ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výroba tvrdokovových nástrojů

Production of carbide tools

Autor práce **Zbyněk Zelinka**

V Praze **2018**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelinka** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **459675**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Výroba tvrdokovových nástrojů

Název bakalářské práce anglicky:

Production of carbide tools

Pokyny pro vypracování:

1. Popište metody výroby tvrdokovových nástrojů (se zaměřením na stopkové frézy).
2. Proveďte rozbor používaných brousicích nástrojů pro výrobu.
3. Specifikujte výkonové a ekonomické parametry brousicích nástrojů.
4. Navrhněte metodiku hodnocení brousicích nástrojů.
5. Na praktických příkladech ověřte metiodiku hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubomír Štajnochr, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lubomír Štajnochr podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24.4.2018 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma *Výroba tvrdokovových nástrojů* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne: …… Podpis autora: …….

Poděkování

Velice rád bych poděkoval panu Ing. Lubomíru Štajnochrovi za odborné vedení práce a cenné rady. Rovněž tímto děkuji panu Ing. Jiřímu Němcovi a dalším zaměstnancům společnosti NAVEL, spol. s.r.o., kteří mi poskytli důležité připomínky a podklady pro vypracování práce. Dále je mou milou povinností poděkovat mé rodině a přítelkyni Ivě za jejich podporu.

Abstrakt

Bakalářské práce se zabývá výrobou tvrdokovových nástrojů. V teoretické části je uvedeno zmapování procesu broušení se zaměřením na volbu brousicích kotoučů. Dále jsou popsány převážně brusiva, pojiva, zrnitosti brousicích kotoučů a další zvláštnosti při broušení tvrdokovových fréz. Poté následuje analýza současného stavu ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o., která ukazuje provozované CNC brusky a používané brousicí kotouče. Byla provedena technicko-ekonomická analýza brousicích kotoučů pomocí inventury brousicích kotoučů. Následuje provedení návrhu metodiky hodnocení brousicích nástrojů prostřednictvím rodného listu brousícího kotouče a sledování doporučených parametrů.

Klíčová slova

NAVEL, spol. s.r.o., broušení, CNC brusky, brousicí kotouče, výroba fréz, slinutý karbid, trvanlivost nástroje, opotřebení nástroje, rodný list brousicího kotouče.

Abstract

This bachelor´s thesis is engaged in the production of cemented carbides tools. In the theoretical part of the thesis the process of grinding is presented, with the focuse on selection of grinding wheels. Thereinafter, the abrasive, the bonds, the grain size and the other specialities of grinding cemented carbides milling cutters are described. The analysis of current status of the company NAVEL, spol. s.r.o., including description of operated CNC grinding machines and used grinding wheels, is following. Technical-economic analysis of grinding wheels presented in the thesis was made with the use of the outakes of the annual stock-taking of grinding wheels that was done in the company NAVEL, spol. s.r.o. One special chapter is dedicated to a concept of grinding wheels evaluation which consists of an implementation so-called birth certificate of grinding wheels and following the recommended parameters.

Keywords

NAVEL, spol. s.r.o., grinding, CNC grinding machines, grinding wheels, production of milling cutters, cemented carbide, tool life, tool wear, birth certificate of grinding wheels.

Obsah

Úvod 7
1 Broušení 8
1.1 Základní podstata broušení 8
1.2 Rozdělení broušení 9
1.2.1 Rozdělení podle brousicího nástroje 9
1.2.2 Rozdělení podle broušené plochy 9
1.2.3 Rozdělení podle hlavního pohybu stolu k brousicímu kotouči 9
1.3 Základní metody broušení 10
1.3.1 Broušení rovinných ploch 10
1.3.2 Broušení vnějších rotačních ploch 10
1.3.3 Broušení vnitřních rotačních ploch 11
1.3.4 Broušení tvarových ploch 12
1.4 Brousicí nástroje 12
1.4.1 Druhy umělého brusiva 13
1.4.2 Tvary a rozměry brousicích kotoučů 14
1.4.3 Druhy pojiva 15
1.4.4 Zrnitost 16
1.4.5 Tvrdost kotouče 17
1.4.6 Sloh kotouče 18
1.4.7 Koncentrace brusiva 18
1.4.8 Označování brousicích nástrojů 18
1.4.9 Brousicí úseky při výrobě tvrdokovové frézy 19
1.4.10 Upínání brousicích kotoučů 21
1.5 Procesní kapaliny 21
1.6 Opotřebení a trvanlivost brousicích kotoučů 22
1.6.1 Opotřebení kotoučů s diamantovým brusivem 23
1.6.2 Orovnávání a oživování diamantových brousicích kotoučů 24
2 Analýza současného stavu ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. 25
2.1 Aplikované brousicí kotouče 25
2.1.1 Evidence a sledování trvanlivosti kotoučů 25
2.1.2 Inventura brousicích kotoučů 25
2.2 Obráběcí stroje 30
2.2.1 CNC brusky 30

2.2.2 Orovnávací stroj a řezné kapaliny ... 33
2.3 Programování brusek ... 33
2.3.1 Walter Window Mode ... 33
2.3.2 Walter Helitronic Tool Studio 2.1 ... 33
3 Návrh metodiky ... 35
3.1 Volba brousicího kotouče ... 35
3.2 Sledování doporučených parametrů ... 35
3.2.1 Brusný poměr ... 35
3.2.2 Rodný list brousicího kotouče ... 37
3.3 Ověření navržené metodiky ... 38
4 Závěr ... 40
Seznam použitých zdrojů ... 41
Seznam použitých obrázků ... 43
Seznam použitých tabulek ... 44
Seznam použitých grafů ... 45
Seznam příloh ... 46

Úvod

V průmyslové praxi se v dnešní době hojně používají nástroje ze slinutého karbidu ve formě monolitních nástrojů. Tyto nástroje se vybrušují z válcových polotovarů, tzv. roubíků. Moderní výroba řezných nástrojů probíhá většinou na CNC bruskách, na kterých se vytváří požadovaný tvar a geometrie nástroje.

Vybroušení optimální geometrie nástroje je umožněno kvalitními brousicími kotouči různých tvarů a velikostí. Je důležité, aby brousicí kotouče dosahovaly dlouhé životnosti. Životnost kotoučů je úzce spjata s jejich opotřebením a trvanlivostí. Maximální životnosti nástroje se dosahuje převážně správnou volbou brousicího kotouče (tvaru, druhu brusiva, pojiva, zrnitosti, tvrdosti kotouče, slohu kotouče, koncentrací brusiva), použitím řezných kapalin, nastavením řezných podmínek na stroji (řezná rychlost, hloubka řezu, rychlost posuvů atd.), četností oživování a orovnávání kotoučů.

Tvrdokovové nástroje neboli nástroje ze slinutého karbidu se výhradně vybrušují kotouči, jež obsahují brusivo ve formě diamantových zrn. Brusná zrna diamantu jsou vhodná k broušení tvrdých a křehkých materiálů (slinuté karbidy, sklo, keramika apod.), proto je práce zaměřena na brousicí kotouče z diamantu, které jsou nezbytné k výrobě monolitních stopkových fréz.

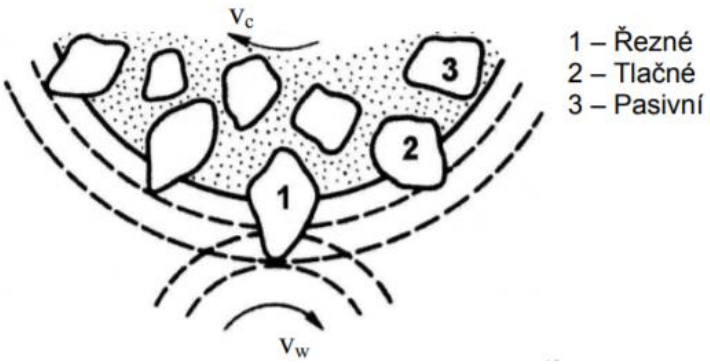
Jedním z výrobců monolitních nástrojů z tvrdokovu je společnost NAVEL, spol. s.r.o., která se v rámci svého rozvoje obrátila na Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie při Fakultě strojní ČVUT v Praze s požadavkem na zmapování procesu broušení se zaměřením na volbu brousicích kotoučů. Společnost sídlí v jihočeském městě Velešín. Zabývá se komplexní výrobou, ostřením, povlakováním a dodáním nástrojů pro strojírenskou a další průmyslovou výrobu. Společnost NAVEL, spol. s.r.o. se specializuje na výrobu a prodej nástrojů z tvrdokovu, polykrystalického diamantu (PKD) a produkuje speciální nástroje podle požadavku zákazníka [10].

1 Broušení

1.1 Základní podstata broušení

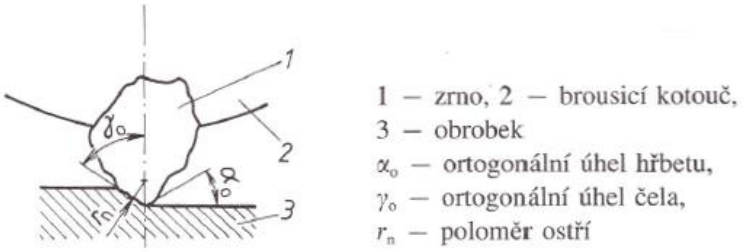
Broušení lze charakterizovat jako rychlostní mikrořezání (odírání) povrchových vrstev těles s jemnými zrny brusiva. Tento proces probíhá běžně při řezných rychlostech do 50 $m \cdot s^{-1}$, ve zvláštních případech lze dosáhnout řezných rychlostí více než 100 $m \cdot s^{-1}$ [1] [15]. Broušení patří do abrazivních metod obrábění, které jsou typické použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu [1].

Řeznými elementy brousicího nástroje jsou zrna abrazivních materiálů. Zrna jsou nepravidelně rozložena na činné ploše nástroje a mají různou výšku a každé brusné zrno má jiný geometrický tvar. Toto je hlavní odlišnost od jiných metod obrábění. Všechna zrna nástroje nemohou být rovnoměrně zatížena, protože jsou různě vysoká a brousicí nástroj má nedokonalý geometrický tvar (kuželovitost, soudkovitost a další nevhodné tvary). Na *obr. 1* je vidět nejvíce zatížené zrno (č. 1 – řezné zrno), které vystupuje nad optimální válcový povrch, zatímco ostatní snížená zrna určitou dobu nepracují. Tato zrna začínají působit po opotřebování vyšších zrn [1] [2].



Obr. 1: Zrna brousicího kotouče [1]

Dále je pro proces broušení charakteristické, že je současně v záběru velké množství zrn (břitů), které vytvářejí třísky velmi malých průřezů a různých velikostí. Úhel čela zrna γ_o bývá negativní a poloměr ostří r_n je u běžných zrnitostí do 40 μm [2].



Obr. 2: Tvar zrna brousicího kotouče [2]

Vybrané typické znaky broušení:

- nestejnoměrné rozložení brusných zrn na pracovní ploše, čímž dochází k nerovnoměrnému úběru třísky obrobku,

- brousicí kotouč nemá souvislý břit,
- dosahování vysoké kvality povrchu (v desetinách mikrometrů) a přesnosti rozměrů (v jednotkách mikrometrů),
- možnost obrábět velmi tvrdé materiály s minimálním stavem napjatosti jeho povrchu,
- velký úběr materiálu (např. u výroby řezných drážek monolitních nástrojů) [1].

1.2 Rozdělení broušení

Brousicí proces lze rozdělit z hlediska typu brousicího nástroje a dále podle tvaru broušených ploch a způsobu práce. Rozdělení brousicích procesů usnadňuje orientaci v jednotlivých metodách broušení.

1.2.1 Rozdělení podle brousicího nástroje

Podle typu brousicího nástroje se rozlišují tyto metody broušení:

a) *vázaným pevným brusivem* - zrna brusiva stmelena pojivem do tvaru kotouče, brousicího tělíska, segmentu, brousicího kamene či nástroje dalších tvarů, nebo zrna přilepena k pružnému podkladu (např. brousicí pás).
b) *volným brusivem* – zrna ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů [2].

1.2.2 Rozdělení podle broušené plochy

Podle tvaru broušené plochy a způsobu práce se rozeznává broušení:

- rovinných ploch,
- válcových ploch (tzv. na kulato),
- tvarových ploch (broušení závitů, ozubených kol apod.)
- kopírovacím způsobem (NC a CNC brusky),
- tvarovými brousicími kotouči (profil kotouče určuje profil obrobku).

Podle funkční (brousicí) části kotouče se rozlišuje:

- obvodové broušení,
- čelní broušení.

Podle polohy obrobku vzhledem k brousicímu kotouči lze dělit:

- vnější broušení,
- vnitřní broušení [19].

1.2.3 Rozdělení podle hlavního pohybu stolu k brousicímu kotouči

Podle hlavního pohybu stolu vzhledem k brousicímu kotouči se definuje broušení:

- axiální (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),

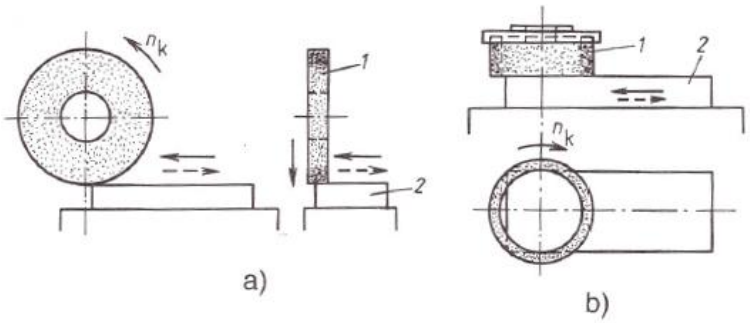
- tangenciální (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče v bodě řezu),
- radiální (hlavní posuv stolu v bodě řezu je radiální k brousicímu kotouči),
- obvodové zapichovací (posuv stolu je plynulý radiální),
- čelní zapichovací (posuv stolu je plynulý axiální) [19].

1.3 Základní metody broušení

1.3.1 Broušení rovinných ploch

Broušení obvodem kotouče patří k nejpřesnějším způsobům broušení ploch. Při této metodě vykonává stůl brusky přímočarý vratný nebo kruhový pohyb. Šířka obráběné plochy je většinou větší než šířka brousicího kotouče, proto se v krajních úvratích realizuje posuvový pohyb ve směru osy nástroje, který se řídí šířkou kotouče. Při kruhovém pohybu stolu kotouč koná posuvový pohyb od obvodu pracovního stolu k jeho středu [27] [28].

