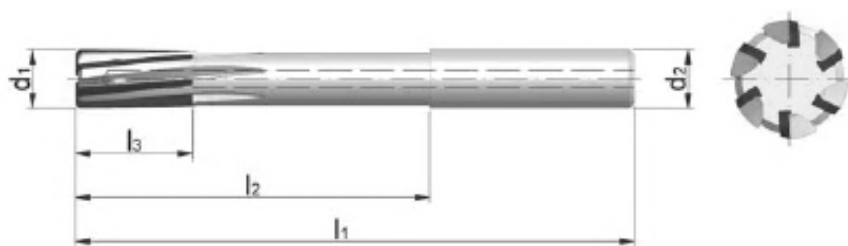
b)



Obr. 19 Výstružník z cermetu s válcovou stopkou [28].

Strojní výstružník z cermetu s válcovou stopkou v levé šroubovici a s vnitřním chlazením

Výstružník o průměru d_1 od 5 do 16 mm (obr. 20) pro obrábění neprůchozích a přerušovaných děr. Vhodný pro sériovou a velkosériovou výrobu [28].



Obr. 20 Výstružník z cermetu s válcovou stopkou v levé šroubovici [28].

Strojní výstružník z cermetu s válcovou stopkou, SN geometrií a s vnitřním chlazením

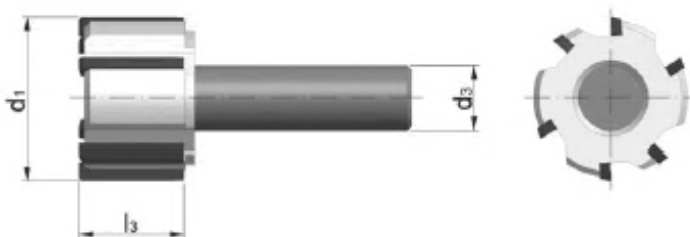
Výstružník o průměru d_1 od 14 do 25 mm (obr. 21) pro obrábění neprůchozích a přerušovaných děr, určen pro sériovou a velkosériovou výrobu. Geometrie SN představuje výbrus na čele břitu, který umožňuje lepší odvod třísky z místa řezu [28, 29].



Obr. 21 Výstružník z cermetu s válcovou stopkou, SN geometrií [28].

Výměnná vystružovací hlavice s břity z cermetu do průchozích a neprůchozích děr

Vystružovací hlavice (obr. 22) o průměru d_1 16 až 40 mm pro obrábění průchozích a neprůchozích děr v sériové nebo velkosériové výrobě [28].



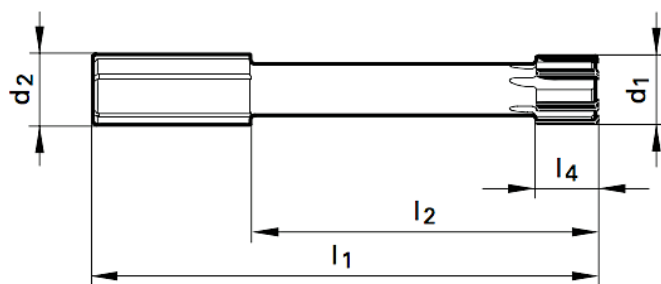
Obr. 22 Vystružovací hlavice s břity z cermetu [28].

4.1.4 Guhring, Inc.

Firma byla založena v roce 1898 v Německu a prvními nástroji byly vrtáky. V roce 1978 Guhring, Inc. představila svůj první povlakovaný vrták a postupně se firma rozšiřovala mimo Evropu. Hlavním zaměřením jsou rotační nástroje včetně výstružníků uvedených níže [30].

Výstružník HR 500 G

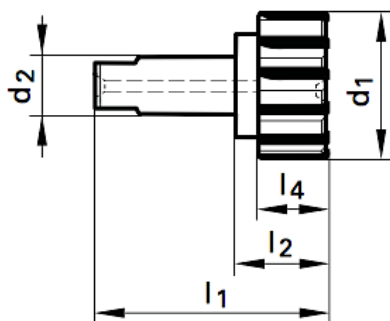
Výstružník s pájenými cermetovými břity (obr. 23) a vnitřním chlazením o průměru d_1 od 6 do 40 mm se 4 až 8 břity. Dosahovaná přesnost je H7. V nabídce jsou výstružníky pro průchozí díry s označením GD a pro neprůchozí díry s označením GS [31].



Obr. 23 Výstružník HR 500 G [31].

Vystružovací hlava HR 500 GT

Vystružovací hlava (obr. 24) s vnitřním chlazením je v nabídce o průměru d_1 41 až 76 mm s 8 až 10 cermetovými břity. Aplikace pro průchozí i slepé otvory s dosahovanou tolerancí H7 [31].



Obr. 24 Vystružovací hlava HR 500 GT [31].

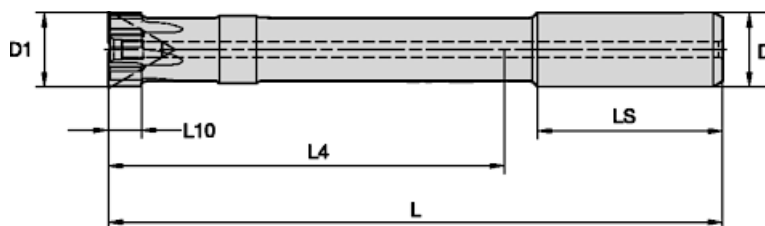
4.1.5 Kennametal GmbH

Firma Kennametal GmbH byla založena v roce 1938 v USA a věnuje se inovacím v oboru materiálů, nástrojů a problémům s opotřebením. Vývoj je zaměřen na rychlou a přesnou výměnu nástrojů, které splňují specifické požadavky zákazníků. Společnost se zaměřuje na letecký, energetický, dopravní průmysl a všeobecné inženýrství [32].

V nabídce má společnost Kennametal GmbH následující cermetové výstružníky.

Výstružník RMB

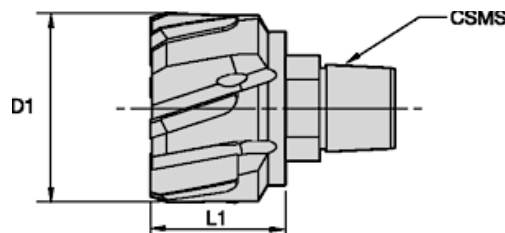
Jedná se o výstružník s pájenými cermetovými břity (obr. 25) a vnitřním chlazením o průměru D_1 14 až 30 mm. Přesnost otvoru IT6 až IT7. Vhodný pro průchozí, neprůchozí a křížící se díry. V nabídce je nepovlakovaný cermet pro obrábění ocelí a povlakovaný cermet pro oceli a litiny [33].



Obr. 25 Výstružník RMB [33].

Vystružovací hlava RHM

Vystružovací hlava (obr. 26) s pájenými cermetovými břity o průměru D_1 14 až 42 mm dosahuje přesnosti IT6 až IT7. Možnost obrábět průchozí, neprůchozí a křížící se díry [33].



Obr. 26 Vystružovací hlava RHM [33].

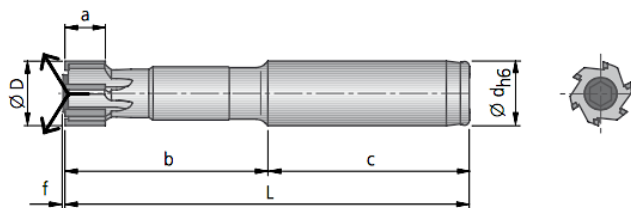
4.1.6 KOMET GROUP GmbH

Firma KOMET GmbH se zaměřuje na komplexní řešení v oblasti přesného vrtání, vystružování, frézování, závitování a monitorování procesů. V nabídce má velké množství různých typů výstružníků z povlakovaných a nepovlakovaných karbidů a cermetů. Každý typ je dostupný ve verzi pro průchozí i slepé otvory. Níže jsou uvedeny některé nabízené výstružníky [34].

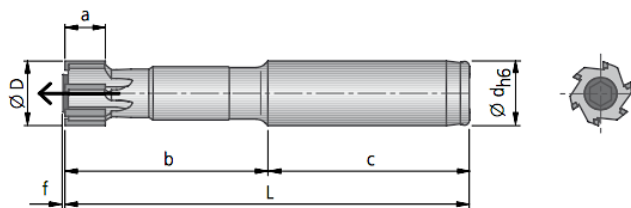
Výstružník Monomax

Monolitický výstružník navržený pro malé průměry děr. Ve verzi pro průchozí díry s radiálním chlazením (obr. 27 a), pro neprůchozí díry s centrálním chlazením (obr. 27 b). Nabízené průměry D od 5,6 do 25,899 mm [35].

a)



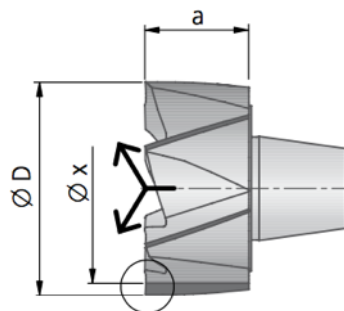
b)



Obr. 27 Výstružník Monomax [35].

Výstružník REAMAX

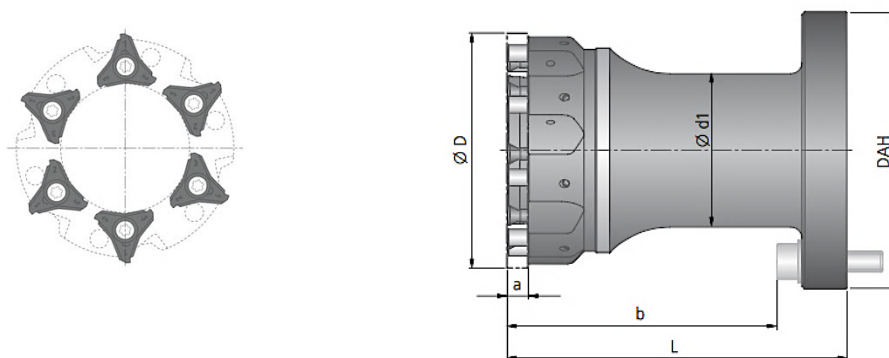
Výstružník s vyměnitelnými břitovými destičkami (obr. 28) o průměru D 12 až 40 mm. Použitelný při vysokých rychlostech s minimálními vibracemi [35].



Obr. 28 Výstružník REAMAX [35].

Výstružník Freemax

Výstružník s polohovatelnými břitovými destičkami (obr. 29) s třemi hranami, které lze bez omezení uložit. Průměr D od 39,9 do 140,1 mm. Tato řada je zaměřena na minimalizaci opotřebení a zvýšení produktivity spolu s jednoduchou manipulací [35].



Obr. 29 Výstružník řady Freemax [35].

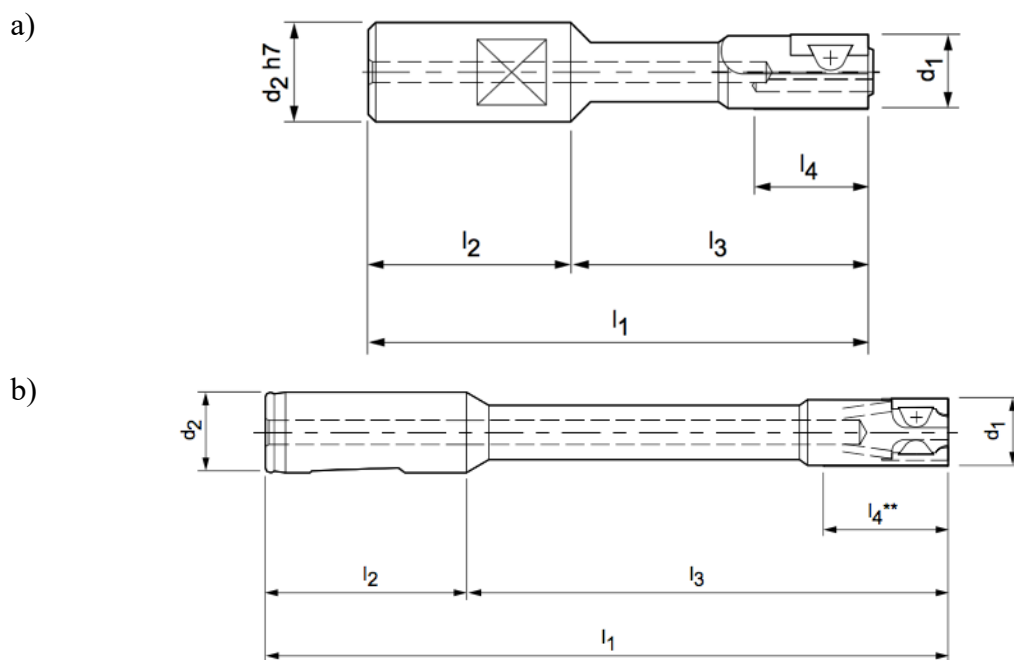
4.1.7 MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG

Firma MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG byla založena roku 1950 v německém městě Aalen. V roce 1954 vyrobila první výstružník a mezi lety 1960 a 1980 se firma soustředila na vývoj a výrobu nástrojů s vodítky pro jemné obrábění otvorů. V dalších letech pokračoval rozvoj firmy až do současné doby, kdy MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG nabízí jedno, dvou a vícebřité výstružníky, monolitické výstružníky z karbidu, cermetu nebo HSS, vyvrtávací nástroje, vyměnitelné břitové destičky a systémy pro obrábění velkých průměrů [36, 37].

Nabídka výstružníků:

Nástroje s vodítky

Výstružníky mají vysokou přesnost a výkon díky přímému vedení pomocí vodicích podložek a vysoké kvalitě břitových destiček. V nabídce jsou nástroje s jedním (obr. 30 a) a dvěma břity (obr. 30 b). Ve srovnání s jednobřitým výstružníkem umožňují dvoubřité zvýšení rezné rychlosti a posuvu. MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG nabízí výstružníky o průměru d_1 5 až 80,29 mm z karbidu, cermetu nebo PD, vhodný pro průchozí a neprůchozí díry [37].



Obr. 30 Výstružníky s vodítky [37].

Pevné vícebřité výstružníky

Vysoce výkonné výstružníky s válcovou stopkou s vnitřním chlazením dosahují přesnosti děr H7:

- Výstružník FixReam (obr. 31 a)

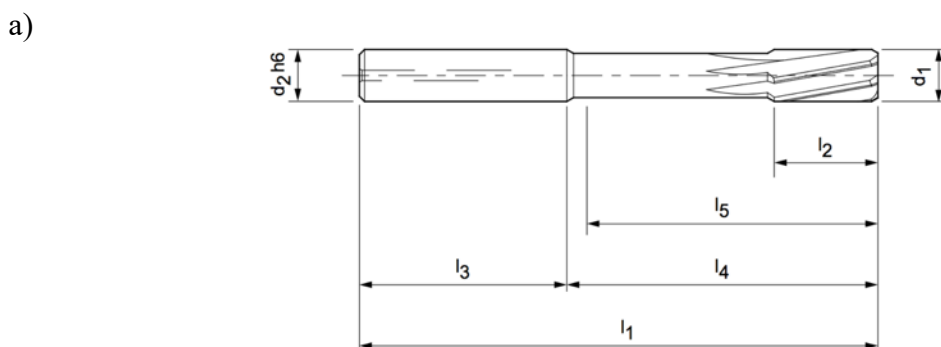
Monolitické výstružníky o průměru d_1 3 až 40 mm, vhodné pro průchozí i neprůchozí díry [37].

