



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÉHO SORTIMENTU
NÁSTROJŮ S APLIKACÍ VYSOCE PRODUKTIVNÍHO
VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ**

PRODUCTION TECHNOLOGY OF SELECTED RANGE OF TOOLS WITH APPLICATION OF HIGH-PRODUCTIVITY EQUIPMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Zdařil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. David Zdařil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**
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:

Technologie výroby vybraného sortimentu nástrojů s aplikací vysoce produktivního výrobního zařízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zefektivnění výrobního procesu při výrobě rezných nástrojů.

Cíle diplomové práce:

Analýza stavu výroby při použití současného výrobního zařízení.

Posouzení nedostatků a technologie.

Návrh nové technologie na vysoce produktivním strojním zařízení.

Využití automatizované výměny obráběných dílců s použitím robotického zakladače.

Technická zpráva a ekonomické posouzení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. a kol. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Přeložil M. KUDELA. AB Sandvik Coromant. Praha: cientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.

ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. Brno: CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-x.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 2nd edition. New York Oxford University Press, 2005. 651 p. ISBN 0-19-514206-3.

MELUZÍN, T. a V. MELUZÍN. Základy ekonomiky podniku. Vyd. 2., přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 119 s. ISBN 978-80-214-3472-1.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-2-4-2250-2.

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

Cílem této práce je rozbor problematiky zajištění řezných nástrojů pro interní využití ve firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. Jedná se zejména o výrobu a přeastřování stopkových fréz a vrtáků pro specifické aplikace při třískovém obrábění, jejichž přínos spočívá ve zvýšení efektivity a flexibility výroby, což přináší také výrazné snížení nákladů.

Klíčová slova

nástrojová bruska, broušení nástrojů, zefektivnění, výroba, přeastřování, slinutý karbid

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze the issue of providing cutting tools for internal use in the company STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. It is mainly the production and regrinding of end mills and drills for specific machining applications, whose benefit lies in increased efficiency and flexibility of production, which also brings a significant cost reduction.

Key words

tool grinder, tool grinding, streamlining, production, regrinding, sintered carbide

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZDAŘIL, David. *Technologie výroby vybraného sortimentu nástrojů s aplikací vysoce produktivního výrobního zařízení* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125249>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Chladil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie výroby vybraného sortimentu nástrojů s aplikací vysoce produktivního výrobního zařízení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.6.2020

.....
Datum

.....
Bc. David Zdařil

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za rady, připomínky a pomoc při vypracovávání této diplomové práce, dále pak firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o., zejména vedoucímu výroby panu Marku Roskolovi za podporu a projevenou důvěru při výběru stroje a technologickém vývoji v oblasti broušení nástrojů ve výše zmíněné společnosti a v neposlední řadě všem, kteří mě během celého studia podporovali či motivovali k jeho úspěšnému dokončení.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	8
1 ROZBOR STAVU VÝROBY A JEJÍCH POŽADAVKŮ	9
1.1 Rozbor stavu výroby	9
1.1.1 Projekt OneWeb	9
1.1.2 Výroba dílců pro letecký průmysl	10
1.1.3 Elektroerozivní obrábění	10
1.1.4 Kusová výroba a vývoj	10
1.2 Požadavky výrobních procesů na nástroje	10
1.2.1 Nástroje pro obrábění chrom-niklových superslitin Inconel	12
1.2.2 Nástroje pro obrábění dílců projektu OneWeb	12
1.2.3 Nástroje pro kusovou výrobu a vývoj	12
2 VÝROBNÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI	13
2.1 Konstrukce stroje	13
2.2 Funkce stroje	18
2.2.1 Ovládací panel stroje	18
2.2.2 Orovňávání a ožívování brousících kotoučů	19
2.2.3 Adaptive Control	21
2.2.4 Hasící systém stroje	21
3 PŘEHLED BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ A JEJICH SADY	22
3.1 Brousící kotouče	22
3.1.1 Tvary brousících kotoučů	22
3.2 Sestavování sad brousících kotoučů	25
4 TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÝCH NÁSTROJŮ	27
4.1 Technologie výroby nástroje za pomoci průvodce Wizard	27
4.1.1 Technologie výroby válcových fréz ostrohranných a se sraženou hranou	29
4.1.2 Výroba nástrojů s rohovým a plným rádiusem	31
4.1.3 Sériová výroba nástrojů	33
4.2 Broušení nástrojů za pomoci editoru profilů	37
4.2.1 Výroba tvarové kotoučové frézy	38
4.2.2 Výroba nástroje pro zpětné odjehlování	41
4.2.3 Výroba nástrojů s válcovou fazetou	42
5 TECHNICKÉ HODNOCENÍ PROCESU	47
5.1 Volba polotovaru nástroje	47
5.2 Volba geometrie nástroje	48
5.2.1 Stanovení geometrie drážky pro třísky	48
5.2.2 Stanovení geometrie na čele a obvodu	49
5.2.3 Stanovení konfigurace břitů na čele	50
5.3 Volba optimálních brousících kotoučů	51
5.4 Stabilita výrobního procesu v závislosti na opotřebení brousících kotoučů	52
5.5 Stanovení rezných podmínek v závislosti na sériovosti výroby	53
6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	55
ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	63