Broušení čelem kotouče je výkonnější, ale méně přesná metoda než broušení obvodem kotouče. Tento způsob se hodí na hrubé broušení širších ploch. Při broušením čelem je nežádoucí velká plocha záběru, jelikož se špatně odvádí tříska z místa řezu. Tento problém se může řešit vykloněním vřetena nebo zúžením čelní plochy kotouče, aby se zmenšila styková plocha kotouče [27] [28].



Obr. 3: Příklad rovinného broušení [2]

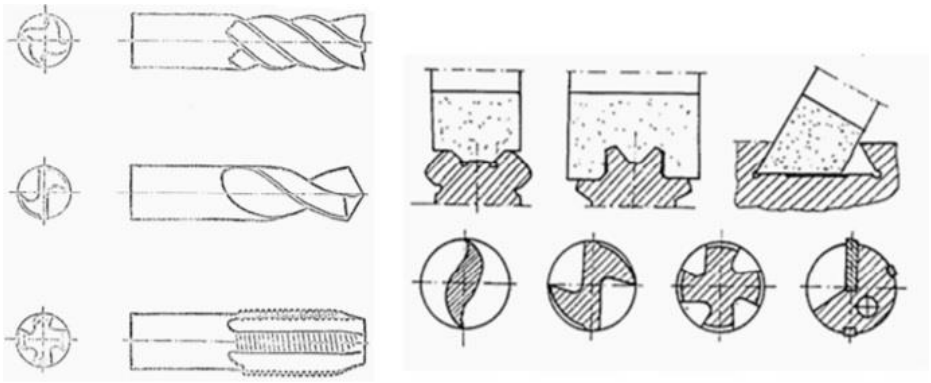
a) obvodem kotouče, b) čelem kotouče
1 - brousicí kotouč, 2 - obrobek

1.3.2 Broušení vnějších rotačních ploch

Vnější podélné broušení se používá k broušení delších obrobků upnutých mezi hroty. Hlavní rotační pohyb koná brousicí kotouč, který je přibližně 100krát větší než pomocný rotační pohyb obrobku [27] [28].

Pro výrobu stopkových monolitních nástrojů je typické hloubkové broušení, které je charakterizováno úběrem velkého množství materiálu při jednom záběru brousicího kotouče. Brousicí kotouče dosahují vysoké řezné rychlosti a vysokého posuvu. Z tohoto důvodu vzniká v místě řezu velké množství tepla, které je nutné odvádět procesní kapalinou. Pro nižší obvodové rychlosti kotouče se používá

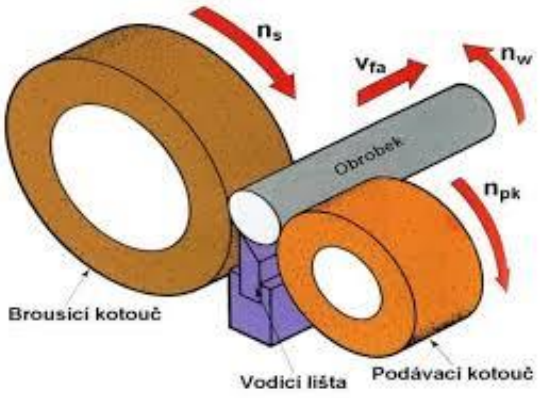
keramické nebo pryskyřičné pojivo, pro vyšší rychlosti kovové pojivo [15]. Důležitým faktorem umožňující provedení hloubkového broušení jsou stroje, které musí dosahovat vysoké tuhosti a velkého příkonu elektromotoru. Hloubkovým broušením lze dosáhnout především zkrácení výrobního času a nižšího opotřebení kotouče [15].



Obr. 4: Tvary dosahované při hloubkovém broušení [15]

Zapichovací broušení je velmi výkonná metoda a může se uplatnit i při obrábění vnitřních ploch. Brousicí kotouč vykonává pouze radiální posuv. Tento způsob se používá většinou v sériové výrobě menších a hrubých obrobků [27] [28].

Bezhroté broušení se dělí na průběžné a zapichovací. Při průběžném bezhrotém broušení se obrobek vloží mezi dva kotouče, z nichž jeden je brousicí a druhý podávací. Brousicí kotouč má větší vnější průměr než podávací a obrobek je veden na kalené liště. Obvodová rychlost podávacího kotouče odpovídá obvodové rychlosti obrobku. U zapichovacího bezhrotého broušení se obrobek vkládá mezi oba kotouče shora [28].

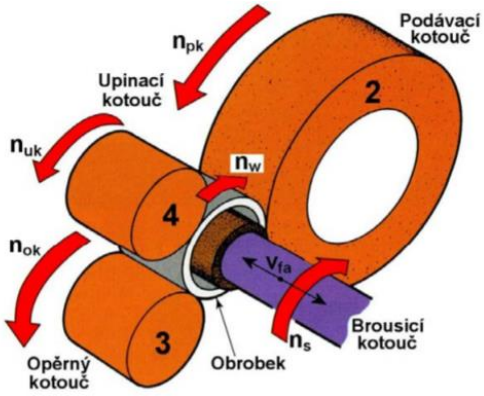


Obr. 5: Bezhroté průběžné broušení [29]

1.3.3 Broušení vnitřních rotačních ploch

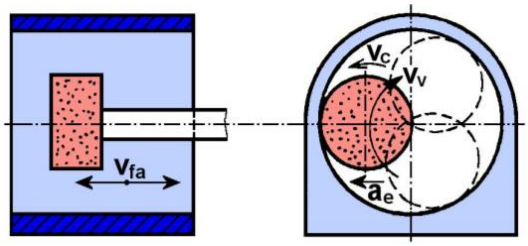
Vnitřní podélné broušení je podobné vnějšímu broušení. Obrobek se upíná do kleštiny nebo vřetene. Musí se volit malý příčný posuv, jelikož je celá upnutá soustava málo tuhá [28].

U bezhrotého broušení vnitřních ploch je obrobek umístěn mezi opěrný, upínací a podávací kotouč, aby bylo umožněno broušení vnitřního povrchu díry [29].



Obr. 6: Bezhroté vnitřní broušení [29]

Planetové broušení se využívá při broušení děr, které nelze upnout do sklíčidla nebo čelistí. Brousicí vřeteno koná veškeré pracovní pohyby, protože obrobek je nehybně upnut. Vřeteno se otáčí kolem své osy, obíhá kolem obrobku a vykonává i posuvný pohyb ve směru osy [28].



Obr. 7: Planetové broušení

1.3.4 Broušení tvarových ploch

Tvarové plochy se mohou brousit buď kopírovacím způsobem, pomocí číslicového řízení (CNC brusky), nebo tvarovými kotouči. Na tvarových brousicích kotoučích je vytvořen na obvodu negativní profil broušené plochy. U kopírovacího a CNC broušení se používají kotouče s obvyklými tvary. Vytváření tvarových ploch se uplatňuje například u výroby a ostření obráběcích nástrojů, kotoučových nožů a různých tvarových kalibrů [27] [28].

1.4 Brousicí nástroje

Brousicí nástroje jsou řezné nástroje obsahující zrna brusiva, která jsou stmelena pojivem. Mezi zrny a pojivem se vyskytují volná místa označována jako póry. Pro výrobu stopkových monolitních nástrojů se téměř výhradně používají brousicí nástroje s vázaným brusivem.

Brousicí nástroje mohou mít tvar kotouče, brousicího tělíska, segmentu, pásu apod. Nejpoužívanější jsou brousicí kotouče, které se používají také k výrobě fréz. Vynalezení umělého brousicího kotouče a sestrojení prvních univerzálních brusek výrazně urychlily vývoj broušení, stalo se tak během 60. let 19. století [1].

Brousicí kotouč je nástroj ve tvaru rotačního tělesa požadovaného tvaru a skládá se z nosné části, na které je upevněna brusná vrstva ve tvaru prstence. Nosné

části kotouče se vyrábějí z hliníkových slitin, oceli a plastu. Tvar a umístění brusné vrstvy se volí podle použití nástroje [4].

Tato skupina nástrojů je charakterizována zejména následujícími vlastnostmi: geometrickým tvarem a velikostí, druhem brusiva, pojivem, zrnitostí, tvrdostí, slohem kotouče. Brusiva se používají buď přírodní (např. přírodní diamant, korund, křemík atd.), nebo umělá (umělý diamant, kubický nitrid bóru, korund, karbid křemíku, karbid bóru atd.). U diamantových brousicích kotoučů je dále důležitým parametrem koncentrace brusiva [1].

Pro výrobu nástrojů se používají umělé brousicí materiály, proto bude dále uveden přehled nejběžnějších umělých brusiv.

Obr. 8: Příklady brousicích kotoučů [6]

1.4.1 Druhy umělého brusiva

Syntetické brousicí materiály postupně vytlačují přírodní brusiva, nicméně v některých případech jsou přírodní materiály složitě nahraditelné. O volbě vhodného brousicího materiálu rozhoduje značné množství parametrů. Mezi nejdůležitější údaje patří broušený materiál, požadované opracování, druh a způsob broušení, obvodová rychlost kotouče, orovnávání, chlazení (za sucha, emulze, řezný olej) [11]. Následuje krátká charakteristika nejpoužívanějších řezných materiálů.

Umělý korund neboli elektrokorund je krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3), který se vyrábí vytavením látek bauxitu nebo čistého oxidu hlinitého v elektrických pecích. Jednotlivé typy umělého korundu se odlišují podle obsahu oxidu hlinitého a podílu příměsí, které společně ovlivňují zabarvení, strukturu a fyzikální vlastnosti brousicího nástroje. Příměsi jsou nejčastěji tvořeny oxidy železa a oxidy chrómu. Oxidy železa zbarví umělý korund dohněda. Oxidy chrómu dají korundu červenou až růžovou barvu. Tento brousicí materiál se používá především při broušení ocelí [1] [11].

Karbid křemíku je sloučenina křemíku s uhlíkem (SiC), který se vyrábí v elektrických pecích za teploty 2100 až 2200 °C. Výchozí surovinou je křemenný písek a uhlík (koks, antracit). První postup pro výrobu syntetického karbidu křemíku byl vyvinut koncem 19. století americkým chemikem E. G. Achensonem. Vyrábí se zelený a černý karbid křemíku. Chemické složení těchto dvou sloučenin je téměř stejné, liší se jen tím, že zelený karbid křemíku dosahuje větší tvrdosti, ale je méně

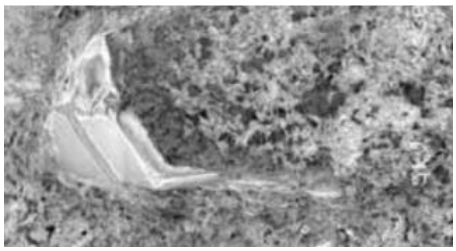
houževnatý. Oba karbidy křemíku se používají pro broušení neželezných materiálů a také při orovnávání diamantových kotoučů [1] [12].

Diamant (DIA) je nejtvrdším řezným materiálem. Jedná se o formu uhlíku, která krystalizuje v kubické modifikaci. Je vyráběn z grafitu za pomoci vysokých teplot a tlaků. První syntetické diamanty byly vyrobeny mezi lety 1952 a 1953. Vlivem afinity uhlíku ke slitinám železa není vhodné brousit oceli diamantem při dosahování vysokých teplot v místě řezu [4]. Je důležité, aby teplota během obrábění nepřesáhla hodnotu kolem 650 °C. Diamant má nízkou teplotní stálost a při této teplotě se mění na grafit [4] [28].

Zrna umělého diamantu se využívají k broušení slinutých karbidů, keramiky, žáruvzdorných a žáropevných materiálů, polykrystalických řezných materiálů (PKD, PKNB - polykrystalický kubický nitrid bóru). K výrobě nástrojů včetně stopkových monolitních fréz ze slinutých karbidů se používají výhradně brusiva ze syntetického diamantu, proto jsou dále popsány zvláštnosti broušení diamantovými kotouči [4].

Mezi hlavní výhody diamantových kotoučů patří:

- možnost obrábění tvrdých materiálů, které jsou klasickými brusivy těžko obrobitelné,
- vysoký výkon broušení,
- vysoká životnost a stálost tvaru kotouče [4].

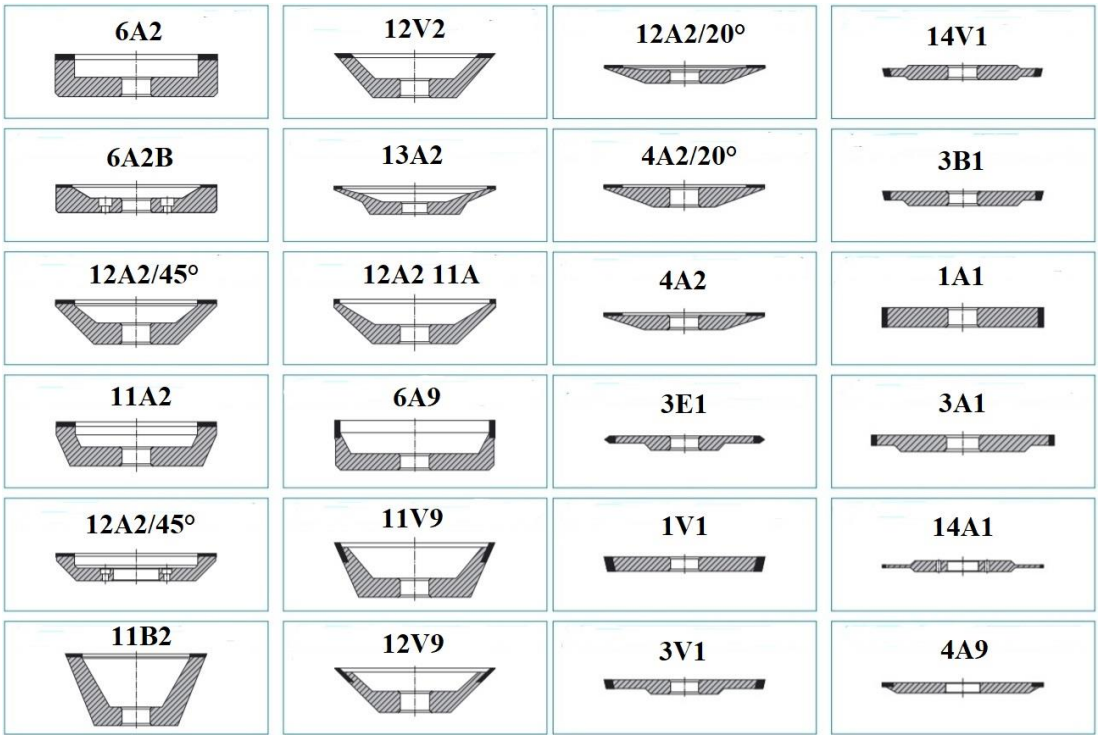


Obr. 9: Diamantové zrno v pojivu brousicího kotouče [3]

Kubický nitrid bóru (KBN nebo CBN – N_2B_3) je velmi tvrdý materiál, jehož syntéza se poprvé uskutečnila v roce 1957. Výroba probíhá podobně jako u syntetického diamantu a dosahuje podobných vlastností jako diamant. Kubický nitrid bóru se od diamantu liší vyšší chemickou stálostí a tepelnou odolností do 1200 °C [4]. Tyto vlastnosti umožňují obrábět různé slitiny železa, vysokopevnostní, rychlořezné a legované oceli, litiny a další materiály o tvrdosti více než 60 HRC [1] [12].