- Výstružník MonoReam (obr. 31 b)

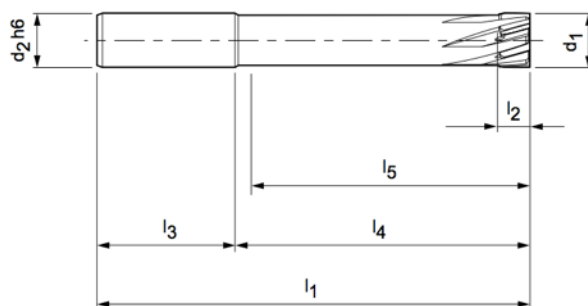
Výstružník o průměru d_1 8 až 40 mm s možností pevného, roztažitelného nebo nastavitelného provedení, pro průchozí i neprůchozí díry [37].

- Výstružník MonoReam Plus (obr. 31 c)

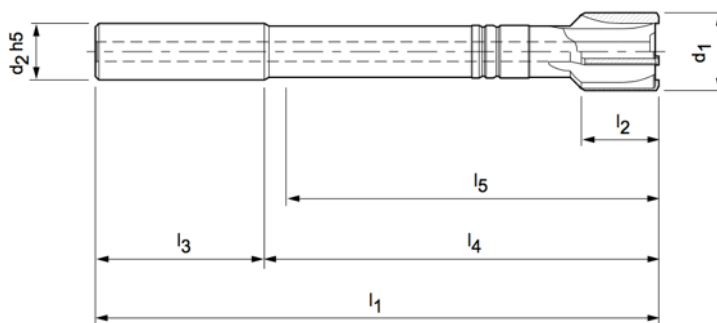
Monolitický cermetový nebo cermetem osazený výstružník o průměru d_1 4 až 40 mm s možností pevného nebo roztažitelného provedení. Vhodný pro průchozí i neprůchozí díry, pro obrábění ocelí a odlitků [37].



b)



c)



Obr. 31 Výstružníky s válcovou stopkou [37].

Výměnné vystružovací hlavy

MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG nabízí dva různé systémy upínání vystružovacích hlav pro bezpečnou a snadnou manipulaci. Výhodou tohoto systému je možnost vyměnit nástroj přímo na stroji. Výměnné nástroje dosahují stejné trvanlivosti jako monolitické, a navíc jejich použití snižuje provozní náklady [37].

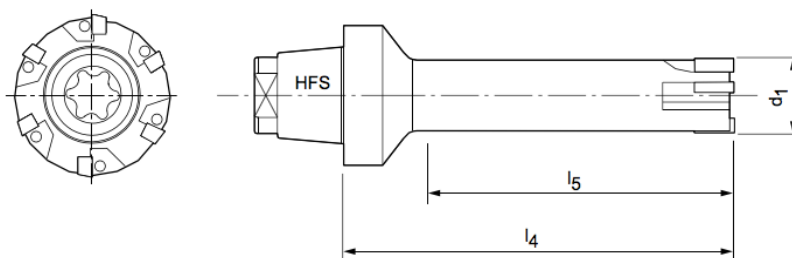
- Vystružovací hlava HPR se systémem upínání HFS (obr. 32 a)

Vystružovací hlavy o průměru d_1 8 až 65 mm pro průchozí i neprůchozí díry. Výstružníky jsou osazeny břity z karbidu, cermetu, PD nebo PKNB. HFS zaručuje vysokou přesnost a přenos výkonu. Jedná se o jednoduchou konstrukci s přímým přívodem chladicí kapaliny [37].

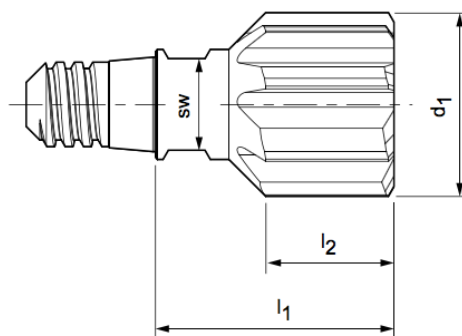
- Vystružovací hlava CPR se systémem upínání CFS (obr. 32 b)

Vystružovací hlavy o průměru d_1 8 až 40 mm pro průchozí i neprůchozí díry. V nabídce je jak monolitické provedení, tak osazení břity z karbidu, cermetu, PD nebo PKNB. Držák CFS je navržen pro nejlepší možnou stabilitu a tuhost s kuželovým a čelním připojením [37].

a)



b)



Obr. 32 Výměnné vystružovací hlavy [37].

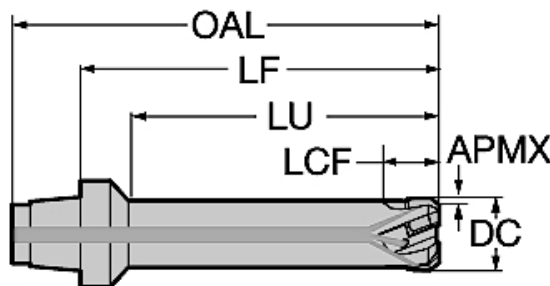
4.1.8 Sandvik Coromant

V roce 1942 vznikla ve švédském Sandvikenu divize pro výrobu slinutých karbidů. Nyní je společnost Sandvik světovým dodavatelem nástrojů pro obrábění kovů. Firma klade důraz na výzkum a vývoj zaměřený na nové produkty a efektivní metody jejich použití [38].

Firma Sandvik Coromant má ve své nabídce jeden výstružník s cermetovými břity:

Výstružník CoroReamer 830

Modulární konstrukce s výměnnými řeznými hlavami, která umožňuje jejich snadnou výměnu zatímco je nástroj upnutý ve vřetenu obráběcího stroje. Průměr vystružovaných děr je od 10 do 31,75 mm s tolerancí H7. Řezné hlavy (obr. 33) jsou osazeny pájenými břity z cermetu. Vhodné pro obrábění ocelí, tvárné a temperované litiny. Mezi aplikace patří vystružování průchozích děr, skloněných povrchů a křížících se děr [39].



Obr. 33 Výstružník CoroReamer 830 [39].

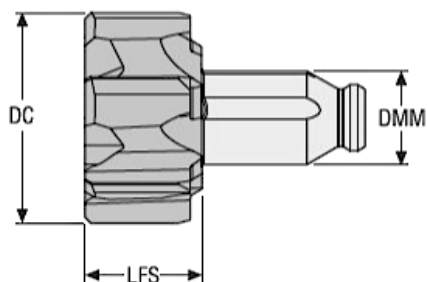
4.1.9 Seco Tools CZ, s.r.o.

Společnost Seco Tools CZ, s.r.o. nabízí kompletní řešení pro frézování, soustružení, obrábění otvorů a závitování. Firma klade důraz na zvýšení produktivity, kvalitu a životní prostředí. Jedním z kroků pro dlouhodobou udržitelnost je recyklace použitého karbidu [40].

Firma vznikla ve Švédsku v roce 1873 a zabývala se výrobou ocelových drátů a trubek. V roce 1932 uvedla na trh první řezný nástroj a v následujících desetiletích se firma zaměřila na zpracování produktů práškové metalurgie. V roce 1974 byla založena společnost Seco Tools AB, která je od roku 2012 součástí skupiny Sandvik [40].

Výstružník s vyměnitelnou hlavičkou – PRECIMASTER PLUS

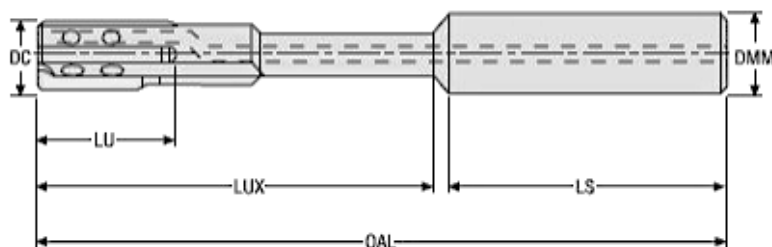
Jedná se o vysoce přesný systém upínání s vyměnitelnými monolitními karbidovými hlavami pro vystružování slepých i průchozích otvorů. Upínání umožňuje rychlou výměnu vystružovací hlavy díky třem čepům zapadajícím do drážek výstružníku. Výstružník (obr. 34) o průměru DC 7,75 až 60 mm je schopný dosáhnout tolerance díry až IT6 a drsnosti povrchu Ra 0,4 až 0,8 μm . Při vystružování slepého otvoru chladicí kapalina vyplavuje třísky směrem nahoru podél břitů, zatímco u průchozích otvorů kapalina ústí do drážek břitů a vyplavuje třísky dopředu. V nabídce jsou tři základní geometrie nástroje a možnost volby mezi povlakovaným a nepovlakovaným karbidem nebo cermetem [41, 42].



Obr. 34 Výstružník s vyměnitelnou hlavičkou [42].

Nastavitelný výstružník s jedním břitem – BIFIX

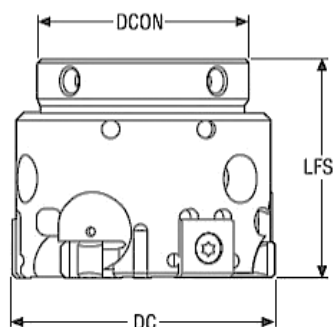
Výstružník (obr. 35) o průměru DC 5,9 až 60,5 mm s vyměnitelnými břity pro obrábění průchozích nebo neprůchozích otvorů. Možnost vystružování otvorů s tolerancí IT6 a jakostí povrchu Ra 0,25 μm , díky třem cermetovým vodícím ploškám a přesnému nastavovacímu systému [41, 42].



Obr. 35 Nastavitelný výstružník s jedním břitem [42].

Nastavitelný výstružník pro velké průměry – XFIX

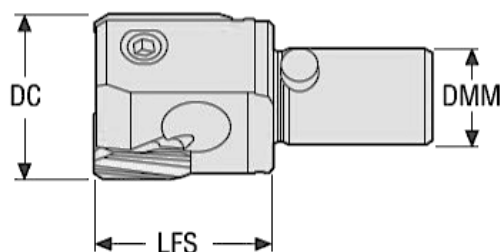
Seco nabízí vícebřité výstružníky (obr. 36) o průměru 39,5 až 154,5 mm, které dosahují hloubky až 6,5xD a tolerance IT6. Výstružníky XFIX jsou osazeny destičkami z karbidů nebo cermetů o čtyřech nebo osmi hranách. Mají systém odpružených vodítek pro zajištění stability řezného procesu [41, 42].



Obr. 36 Nastavitelný výstružník pro velké průměry [42].

Nastavitelný výstružník s jedním břitem – PRECIFIX

Vysoce přesné výstružníky (obr. 37) s vyměnitelnými břitovými destičkami o průměru DC 11,75 až 60,5 mm. Umožňují dosahovat tolerance otvorů IT6 a drsnosti povrchu Ra 0,4 až 0,8 μm díky dvojitému náběžnému úhlu a stabilnímu upínacímu systému. Výstružníky jsou určeny pro obrábění průchozích i neprůchozích děr [41, 42].



Obr. 37 Nastavitelný výstružník s jedním břitem [42].

4.1.10 Srovnání výrobců výstružníků

V tab. 1 jsou uvedeny parametry a možné aplikace nabízených výstružníků od jednotlivých firem. Dle informací v tab. 1 je zřejmé, že výstružníky, které dosahují vysokých tolerancí děr vyrábí firma Seco Tools CZ, s.r.o a firma Kennametal GmbH. Výstružníky pro vystružování děr o malých průměrech nabízí firmy MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG, August Beck GmbH & Co. KG a FINAL Tools a.s.

Tab. 1 Porovnání nabídky výstružníků [23–42].

| Výrobce | Průměr [mm] | Tolerance | Povlak | Otvory | | | |
|---|---------------|------------|--------|----------|------------|-------------|------------|
| | | | | Průchozí | Neprůchozí | Přerušované | Křížící se |
| August Beck GmbH & Co. KG | 4 až 40 | IT7 | ano | × | × | | |
| DIATool Präzisionswerkzeug GmbH | 5,6 až 60,599 | IT7 | ano | × | × | | |
| FINAL Tools a.s. | 5 až 40 | IT7 | ne | × | × | × | |
| Guhring, Inc. | 6 až 76 | IT7 | ne | × | × | | |
| Kennametal GmbH | 14 až 42 | IT6 až IT7 | ano | × | × | | × |
| KOMET GROUP GmbH | 5,6 až 140,1 | – | ano | × | × | | |
| MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG | 3 až 80,29 | IT7 | ano | × | × | | |
| Sandvik Coromant | 10 až 31,75 | IT7 | ne | × | | | × |
| Seco Tools CZ, s.r.o. | 5,9 až 154,5 | IT6 | ano | × | × | | |

4.2 Výrobci cermetových polotovarů

Kapitola představuje současný stav dodavatelů cermetových polotovarů a popisuje vlastnosti jednotlivých polotovarů pro výrobu výstružníků.

4.2.1 CERATIZIT Luxembourg S. à r. l.

Firma CERATIZIT Luxembourg S. à r. l. vyvíjí a vyrábí řezné nástroje, vyměnitelné břitové destičky, karbidové a cermetové tyče. Současně se věnuje vývoji nových karbidů a jejich testování. V nabídce má firma cermet třídy CTF28T odolný proti oxidaci, vhodný pro výrobu nepovlakovaných výstružníků, které jsou určeny pro obrábění oceli. Vlastnosti zmíněného cermetu jsou uvedeny v tab. 2. Dle katalogu jsou dostupné slinované tyče o průměru 3,4 až 12,4 mm, broušené tyče s tolerancí h6 o průměru 3 až 12 mm, slinované tyče o průměru 6,45 až 12,55 mm s otvorem pro přívod chladicí kapaliny (průměr otvoru 1 až 2 mm). Standardní délka tyčí je 330 mm. CERATIZIT Luxembourg S. à r. l. také nabízí cermetové polotovary pro dokončovací nástroje s pájenými břity [43].

Tab. 2 Vlastnosti cermetu [43].

| Třída | Pojivo [hm %] | Tvrdość [HRA] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|--------|---------------|---------------|-----------------------|
| CTF28T | 14,1 | 91,8 | 2000 |

4.2.2 Changsha Langfeng Metallic Material Co., Ltd

Čínská firma založená v roce 2009 vyrábí materiály pro vojenské raketové systémy, povlakované materiály, přísady slinutých karbidů a cermetové polotovary. Mezi nabízené polotovary patří cermetové TiC nebo Ti(C, N) tyče a pláty. Vlastnosti jednotlivých

cermetových tříd jsou uvedeny v tab. 3. Tyče jsou k dostání v neopracovaném a broušeném stavu s tolerancí h6. Cermetové tyče s otvorem pro přívod procesní kapaliny mají průměr od 6,4 do 20,4 mm, plné tyče mají průměr od 3 do 20 mm [44].