1.4.2 Tvary a rozměry brousicích kotoučů

Tvar brousicího kotouče pomáhá vytvořit optimální tvar a geometrii nástroje. Kotouče se dělí dle normy FEPA (Federace evropských výrobců brusiv), která sjednocuje označování tvarů kotoučů mezi výrobci. První číslo označení uvádí tvar nosného těla kotouče. Písmeno na druhém místě značí tvar brusné vrstvy. Číslo na třetí pozici zleva symbolizuje umístění vrstvy. Dále mohou následovat další specifikace ohledně velikosti úhlu nosného těla nebo jiné modifikace tvaru brousicího kotouče.



Obr. 10: Vybraná provedení brousicích kotoučů a značení dle FEPA [6]

Základní rozměry kotouče vycházejí z jeho tvaru. Rozměry bývají popsány velikostí největšího průměru a šířkou kotouče, šířkou a výškou brousicí vrstvy, průměrem upínací díry, případně kuželovitostí nebo rádiusem brousicí vrstvy. Průměr kotouče se volí podle typu brusky, jejíž konstrukce by měla zaručit dosažení doporučených pracovních rychlostí. Platí, že čím větší a těžší nosná část kotouče, tím lepší kinematické vlastnosti, ale více se projeví házení kotouče [6].

Podstatný rozměr je také šířka brousicí vrstvy. Je nutné, aby byla využita celá nebo co největší šířka brousicí vrstvy. Úzká brousicí vrstva umožňuje vyšší výkon broušení s malým vývinem tepla. Příliš široká vrstva způsobuje dosažení vysoké teploty v místě řezu, což může mít za následek snížení výkonu broušení [6].

Výšky brousicí vrstvy jsou v různých velikostech. Podle katalogů společností Urdiamant, s.r.o. [6], Saidtools S.R.L. [3] a TYROLIT CEE k. s. [31] se výška brousicí vrstvy běžně udává v rozmezí od 1,5 mm do 10 mm. Výška vrstvy závisí na tvaru kotouče a druhu pojiva. Silnější vrstva zvýší prodejní cenu kotouče, ale umožní větší počet přeostření, což může vést k celkovému snížení nákladů na broušení.

1.4.3 Druhy pojiva

Pojivo slouží ke stmelení brusiva a spolu s brusivem vytvářejí požadovaný tvar a rozměr brousicího nástroje. Na druhu pojiva závisí tvrdost a pevnost kotouče, brousicí vlastnosti a maximální obvodová rychlost kotouče, která nesmí být překročena. Tmelící materiál dále ovlivňuje výkon broušení, životnost a samoostřicí vlastnost kotouče. Pro volbu pojiva je kromě brouseného materiálu a druhu brusiva také důležité určit druh operace a způsob broušení [2] [6].

Mezi nejpoužívanější pojiva obecně patří keramické, pryskyřičné a pryžové. U brousicích nástrojů diamantových nebo z kubického nitridu bóru se využívají vlastnosti pojiva kovového (bronz, měď, měkká pájka), galvanického, keramického

a pojiva z umělé pryskyřice. Brousicí kotouče mohou být zpevněny skelnou nebo textilní výztuží (přidává se označení F) nebo jejich kombinací. Zvyšuje se tím pevnost kotouče a použitelné obvodové rychlosti [2] [6].

Pro výrobu a ostření stopkových monolitních nástrojů se používají převážně pryskyřičné a kovové pojivo, pro speciální broušení nástrojů lze použít galvanické pojivo [2] [6]. Dále se mohou používat hybridní pojiva, která jsou na bázi pojiv kovových [3].

Pryskyřičné pojivo je obvyklé pro ostření nástrojů při strojním broušení z důvodu nižší tvrdosti oproti kovovému a galvanickému pojivu. Na tělo (nosič) nástroje se umístí vrstva složená z diamantových zrn nebo ze zrn kubického nitridu bóru a umělé pryskyřice. Přidají se další plnidla (např. karbid křemíku, měď, hliník) podle požadovaných vlastností a tato směs se lisuje za vysokých teplot, tím se vytvoří požadovaný tvar pracovní části kotouče [16]. Vznikne měkké pojivo s kratší životností. Pryskyřičné pojivo dosahuje dobrých samoostřicích vlastností, ale v produktivitě se nevyrovnají kovovému pojivu [6].

Kovové pojivo je vhodné k výrobě nástrojů, kde dochází k většímu úběru broušeného materiálu než u ostření. Kovové pojivo se používá převážně u diamantových brousicích nástrojů a je tvrdší než pryskyřičné. Brousicí nástroje s kovovým pojivem vznikají podobně jako nástroje s pryskyřičným pojivem. Zrna diamantu se smíchají s práškovou směsí různých kovů podle požadovaných vlastností. Lisováním za vysokých teplot vzniká výsledný brousicí nástroj. Výroba může probíhat i „za studena“, nicméně při tomto procesu vznikají levnější diamantové nástroje. Kovová pojiva se používají pro náročnější aplikace s nároky na stálost tvaru nebo ostří nástroje, proto je jejich cena vyšší než u pryskyřičného pojiva [6] [16].

Galvanická pojiva se používají pro výrobu tvarově složitých nástrojů a používají se všude tam, kde nelze použít klasické technologie výroby brousicích kotoučů z diamantu a kubického nitridu bóru. Nevýhodou je malá životnost daná pouze jednou vrstvou brusiva (běžně diamantu). Kotouče s galvanickými pojivy se neorovnávají [6].

Běžné brousicí kotouče s keramickým pojivem dosahují řezné rychlosti 30 až 35 $m \cdot s^{-1}$, u moderních kotoučů při strojním broušení do 100 $m \cdot s^{-1}$. U kotoučů s pryskyřičným pojivem a s vyztuženými skelnými vlákny lze použít rychlosti i přes 100 $m \cdot s^{-1}$ [2]. U kovového pojiva lze dosahovat větších řezných rychlostí než u pojiva z pryskyřice. Takové vysoké rychlosti se využívají například při výrobě stopkových monolitních nástrojů.

1.4.4 Zrnitost

Zrnitost obecného brusiva se pro běžné brousicí nástroje určuje jako velikost použitých zrn v brousicím nástroji. Mezinárodní norma FEPA „F“ 42-D-1986 sjednocuje značení měrných rozměrů zrn a nahradila normu ČSN 22 4012. Definuje zrnitost jako počet ok síta na délku jednoho anglického palec (25,4 mm), kterým ještě brusivo při prosévání propadne. Čím je číslo označující zrnitost brusiva vyšší, tím je velikost ok síta menší a brusivo je tudíž jemnější [11] [2].

Proti tomu je zrnitost brusiva z diamantu nebo z kubického nitridu bóru uváděna podle normy ISO 6106 (standard FEPA), která se hojně využívá u tuzemských i evropských výrobců brousicích kotoučů. Američtí výrobci brousicích kotoučů používají normu ASTM E 11-70, která je podobná standardně užívané normě

FEPA „F“ 42-D-1986 [6]. Podle dříve používané normy ČSN 22 4015 byla zrnitost udávána jako podíl, kde v čitateli je horní a ve jmenovateli dolní rozměr zrna v mikrometrech [18]. V *tab. 1* můžeme porovnat jednotlivé zrnitosti podle různých norem.

Zrnitost se volí podle požadavku na drsnost broušené plochy a dále ovlivňuje množství odebíraného materiálu. Při zmenšování velikosti zrna se zkvalitňuje jakost broušené plochy, ale snižuje se výkon broušení. Brousicí kotouč se více zanáší a je nutné ho častěji oživovat nebo dokonce orovnávat, aby se snížilo teplo při broušení a zachovala se přesnost a kvalita broušeného povrchu [2].

Tab. 1: Porovnání běžných zrnitostí diamantu a KBN [6] [11] [18]

ČSN 22 4015	**Jmenovitá max./min. délka strany oka síta [μm]**	**ISO 6106 (FEPA)**		**US Standard ASTM E 11-70**	**FEPA „F“ 42-D-1986 (ČSN 22 4012)**	**Použití pro broušení**
		Diamant	Kubický nitrid bóru			
250/200	315/160	D251	B251	60/70	60	Výkonné a hrubování s vysokým výkonem
200/160	250/125	D213	B213	70/80	70	
		D181	B181	80/100	80	
160/125	200/100	D151	B151	100/120	100	
125/100	160/80	D126	B126	120/140	120	Výkonné a hrubování
100/80	125/63	D107	B107	140/170	150	
		D91	B91	170/200	180	
80/63	100/50	D76	B76	200/230	220	Střední, ostření nástrojů
63/50	80/40	D64	B64	230/270	240	
50/40	63/ -	D54	B54	270/325	280	Dokončovací
		D46	B46	325/400	320	

1.4.5 Tvrdost kotouče

Tvrdost brousicího nástroje se uvádí jako odpor proti uvolnění zrn z povrchu kotouče a je velmi důležitou vlastností při stanovení optimální životnosti kotoučů. Tvrdost kotouče závisí především na schopnosti pojiva udržet zrno v brousicím kotouči. Při otupení brusného zrna roste řezný odpor a tření o materiál, do té doby než se zrno z vazby vylomí. Poté se odkryjí spodní, nová zrna [2] [11].

Tento proces se nazývá samoostření, díky němuž se brousicí kotouč udržuje stále ostrý. Ke správnému průběhu samoostřicího procesu je nutné včasné vylomení zrna, to je podmíněno vhodnou volbou tvrdosti kotouče. U měkkého kotouče se vylamují zrna už při nepatrném otupení. Kotouče rychle ztrácí tvar a rozměr. U příliš tvrdého kotouče se zrna naopak nevylamují a kotouč se rychleji zanáší a dochází k jeho pálení vlivem nadměrného zahřátí. Tvrdost brousicího kotouče se obvykle označuje písmeny E až Z (od velmi měkkého až po zvlášť tvrdý) [2] [11].

1.4.6 Sloh kotouče

Sloh neboli struktura kotouče se charakterizuje jako poměr objemu pórů a objemu brusných zrn a pojiva. Mezi zrny a pojivem musí být dostatek prostoru, aby odebrané třísky materiálu mohly volně vypadávat a nepěchovaly se mezi brusná zrna. Díky pórovitosti kotouče se procesní kapalina lépe dostane do místa řezu a usnadňuje chlazení kotouče. Sloh kotouče se označuje čísly 1 až 15, od velmi hutného (5% pórovitost) až zvlášť pórovitého (nad 50%) [2] [11].

1.4.7 Koncentrace brusiva

Koncentrace brusiva (*K* nebo *C*) se obvykle uvádí u brousicích nástrojů diamantových nebo z kubického nitridu bóru a vyjadřuje hmotnostní obsah brusiva (v gramech nebo karátech) v 1 cm^3 brousicí vrstvy (K = g/cm^3 nebo K = ct/cm^3). Jako základ byla stanovena koncentrace *K 100*, při které je v 1 cm^3 brousicí vrstvy obsaženo 0,88 g (4,4 ct) brusiva, což představuje 25 % objemu této vrstvy [6].

Tab. 2: Řada koncentrací pro brousicí nástroje [6] [17]

Koncentrace *K*	25	50	75	100	125	150
Obsah brusiva [g/cm^3]	0,22	0,44	0,66	0,88	1,1	1,32
Obsah brusiva [ct/cm^3]	1,1	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6
Objem zrn ve funkční vrstvě [%]	6,25	12,5	18,75	25	31,25	37,5
Velikost koncentrace	Nízká		Střední		Vysoká	

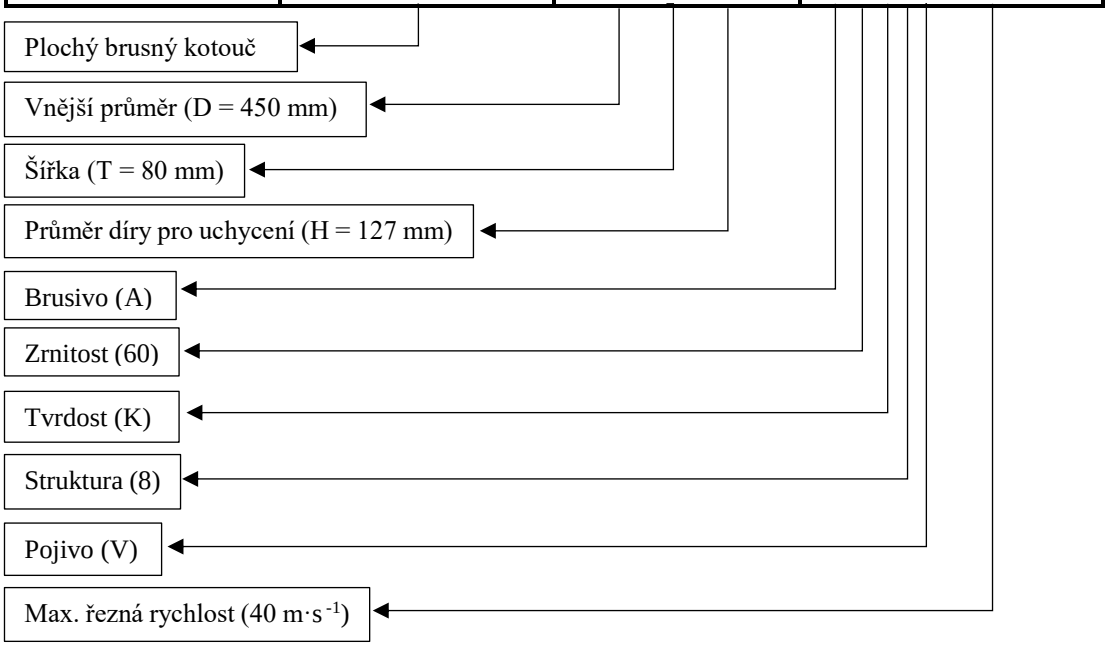
- *Nízká koncentrace* – zaručuje dobré samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje výkon broušení, snižuje vývin tepla, snižuje životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru kotouče, zvyšuje drsnost povrchu.
- *Střední koncentrace* – pro běžné broušení.
- *Vysoká koncentrace* – zhoršuje samoostřicí vlastnosti kotouče, snižuje výkon broušení, zvyšuje vývin tepla, zvyšuje životnost kotouče, zlepšuje stálost tvaru kotouče, snižuje drsnost povrchu. Používají se hlavně na CNC bruskách při profilovém broušení [6].