Tab. 3 Vlastnosti cermetů [44].

| Třída | Chemické složení | Tvrdość [HRA] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|---------|------------------|---------------|-----------------------|
| LFT10 | 10%CoNi-WC-TiCN | 93 | 2150 |
| LFT15 | 15%CoNi-WC-TiCN | 92,5 | 2050 |
| LFT15-N | 15%Ni-WC-TiCN | 92,5 | 2050 |
| LFT20 | 20%CoNi-WC-TiCN | 91 | 2250 |

4.2.3 Chengdu Met-ceramic Advanced Materials Co., Ltd

Firma se zaměřuje na výrobu kovokeramických materiálů a řezných nástrojů. V nabídce má cermetové polotovary nebo vyměnitelné břitové destičky pro soustružení, frézování a vrtání. Nabízí také cermetové tyče o průměru 2,5 až 14 mm a cermetové pláty. Vlastnosti cermetových tyčí jsou uvedeny v tab. 4 [45].

Tab. 4 Vlastnosti cermetových tyčí [45].

| Třída | Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] | Tvrdość [HRA] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|--------|---|---------------|-----------------------|
| MC102A | 7,15 | 92,7 | 2200 |
| MC206L | 7,1 | 92,5 | 2300 |

4.2.4 CY CARBIDE MFG. Co., Ltd.

Firma CYC vyrábí produkty z karbidu wolframu a cermetové materiály. Z cermetů jsou v nabídce tyče a vyměnitelné břitové destičky na bázi TiC a Ti(C, N). Vlastnosti jednotlivých cermetových tříd jsou uvedeny v tab. 5 [46, 47].

Tab. 5 Vlastnosti cermetů [47].

| Třída | Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] | Tvrdość [HRA] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|--------|---|---------------|-----------------------|
| CMT 60 | 7 | 92,3 | 2000 |
| CMT 70 | 7,1 | 91,8 | 2100 |
| CMT 80 | 7,3 | 90,6 | 2250 |

4.2.5 HHT – Hartmetall GmbH & Co. KG

Firma HHT – Hartmetall GmbH & Co. KG se zaměřuje na výrobu polotovarů z karbidů a cermetů. Mezi nabízené cermetové polotovary patří neopracované a broušené plné tyče o průměru 3,2 až 10,3 mm a délce 310 mm. Cermetová řada je určena pro vysoce výkonné nástroje pro dokončovací obrábění s požadavkem vysoké kvality povrchu a rozměrové přesnosti [48].

4.2.6 Kyocera Precision Tools, Inc.

Kyocera Precision Tools, Inc. je výrobce řezných nástrojů, které se používají v medicíně, automobilovém a leteckém odvětví. Firma nabízí řadu cermetových vyměnitelných břitových destiček s PVD povlakem nebo nepovlakované. Základní komponentou je Ti(C, N), Ti(C, N) + NbC, TiC + TiN nebo NbC. Cermety jsou určeny pro obrábění oceli a vyznačují se vysokou odolností proti opotřebení a trvanlivostí při vysokých rychlostech. V tab. 6 jsou uvedeny vlastnosti vybraných nabízených cermetových břitových destiček [49].

Tab. 6 Vlastnosti cermetových břitových destiček [49].

| Třída | Základní komponenta/povlak | Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] | Tvrdość [HV] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|--------|----------------------------|---|--------------|-----------------------|
| TN620 | Ti(C, N) | 6,9 | 1550 | 2500 |
| TN90 | Ti(C, N) + NbC | 6,4 | 1450 | 1960 |
| PV7025 | Ti(C, N)/PVD | 6,4 | 1500 | 2500 |

4.2.7 SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH

Firma SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH vyvíjí a vyrábí komplexní sortiment řezných nástrojů, karbidů, cermetů, PD a PKNB. V nabídce má nepovlakované cermetové vyměnitelné břitové destičky odolné proti otěru a lomu, určené pro vysokorychlostní nepřerušované dokončovací obrábění ocelí a šedé litiny. Dostupné jsou také destičky s PVD povlakem o tloušťce 3 μm . V tab. 7 jsou uvedeny vlastnosti vybraných cermetů [50].

Tab. 7 Vlastnosti vybraných cermetů [50].

| Třída | Povlak | Tvrdość [HRA] | Pevnosť v ohybu [MPa] |
|--------|--------|---------------|-----------------------|
| T1000A | – | 93,3 | 1800 |
| T1500Z | PVD | 92 | 2200 |

4.2.8 TUNGALOY CZECH s.r.o.

Firma Tungaloy Czech, s.r.o. vyrábí karbidové nástroje, frikční a ořevzdorné materiály pro automobilový, stavební, letecký, zdravotní, energetický a dopravní průmysl. Tungaloy Czech, s.r.o. nabízí cermetové destičky povlakované nebo bez povlaku vyznačující se odolností proti lomu a tepelným trhlinám, které jsou určeny pro dokončovací operace s vysokou kvalitou povrchu. Povlak je složen z Ti(C, N, O) a má tloušťku 3 μm nebo z TiN o tloušťce 1 μm [51, 52].

4.2.9 Srovnání výrobců cermetových polotovarů

Tab. 8 porovnává nabídku jednotlivých výrobců a uvádí základní parametry cermetových polotovarů. Mezi nabízené polotovary patří cermetové destičky a tyče s různými průměry.

Tab. 8 Porovnání nabídky cermetových polotovarů [43–52].

| Výrobce | VBD | Cermetové tyče | Průměr [mm] | Délka [mm] | Tolerance | Broušené | Neopracované | Otvor |
|---|-----|----------------|-------------|------------|-----------|----------|--------------|-------|
| CERATIZIT Luxembourg S. à r. l. | | × | 3 až 12,55 | 330 | h6 | × | × | × |
| Changsha Langfeng Metallic Material Co., Ltd | | × | 3 až 20,4 | 330 | h6 | × | × | × |
| Chengdu Met-ceramic Advanced Materials Co., Ltd | × | × | 2,5 až 14 | 330 | h6 | × | × | |
| CY CARBIDE MFG. Co., Ltd. | × | × | | | | | | |
| HHT – Hartmetall GmbH & Co. KG | | × | 3,2 až 10,3 | 310 | | × | × | |
| Kyocera Precision Tools, Inc. | × | | | | | | | |
| SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH | × | | | | | | | |
| Tungaloy Czech, s.r.o. | × | | | | | | | |

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této práce byla provedena ve spolupráci s firmou FINAL Tools a.s., která osazuje nástroje pro obrábění velmi přesných děr břity z cermetů. Firma nakupuje cermety od různých dodavatelů, od kterých získává také informace o užitečných vlastnostech daného nástrojového materiálu. Aby však mohla firma FINAL Tools a.s. zaručit určité výsledky svých nástrojů koncovému zákazníkovi, tak provádí vlastní testy dodaných materiálů.

Předkládaná práce navazuje na dříve provedené testy, které byly zpracovány panem Ing. Ondřejem Kunkelou. Předchozí zkoušky byly realizovány pouze pro dvě řezné rychlosti, nebylo tedy možné sestavit $T-v_c$ závislost. Proto byly přidány další řezné rychlosti a testování bylo dokončeno sestavením $T-v_c$ závislosti.

Následující text obsahuje popis metodiky řezných zkoušek, analýzu procesu obrábění a zpracování výsledků naměřených dat. Data byla získána při testování nástrojů, které byly osazeny cermetovými břity. Byly testovány dva typy cermetů, u kterých bylo cílem získat křivky trvanlivostí. Cermety nesou interní označení SC3 a SC8. Z důvodu ochrany technického řešení není možné zveřejnit složení a mechanické vlastnosti uvedených materiálů. Testy byly provedeny technologií podélného soustružení, které simuluje proces vystružování, včetně jeho pracovních podmínek. Pro obrábění byl použit polotovar o průměru 120 mm a délce 300 mm z oceli 12 050 žíhané naměkko.

Během obrábění byly sledovány následující veličiny:

- maximální opotřebení VB_{max} [mm],
- parametry drsnosti R_a a R_z [μm].

Proces obrábění byl ukončen po dosažení stanovené hodnoty maximálního opotřebení $VB_{max} = 0,13$ mm.

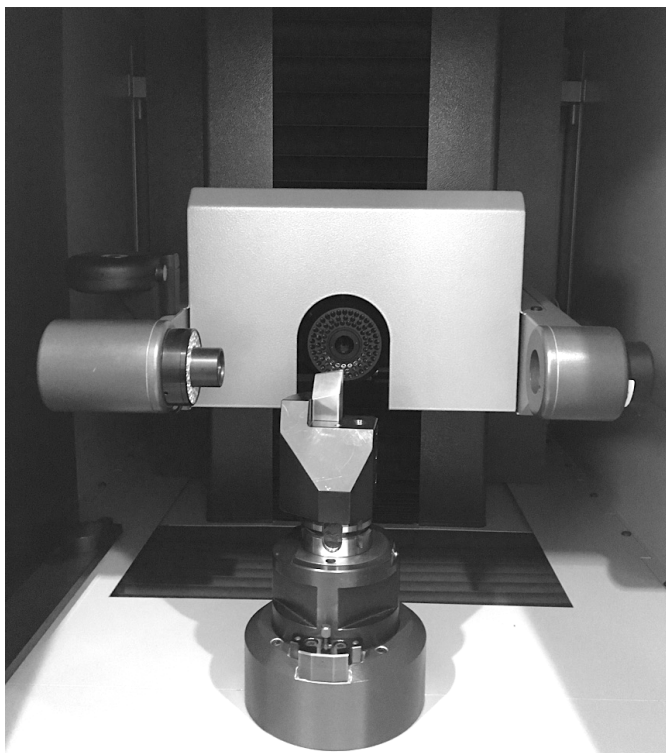
5.1 Obráběcí stroj

Testy byly provedeny na CNC obráběcím centru značky DMG MORI, typ CTX beta 1250 TC (obr. 38). Stroj je určen pro komplexní frézovací a soustružnické operace. Disponuje speciálním vřetenem compactMASTER, které dosahuje točivého momentu 120 Nm s 12 000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Stroj je vybaven kotoučovým zásobníkem pro 24 nástrojů [53].



Obr. 38 Obráběcí stroj CTX beta 1250 TC.

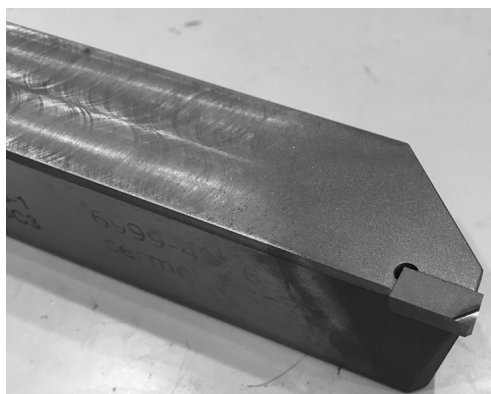
Pro kontrolu geometrie řezného nástroje před spuštěním programu byl použit univerzální měřicí přístroj ZOLLER genius 3s (obr. 39). Přístroj rychle a jednoduše změří vnější konturu nástroje pomocí 3D násvitové a 2D průsvitové kamery [54].



Obr. 39 Měřicí přístroj ZOLLER genius 3s.

5.2 Řezné nástroje

Pro řezné zkoušky byly vyrobeny soustružnické nože s pájenými cermetovými břity (obr. 40) dle výkresu (příloha 1). Jedná se o nepovlakované cermety. Povlakovaný břit by znamenal zaoblení hrany nástroje, což je nežádoucí. Dalším aspektem je nepřesné určení trvanlivosti břitu, protože není známo, jak rychle se bude opotřebovávat samotný cermet po opotřebení povlaku. Případné odloupení povlaku by znamenalo jiné silové působení v místě řezu. Nepovlakovaný cermet má sice menší trvanlivost, ale lze ji garantovat. Tělo nástroje je z oceli 12 060 a zušlechťeno na 900 MPa.



Obr. 40 Soustružnický nůž.

5.3 Řezné podmínky

Pro soustružení byly stanoveny následující řezné podmínky:

- posuv $f = 0,1 \text{ mm}$
- šířka záběru ostří $a_p = 0,15 \text{ mm}$
- řezné rychlosti $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Proces obrábění probíhal s chlazením procesní kapalinou Blasocut Bc 35 Kombi s koncentrací 15 % a tlakem 100 barů.

5.4 Zařízení pro měření

Mikroskop

Opotřebení na hřbetě bylo měřeno pomocí dílenského mikroskopu BLICKLE Multicheck PC500 (obr. 41).



Obr. 41 Mikroskop BLICKLE Multicheck PC500.

Kontrolní snímky byly pořízeny na digitálním optickém mikroskopu Keyence VHX-5000 (obr. 42). Mikroskop Keyence se vyznačuje vysokou hloubkou ostrosti, možností pozorování předmětu z více úhlů a umožňuje spojovat 2D/3D obrazy v reálném čase [55].



Obr. 42 Mikroskop Keyence VHX-5000.

Přenosný drsnoměr

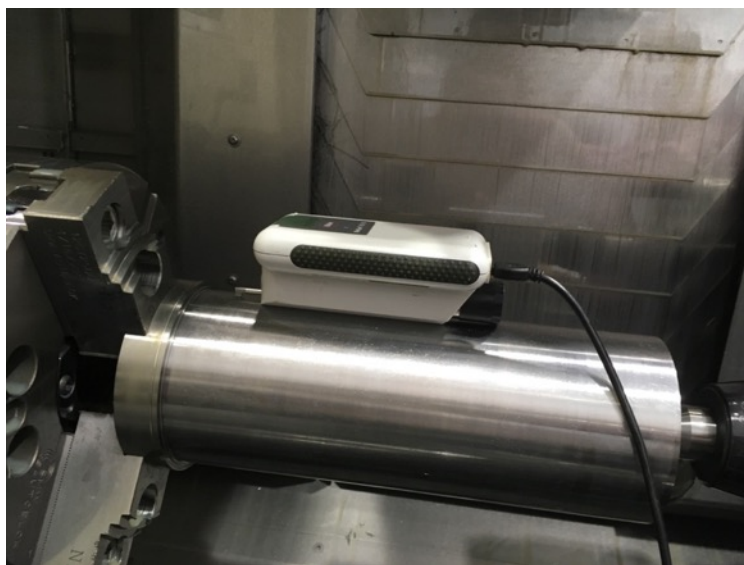
R parametry drsnosti byly změřeny pomocí přenosného drsnoměru MarSurf M300 (obr. 43) od firmy Mahr. Zařízení měří dotykovou metodou s rozsahem 350 μm a rozlišením profilu 8 nm. Obsahuje integrovanou kalibraci snímače, který je osazen diamantovým hrotem o velikosti 2 μm . Spodní část těla drsnoměru je ve tvaru prizma, které umožňuje měřit parametry drsnosti na válcových plochách [56].



Obr. 43 Drsnoměr MarSurf M300.