1.4.8 Označování brousicích nástrojů

Každý brousicí nástroj musí být popsán údaji o výrobci, rozměrech, číslem příslušné normy a hlavně musí být uvedena jakost nástroje. Ta je popsána kódem, který zahrnuje výše popsané vlastnosti ve stanoveném pořadí [11]. Převážně se brousicí kotouče označují v pořadí podle jeho tvaru, rozměru, brusiva, zrnitosti, tvrdosti, struktury, pojiva a případně jeho koncentrace brusiva.

Tab. 3: Značení brousicích nástrojů podle dané normy [20]

Označení	Tvar	Rozměry	Složení – rychlost
BK ISO 603-1	-1-	450x80x127	A60K8V – 40 $m \cdot s^{-1}$



Tab. 4: Značení brousicích materiálů a pojiva dle ČSN 22 4010 [21]

Druhy brusiva		Druhy pojiva	
Označení	**Název**	**Označení**	**Název**
A99	Umělý korund bílý	V	Keramické
A98	Umělý korund růžový	R	Pryžové
A96	Umělý korund hnědý	B	Umělá pryskyřice
C49	Karbid křemíku zelený	E	Šelakové
C48	Karbid křemíku černý	Mg	Magnezitové
D	Diamant	S	Silikátové
BN	Kubický nitrid bóru	U	Polyuretanové

1.4.9 Brousicí úseky při výrobě tvrdokovové frézy

Monolitní nástroje se vyznačují tím, že nástroj (alespoň řezná část) je vyroben z jednoho druhu nástrojového materiálu. Výhodou monolitních nástrojů je vysoký možný počet přeostření. Po slinování tvrdokovu do tvaru polotovaru jednotlivého monolitního nástroje následuje proces broušení, který je možný pouze diamantovými brousicími kotouči. Po tomto procesu výroby vzniká vysoká tuhost celého nástroje daná vysokým modulem pružnosti slinutého karbidu. Nevýhodou všech monolitních nástrojů je vysoká spotřeba nástrojového materiálu. Z těchto důvodů vyplývá, že monolitní stopkové nástroje se vyrábějí v menších rozměrech. Mohou se vytvářet nástroje tvarově složité a speciální [23].

Výroba monolitní stopkové frézy probíhá na moderních CNC bruskách na jedno upnutí a jednotlivé procesy broušení jsou dále nazvány jako brousicí úseky. Označování břitu nástroje se ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. odlišuje od značení podle normy ČSN 22 0011, proto je dále uvedeno nejprve označení daných ploch podle této normy a poté označení, které se zaběhlo ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o.

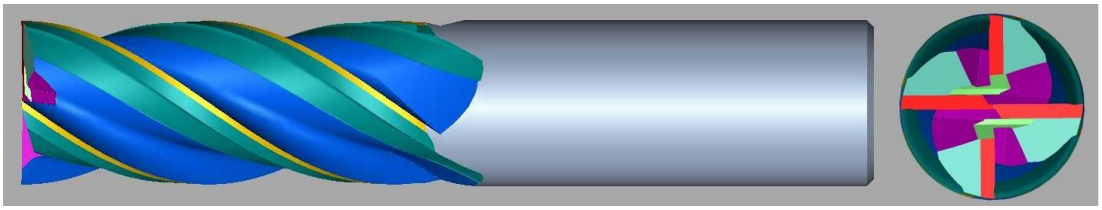
Z válcového polotovaru se nejprve vybrousí řezné drážky neboli čela hlavní (čelo obvod). Je vhodné, aby řezná drážka frézy byla co největší. To umožňuje dobré utváření, skladování a odvod třísek. Na druhou stranu větší drážky snižují pevnost zubu, případně celého nástroje a snižují možný počet přeostření [23]. Při výrobě monolitních stopkových fréz se uplatňuje vysokoúběrové broušení, které probíhá při jednom záběru kotouče. Ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. se pro větší drážky (u dvoubřitých, tříbřitých fréz a u fréz větších průměrů od Ø12 mm) používají brousicí kotouče tvaru 1A1 nebo u vícebřitých fréz (tříbřité až osmibřité) o menším průměru (méně než Ø12 mm) se uplatňují většinou kotouče 1V1, které méně vibrují, umožňují vytvářet lepší tvar drážky a lépe se orovnávají než kotouče 1A1.

Po zhotovení řezné drážky následuje výroba vedlejšího čela nástroje (čelo na čele). Čela vedlejší se brousí kotoučem 12V9, který je pro výrobu dané plochy nejvhodnější.

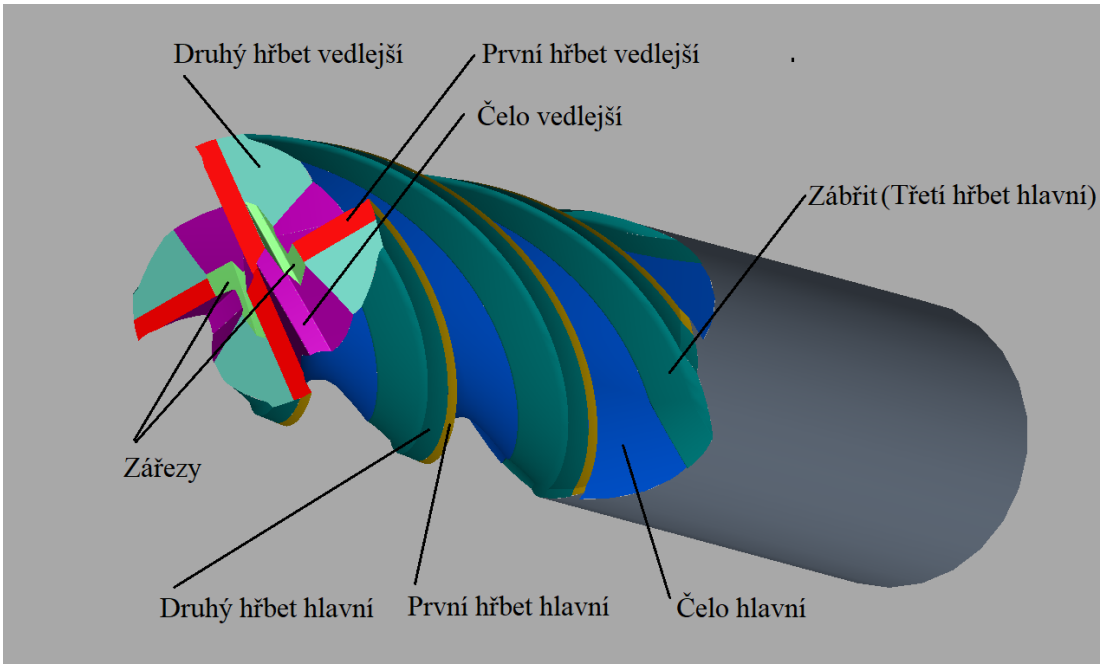
Zbývá vytvoření hřbetů nástroje. U fréz se většinou brousí první a druhý hřbet hlavní (první a druhý úhel hřbetu na obvodu). Poté se může vytvořit první a druhý vedlejší hřbet (první a druhý úhel na čele). Tvorbu vedlejších a hlavních hřbetů nástroje obstarává kotouč 11V9. Začíná se broušením druhého a poté se vytvoří první hlavní hřbet nástroje. Následuje broušení druhého a prvního vedlejšího hřbetu. První hřbety obráběcího nástroje se nazývají fazetkami. Na závěr brousicích úseků následuje vytvoření zkosení na špičkách frézy (rohové sražení), aby byla docílena dlouhá trvanlivost nástroje [30].

Při výrobě monolitních stopkových fréz ze slinutého karbidu je nutné zohlednit požadovaný počet břitů, velikost nástroje, úhel šroubovice řezné drážky a chování kotoučů (vibrace, pískání, pálení atd.), aby bylo docíleno optimálního tvaru brouseného nástroje. Po provedení všech úseků broušení se na řeznou část většiny stopkových fréz nanáší tenká ochranná vrstva podle obráběného materiálu. Správná volba a provedení technologie povlakování může prodloužit životnost nástroje [25].

Pro lepší znázornění popsaných ploch břitu nástroje jsou uvedeny *obr. 11* a *obr. 12*, na kterých jsou barevně odlišeny a popsány dané plochy frézy. Na stopkových frézách se mohou vytvářet další plochy, které jsou například tzv. zábřity a zářezy.



Obr. 11: Model čtyřbřité frézy z programu Walter Helitronic Tool Studio 2.1



Obr. 12: Model čtyřbřité frézy z programu Walter Helitronic Tool Studio 2.1

1.4.10 Upínání brousicích kotoučů

Při výrobě monolitních stopkových nástrojů se brousicí kotouč nejčastěji umisťuje na upínací trn. Na jednom upínacím trnu mohou být upnuty i dva kotouče (např. kombinace kotouče 11V9 a 12V9). Výrobci doporučují nechávat brousicí kotouče na upínacích trnech po celou dobu životnosti kotouče, aby se předešlo možnému špatnému přeupnutí kotouče. Špatně upnutý kotouč může přesahovat doporučené hodnoty radiální a axiální házivosti. Přesahování těchto hodnot může mít za následek zhoršenou kvalitu a přesnost broušení. Kotouče větších rozměrů a hmotností jsou dynamicky vyvažovány. Dynamické vyvážení podstatně snižuje chvění a vibrace při broušení, a tím se zvyšuje výkon broušení, životnost kotouče a kvalita výbrusu [6].

Brousicí kotouč se společně s upínacím trnem upíná na vřeteno CNC brusky na předepsaný moment. Použití diamantových kotoučů a kotoučů z kubického nitridu bóru zvyšuje nároky na technický stav stroje než při použití kotoučů s klasickými brusivy. Bruska, upnutý polotovar nástroje a brousicí kotouč musí společně dosahovat velké tuhosti, aby nedocházelo k vibracím vřetena. Tuhost této soustavy umožňuje dosažení předepsané drsnosti a kvality povrchu, rozměrové přesnosti, geometrických tolerancí. Brousicí kotouče, které nejsou správně upnuty, se dříve opotřebují [6].

1.5 Procesní kapaliny

Během výroby monolitních tvrdokovových nástrojů dosahují brousicí kotouče velkých řezných rychlostí, tudíž je nezbytné používat při tomto procesu některou z procesních kapalin. Při vzniku vysokých teplot v místě řezu je nutné ochlazovat kotouč i obrobek procesní kapalinou. Další funkcí procesních kapalin je odvádění třísek a nečistot z místa styku brousicího kotouče a obrobku. Jejich hlavním účelem

je zvýšení výkonnosti obrábění. Přítomnost procesní kapalin v místě řezu snižuje tření, čímž se snižuje vznikající množství tepla.

Použitím vhodné procesní kapaliny a správného nastavení pozice trysek na daný úsek broušení je možné dosáhnout až čtyřnásobného zvýšení trvanlivosti nástroje a zvýšení produktivity obrábění o 10 až 50 % [22]. Pro běžné broušení se používají roztoky elektrolytů a emulzí. Pro náročnější broušení se aplikují speciální chladicí kapaliny nebo řezné oleje [2] [22].

Procesní kapaliny pro obrábění se dělí na dva základní typy:

- řezné oleje,
- řezné kapaliny mísitelné s vodou.

Řezné oleje jsou procesní kapaliny na bázi minerálních olejů. Pro lepší funkci olejů se mohou přidávat přísady (mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva). Mají velice dobrý mazací účinek, ale nízký chladicí účinek. Některé řezné oleje mohou při vysokém překročení řezné rychlosti nebo při nedodržení správné technologie broušení i vzplanout. Oproti řezným kapalinám mísitelnými s vodou přináší větší trvanlivost nástroje a lepší kvalitu povrchu při nízkých řezných rychlostech [22].

Řezné kapaliny mísitelné s vodou se vyznačují vyšší chladicí vlastností oproti řezným olejům. Nevýhodou bývá horší mazná schopnost. Emulze jsou nejpoužívanější z řezných kapalin mísitelných s vodou [22].

1.6 Opotřebení a trvanlivost brousicích kotoučů

Během procesu broušení dochází k opotřebování brousicího kotouče, což vede ke změnám provozních podmínek. Opotřebení pracovních ploch závisí na všech podmínkách broušení, charakteristice kotouče, vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách atd. Opotřebení je dáno vztahem:

$$U = \frac{C_T}{T^m},$$

kde C_T je konstanta závislá na podmínkách broušení,

T_m - trvanlivost kotouče,

m - exponent relativní trvanlivosti [1].

Vlivem parametrů kotouče a řezných podmínek dochází buď k otupení kotouče, nebo se uplatňuje samoostření. Otupení nastává při zaoblování hrany kotouče, vyštípáním nebo štěpením brusných zrn, čímž dochází ke ztrátě řezivosti zrn. Samoostření probíhá v důsledku otupování zrn brusiva tak, že jsou vylamována se vzrůstajícím řezným odporem. Po obroušení pojiva začínají pracovat nová zrna [1].

Podle podmínek a broušení rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení:

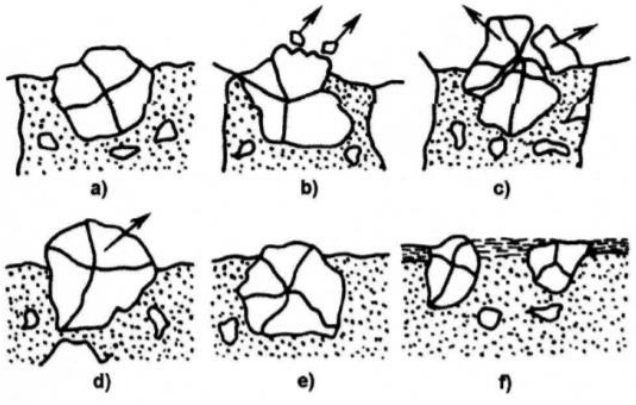
a) otěr řezných částí (vrcholů) brusných zrn se vznikem hladkých plošek,

b) mikroskopické porušování (štěpení) zrn ve formě malých úlomků,

c) porušování celých zrn,

d) vylamování celých zrn,

e) ničení zrn působením chemických vlivů a při vysokých teplotách vzniká difúzní a adhezní opotřebení,
f) zanášení prostorů mezi zrny, třískami a brusným odpadem [1].