5.5 Proces měření

Obrobek byl upnut do sklíčidla a podepřen koníkem. Obsluha stroje provedla kontrolu geometrie řezného nástroje, který poté upnula do nožové hlavy. Hodnoty získané z měřicího přístroje byly zadány do programu stroje. Následně byly nastaveny řezné podmínky (viz kap. 5.3) a spuštěn program. Počet řezů byl vypočten programovým systémem stroje na základě požadovaného času obrábění. Po skončení procesu soustružení byl nástroj vyjmut z nožové hlavy a očištěn. Na mikroskopu BLICKLE Multicheck PC500 byla změřena velikost opotřebení VB_{max} , zapsána do tabulky a přiřazena příslušnému času obrábění. Povrch obrobku byl očištěn stlačeným vzduchem a byla změřena jeho drsnost (obr. 44). Měřeny byly veličiny R_a a R_z , které byly zapsány k odpovídající hodnotě opotřebení VB_{max} . Tento postup se opakoval až do okamžiku, kdy bylo dosaženo mezní hodnoty opotřebení nástroje $VB_{max} = 0,13$ mm.



Obr. 44 Měření drsnosti povrchu.

5.6 Výsledky experimentu

Způsobem popsaným výše bylo provedeno měření při třech řezných rychlostech pro cermet SC3 a při čtyřech řezných rychlostech pro cermet SC8. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek a vyneseny do grafů. Parametry drsnosti byly měřeny na třech místech povrchu obrobku. Ze získaných hodnot byl vypočten aritmetický průměr, který představuje výsledné hodnoty.

5.6.1 Řezný materiál cermet SC3

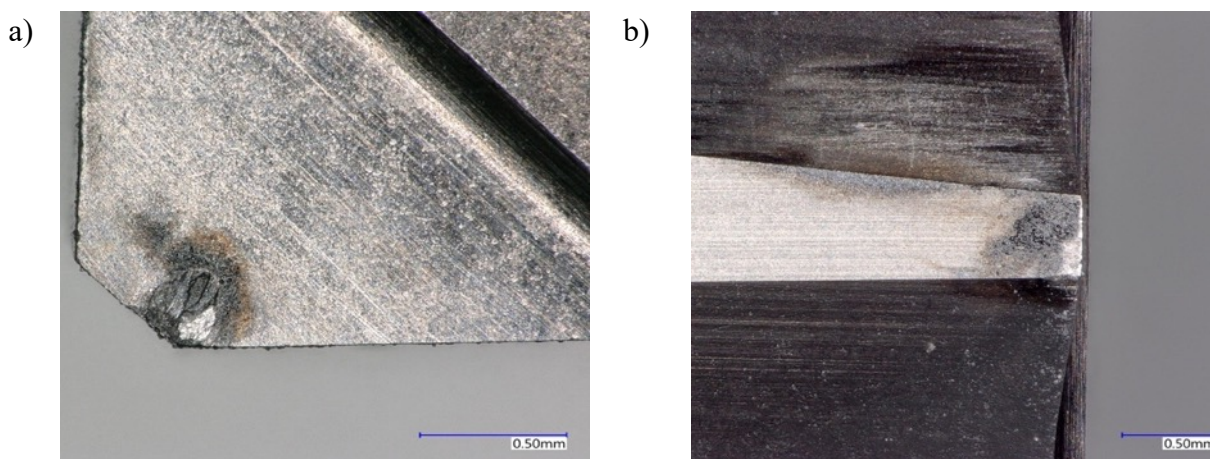
Nástroje s pájenými břity z cermetu SC3 byly testovány pro tři různé rychlosti. V tab. 9 až tab. 11 jsou uvedeny naměřené hodnoty, čas t je uveden v min, parametry drsnosti povrchu R_a a R_z v μm a maximální opotřebení VB_{max} v mm. Z naměřených hodnot byly sestaveny grafické závislosti uvedené níže. Snímky hřbetu nástroje, kde je patrné opotřebení VB_{max} pro jednotlivé časy t jsou uvedeny v příloze 2.

Řezná rychlost $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 9 Naměřené hodnoty pro cermet SC3, řezná rychlost $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 15 | 2,098 | 2,056 | 2,076 | 2,077 | 11,020 | 10,770 | 10,930 | 10,907 | 0,014 |
| 2 | 45 | 2,821 | 2,837 | 2,839 | 2,832 | 11,730 | 12,140 | 11,990 | 11,953 | 0,041 |
| 3 | 74 | 1,629 | 1,622 | 1,905 | 1,719 | 6,388 | 7,031 | 8,095 | 7,171 | 0,104 |
| 4 | 88 | 1,493 | 1,616 | 1,664 | 1,591 | 7,534 | 7,943 | 8,190 | 7,889 | 0,112 |
| 5 | 102 | 1,346 | 1,273 | 1,135 | 1,251 | 7,722 | 7,777 | 6,017 | 7,172 | 0,137 |
| 6 | 116 | 1,264 | 1,270 | 1,473 | 1,336 | 7,094 | 6,801 | 7,442 | 7,112 | 0,156 |

Obr. 45 a) zobrazuje žlábek na čele, jehož hloubka je 20,55 μm, lze také vidět vydrolené ostří o hloubce 20 μm. Obr. 45 b) zobrazuje opotřebení hlavního hřbetu břitu po 116 min soustružení řeznou rychlostí $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



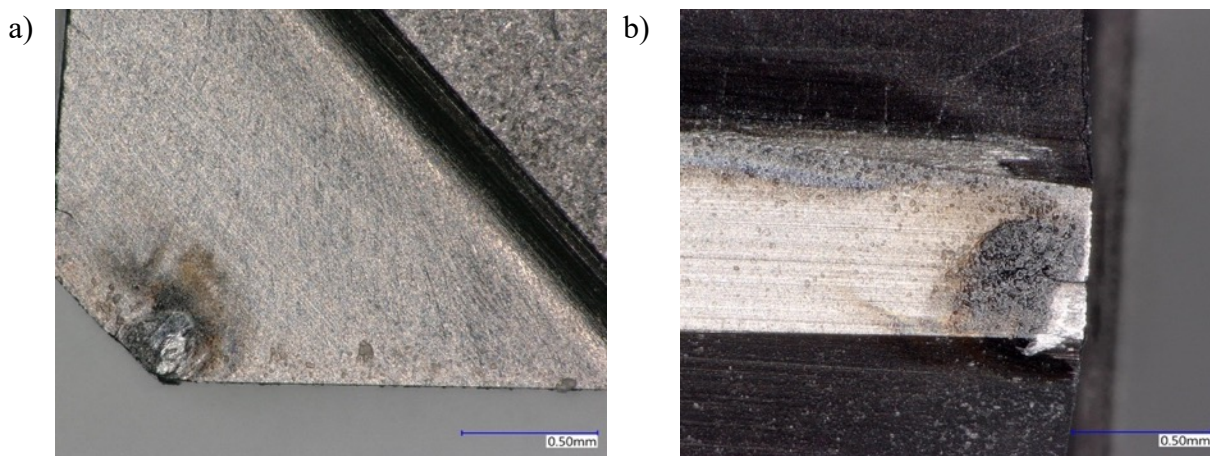
Obr. 45 Celkové opotřebení nástroje SC3 ($v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Řezná rychlost $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro cermet SC3, řezná rychlost $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 20 | 1,890 | 1,895 | 1,876 | 1,887 | 10,310 | 10,240 | 10,400 | 10,317 | 0,030 |
| 2 | 40 | 1,986 | 2,160 | 2,062 | 2,069 | 11,020 | 11,480 | 11,660 | 11,387 | 0,056 |
| 3 | 59 | 1,987 | 1,606 | 2,029 | 1,874 | 10,250 | 9,474 | 10,560 | 10,095 | 0,068 |
| 4 | 78 | 1,397 | 1,481 | 1,541 | 1,473 | 6,525 | 7,604 | 7,140 | 7,090 | 0,085 |
| 5 | 105 | 1,094 | 1,186 | 1,050 | 1,110 | 6,561 | 7,439 | 5,084 | 6,361 | 0,104 |
| 6 | 131 | 0,514 | 0,529 | 0,562 | 0,535 | 3,121 | 3,069 | 3,462 | 3,217 | 0,120 |
| 7 | 166 | 0,376 | 0,412 | 0,443 | 0,410 | 2,528 | 2,562 | 2,789 | 2,626 | 0,156 |

Soustružení při řezné rychlosti $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo ukončeno po 166 min. Na obr. 46 a) je zobrazeno čelo nástroje, na kterém se vytvořil žlábek o hloubce $4,42 \mu\text{m}$, patrné je také vydrolení ostří o hloubce $20 \mu\text{m}$. Obr. 46 b) zobrazuje hlavní hřbet, kde lze ve vzdálenosti $0,23 \text{ mm}$ od špičky nástroje pozorovat hřebenovou trhlinu. Jak bylo uvedeno v kap. 2.1.5, důvodem vzniku hřebenových trhlin je kombinace mechanického a teplotního napětí.



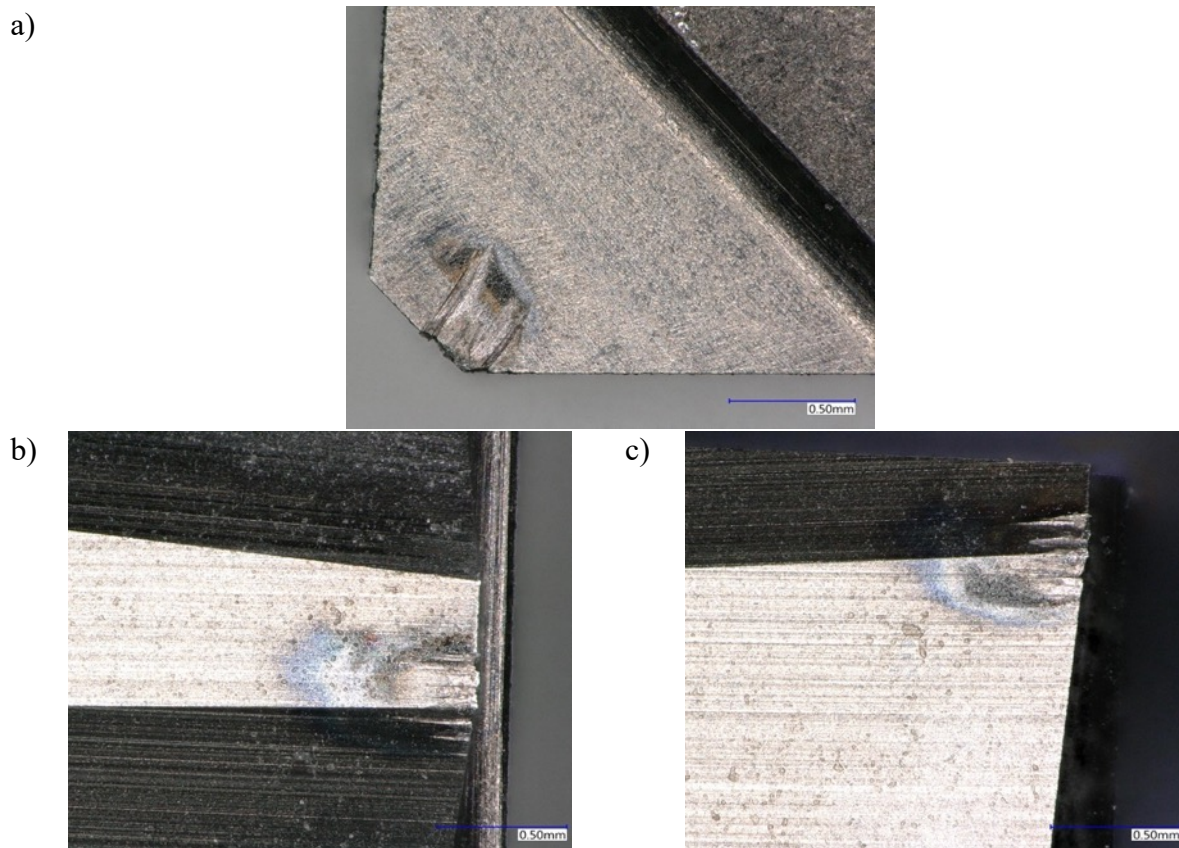
Obr. 46 Celkové opotřebení nástroje SC3 ($v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Řezná rychlost $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro cermet SC3, řezná rychlost $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 12 | 2,299 | 2,074 | 1,720 | 2,031 | 9,121 | 8,275 | 8,463 | 8,620 | 0,089 |
| 2 | 24 | 2,781 | 2,583 | 2,542 | 2,635 | 9,972 | 10,010 | 10,080 | 10,021 | 0,095 |
| 3 | 36 | 2,721 | 2,758 | 2,770 | 2,750 | 10,280 | 10,320 | 10,490 | 10,363 | 0,133 |
| 4 | 49 | 2,737 | 2,691 | 2,833 | 2,754 | 10,790 | 10,340 | 10,300 | 10,477 | 0,137 |
| 5 | 61 | 2,734 | 2,616 | 2,742 | 2,697 | 10,590 | 9,994 | 10,370 | 10,318 | 0,149 |
| 6 | 73 | 2,761 | 2,738 | 2,811 | 2,770 | 10,830 | 10,680 | 10,880 | 10,797 | 0,160 |
| 7 | 85 | 2,756 | 2,751 | 2,731 | 2,746 | 10,660 | 10,640 | 10,780 | 10,693 | 0,178 |
| 8 | 97 | 2,749 | 2,771 | 2,739 | 2,753 | 10,770 | 10,770 | 10,640 | 10,727 | 0,189 |
| 9 | 109 | 2,738 | 2,787 | 2,770 | 2,765 | 10,630 | 10,960 | 10,830 | 10,807 | 0,200 |
| 10 | 121 | 2,668 | 2,752 | 3,075 | 2,832 | 10,290 | 10,130 | 12,310 | 10,910 | 0,224 |

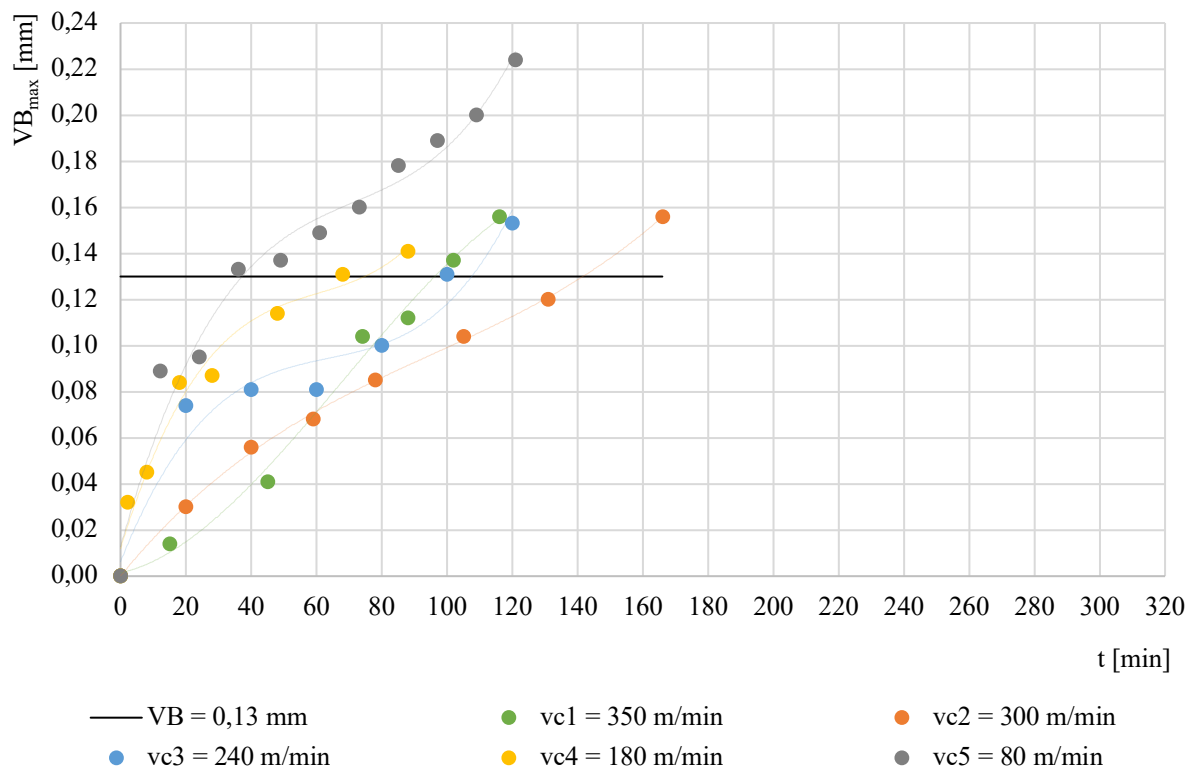
Během testování cermetu SC3 při řezné rychlosti $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ došlo k velmi rychlému opotřebení a dosažení mezní hodnoty VB_{max}. Testy přesto pokračovaly a výsledné opotřebení lze pozorovat na obr. 47 a) ve formě žlábků na čele (hloubka $5,42 \mu\text{m}$). Obr 47 b) zobrazuje opotřebení hlavního hřbetu a obr. 47 c) vedlejšího hřbetu, na obou je možné vidět opotřebení ve formě vrubu v hloubce $30 \mu\text{m}$ od původního břitu.