Obr. 13: Základní způsoby opotřebování brousicího kotouče [1]

Při procesu broušení se jednotlivé druhy opotřebení kombinují, proto je potřeba počítat se všemi vlivy opotřebení, které mohou nastat. Zrno, které je chemicky příbuzné s obráběným materiálem, zvyšuje intenzitu opotřebení brousicího kotouče. Jedná se především o difúzní opotřebení za vyšších teplot. Difúzní opotřebení je typické pro broušení ocelí diamantovým brusivem, proto se toto broušení nedoporučuje [1].

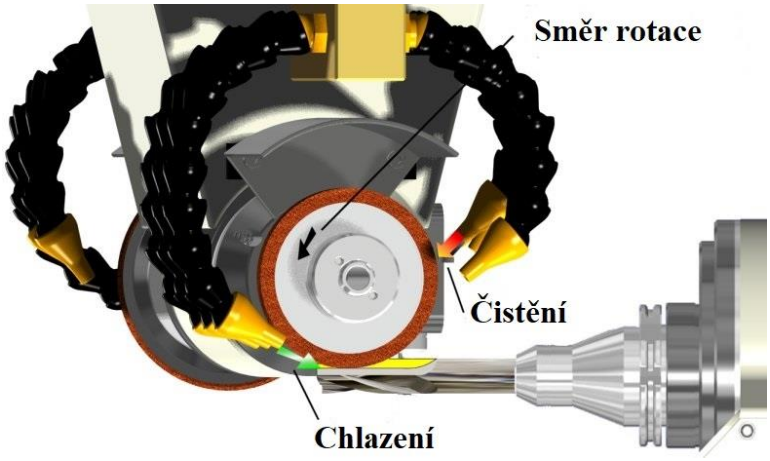
Experimenty prokázaly, že vysoké rychlosti broušení jsou prospěšné pro aplikaci broušení. Při vyšších řezných rychlostech dochází ke snižování opotřebení brousicího kotouče. Zatížení jednoho zrna je nižší, tím se trvanlivost nástroje zvětšuje [15]. Zároveň obvodová rychlost nesmí překročit hodnoty, které doporučuje výrobce kotoučů [1].

1.6.1 Opotřebení kotoučů s diamantovým brusivem

V případě broušení slinutých karbidů jsou zrna z umělého diamantu výkonnější než zrna z přírodního diamantu. Zrno umělého diamantu se opotřebovává mikroskopickým vydrolováním malých úlomků a zbytek zrna zůstává v pojivu až do úplného opotřebení kotouče. Pouze vadná zrna se odlamují a odstraněním zrn je podporována samoostřicí funkce kotouče. Nárůstek na diamantových zrnech příznivě ovlivňuje oddělování třísek, ale současně se otupuje kotouč a část nárůstku se může dostat na broušený materiál [1].

Diamantové kotouče jsou vhodné k broušení tvrdých a křehkých materiálů (slinuté karbidy, keramika, sklo apod.). Je to dáno povahou porušení brusiva u křehkých materiálů a tím, že materiály na sebe vzájemně chemicky nepůsobí [1].

Obzvláště u broušení slinutých karbidů diamantovými kotouči musí být odváděno vzniklé teplo ve formě proudících řezných olejů (*obr. 14*). Řezné oleje jsou přiváděny za zvýšeného tlaku, následně se filtrací zbavují vzniklých třísek a opotřebovaných částí kotouče [2].



Obr. 14: Nastavení trysek při broušení frézy [14]

1.6.2 Orovnávání a oživování diamantových brousicích kotoučů

Diamantové kotouče se orovnávají především při hrubovacím broušení, kdy se odebírají velké přídavky na obrábění. Orovnávání se používá při zanesení, nerovnoměrném opotřebení nebo při obnovení tvaru u tvarových kotoučů. Orovnávacím nástrojem je brousicí kotouč ze zeleného nebo černého karbidu křemíku s keramickým pojivem. Může být tvrdší, může mít hrubší zrna a vyšší zrnitost než orovnávaný kotouč. Existují dva způsoby orovnávání diamantových kotoučů a kotoučů z kubického nitridu bóru. Jedná se buď o odvalování, nebo obrušováním. Při obrušování se roztočí orovnávací nástroj a brousicí kotouč koná rotační pohyb bez ohledu na orovnávací nástroj. Naproti tomu při odvalovací metodě pohyb orovnávacího nástroje vychází z brousicího (orovnaného) kotouče [1].

Oživování brousicích kotoučů se provádí při ztrátě brousicích vlastností v důsledku snížení samoostřicí funkce. Používají se oživovací kameny s keramickým nebo pryžovým pojivem, který odebere z kotouče zbytky nalepeného materiálu a přebytečné pojivo, čímž odkryje diamantové zrno a kotouč následně opět dobře brousí [6].

2 Analýza současného stavu ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o.

2.1 Aplikované brousicí kotouče

2.1.1 Evidence a sledování trvanlivosti kotoučů

Společnost NAVEL, spol. s.r.o. používá brousicí kotouče převážně od italského výrobce brousicích nástrojů Saidtools S.R.L., který pravidelně dodává všechny typy kotoučů pro výrobu nástrojů. Další významní dodavatelé kotoučů jsou společnosti TYROLIT CEE k. s. a Urdiamant, s.r.o. Tito výrobci dodávají kotouče buď pro výrobu speciálních tvarových nástrojů, nebo pro ostření a renovaci nástrojů.

Po dodání se brousicí kotouče uschovávají ve skladu u pana vedoucího výroby a účetně se odepisují do spotřeby. Podrobnější evidence a sledování kotoučů, které by se mohly týkat počtu orovnání a oživení, počtu vyrobených nástrojů daným kotoučem nebo sledování broušené dráhy, se neprovádí.

Operátoři brusek mají uschovány brousicí kotouče, které byly vydané do výroby, ve svých skříních u strojů. Uschování kotoučů u strojů umožňuje zajištění kontinuální výroby i během odpoledních směn, během nichž nemají operátoři přístup ke skladovým zásobám kotoučů. Operátor je zodpovědný za včasné oživování kotoučů a dále rozhoduje o potřebě orovnávání nebo vyřazení kotouče. Při požadavku na orovnání je kotouč umístěn do fronty kotoučů na orovnání, které provádí pracovník na ranní směně. Operátoři posuzují potřebu orovnání kotoučů především podle tvaru a stavu brousicí vrstvy a u výrobních kotoučů také podle přesnosti rozměrů a kvality povrchu vyrobených nástrojů.

Pokud se operátor domnívá, že kotouč je již na pokraji životnosti, odnese kotouč vedoucímu výroby. Pokud byla životnost skutečně vyčerpána, dostává nový kotouč ze skladu. Navíc operátoři na základě svých zkušeností a znalostí sami rozhodují o tom, jaký kotouč použijí na daný brousicí úsek a sérii výroby. Všechny výše zmíněné praktiky mají za následek velice subjektivní sledování trvanlivosti brousicích kotoučů, které se nedají exaktně porovnat.

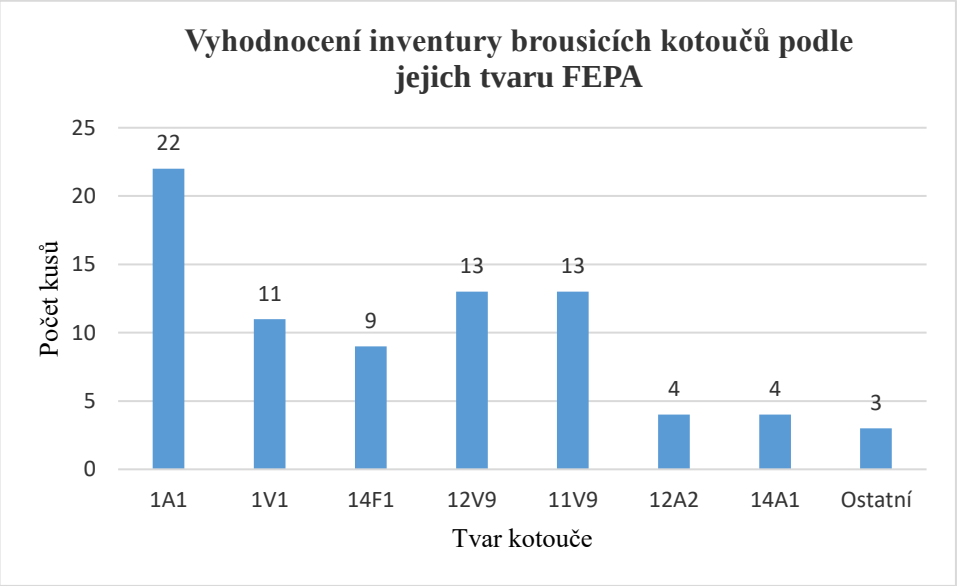
2.1.2 Inventura brousicích kotoučů

K určení úspor nákladů a stanovení ekonomického pohledu na hospodaření s brousicími kotouči bylo navrženo provedení inventury brousicích kotoučů ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o., které se vyskytují hlavně ve skladu, na upínacích trnech strojů, ve skříních jednotlivých pracovníků, případně na dalších místech. Dále bylo umožněno nahlédnout do výpisu objednávek, které jsou prospěšné při vytváření pohledu na ekonomičnost výroby. Celá inventura brousicích kotoučů je dostupná v *příloze 1* a byla provedena ke dni 30. 5. 2018.

Inventura výrobních brousicích kotoučů ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. prokázala, že s největší četností jsou zastoupeny kotouče na výrobu řezných drážek fréz (1A1 100x12x6, 1V1 30° 100x12x6) a dále jsou hojně zastoupeny kotouče

na další úseky výroby a ostření fréz (11V9 75° 100x10x3, 12V9 45° 125x10x3). Rozměry brousicích kotoučů jsou označovány podle katalogu společnosti Saidtools S.R.L. [3], které jsou uvedeny v *tab. 5* (DxUxX). Inventura dále ukázala převahuju brousicích kotoučů s hybridními pojivy (značení společnosti Saidtools S.R.L.: *MX*), které se používají převážně na výrobu nástrojů.

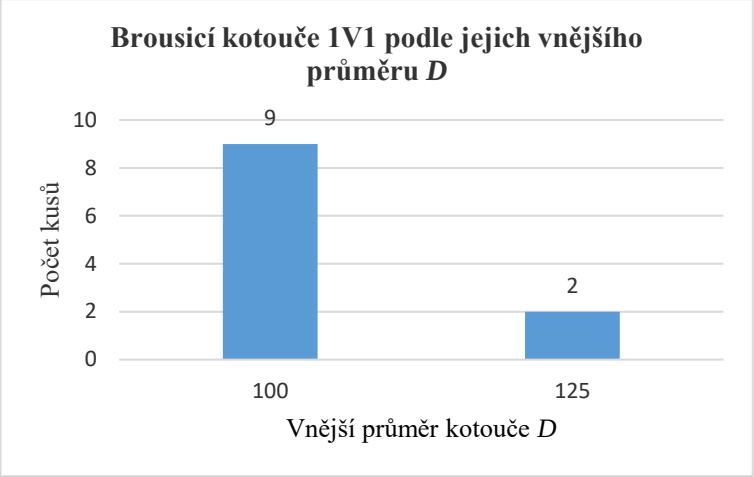
Nejvíce spotřebovávané brousicí kotouče jsou 1A1 a 1V1. Všechny brousicích kotouče 1A1 a 1V1 mají podle inventury stejnou výšku brousicí vrstvy X = 6 mm. Optimální výška brousicí vrstvy kotoučů byla dříve stanovena na základě zkušeností výroby tvrdokovových nástrojů ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Vyhodnocení inventury brousicích kotoučů ohledně jejich množství je znázorněno v následujícím grafu (*graf 1*). Brousicí kotouče 1A1 se podle inventury (*příloha 1*) vyskytují s různými druhy pojiv, což značí, že společnost NAVEL, spol. s.r.o. dříve nesystémově objednávala kotouče dle preferencí jednotlivých brusičů. Tyto objednávky vedly k vytváření velkého množství skladových zásob, proto je velký nepoměr mezi brousicími kotouči 1A1 a 1V1.



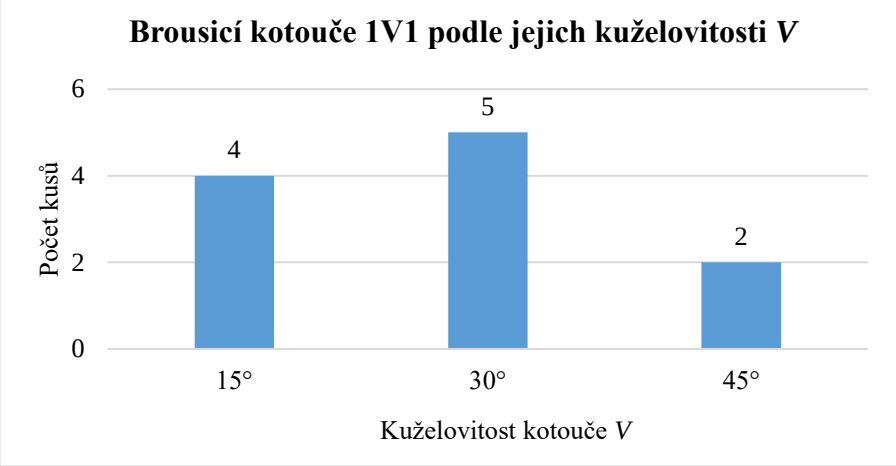
Graf 1: Vyhodnocení inventury brousicích kotoučů podle jejich tvaru FEPA

Společnost NAVEL, spol. s.r.o. by chtěla v budoucnu převést výrobu řezných drážek fréz na kotouče 1V1, proto požádala o provedení detailní inventury těchto kotoučů. Ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. se vyskytují brousicí kotouče 1V1 pouze se šířkou brousicí vrstvy U = 12 mm a výškou brousicí vrstvy X = 6 mm. Hodnoty optimální šířky a výšky brousicí vrstvy byly dříve stanoveny na základě mnohaleté zkušenosti a technicko-ekonomické analýzy společností NAVEL, spol. s.r.o. Z přiložených dokumentů (*graf 2, graf 3, příloha 1*) vyplývá, že nejpoužívanější brousicí kotouče jsou 1V1 30° 100x12x6 a 1V1 15° 100x12x6 od společnosti Saidtools S.R.L.

Mohlo by být zajímavé věnovat se i zbylým brousicím kotoučů na výrobu fréz (1A1, 11V9, 12V9). Provedení podrobnější inventury ostatních brousicích kotoučů a posouzení jejich využitelnosti by udělalo pořádek v hospodaření s kotouči. Nevyužité brousicí kotouče by se mohly zlikvidovat.

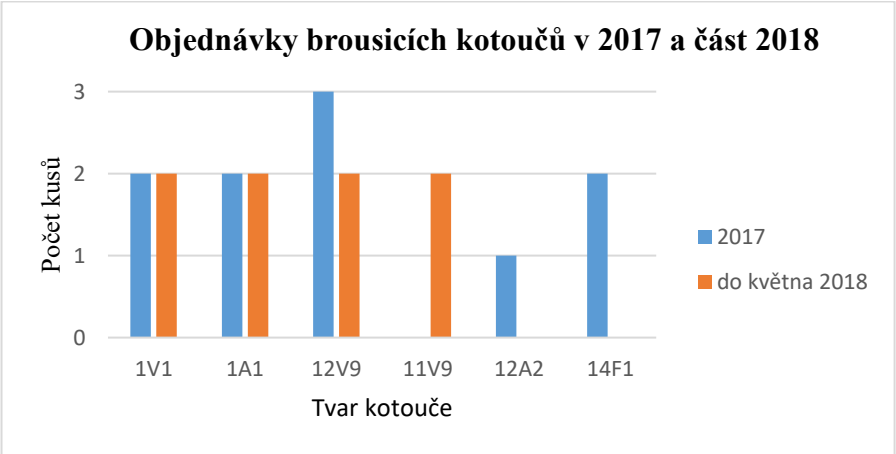


Graf 2: Množství brousicích kotoučů 1V1 podle jejich vnějšího průměru D



Graf 3: Množství brousicích kotoučů 1V1 podle jejich kuželovitosti V

Ke stanovení inventury byly dále použity výpisy objednávek kotoučů za poslední dva roky (*graf 4*), ze kterých vyplývá, že se stále nakupují brousicí kotouče pro výrobu fréz. Nejčastěji se nakupují brousicí kotouče pro výrobu tvrdokovových nástrojů s hybridními pojivy MX7.0H (Hard) a MX7.0M (Medium). Z těchto výpisů je také patrné, že brousicí kotouče mají dlouhou životnost, proto se tak často nenakupují.



Graf 4: Objednávky brousicích kotoučů v 2017 a část 2018

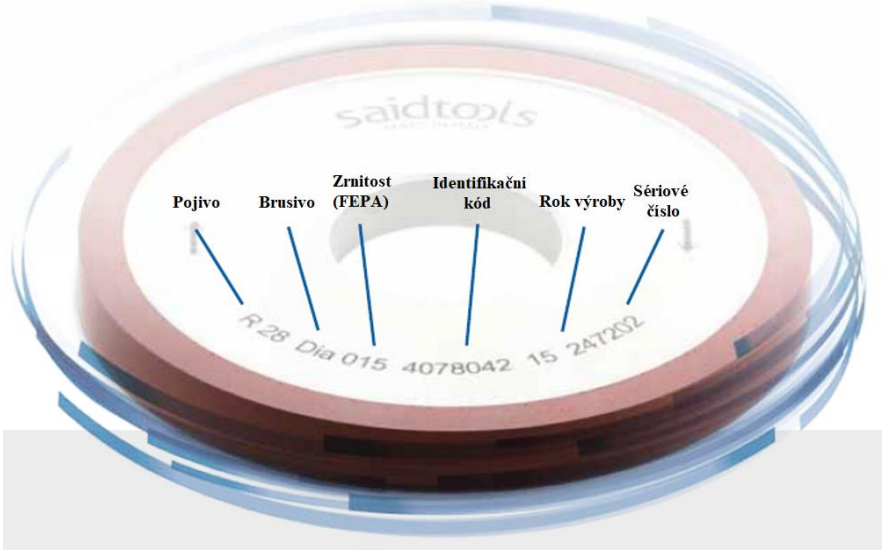
Dále se na ostření nástrojů osvědčily brousicí kotouče s pryskyřičnými (označení společnosti Saidtools S.R.L.: *R*) nebo hybridními pojivy z důvodu nízké pořizovací ceny. Při ostření nástrojů dochází k častému ničení kotoučů vlivem nezkušené obsluhy strojů, jelikož noví brusiči se zaučují na CNC bruskách, kde probíhá ostření nástrojů. Nyní se uvažuje o přechodu na kovová pojiva a většího využití hybridních pojiv i při ostření nástrojů. Tato inovace by měla mít pozitivní vliv na produktivitu a úsporu nákladů, která je spjatá se vzrůstající zkušeností brusičů.

Pro broušení většiny tvrdokovových nástrojů používá společnost NAVEL, spol. s.r.o. zrnitost diamantového brusiva D64. Brousicí kotouče o této zrnitosti by měly být schopny dosáhnout drsnosti povrchu za ideálních podmínek až R_a 0,4 [3]. Na broušení nástrojů z rychlořezné oceli se používají kotouče, které obsahují brusivo z kubického nitridu bóru (CBN).

Během inventury se nepodařilo zachytit všechny brousicí kotouče ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. z důvodu nečitelnosti údajů na kotoučích. Označení brousicích kotoučů se vyskytovalo i pod upínacími prvky trnu, což také znemožnilo zachycení těchto kotoučů. Provedení inventury by rozhodně zjednodušilo a urychlilo zavedení systému pro automatickou identifikaci brousicích kotoučů. Zakoupení tohoto sofistikovaného systému by muselo promyslet vedení společnosti, protože náklady mohou být velmi vysoké a nemusely by se vyplatit. Problém nečitelnosti údajů na brousicích nástrojích je dále řešen v kapitole *3.2.2 Rodný list brousicího kotouče*.

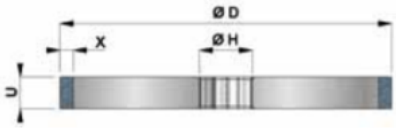
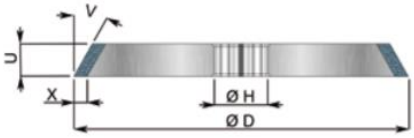
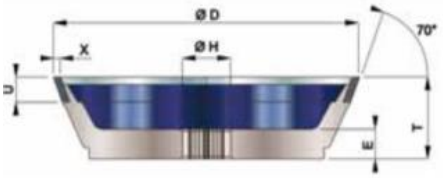
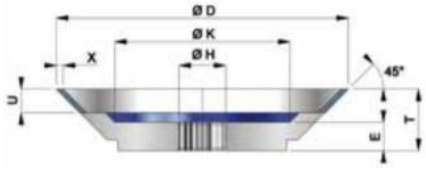
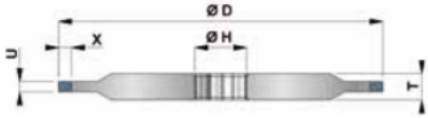
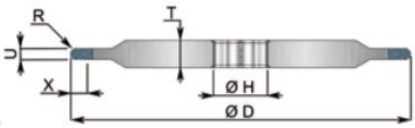
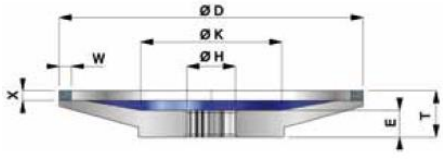
Inventura by měla položit základy evidence brousicích kotoučů a zjištěná data by měla v budoucnu posloužit při srovnání evidovaného stavu s aktuálním stavem. Inventury by se měly opakovat v pravidelných intervalech, aby se nasbíraná data dala mezi sebou porovnávat. Možné jsou i nepravidelné nebo mimořádné inventury, které by mohly přinést zajímavá data ohledně evidence kotoučů. Zavedené inventury brousicích kotoučů mohou pomoci nejen při rozvoji společnosti NAVEL, spol. s.r.o., ale také při úspoře nákladů a úspoře energie zaměstnanců.

Brousicí kotouče od společnosti Saidtools S.R.L. jsou označovány podle *obr. 15* a dále následuje *tab. 5*, která uvádí přehled nejpoužívanějších brousicích kotoučů ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o.



Obr. 15: Způsob značení brousicích kotoučů od Saidtools S.R.L. [3]

Tab. 5: Nejpoužívanější brousicí kotouče v NAVEL, spol. s.r.o. [3]

Název a tvar průřezu	Označení dle FEPA	Použití
Obvodový kotouč 	**1A1** Ø75, Ø100, Ø125	Broušení čela drážky - výroba
Obvodový úhlový kotouč 	**1V1** Ø100, Ø125 15°, 30°, 45°	Broušení čela drážky - výroba
Hrníčkový kotouč 	**11V9** Ø100, Ø125 75°	Tvarové broušení - první a druhý úhel hřbetu na čele a na obvodu
Hrníčkový kotouč 	**12V9** Ø75, Ø100,Ø125 45°	Čelo na čele - ostření
Obvodový kotouč 	**14A1** Ø75	Broušení průměrů pro stupňové vrtáky, tvarové nástroje
Obvodový kotouč 	**14F1** Ø75, Ø100, Ø125 R1; R1,5; R2	Broušení válcových ploch
Miskový kotouč 	**12A2** Ø125 20°	Výroba a ostření vrtáků

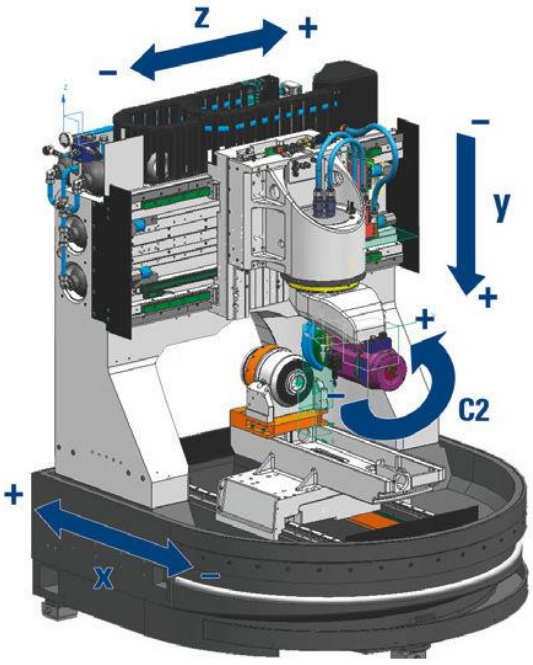
2.2 Obráběcí stroje

2.2.1 CNC brusky

Společnost NAVEL, spol. s.r.o. disponuje celkem šesti CNC bruskami od společnosti Walter Maschinenbau GmbH. Z toho dvě CNC brusky Walter Helitronic MINI POWER (*tab. 6*) a dvě CNC brusky Walter Helitronic POWER REGRINDER (*tab. 7*) slouží převážně k ostření nástrojů z tvrdokovu a rychlořezné oceli. Dále se v brusírně nachází CNC bruska Walter Helitronic POWER DIAMOND (*tab. 7*), která se používá k výrobě standardních nástrojů z tvrdokovu, rychlořezné oceli a k rotačnímu erodování nástrojů z polykrystalického diamantu. Všechny brusky umožňují pohyb v pěti osách (posuv v osách X, Y, Z a rotační pohyb v osách A, C).

Nejnovějším přírůstkem do strojového parku společnosti NAVEL, spol. s.r.o. je CNC bruska Walter Helitronic Vision 400 L (*tab. 8*) s robotickým podavačem RL-25 a podavačem brousicích kotoučů, o které se stará automatický řídicí systém od společnosti FANUC Corporation. Na tuto brusku se postupně převádí sériová výroba, ale je také možné brousit tvarově speciální nástroje.

CNC bruska Walter Helitronic Vision 400 L přeměřuje průměr kotouče a jeho vzdálenost v ose Z. Při změně těchto rozměrů systém této brusky automaticky přepočítá korekce tak, aby byly zachovány správné parametry ohledně geometrie a tvaru nástroje, které jsou také přeměřovány přímo na brusce. Tento integrovaný měřící systém (Integrated Measuring System) značně ulehčuje operátorům práci a zmenšuje chybu lidského faktoru. Při opakovaném nedosahování správné geometrie a tvaru nástroje se proces výroby zastaví a obsluze, která nemusí být přítomna v brusírně, přijde upozornění například přes SMS zprávu. Bruska si udržuje stálou teplotu procesní kapaliny i po dlouhém broušení. Tento jev je velmi prospěšný, protože změna teploty prostředí má negativní vliv na přesnost a kvalitu broušení.