Obr. 47 Celkové opotřebení nástroje SC3 ($v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Obr. 48 zobrazuje grafickou závislost maximálního opotřebení VB_{\max} na čase t pro řezné rychlosti $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c4} = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V grafu je uvedena hodnota maximálního opotřebení $VB_{\max} = 0,13 \text{ mm}$, pro kterou byl následně sestaven Taylorův model. Ze závislostí na obr. 48 byly odečteny hodnoty T_1 , T_2 , T_3 , T_4 a T_5 , které odpovídají řezným rychlostem v_{c1} , v_{c2} , v_{c3} , v_{c4} a v_{c5} (tab. 12). Na základě zmíněného grafu byla sestavena závislost trvanlivosti a řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích (obr. 49), která je tvořena body $v_{c1} - T_1$, $v_{c2} - T_2$, $v_{c3} - T_3$, $v_{c4} - T_4$ a $v_{c5} - T_5$.

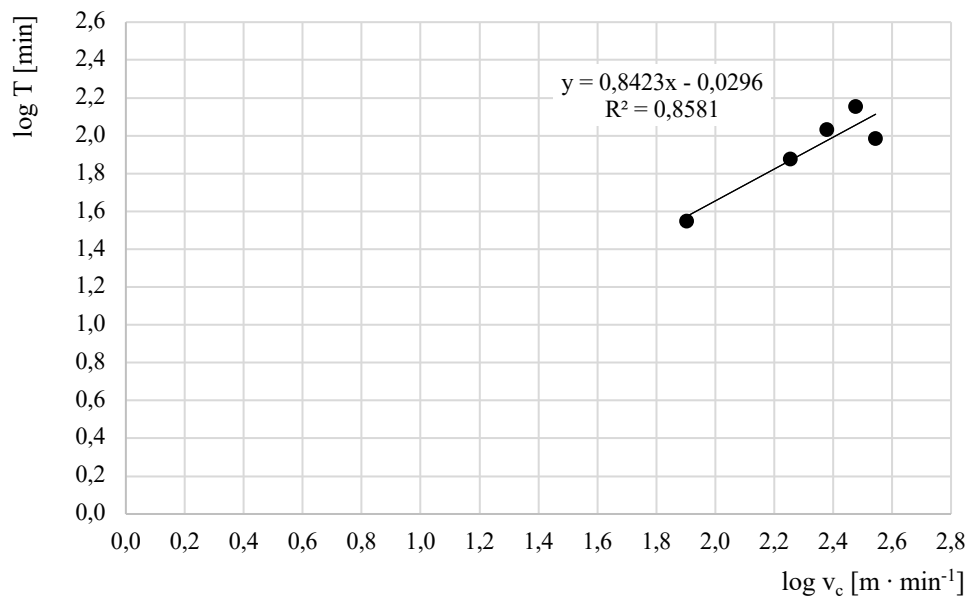
Na obr. 50 a obr. 51 jsou zobrazeny křivky odpovídající naměřeným parametrům drsnosti Ra_{pr} a RZ_{pr} v závislosti na čase t . Křivky na obr. 48 až obr. 51 pro rychlosti $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c4} = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byly sestaveny na základě hodnot naměřených v [57] (příloha 3).



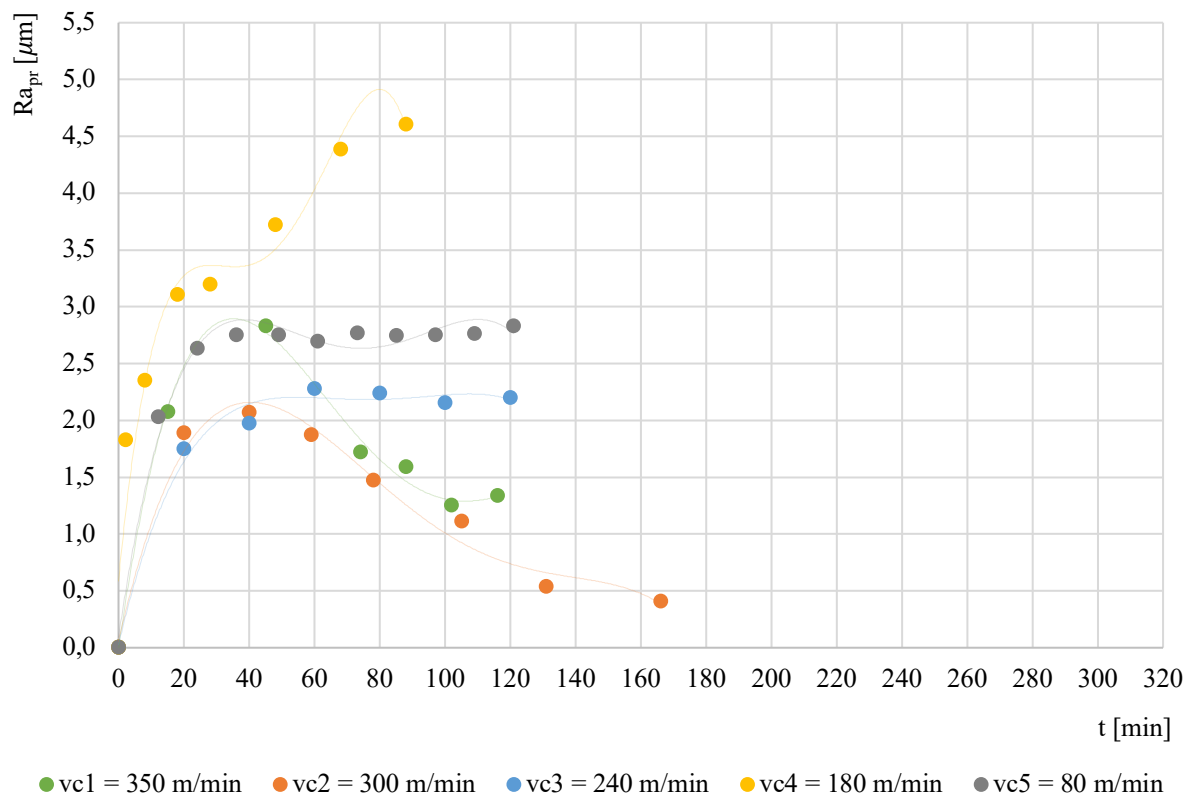
Obr. 48 Závislost maximálního opotřebení VB_{max} na čase t pro cermet SC3 [57].

Tab. 12 Hodnoty řezných rychlostí a jim odpovídající trvanlivosti pro $VB_{max} = 0,13$ mm.

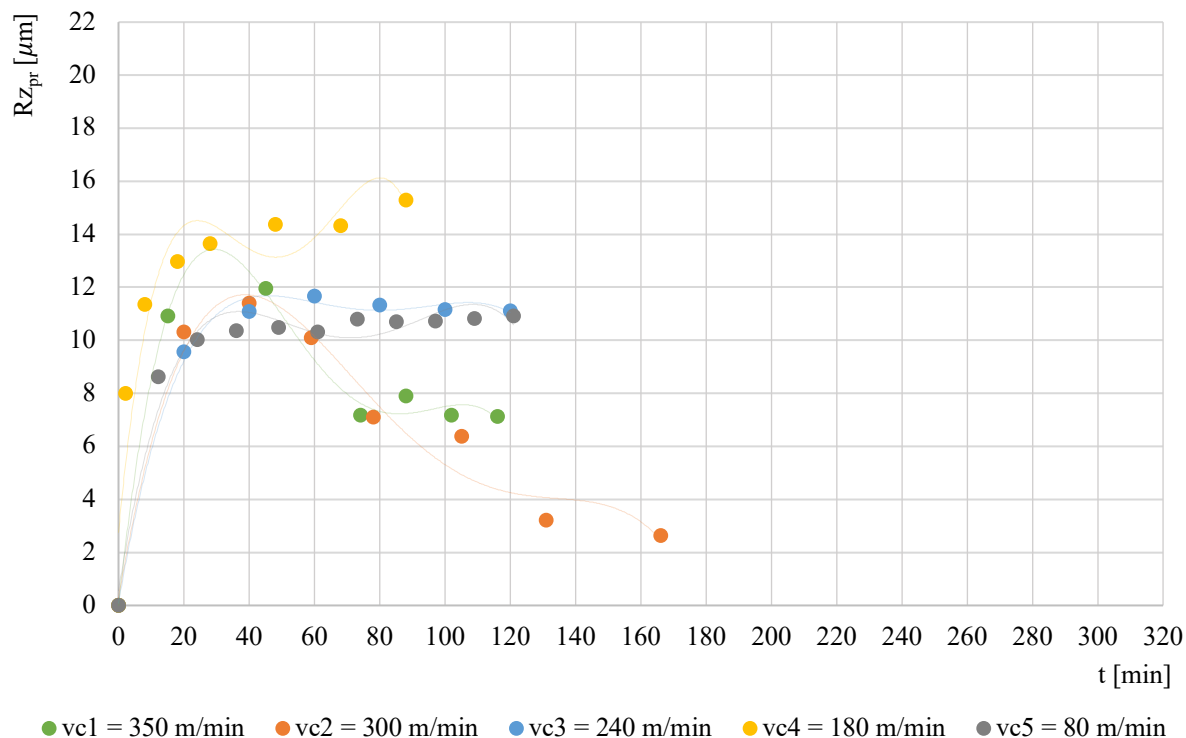
| v_c [$m \cdot min^{-1}$] | $\log v_c$ [$m \cdot min^{-1}$] | T [min] | $\log T$ [min] |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------|
| 80 | 1,903 | 35,2 | 1,547 |
| 180 | 2,255 | 74,9 | 1,874 |
| 240 | 2,380 | 107,8 | 2,033 |
| 300 | 2,477 | 141,8 | 2,152 |
| 350 | 2,544 | 96,1 | 1,983 |



Obr. 49 Závislost trvanlivosti a řezné rychlosti v logaritmickech souřadnicích.



Obr. 50 Závislost průměrné aritmetické úchytky $R_{a_{pr}}$ na čase t pro cermet SC3 [57].



Obr. 51 Závislost největší výšky profilu Rz_{pr} na čase t pro cermet SC3 [57].

5.6.2 Řezný materiál cermet SC8

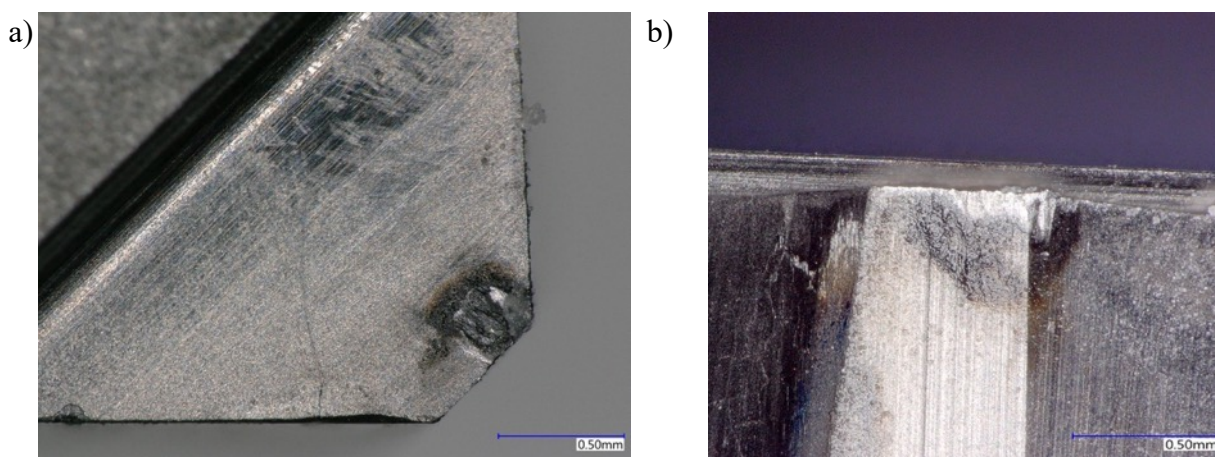
Nástroje s pájenými břity z cermetu SC8 byly testovány pro čtyři různé rychlosti. V tab. 13 až tab. 16 jsou uvedeny naměřené hodnoty, čas t je uveden v min, parametry drsnosti povrchu Ra a Rz v μm a maximální opotřebení VB_{max} v mm. Z naměřených hodnot byly sestaveny grafické závislosti uvedené níže. Snímky hřbetu nástroje, kde je patrné opotřebení VB_{max} pro jednotlivé časy t jsou uvedeny v příloze 2.