Obr. 16: Kinematické schéma CNC brusky Walter Helitronic Vision 400 L [9]

Tab. 6: Technické údaje CNC brusky Walter Helitronic MINI POWER [7]

Pracovní rozsah		
Osa X	Podélný posuv	350 mm
Osa Y	Vertikální posuv	200 mm
Osa Z	Příčný posuv	370 mm
	Rychloposuv os X, Y, Z	15 $m \cdot min^{-1}$
Osa C	Rozsah natočení	±200°
Osa A	Otočná osa	∞
Přesnost		
Lineární krok		0,0001 mm
Radiální krok		0,0001°
Parametry obou vřeten		
Max. průměr kotouče		∅150 mm
Max. otáčky vřeten		10 500 min^{-1}
Ostatní parametry		
Celková hmotnost s chladicím systémem		3 600 kg
Software		Walter Window Mode
Řezná kapalina		Dionol® V 1519

Tab. 7: Technické údaje CNC brusek Walter Helitronic POWER REGRINDER/DIAMOND [8]

Pracovní rozsah		
Osa X	Podélný posuv	460 mm
Osa Y	Vertikální posuv	320 mm
Osa Z	Příčný posuv	660 mm
	Rychloposuv os X, Y, Z	15 $m \cdot min^{-1}$
Osa C	Rozsah natočení	±200°
Osa A	Otočná osa	∞
Přesnost		
Lineární krok		0,0001 mm
Radiální krok		0,0001°
Parametry obou vřeten		
Max. průměr kotouče		∅200 mm
Max. otáčky vřeten		10 500 min^{-1}
Ostatní parametry		
Hmotnost s chladicím systémem		4 600 kg
Software		Walter Window Mode/ Tool Studio 2.1
Řezná kapalina		Dionol® V 1519/ IonoGrind Dielektrikum

Tab. 8: Technické údaje CNC brusek Walter Helitronic Vision 400 L [9]

Pracovní rozsah		
Osa X	Podélný posuv	500 mm
Osa Y	Vertikální posuv	350 mm
Osa Z	Příčný posuv	700 mm
	Rychloposuv os X, Y, Z	50 $m \cdot min^{-1}$
Osa C	Rozsah natočení	±200°
	Počet otáček	20 min^{-1}
Osa A	Otočná osa	∞
	Počet otáček	750 min^{-1}
Min. až max. průměr obrobku		3 mm až 315 mm
Max. délka obrobku		390 mm
Max. hmotnost obrobku		50 kg
Přesnost		
Lineární krok		0,0001 mm
Radiální krok		0,0001°
Parametry obou vřeten		
Max. průměr kotouče		Ø254 mm
Rozsah otáček vřetena		0 až 10 500 min^{-1}
Průměr vřetene		Ø100 mm
Příkon		33 kW
Ostatní parametry		
Rozměry stroje		4 242 x 2 428 x 2 639 mm
Hmotnost s chladicím systémem		7 100 kg
Příkon při 400 V / 50 Hz		35 kVA
Software		Tool Studio 2.1
Řezná kapalina		Dionol® V 1519

Obr. 17: CNC bruska Walter Helitronic Vision 400 L [9]

2.2.2 Orovnávací stroj a řezné kapaliny

Společnost NAVEL, spol. s.r.o. disponuje poloautomatickým orovnávacím strojem ERO-AR 15. Na tomto stroji se pravidelně orovnávají brousicí kotouče tak, aby byla docílena požadovaná přesnost a geometrie nástrojů.

Do CNC brusek používaných pro výrobu a ostření nástrojů se dolévá řezný olej nemísitelný s vodou Dionol® V 1519. Tento olej se vyznačuje nízkou viskozitou a podporuje broušení kotoučů z diamantu a kubického nitridu bóru. Podle webových stránek výrobce MKU [5] je vhodný pro broušení tenkých, tvrdých materiálů. Umožňuje broušení při vyšších řezných rychlostech a stará se také o mazání stroje. Druhým typem používané kapaliny je IonoGrind Dielektrikum, jejíž hlavní výhodou je syntéza vlastností pro broušení obráběcích nástrojů a erodování nástrojů z polykrystalického diamantu.

2.3 Programování brusek

Každý počítačem řízený obráběcí stroj pracuje s programem, který vytvoří buď obsluhou stroje, nebo zkušený programátor. Ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. si program vytváří přímo operátor stroje. To představuje výhodu v podobě toho, že si obsluha pečlivě dohlédne na jednotlivé operace a brousicí úseky stroje. Vytváření a správné odladění programu může obsluze trvat i několik hodin, obzvlášť jedná-li se o speciální výrobu nástrojů. Nevýhoda vytváření programu přímo na stroji je časové vytížení obsluhy. Během programování nemůže probíhat na stroji jiná operace nebo jiná výroba nástrojů.

2.3.1 Walter Window Mode

Programování CNC brusek ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. je zajištěno dvěma programy. Prvním z nich je Walter Window Mode, který se nachází na starších strojích. Tyto brusky jsou určeny spíše k ostření nástrojů a programování je velmi snadné, intuitivní a rychlé. Vybere se správný paket, ve kterém jsou odlišeny jednotlivé druhy ostřených nástrojů. Dále se nastavují základní parametry nástroje a brousicích kotoučů. Na strojích, na kterých je umístěn tento program, začíná zaučení nové obsluhy.

2.3.2 Walter Helitronic Tool Studio 2.1

Druhým programem je Walter Helitronic Tool Studio 2.1. V tomto programu probíhá komplexní výroba většiny nástrojů společnosti NAVEL, spol. s.r.o., kde se uplatňuje běžné počítačové programování pomocí CAD/CAM systému. Obsluha stroje vytváří návrh, program, simulaci pohybů stroje a samotnou výrobu převážně rotačně symetrických nástrojů a dalších dílů. Vytvořené nástroje se přeměřují na CNC měřících strojích a následně se upravují jednotlivé parametry v programu brusky. Na CNC brusce Walter Helitronic Vision 400 L probíhá přeměřování brousicích kotoučů i nástrojů přímo na stroji, což výrazně zjednodušuje jejich výrobu.

Walter Tool Studion 2.1 může zaznamenávat různé parametry zachycené během broušení. Mezi tyto parametry patří například krouticí moment vřetena, korekce brousicích kotoučů, ujetá dráha kotouče a mnohé další. Tato data a informace o vyrobených nástrojích se ukládají, aby se nemusel program vytvářet znovu od začátku [24].

3 Návrh metodiky

3.1 Volba brousicího kotouče

Volba brousicího kotouče závisí nejen na jeho tvaru a velikosti, ale také na tvaru plochy broušené součásti. Podle materiálu obrobku a jeho mechanických vlastností se volí typ brusiva a tvrdost kotouče. K zachování samoostřicí schopnosti se volí měkčí kotouče pro broušení tvrdých materiálů. Pro broušení měkčích materiálů se volí tvrdší brousicí kotouče. Podle požadovaného výkonu broušení se následně volí velikost zrna, která také ovlivňuje jakost vyrobeného povrchu [2].

Volba vychází z brousicích kotoučů, jež jsou používány ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. nejčastěji (*tab. 5*). Na základě inventury brousicích kotoučů a zkušeností zaměstnanců společnosti NAVEL, spol. s.r.o. bylo rozhodnuto o výběru brousicího kotouče pro výrobu řezných drážek. Při tomto úseku výroby dochází k velkému úběru materiálu a tyto brousicí kotouče se nejčastěji nakupují kvůli jejich velké spotřebě.

Obvodové drážky fréz se v brusírně společnosti NAVEL, spol. s.r.o. vyrábějí dvěma tvary kotoučů. Jedním z nich je dle normy FEPA kotouč 1A1 a druhý je brousicí kotouč 1V1. K dosažení nejlepších vlastností řezné drážky u monolitních stopkových fréz z tvrdokovu musíme zohlednit velikost průměru a délky frézy, počet broušených břitů, kvalitě výbrusu a množství brouseného materiálu (slinutého karbidu). Čím je menší fréza s více břity, tím spíše se volí brousicí kotouč 1V1. U jednobřitých, dvoubřitých i tříbřitých fréz větších průměrů se používají kotouče 1A1, které se méně zanášejí. Během broušení fréz s menším počtem břitů vydrží řezná hrana kotouče 1A1 déle než u kotouče 1V1. U dlouhých a velkých průměrů fréz se nesmí zanedbat ani pracovní prostor CNC brusky tak, aby bylo možné provedení jednotlivých brousicích úseků a potřebných pohybů stroje.

3.2 Sledování doporučených parametrů

Pro určení míry opotřebení bylo navrženo sledování vybraných parametrů brousicího kotouče. Mezi vybrané parametry patří ujetá dráha kotouče v řezu, četnost orovnání, odebrané množství brousicí vrstvy při orovnání, tvar opotřebení brousicí vrstvy před orovnáním, počet oživení, operátor orovnávacího stroje a další parametry. Tyto uvedené parametry by bylo vhodné zapisovat do tzv. rodného listu brousicího kotouče a na základě těchto údajů bude možné provádět další technicko-ekonomické analýzy.

3.2.1 Brusný poměr

Jedna z nejdůležitějších veličin při posuzování procesu broušení je tzv. brusný poměr. Brusný poměr závisí na úběru určeného objemem odebraného materiálu Q_m $[mm^3 \cdot min^{-1}]$ a na opotřebení nástroje (brusiva) určený jeho spotřebou Q_a $[mm^3 \cdot min^{-1}]$.

Brusný poměr se vyjadřuje následujícím vztahem [1].

$$q = \frac{Q_m}{Q_a}\ [-]$$

Určení brusného poměru (poměrný objemový obrus) *G* vyplývá z objemu odebraného materiálu, které připadá na jednotku objemu spotřebovaného zrna. Platí, že čím větší je hodnota *G*, tím lepší je řezivost a výkon brousicího kotouče. V rámci praktických zkoušek by se mohl výpočet *G* upravit do tohoto tvaru:

$$G = \frac{V_m}{V_k}\ [-],$$

kde V_m $[mm^3]$ je objem odbroušeného materiálu v čase *t* (slinutého karbidu);

V_k $[mm^3]$ je objemové opotřebení brousicího kotouče v čase *t* [26].

Stanovení jednotlivých objemů V_m a V_k lze provést z rozdílu hmotností před broušením a po broušení s přepočtení podle příslušné hustoty slinutého karbidu ρ_m nebo hustoty brousicí vrstvy kotouče ρ_k.

Objem odbroušené vrstvy kotouče 1A1 nebo 1V1 je určen vztahem:

$$V_k = \frac{m_{k1} - m_{k2}}{\rho_k} \cdot 1000\ [mm^3],$$

kde m_{k1} $[g]$ je hmotnost kotouče před broušení,

m_{k2} $[g]$ je hmotnost kotouče po broušení,

ρ_k $[g \cdot cm^{-3}]$ je hustota brousicí vrstvy kotouče.

Objem odbroušeného materiálu je dán vztahem:

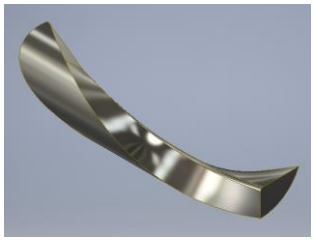
$$V_m = \frac{m_{m1} - m_{m2}}{\rho_m} \cdot 1000\ [mm^3],$$

kde m_{m1} $[g]$ je hmotnost materiálu (slinutého karbidu) před broušením,

m_{m2} $[g]$ je hmotnost materiálu (slinutého karbidu) po broušení,

ρ_m $[g \cdot cm^{-3}]$ je hustota materiálu (slinutého karbidu).

Teoretický objem odbroušeného materiálu by se také dal přibližně stanovit výpočtem z CAD modelu objemu drážky nástroje (*obr. 18*).



Obr. 18: Přibližný CAD model objemu řezné drážky frézy

V rámci této práce nemá smysl počítat brusný poměr *G* na úsek výroby, při kterém nedochází k velkému úběru materiálu, jelikož by bylo komplikované měření úběru materiálu a opotřebení brousicího kotouče. Toto je další důvod, proč se věnovat výrobě řezných drážek. Objemy odbroušeného materiálu a vrstvy kotouče lze stanovit při výrobě větší série nástrojů.

Mohlo by být zajímavé sledovat relaci brusného poměru k množstvím odbroušené vrstvy hned po broušení a množstvím odbroušené vrstvy po orovnání kotouče. Při jednotlivém vážení brousicích kotoučů a nástrojů je potřeba důkladné očištění od řezného oleje. Ulpívající řezný olej by mohl znehodnocovat hmotnost kotouče. Samozřejmě se jeví jako nejjednodušší změření rozměrů brousicího kotouče a z daného měření po orovnání vypočítat objem brousicí vrstvy kotouče. Z brusného poměru lze dále stanovit náklady brousicích kotoučů na odebrání jednotky objemu tvrdokovu.

3.2.2 Rodný list brousicího kotouče

U vybraného brousicího kotouče by se mělo sledovat jeho opotřebení v závislosti na všech možných měřitelných parametrech (*přílohy 2 až 5).* Bude nutné brousicí kotouče jednoznačně identifikovat. Z tohoto důvodu je vhodné, aby brousicí kotouče byly opatřeny čárovými nebo QR kódy. Pomocí těchto kódů by mohly být načteny ze systému všech informace, které se týkají daného kotouče. Načtení kódu by mohlo probíhat například pomocí mobilní aplikace. Další možností identifikace brousicích kotoučů je pomocí vloženého čipu do brousicích nástrojů nebo přiděleného upínacího trnu. Technologie čipování nástrojů zatím není v možnostech společnosti NAVEL, spol. s.r.o.

Důležité je vhodné umístění čárového nebo QR kódu na nástroj, aby nedošlo k jeho poškození. V tomto ohledu je třeba zvážit vliv vnějšího prostředí při CNC broušení. Zejména se jedná o proudění procesní kapaliny za zvýšeného tlaku na brousicí kotouč. Údaje o brousicích kotoučích se běžně uvádějí na vnitřních plochách kotouče tak, aby bylo zabráněno poškození značky vnějšími vlivy prostředí. Pro zapsání identifikačních údajů o kotouči se obvykle používá gravírování nebo označení laserem. Jelikož se označení vytváří převážně na vnitřní plochy kotouče, bylo by komplikované načtení údajů pomocí čárového nebo QR kódu. Dočasně lze použít variantu označení pomocí pořadového čísla (např.: 1 až 99) a data o kotoučích by se ukládala do systému manuálně.

V dnešní době probíhá intenzivní rozvoj radiofrekvenční identifikace objektů tzv. RFID. Tato technologie nabízí řešení čitelnosti údajů z obráběcích nástrojů, protože informace jsou ukládány do velmi malých čipů (tagů), které by se daly umístit do předpřipravených otvorů buď přímo v brousicím kotouči, nebo v přiděleném upínacím trnu. Vytvořením otvoru na těchto rotačních součástích se poruší jejich vyvážení, které by se dalo vyřešit umístěním závaží. Hlavní otázkou je cena RFID systému, která by se mohla v nadcházejících letech snižovat.

Jedním z významných údajů je výška orovnané vrstvy kotouče, která pomůže při stanovení brusného poměru. Dále je vhodné zaznamenávat důvody orovnávání nebo vyřazení a kdo daný kotouč orovnával. Bylo by vhodné zjednodušeně nakreslit tvar opotřebení kotouče, případně ho slovně okomentovat. Za další důvody orovnání

nebo vyřazení může patřit příliš zaoblená brousicí hrana kotouče, vyštípání kotouče, zalepení kotouče, vibrace, pískání a pálení kotouče, zvýšení výkonu brusky a jiné. Nesmí chybět zapisování dnů, kdy byly kotouče vydány do výroby a kdy byly orovnávány. Dále by mohl mít vliv na opotřebení brousicího kotouče počet oživení. Sledování zaznamenaných hodnot celkového počtu oživení za celou životnost kotouče by také mohlo být prospěšné. Zapisování výše uvedených parametrů zvládnou operátoři během svojí směny, protože mají všechna data k dispozici. Uvedený rodný list brousicího kotouče je znázorněn v *příloze 2*.

Dále by mohlo být zajímavé sledování množství a druh vyrobených nástrojů, které se vyrobí daným brousicích kotoučem (*příloha 3*). K zapisování druhu vyrobených nástrojů by se mohl použít zavedený formát označování nástrojů ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. podle Katalogu řezných nástrojů. Data týkající se výšky orovnané vrstvy, důvodu a datum orovnání jsou důležitá, a proto se opakují ve všech návrzích rodných listů brousicích kotoučů. Pro upřesnění je uveden příklad značení frézy: NAVEL A1442-4.

- A – druh frézy
- 14 – průměr frézy [mm]
- 42 – osová délka řezné části [mm]
- 4 – počet břitů

Do dalšího návrhu rodného listu v *příloze 4* by se zapisovala tzv. odbroušená délka, která představuje ujetou dráhu brousicího kotouče při řezu. Bylo by nejvhodnější sledovat tento údaj při broušení řezné drážky. Z programu Walter Helitronic Tool Studio 2.1 lze sledovat odbroušenou délku na všech bruskách. Ujetá dráha brousicího kotouče při záběru by byl velmi užitečný údaj a pomohl by k zpřesnění, které se týká sledování opotřebovaných kotoučů. Mohlo by být zajímavé vysledovat vztah mezi ujetou dráhou kotouče a jeho opotřebením. Dále by se v této verzi rodného listu zapisovaly hodnoty vypočteného brusného poměru *G*.

V *příloze 5* se nachází kombinace výše uvedených parametrů. Praktické zkoušky a diskuze s operátory strojů by mohly pomoci k výběru vhodné kombinace těchto údajů a realizovatelnosti sběru dat.

Pro upřesnění je v *příloze 6* uveden příklad vyplnění fiktivního rodného listu, z kterého by mělo následovat vyhodnocení zapsaných dat. Vyhodnocení dat z jednoho rodného listu je komplikované. K vyhodnocení a stanovení závěrů je potřeba dlouhé sledování daných parametrů.

Stanovení optimální verze rodného listu brousicího kotouče by mělo být prospěšné pro hospodaření s brousicími kotouči ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Dlouhodobé zapisování a správné vyhodnocení těchto vybraných parametrů by mělo vést k úspoře nákladů a zefektivnění výroby nástrojů.

3.3 Ověření navržené metodiky

Po konzultaci se zadavatelem práce bylo navrženo zavedení pilotního rodného listu pro hojně využívaný kotouč 1V1 30° 100x12x6, který byl vybrán z důvodu pořízení nových technologií ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Tento brousicí kotouč by se měl častěji používat na výrobu řezných drážek než brousicí kotouč 1A1. Použití

brousicího kotouče 1V1 umožňuje provedení kvalitnější výbrusu a jeho kónický tvar zjednodušuje orovnání kotouče. Na pilotním rodném listu si pracovníci společnosti NAVEL, spol. s.r.o. vyzkouší sledování parametrů brousicího kotouče. S dalším uvolněním nového brousicího kotouče 1V1 do výroby bude zaveden i zkušební rodný list. Tento zkušební rodný list bude sloužit pro dokončení protokolu podle potřeb uživatele. Vzhledem k dlouhé životnosti nástroje nebylo možné dokončit jeho rodný list během tvorby této práce.

V rámci rozvoje společnosti NAVEL, spol. s.r.o. by se mohly porovnat brousicí kotouče 1V1 30° 100x12x6 D64 od společnosti Saidtools S.R.L. s hybridním pojivem MX7.0H (Hard) a MX7.0M (Medium) s brousicími kotouči od společnosti TYROLIT CEE k. s. 1V1 30° 100x12x6 D54 s kovovým pojivem MXPP. U těchto vybraných brousicích kotoučů by se hlavně sledoval výkon broušení (množství odebraného materiálu za čas t), dále brusný poměr G a stálost tvaru brusné vrstvy (držení řezné hrany). Vedení společností NAVEL, s.r.o. s navrženým experimentem souhlasí, ale z ekonomických důvodů se rozhodlo provést praktickou zkoušku až s uvolněním nového brousicího kotouče 1V1 30° do výrobního procesu.

4 Závěr

Volba brousicích kotoučů k výrobě tvrdokovových stopkových nástrojů je velice náročná, jelikož tato volba závisí na mnoha parametrech. Je nutné posouzení jednotlivých faktorů a jejich vzájemné působení při tomto procesu broušení. Optimální výběr brousicího kotouče pro určitý brousicí úsek výroby nástroje vyžaduje komplexní řešení daných parametrů broušení.

Broušení tvrdokovových nástrojů umožňují brousicí kotouče s diamantovým brusivem, které se používají v různých tvarech a rozměrech jejich nosné části a jejich brousicích vrstev. Při tomto procesu výroby se uplatňují také různé materiály pojiv, která jsou neméně důležitá pro vytvoření optimální geometrie, tvaru a kvality tvrdokovového nástroje.

Dále byly položeny základy evidence a sledování brousicích kotoučů prostřednictví analýzy současného stavu ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Byla provedena inventura brousicích kotoučů, aby bylo zjištěno, jakým brousicím kotoučů se dále věnovat a do jaké oblasti výroby nástrojů probíhá rozvoj společnosti NAVEL, spol. s.r.o. Na základě získaných údajů bylo rozhodnuto o bližším zkoumání využitelnosti brousicího kotouče 1V1 30° 100x12x6, na kterém by se dále mělo provést ověření navržené metodiky hodnocení.

Byl proveden návrh sledování vybraných parametrů, který by měl pomoci ke stanovení opotřebení a trvanlivosti kotoučů. Posouzení trvanlivosti a opotřebení brousicích kotoučů probíhá ve společnosti NAVEL, spol. s.r.o. pouze na základě subjektivního posouzení jednotlivého operátora. O orovnání kotoučů, případně jejich vyřazení rozhoduje především tvar a stav brousicí vrstvy kotouče a kvalita broušených nástrojů. Toto rozhodnutí závisí pouze na zkušenostech operátorů CNC brusek. S nástupem nových technologií v oblasti evidence a identifikace objektů by se mohla provést automatizace sledování brousicích kotooučů a zavedené řídicí systémy by potlačily lidský faktor při hodnocení opotřebení a trvanlivosti brousicích kotoučů. Optimální vyhodnocení těchto dat by mělo vést k zefektivnění výroby nástrojů a snížení nákladů za brousicí kotouče.

Hlavním navrhovaný parametrem ke sledování opotřebení brousicích kotoučů byl vybrán brusný poměr *G,* který vhodně reflektuje poměr mezi objemem broušeného materiálu a objemem odbroušené vrstvy kotouče za jednotku času. Dále jsou to údaje týkající se orovnání, počtu oživení, počtu a druhu vyrobených nástrojů a ujeté dráhy kotouče v záběru. Dlouhodobé shromažďování a správné vyhodnocení těchto dat o jednotlivých brousicích kotoučích do jejich tzv. rodných listů by mělo zavést řád při sledování trvanlivosti a opotřebení brousicích kotoučů.

Dále by bylo zajímavé zabývat se průběhem praktických zkoušek a následným vyhodnocením nasbíraných dat. Ověření navržené metodiky nebylo možné dokončit vzhledem k dlouhé životnosti brousicích nástrojů. Navazující práce by se dala například obohatit o optimalizaci parametrů broušení.

Seznam použitých zdrojů

[1] MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.

[2] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.

[3] Wood & spark catalogue. *Saidtools* [online]. 2016 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: http://www.saidtools.com/wp-content/uploads/2016/04/catalog%20SaidTools%202016%20WEB.pdf

[4] Brousicí kotouče ze supertvrdých řezných materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. 2001, (7), 40.

[5] KLAPP, Ernst. Cutting Neat Oils for High-Performance Grinding Operations on Hard Metals and Cermets with Diamond Tools. *MKU Chemie* [online]. Rödermark, 2015 [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: http://www.mku-chemie.de/en/mku-chemie-group/lectures/lubricants-for-high-performance-grinding-operations/

[6] BROUSICÍ KOTOUČE Z DIAMANTU A KUBICKÉHO NITRIDU BORU. *Urdiamant, s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://www.urdiamant.cz/wpimages/other/doc2/BK.pdf

[7] HELITRONIC MINI POWER. *Walter Körber Solutions* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: https://www.walter-machines.com/de/produkte/schleifen/helitronic-mini-power.html

[8] HELITRONIC MINI POWER. *Walter* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: https://www.walter-machines.com/de/produkte/schleifen/helitronic-power.html

[9] HELITRONIC POWER. *Walter* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: https://www.walter-machines.com/de/produkte/schleifen/helitronic-vision-400-l.html

[10] Představení společnosti NAVEL, spol. s r.o. *NAVEL, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: http://www.navel.cz/cs/o-nas

[11] ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů*. Praha: Grada, 2000. Profi & hobby. ISBN 80-7169-809-1.

[12] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.

[13] Diamantové nástroje a brusivo. *DIA-Praha s.r.o.* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/dia-praha_katalog_2016_web.pdf

[14] Diamantové a CBN brusné kotouče pro výrobu a ostření nástrojů na kov. *SUPER ABRASIVES* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://superabrasives.cz/?p=72

[15] HOLEŠOVSKÝ, František. *Abrazivní metody dokončování povrchů: Metodická příručka*. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015. ISBN 978-80-86302-68-3.

[16] Jak diamantové nástroje fungují. *GENT: Eurocon GN, s.r.o* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.gent.cz/jak-diamantove-nastroje-funguji/

[17] Diamantové a CBN nástroje. *PK REALIZACE s.r.o.: Pferd* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.pkrealizace.cz/content/files/PFERD-kat_205_cz.pdf

[18] ČSN 22 4015. *Brusivo. Diamantové prášky. Zrnitost a granulometrické složení*. Praha: Československá společnost normalizační, 1981.

[19] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění 3. část*. *VUT v Brně, FSI* - Ústav strojírenské technologie: Odbor technologie obrábění - Studijní opory [online]. 2005 [cit. 2018-06-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

[20] Brousicí nástroje: Údaje na brusných kotoučích. *ELUC: Strojírenství* [online]. [cit. 2018-06-11]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1257

[21] ČSN 22 4010. *Brusivo. Brousicí materiály a pojiva. Klasifikace.* Praha: Československá společnost normalizační, 1984.

[22] MANG, T. a W. DRESEL. *Lubricants and Lubrication*. 2. vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.

[23] KVASNIČKA, Ivo, Lubomír ŠTAJNOCHR a Vladimír SLAVÍK. *Obráběcí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01755-9.

[24] HELITRONIC TOOL STUDIO. *Walter Maschinenbau GmbH* [online]. [cit. 2018-06-25]. Dostupné z: https://www.walter-machines.com/en/products/software/helitronic-tool-studio.html

[25] HORVÁTH, Evžen. Povlakování a životnost nástroje. MM Průmyslové spektrum [online]. 14. 12. 2010 [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-a-zivotnost-nastroje.html

[26] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

[27] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.

[28] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 80-7082-823-4.

[29] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Technologie obrábění: Broušení a dokončovací operace obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-07-15]. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2005%20Brou%C5%A1en%C3%AD%20a%20dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20operace%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf

[30] SLAVÍK, Vladimír a Lubomír ŠTAJNOCHR. *Obráběcí nástroje - návody ke cvičení*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1988.

[31] *Katalog výrobků pro průmyslové aplikace: Broušení nástrojů na CNC bruskách* [online]. Schwaz (Rakousko): Tyrolit CEE, 2018 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: https://www.yumpu.com/en/embed/view/gYokS5pw3yE9Peav

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Zrna brousicího kotouče [1] 8
Obr. 2: Tvar zrna brousicího kotouče [2] 8
Obr. 3: Příklad rovinného broušení [2] 10
Obr. 4: Tvary dosahované při hloubkovém broušení [15] 11
Obr. 5: Bezhroté průběžné broušení [29] 11
Obr. 6: Bezhroté vnitřní broušení [29] 12
Obr. 7: Planetové broušení 12
Obr. 8: Příklady brousicích kotoučů [6] 13
Obr. 9: Diamantové zrno v pojivu brousicího kotouče [3] 14
Obr. 10: Vybraná provedení brousicích kotoučů a značení dle FEPA [6] 15
Obr. 11: Model čtyřbřité frézy z programu Walter Helitronic Tool Studio 2.1 20
Obr. 12: Model čtyřbřité frézy z programu Walter Helitronic Tool Studio 2.1 21
Obr. 13: Základní způsoby opotřebování brousicího kotouče [1] 23
Obr. 14: Nastavení trysek při broušení frézy [14] 24
Obr. 15: Způsob značení brousicích kotoučů od Saidtools S.R.L. [3] 28
Obr. 16: Kinematické schéma CNC brusky Walter Helitronic Vision 400 L [9] 30
Obr. 17: CNC bruska Walter Helitronic Vision 400 L [9] 32
Obr. 18: Přibližný CAD model objemu řezné drážky frézy 36

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Porovnání běžných zrnitostí diamantu a KBN [6] [11] [18] 17
Tab. 2: Řada koncentrací pro brousicí nástroje [6] [17] 18
Tab. 3: Značení brousicích nástrojů podle dané normy [20] 19
Tab. 4: Značení brousicích materiálů a pojiva dle ČSN 22 4010 [21]..... 19
Tab. 5: Nejpoužívanější brousicí kotouče v NAVEL, spol. s.r.o. [3] 29
Tab. 6: Technické údaje CNC brusky Walter Helitronic MINI POWER [7] 31
Tab. 7: Technické údaje CNC brusek Walter Helitronic POWER REGRINDER/DIAMOND [8]..... 31
Tab. 8: Technické údaje CNC brusek Walter Helitronic Vision 400 L [9] 32

Seznam použitých grafů

Graf 1: Vyhodnocení inventury brousicích kotoučů podle jejich tvaru FEPA 26
Graf 2: Množství brousicích kotoučů 1V1 podle jejich vnějšího průměru D 27
Graf 3: Množství brousicích kotoučů 1V1 podle jejich kuželovitosti V 27
Graf 4: Objednávky brousicích kotoučů v 2017 a část 2018 27

Seznam příloh

Příloha 1	Inventura brousicích kotoučů
Příloha 2	Rodný list brousicího kotouče verze 1
Příloha 3	Rodný list brousicího kotouče verze 2
Příloha 4	Rodný list brousicího kotouče verze 3
Příloha 5	Rodný list brousicího kotouče verze 4
Příloha 6	Fiktivně vyplněný rodný list brousicího kotouče verze 1