Řezná rychlost $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 13 Naměřené hodnoty pro cermet SC8, řezná rychlost $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra_1 [μm] | Ra_2 [μm] | Ra_3 [μm] | Ra_{pr} [μm] | Rz_1 [μm] | Rz_2 [μm] | Rz_3 [μm] | Rz_{pr} [μm] | VB_{max} [mm] |
|---------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1 | 5 | 1,748 | 1,743 | 1,730 | 1,740 | 7,879 | 7,703 | 7,876 | 7,819 | 0,000 |
| 2 | 14 | 2,085 | 2,053 | 2,011 | 2,050 | 10,220 | 10,200 | 9,836 | 10,085 | 0,048 |
| 3 | 23 | 2,345 | 2,347 | 2,286 | 2,326 | 11,860 | 11,920 | 11,960 | 11,913 | 0,073 |
| 4 | 32 | 2,584 | 2,591 | 2,521 | 2,565 | 12,570 | 12,600 | 12,540 | 12,570 | 0,098 |
| 5 | 45 | 2,927 | 2,811 | 2,868 | 2,869 | 13,600 | 13,410 | 13,480 | 13,497 | 0,097 |
| 6 | 58 | 3,034 | 3,026 | 3,020 | 3,027 | 13,800 | 12,990 | 13,070 | 13,287 | 0,097 |
| 7 | 83 | 2,953 | 2,963 | 2,828 | 2,915 | 10,830 | 11,100 | 10,760 | 10,897 | 0,108 |
| 8 | 107 | 3,062 | 3,038 | 2,903 | 3,001 | 11,560 | 11,190 | 11,150 | 11,300 | 0,122 |
| 9 | 140 | 2,631 | 2,352 | 2,269 | 2,417 | 10,070 | 8,282 | 8,312 | 8,888 | 0,156 |

Po dosažení maximálního opotřebení na hlavním hřbetě (obr. 52 b) při rychlosti $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byl změřen žlábek na čele (obr. 52 a) o hloubce $12,34 \mu\text{m}$.



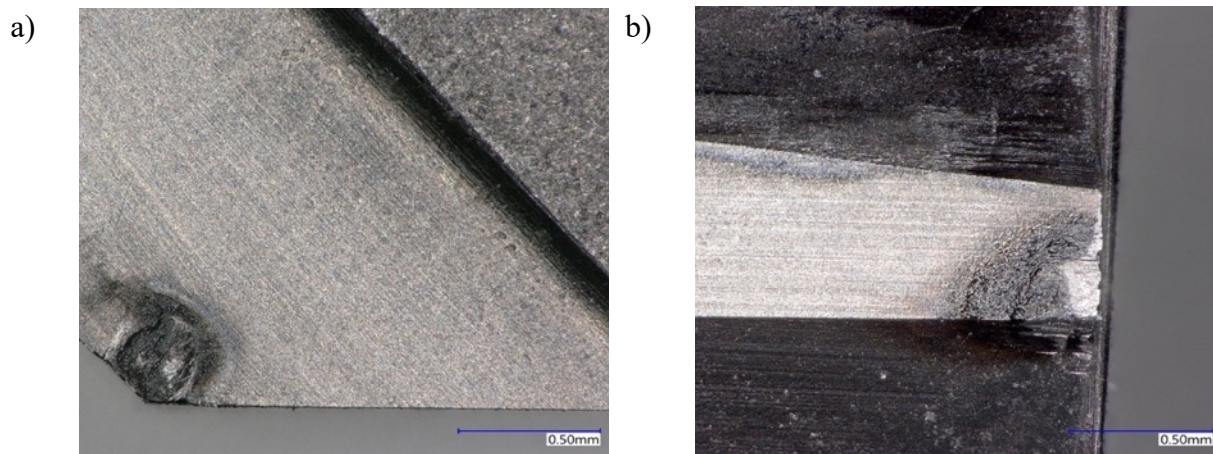
Obr. 52 Celkové opotřebení nástroje SC8 ($v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Řezná rychlost $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 14 Naměřené hodnoty pro cermet SC8, řezná rychlost $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 20 | 2,862 | 2,611 | 2,357 | 2,610 | 10,680 | 10,940 | 10,980 | 10,867 | 0,027 |
| 2 | 45 | 2,893 | 2,839 | 2,921 | 2,884 | 11,240 | 11,290 | 11,870 | 11,467 | 0,044 |
| 3 | 85 | 3,353 | 3,399 | 3,411 | 3,388 | 13,760 | 13,470 | 13,960 | 13,730 | 0,058 |
| 4 | 117 | 3,337 | 3,162 | 3,718 | 3,406 | 15,650 | 15,890 | 20,380 | 17,307 | 0,083 |
| 5 | 147 | 2,420 | 1,791 | 2,370 | 2,194 | 11,930 | 9,422 | 12,700 | 11,351 | 0,091 |
| 6 | 177 | 2,357 | 1,956 | 2,038 | 2,117 | 10,680 | 10,240 | 11,210 | 10,710 | 0,095 |
| 7 | 207 | 1,836 | 1,890 | 2,033 | 1,920 | 10,080 | 10,520 | 10,260 | 10,287 | 0,110 |
| 8 | 241 | 1,693 | 1,916 | 2,097 | 1,902 | 9,621 | 11,360 | 11,110 | 10,697 | 0,125 |
| 9 | 274 | 1,555 | 2,004 | 2,257 | 1,939 | 8,288 | 12,290 | 12,070 | 10,883 | 0,128 |
| 10 | 306 | 1,057 | 1,069 | 1,262 | 1,129 | 5,094 | 5,210 | 6,133 | 5,479 | 0,135 |

Test provedený pro řeznou rychlost $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byl ukončen po 306 min při velikosti opotřebení $VB_{\text{max}} = 0,135 \text{ mm}$. Obr. 53 a) zobrazuje opotřebení ve formě žlábků na čele, jehož hloubka je $17,66 \mu\text{m}$. Další formou opotřebení je vydrolené ostří v hloubce $20 \mu\text{m}$ na hlavním hřbetu a $10 \mu\text{m}$ na vedlejším hřbetu. Na obr. 53 b) je patrná hřebenová trhlina ve vzdálenosti $0,24 \text{ mm}$ od špičky nástroje.



Obr. 53 Celkové opotřebení nástroje SC8 ($v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Řezná rychlost $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 15 Naměřené hodnoty pro cermet SC8, řezná rychlost $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

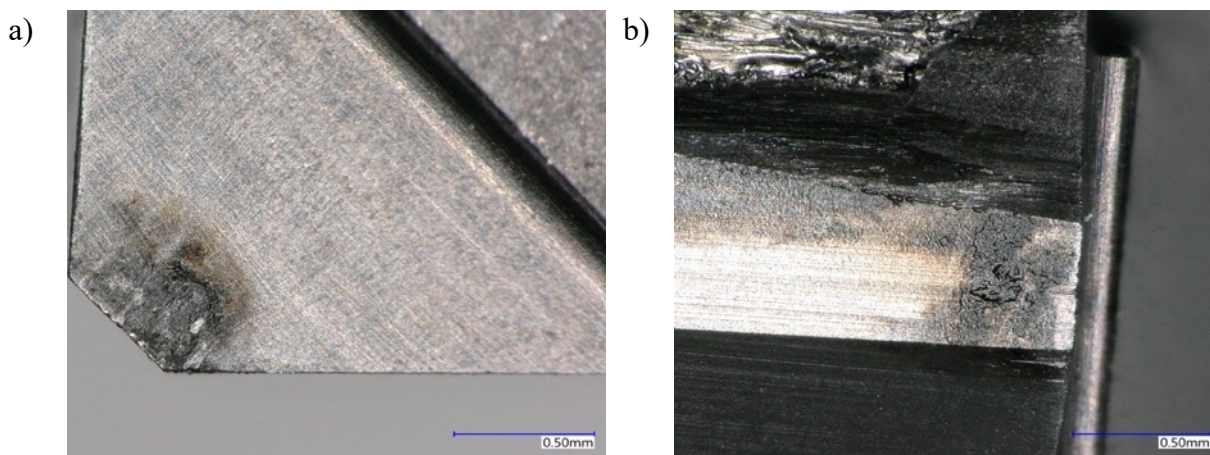
| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 18 | 2,137 | 2,202 | 2,136 | 2,158 | 11,590 | 11,780 | 11,580 | 11,650 | 0,019 |
| 2 | 27 | 2,638 | 2,615 | 2,354 | 2,536 | 12,450 | 13,050 | 12,210 | 12,570 | 0,035 |
| 3 | 44 | 2,865 | 1,265 | 2,751 | 2,294 | 12,980 | 7,171 | 13,770 | 11,307 | 0,037 |
| 4 | 78 | 2,451 | 2,646 | 2,198 | 2,432 | 13,260 | 13,430 | 13,430 | 13,373 | 0,046 |
| 5 | 111 | 2,855 | 2,729 | 3,085 | 2,890 | 13,290 | 13,200 | 13,710 | 13,400 | 0,073 |
| 6 | 143 | 3,128 | 3,024 | 1,633 | 2,595 | 12,970 | 12,920 | 8,410 | 11,433 | 0,075 |
| 7 | 182 | 2,773 | 2,530 | 2,831 | 2,711 | 13,770 | 12,660 | 13,710 | 13,380 | 0,081 |
| 8 | 220 | 3,003 | 2,991 | 3,223 | 3,072 | 18,780 | 17,430 | 19,300 | 18,503 | 0,085 |

Při obrábění řeznou rychlostí $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ nebylo dosaženo stanovené hodnoty opotřebení $VB_{\text{max}} = 0,13 \text{ mm}$ z důvodu lomu břitu (obr. 54). Během soustružení se lom projevil změnou tvaru třísky a změnou směru odchodu třísky. Lom břitu vznikl v okamžiku, kdy nástroj dojel do rohu a mezi břitem a boční plochou obrobku uvízla tříška.



Obr. 54 Lom břitu, cermet SC8.

Obr. 55 a) zobrazuje opotřebení břitu na čele. Na obr. 55 b) lze vidět vrub na hlavním a vedlejším hřbetě.



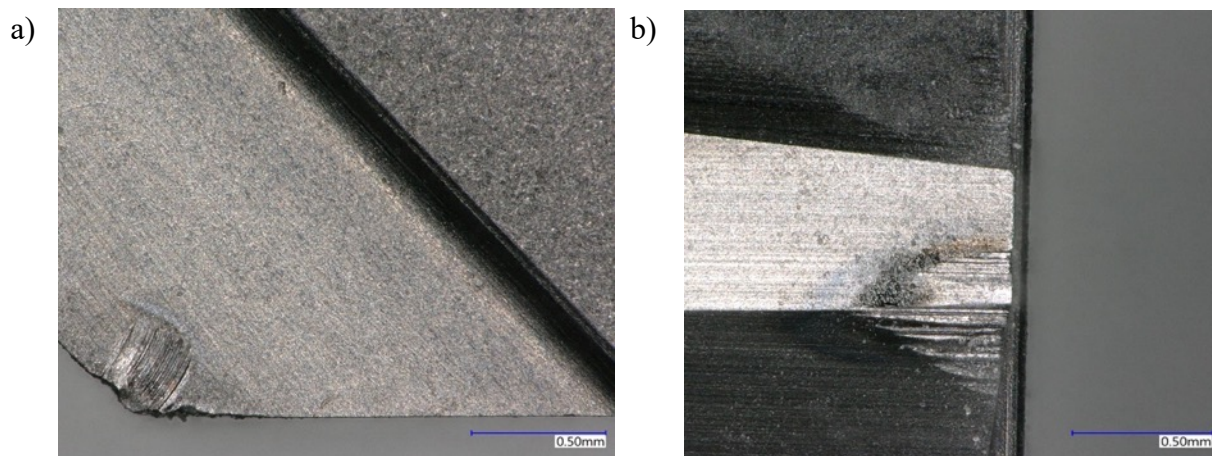
Obr. 55 Celkové opotřebení nástroje SC8 ($v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Řezná rychlost $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 16 Naměřené hodnoty pro cermet SC8, řezná rychlost $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

| Č. měř. | t [min] | Ra ₁ [μm] | Ra ₂ [μm] | Ra ₃ [μm] | Ra _{pr} [μm] | Rz ₁ [μm] | Rz ₂ [μm] | Rz ₃ [μm] | Rz _{pr} [μm] | VB _{max} [mm] |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 13 | 3,424 | 4,175 | 2,814 | 3,471 | 15,030 | 16,360 | 12,750 | 14,713 | 0,098 |
| 2 | 26 | 4,782 | 4,327 | 4,349 | 4,486 | 17,290 | 17,190 | 16,410 | 16,963 | 0,149 |
| 3 | 38 | 3,897 | 4,106 | 4,742 | 4,248 | 16,460 | 16,170 | 18,230 | 16,953 | 0,185 |
| 4 | 50 | 4,823 | 4,868 | 4,907 | 4,866 | 17,900 | 18,110 | 17,730 | 17,913 | 0,191 |
| 5 | 62 | 4,896 | 4,595 | 4,895 | 4,795 | 16,060 | 15,890 | 17,040 | 16,330 | 0,218 |
| 6 | 75 | 4,720 | 4,532 | 4,663 | 4,638 | 16,920 | 16,180 | 18,270 | 17,123 | 0,220 |
| 7 | 87 | 5,108 | 5,544 | 4,465 | 5,039 | 17,170 | 18,160 | 18,600 | 17,977 | 0,245 |
| 8 | 99 | 4,586 | 4,208 | 4,123 | 4,306 | 18,220 | 15,480 | 15,700 | 16,467 | 0,266 |
| 9 | 112 | 4,185 | 4,196 | 4,519 | 4,300 | 16,620 | 17,270 | 16,080 | 16,657 | 0,280 |
| 10 | 124 | 5,224 | 5,723 | 4,629 | 5,192 | 19,250 | 20,340 | 19,910 | 19,833 | 0,326 |

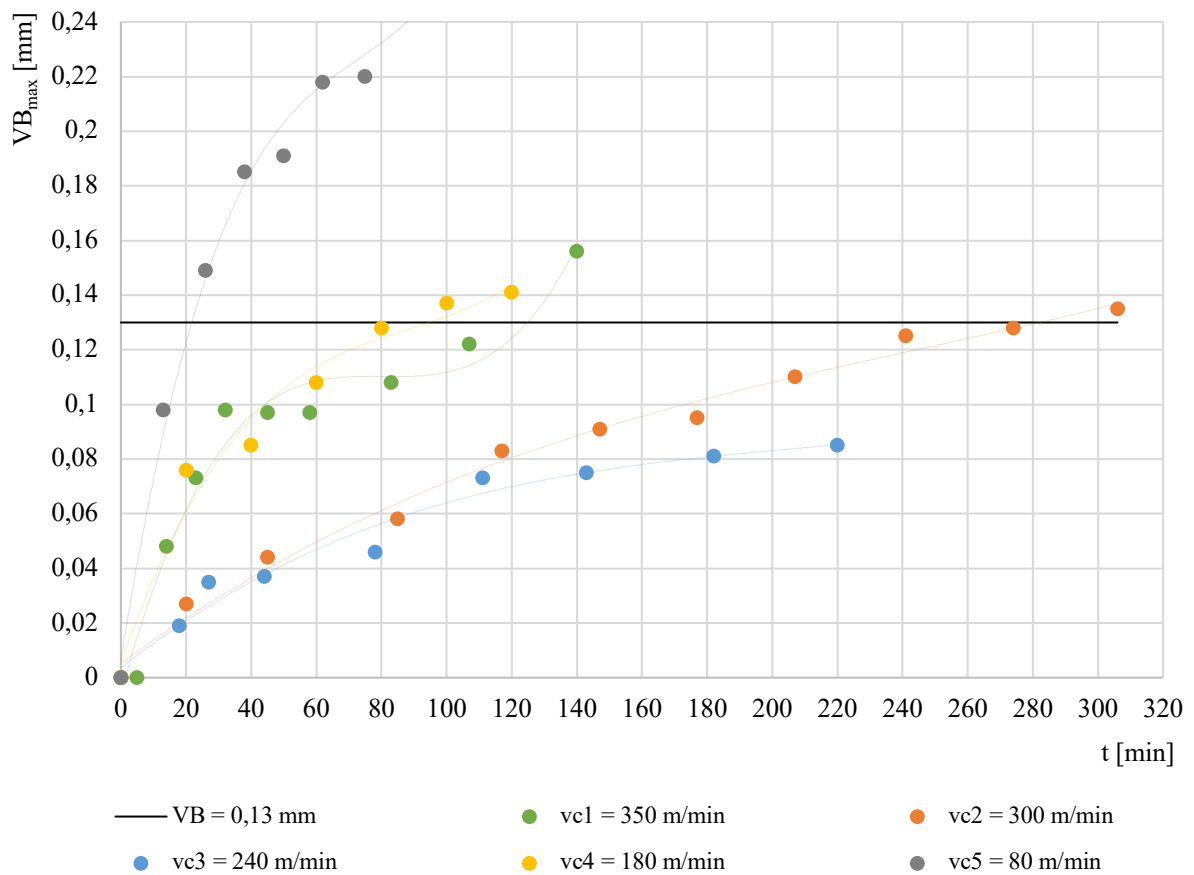
Cermet SC8 se při obrábění řeznou rychlostí $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ velmi rychle opotřebil a dosáhl mezní hodnoty VB_{max}. Na obr. 56 a) lze pozorovat žlábek o hloubce 7,2 μm a výrazné opotřebení ostří. Obr. 56 b) pak zobrazuje hřbet nástroje, kde je možné vidět výrazné opotřebení ve tvaru vrubu na hlavním i vedlejším hřbetě.



Obr. 56 Celkové opotřebení nástroje SC8 ($v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Obr. 57 zobrazuje graf závislosti maximálního opotřebení VB_{\max} na čase t pro řzné rychlosti $v_{c1} = 350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c4} = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $v_{c5} = 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V grafu je uvedena hodnota maximálního opotřebení $VB_{\max} = 0,13 \text{ mm}$, pro kterou byl následně sestaven Taylorův model. Ze závislostí na obr. 57 byly odečteny hodnoty T_1 , T_2 , T_4 a T_5 , které odpovídají řzným rychlostem v_{c1} , v_{c2} , v_{c4} a v_{c5} (tab. 17). Na základě zmíněného grafu byla sestavena závislost trvanlivosti a řzné rychlosti v logaritmických souřadnicích (obr. 58), která je tvořena body $v_{c1} - T_1$, $v_{c2} - T_2$, $v_{c4} - T_4$ a $v_{c5} - T_5$.

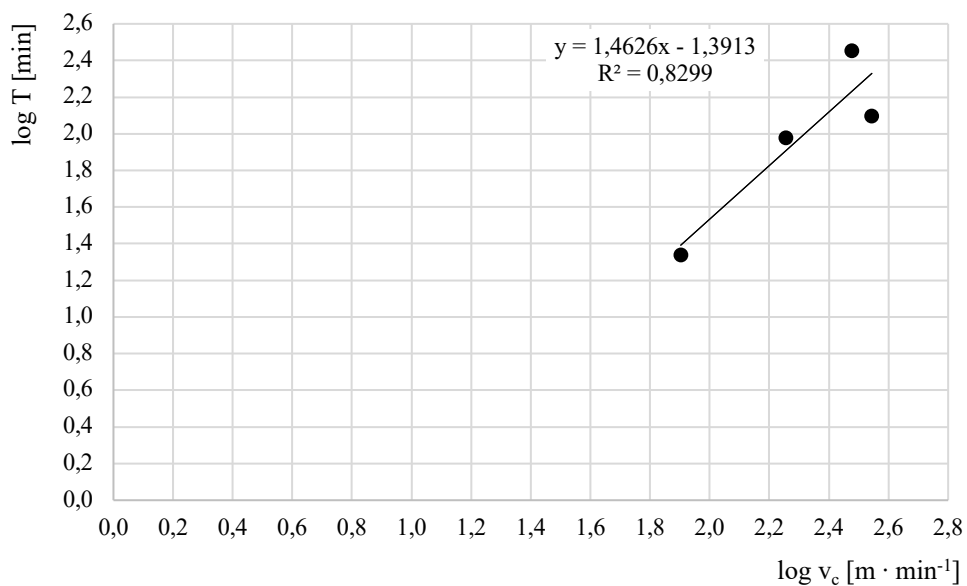
Na obr. 59 a obr. 60 jsou zobrazeny křivky odpovídající naměřeným parametrům drsnosti R_{ap} a R_{zpr} v závislosti na čase t . Křivky na obr. 57 až obr. 60 pro rychlost $v_{c4} = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byly sestaveny na základě hodnot naměřených v [57] (příloha 3).



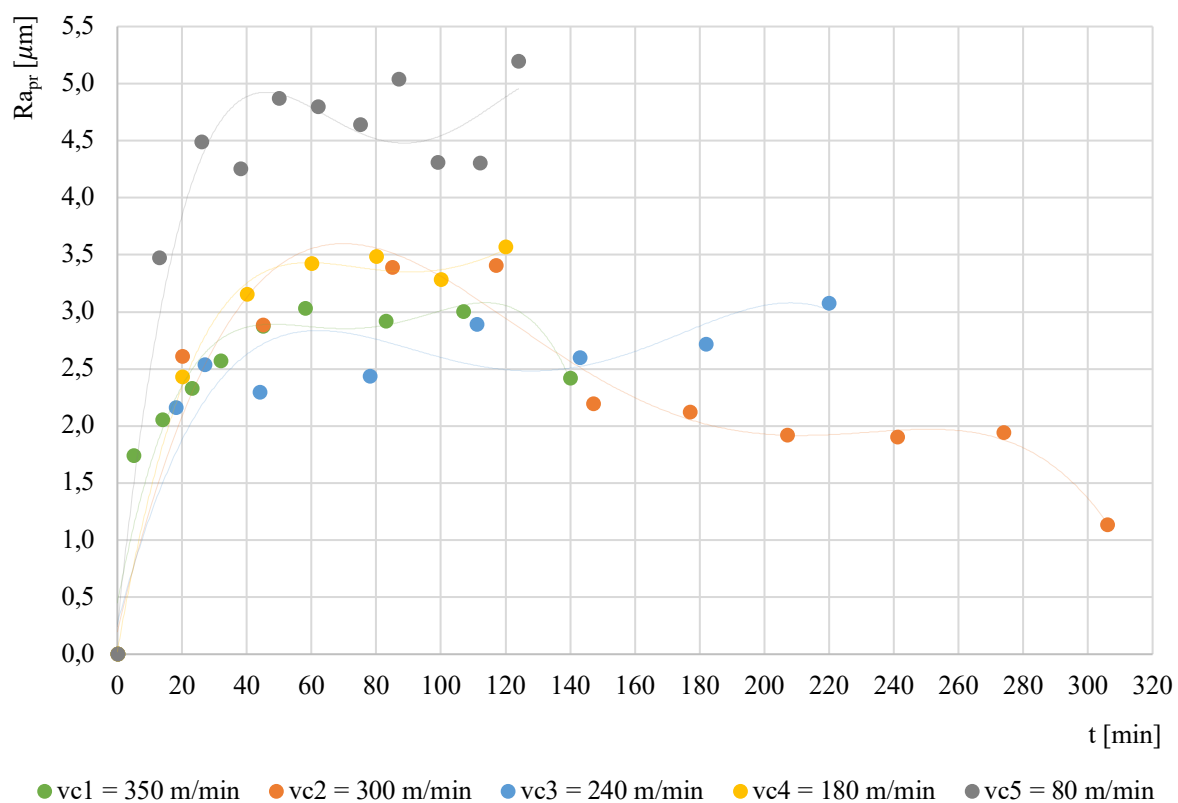
Obr. 57 Závislost maximálního opotřebení VB_{\max} na čase t pro cermet SC8 [57].

Tab. 17 Hodnoty řezných rychlostí a jim odpovídající trvanlivosti pro $VB_{\max} = 0,13$ mm.

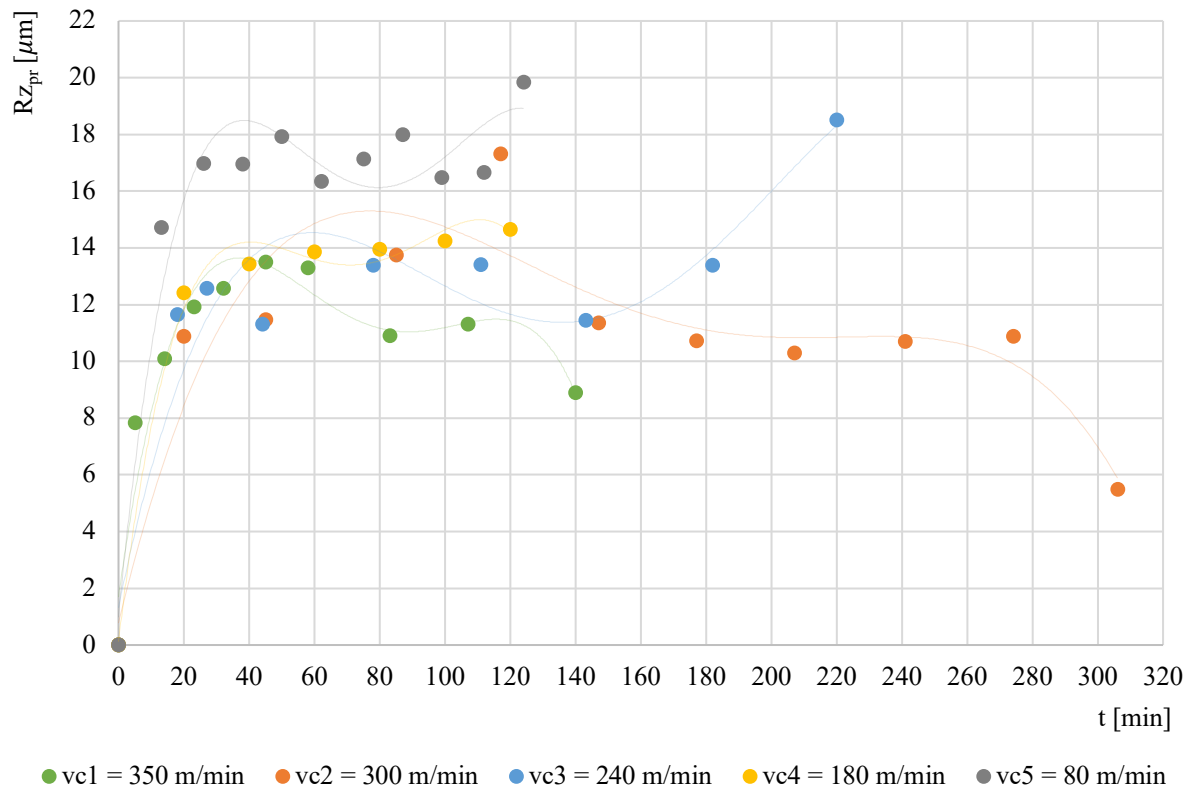
| v_c [$m \cdot min^{-1}$] | $\log v_c$ [$m \cdot min^{-1}$] | T [min] | log T [min] |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|
| 80 | 1,903 | 21,8 | 1,338 |
| 180 | 2,255 | 94,5 | 1,975 |
| 300 | 2,477 | 282 | 2,450 |
| 350 | 2,544 | 124,8 | 2,096 |



Obr. 58 Závislost trvanlivosti a řezné rychlosti v logaritmičeských souřadnicích.



Obr. 59 Závislost průměrné aritmetické úchytky Ra_{pr} na čase t pro cermet SC8 [57].



Obr. 60 Závislost největší výšky profilu Rz_{pr} na čase t pro cermet SC8 [57].

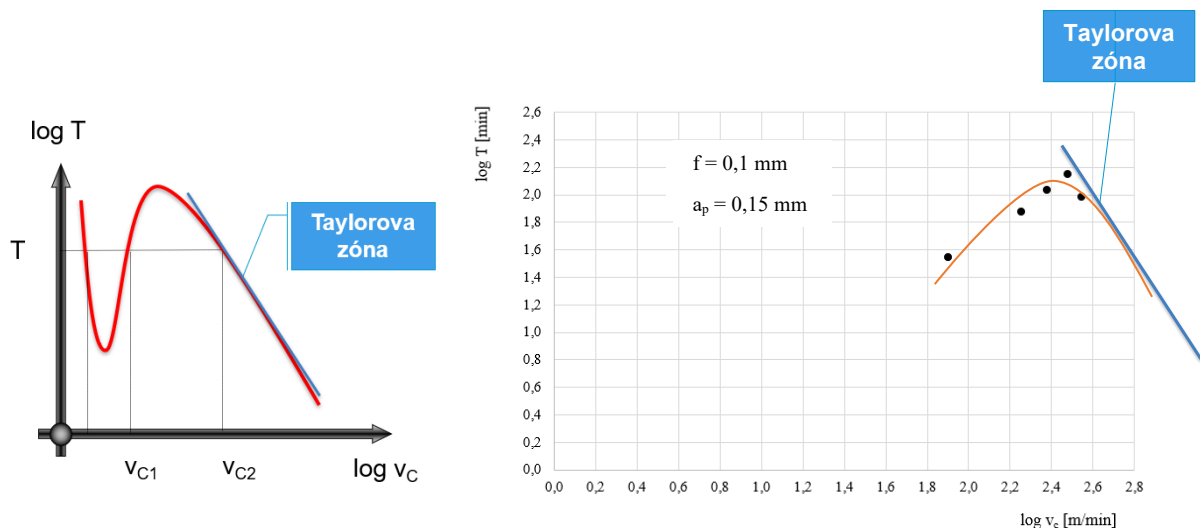
Hodnoty hloubky žlábků na čele byly změřeny pomocí digitálního optického mikroskopu Keyence VHX-5000. Fotky spolu s kótami jsou uvedeny v příloze 4.

6 DISKUZE

Naměřená data ukazují, že s klesající řeznou rychlostí roste opotřebení nástroje. Stejného trendu dosáhl ve své práci také pan Ing. Ondřej Kunkela. Výsledky experimentu však neodpovídají teoretickým předpokladům, proto byly konzultovány s odborníkem z firmy Seco Tools CZ, s.r.o., panem Ing. Janem Matějčkem.

Obecně platí, že cermety se používají při vysokých řezných rychlostech. Nízké a střední řezné rychlosti, spolu s malými hodnotami posuvu a hloubky řezu mají za následek utváření nárůstku, což vede k nepředvídatelnému rozvoji opotřebení. Až vyšší hodnoty řezné rychlosti zajišťují správnou teplotu v řezu a rychlý vzájemný pohyb třísky a čela břitu, což eliminuje vznik nárůstku.

Sestavené $T-v_c$ závislosti se nacházejí mimo oblast platnosti Taylorova zákona (obr. 61). Pro získání hodnot, které jsou v mezích Taylorova zákona by bylo nutné další zvyšování řezné rychlosti.



Obr. 61 Teoretický Taylorův model vs. Výsledky experimentu pro cermet SC3 [11].

Testy nebyly provedeny při vyšších řezných rychlostech, protože požadavkem firmy FINAL Tools a.s. byly výsledky pro řezné rychlosti v rozsahu $80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ až $350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo srovnání dvou řezných materiálů – cermetů s označením SC3 a SC8. Nejprve byl proveden teoretický rozbor a následně byly realizovány řezné zkoušky. V práci byla naměřená data zpracována a vyhodnocena spolu s rozbohem opotřebení břitů. Pro testy byla zvolena technologie soustružení, která se zvolenými řeznými podmínkami nejlépe simuluje proces vystružování.

Práce je zaměřena na vyhodnocení trvanlivostí a parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz jednotlivých testovaných cermetů. Výsledná $T-v_c$ závislost pro cermet SC3 byla sestavena z pěti bodů, pro cermet SC8 pouze ze čtyřech bodů. Důvodem byl lom břitu během obrábění řeznou rychlostí $v_{c3} = 240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ před dosažením stanovené hodnoty opotřebení. Lom břitu způsobila tříska mezi břitem a boční plochou obrobku. Z naměřených dat je zřejmé, že nejvyšší trvanlivosti bylo dosaženo při řezné rychlosti $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ u obou testovaných cermetů. Cermet SC8 však dosáhl téměř dvojnásobné trvanlivosti v porovnání s cermetem SC3 při řezné rychlosti $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při stejné trvanlivosti dosahovala průměrná aritmetická úchylka Ra_{pr} a největší výška profilu Rz_{pr} vyšších hodnot u cermetu SC8, stejně tak po dosažení mezní hodnoty opotřebení. V tab. 18 jsou porovnány trvanlivosti T a parametry Ra_{pr} a Rz_{pr} pro řeznou rychlost $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy testované řezné materiály dosáhly stanovenou mezní hodnotu opotřebení $VB_{max} = 0,13 \text{ mm}$. Obecně jsou cermety doporučovány pro vyšší řezné rychlosti, což provedené testy potvrdily.

Tab. 18 Srovnání výsledných hodnot ($v_{c2} = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $VB_{max} = 0,13 \text{ mm}$).

| Cermet | T [min] | Ra_{pr} [μm] | Rz_{pr} [μm] |
|--------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| SC3 | 141,8 | 0,5 | 2,9 |
| SC8 | 282 | 1,75 | 9 |

Při rozboru opotřebení břitu byl pozorován u téměř každého nástroje žlábek na čele a vydrolené ostří, dalším projevem bylo tepelné ovlivnění a oxidace.

Předkládaná práce slouží firmě FINAL Tools a.s. pro základní klasifikaci obou řezných materiálů a dále bude pokračovat testováním výstružníků v praxi.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. : il. (převážně barev.) ; 26 cm. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] KUDELA, Miroslav. SANDVIK COROMANT (FIRMA). *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 91-972299-4-6.
- [3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] HUMÁR, Anton. Technologie I.: Technologie obrábění 1. část. In: *Ústav strojírenské technologie* [online]. 2003 [cit. 2019-03-10].
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [5] DAVIS, J. R. (Joseph R.). *Tool materials*. Materials Park: ASM International, 1995, v, 501 stran : ilustrace. ISBN 0-87170-545-1.
- [6] GRÝČ, Jan. Nová generace povlakovaných cermetů. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha, 2016, 13.04.2016 [cit. 2019-03-08].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-povlakovanych-cermetu.html>
- [7] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, 1995, 265 s. : il. ISBN 80-85825-10-4.
- [8] CARDINAL, S., A. MALCHÈRE, V. GARNIER a G. FANTOZZI. Microstructure and mechanical properties of TiC–TiN based cermets for tools application. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. Elsevier, 2009, 27(3), 521-527 [cit. 2019-03-12]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.10.006. ISSN 0263-4368.
- [9] BOCANEGRA-BERNAL, M. *Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics* [online]. , 6399-6420 [cit. 2019-03-12]. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90.
- [10] FREY, Hartmut a Hamid R KHAN. *Handbook of thin-film technology*. Berlin: Springer, 2015, xiii, 379 stran : ilustrace. ISBN 978-3-642-05429-7.
- [11] DE VOS, Patrick, Jan-Eric STÅHL, Kateřina DUFKOVÁ, Miroslav PÍŠKA a Martin SLANÝ. *Opotřebení řezných nástrojů: praktické zkušenosti*. Fagersta: Seco Tools AB, 2014, 168 stran : barevné ilustrace, fotografie.
- [12] GRAHAM, Don. Rozpoznání a vyřešení osmi nejčastějších typů opotřebení břitových destiček. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, 07.03.2014 [cit. 2019-04-03].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/rozpoznani-a-vyreseni-osmi-nejcastejsich-typu-opotrebeni-britovych-desticek.html>

- [13] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, 13.06.2012 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [14] ČSN ISO 8688-1. *Rezné nástroje. Testovanie trvanlivosti pri frézování. Časť 1: Rovinné frézovanie*. Praha: Centrum služeb pro normalizaci, 1993.
- [15] ISO 3685. *Tool-life testing with single-point turning tools*. Second edition. Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.
- [16] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989, 338 s. : obr., fot., tb., grafy ; 21 cm. ISBN Váz.
- [17] ČSN EN ISO 4287 (014450). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [18] Měření jakosti povrchu obrobku. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
- [19] DAVIM, J. Paulo. *Surface integrity in machining*. London: Springer, 2010, 215 s. : il., čb. fot. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [20] DRSNOST JAKO SOUČÁST STRUKTURY POVRCHU (2002 : BRNO, Česko) a Miroslav TYKAL. *Drsnost jako součást struktury povrchu: sborník přednášek ze semináře, Brno 13. února 2002*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2002, 88 s. : il. ; 29 cm. ISBN 80-214-2063-4.
- [21] OHLÍDAL, Miloslav. Optické metody hodnocení textury povrchu v mikrometrové oblasti. In: *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. Brno, 2005 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/46_Ohlidal_VUTBR.pdf
- [22] SUN, W., B. YAO, B. CHEN, Y. HE, X. CAO, T. ZHOU a H. LIU. Noncontact surface roughness estimation using 2D complex wavelet enhanced ResNet for intelligent evaluation of milled metal surface quality. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. MDPI, 2018, 8(3), 2 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.3390/app8030381. ISSN 20763417. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/381/xml>
- [23] Company. *BECK* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: www.beck-tools.de
- [24] Products. In: *BECK* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.beck-tools.de/en/products/>
- [25] About us. In: *DIATool* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://diatool.de/en/about-us.html>

- [26] DIATool: Reamers. In: *DIATool* [online]. Německo, 2016 [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: [https://diatool.de/uploads/pdf/juni-2016/Diatool_Katalog%202016_kl%20\(2\).pdf](https://diatool.de/uploads/pdf/juni-2016/Diatool_Katalog%202016_kl%20(2).pdf)
- [27] FINAL Tools: obrábění velmi přesných děr. In: *FINAL Tools* [online]. 2018 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://www.finaltools.cz/files/final_tools_propagacni_casopis.pdf
- [28] Katalog produktů. *FINAL Tools* [online]. [cit. 2019-04-15].
Dostupné z: http://www.finaltools.cz/?page=katalog_standardni_nastroje
- [29] KOUŘIL, Karel a Vladimír VANĚK. Dokončovací operace vystružování. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2019-04-15].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-operace-vystruzovani.html>
- [30] Guhring Company Timeline. In: *Guhring* [online]. [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <http://www.guhring.com/About/Timeline>
- [31] Catalog HR500. In: *Guhring* [online]. 2019 [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <http://media.guhring.com/catalogs/uwsxm0p1jli.pdf?=&011019013714>
- [32] ABOUT US. In: *KENNAMETAL* [online]. [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: https://www.kennametal.com/en/about_us.html
- [33] Reaming. In: *KENNAMETAL* [online]. [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <https://www.kennametal.com/en/products/20478624/556249/3924463/8378384.html>
- [34] KOMET. In: *KOMET CERATIZIT GROUP* [online]. [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <https://www.kometgroup.com/en/komet/komet/>
- [35] KomPass Reaming. In: *KOMET CERATIZIT GROUP* [online]. Německo: KOMET Deutschland, 2019 [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: https://www.kometgroup.com/fileadmin/user_upload/9_downloads/kompass/GB_KomPass-Reaming.pdf
- [36] The MAPAL History. In: *MAPAL* [online]. [cit. 2019-04-29].
Dostupné z: <https://www.mapal.com/cs/ve-svete/historie-spolecnosti/>
- [37] REAMING | FINE BORING. In: *MAPAL* [online]. [cit. 2019-04-29].
Dostupné z: https://www.mapal.com/fileadmin/mapal_ftp/Blaetterkataloge/catalogs/MAPAL-Reaming-Fine-boring/pdf/MAPAL-Reaming-Fine-boring.pdf
- [38] O společnosti Sandvik Coromant. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-01].
Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/aboutus/pages/default.aspx>
- [39] CoroReamer 830. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-01].
Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/reamer_830/Pages/default.aspx

- [40] O společnosti Seco. In: *SECO* [online]. [cit. 2019-05-01].
Dostupné z: <https://www.secotools.com/#article/742>
- [41] Vystružování. In: *SECO* [online]. [cit. 2019-05-01].
Dostupné z: https://www.secotools.com/#article/m_7140
- [42] KATALOG A TECHNICKÝ PRŮVODCE 2019.1: OBRÁBĚNÍ OTVORŮ.
In: *SECO* [online]. SECO TOOLS AB, 2019 [cit. 2019-05-01].
Dostupné z: <https://www.secotools.com/#article/84588>
- [43] ROUND TOOL MATERIALS: p-line programme. In: *CERATIZIT* [online]. 2018 [cit. 2019-05-08].
Dostupné z: https://www.ceratizit.com/uploads/tx_extproduct/files/GD_KT_PRO-0147-0218_SEN_ABS_V1.pdf
- [44] PRODUCT LINES. In: *Changsha Langfeng Metallic Material* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.langfengmetallic.com/products/>
- [45] General Catalog. In: *KYOCERA Precision Tools, Inc.* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15].
Dostupné z: <https://www.flipsnack.com/kyoceracatalog/kyocera-general-catalog-2018-2019/full-view.html>
- [46] PRODUCTS. In: *METCERA* [online]. [cit. 2019-05-15].
Dostupné z: <http://www.metcera.com/list-3-1.html>
- [47] ABOUT US. In: *CY CARBIDE MFG. CO., LTD.* [online]. [cit. 2019-05-08].
Dostupné z: <https://www.cycarbide.com/en/about.html>
- [48] CERMETS. In: *CY CARBIDE MFG. CO., LTD.* [online]. [cit. 2019-05-08].
Dostupné z: <https://www.cycarbide.com/en/product-c136330/Cermets.html>
- [49] Product range. In: *HHT – Hartmetall* [online]. [cit. 2019-05-15].
Dostupné z: http://www.hht-hartmetall.com/en/product_range.html
- [50] VÝKONNÉ OBRÁBĚCÍ NÁSTROJE. In: *SUMITOMO* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15].
Dostupné z:
https://www.sumitomotool.com/fileadmin/user_upload/Catalogues_Download/General_Catalogue_2018-2019_interactive_CZ.compressed.pdf
- [51] O NÁS. In: *TUNGALOY* [online]. [cit. 2019-05-16].
Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/cz/about-us/>
- [52] Řezné materiály. In: *TUNGALOY* [online]. 2018 [cit. 2019-05-16].
Dostupné z: https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/GC_2018-2019_CZ_A_Grade.pdf
- [53] CTX beta 1250 TC. In: *DMG MORI* [online]. [cit. 2019-05-16].
Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustrueni/soustruzeni-frezovani/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc#222246>

- [54] Měření a kontrola nástrojů. In: *ZOLLER* [online]. [cit. 2019-05-16].
Dostupné z: <http://www.zoller.cz/produkty/mereni-a-kontrola-nastroju/>
- [55] Mikroskop Keyence VHX-5000. In: *Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky* [online]. [cit. 2019-05-17].
Dostupné z: http://uhulag.mendelu.cz/cz/veda/biometricka_laborator/mikroskop-vhx-5000
- [56] MARSURF M 300 PŘENOSNÝ DRSNOMĚŘ. In: *Mahr* [online]. [cit. 2019-05-17].
Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-sluzby/Vyrobn%C3%AD-m%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---Mobiln%C3%AD-za%C3%ADzen%C3%AD-na-m%C3%AD-mer%C3%AD-drsnosti/MarSurf-M-300---Prenosny-drsnomer/>
- [57] KUNKELA, O. *Analýza opotřebení nástrojů s břity z cermetů při soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 68 s., 1 příloha. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol | Jednotka | Popis |
|--------|--------------------------------------|---|
| a_p | [mm] | šířka záběru ostří |
| C_T | [-] | konstanta |
| C_V | [-] | konstanta |
| f | [mm] | posuv |
| KT | [mm] | hloubka výmolu na čele |
| KV_y | [mm] | radiální opotřebení špičky |
| l_n | [mm] | vyhodnocená délka |
| l_r | [mm] | základní délka |
| m | [-] | exponent |
| R_a | [μm] | průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu |
| R_c | [μm] | průměrná výška prvků profilu |
| R_p | [μm] | největší výška výstupků profilu |
| R_q | [μm] | průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu |
| R_t | [μm] | celková výška profilu |
| R_v | [μm] | největší hloubka prohlubní profilu |
| R_z | [μm] | největší výška profilu |
| T | [min] | trvanlivost |
| t | [min] | čas |
| VB | [mm] | šířka fazetky opotřebení na hřbetě |
| v_c | [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] | řezná rychlost |

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|---------|----------|------------------------------|
| AFM | [-] | Atomic Force Microscopy |
| CFS | [-] | Complete Fitting System |
| CNC | [-] | Computer Numerical Control |
| CPR | [-] | Complete Performance Reamers |
| CVD | [-] | Chemical Vapour Deposition |
| HFS | [-] | Head Fitting System |
| HIP | [-] | Hot Isostatic Pressing |
| HPR | [-] | High Performance Reamers |
| HRA | [-] | tvrdost dle Rockwella |
| HSS | [-] | High Speed Steel |

| | | |
|------|-----|-------------------------------------|
| PD | [-] | polykrystalický diamant |
| PKNB | [-] | polykrystalický kubický nitrid boru |
| PVD | [-] | Physical Vapour Deposition |
| STM | [-] | Scanning Tunneling Microscopy |
| VBD | [-] | vyměnitelná břitová destička |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres soustružnického nože
- Příloha 2 Opořebení VB_{\max} pro jednotlivé časy
- Příloha 3 Hodnoty naměřené panem Ing. Ondřejem Kunkelou
- Příloha 4 Fotky včetně kót z digitálního optického mikroskopu Keyence VHX-5000