ÚVOD

Třískové obrábění patří mezi jednu z nejrozšířenějších strojírenských technologií. Jeho podstatou je odebírání materiálu za pomoci vníkání řezného nástroje do materiálu, čímž dochází k oddělení třísky. Tímto způsobem lze získat širokou škálu rovinných, rotačních, či tvarových ploch. Postupným odebíráním materiálu za daných řezných podmínek lze tedy z polotovaru vytvořit finální výrobek, jehož vlastnosti musí vždy korespondovat s požadavky výkresové dokumentace.

Se stále se zvyšujícím důrazem, kladeným jak na vysokou přesnost, tak i na co možná nejnižší cenu je nutné, aby výrobci nejen obráběných součástí zvyšovali efektivitu výrobního procesu, snižovali zmetkovitost a byli schopni flexibilně reagovat na měnící se požadavky trhu.

Jednou z možností, jak docílit vysoké efektivity výroby při třískovém obrábění, je aplikovat v procesu vhodné řezné nástroje, které jej dokáží zrychlit, zefektivnit, či přinést jiné, např. ekonomické výhody.

Firma STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. se zabývá výrobou vysoce přesných součástí leteckých motorů, servopohonů určených k ovládání armatur např. v elektrárnách, vodárnách apod., ale také součástí určených pro satelity, konkrétně jejich sestavu gyroskopů. Jedná se tedy o obrábění rozmanité škály materiálů a tvarů, společná je však vždy přesnost.

Díky tomu je kladen důraz také na zajištění vhodných, často specifických, nástrojů pro dané aplikace, a to v co nejkratším čase.

Společnost již dříve vlastnila CNC nástrojovou brusku ISOG S20+, jejíž kapacita a výkonnost nebyla při zvyšujícím se objemu výroby dostačující. Proto bylo v minulém roce rozhodnuto o nákupu sofistikovanějšího a výkonnějšího obráběcího centra Walter Helitronic Vision 400L s robotickým zakladačem obrobků.

Výhody zařazení tohoto stroje do výroby a samotnou technologii výroby, ale i její úskalí a nevýhody budou popsány a zhodnoceny v této práci.

1 ROZBOR STAVU VÝROBY A JEJÍCH POŽADAVKŮ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, firma STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. se zabývá výrobou poměrně širokého spektra výrobků. Jedná se jak o sériovou, tak i kusovou výrobu, případně vývoj zcela nových komponent či celých sestav jako celku.

1.1 Rozbor stavu výroby

Výrobu firmy STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. lze rozdělit do následujících čtyř podoblastí.

1.1.1 Projekt OneWeb

Jedním z největších kontraktů, které jsou v současnosti ve firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. realizovány, je zakázka sestav gyroskopů pro satelity sítě OneWeb (obr. 1.1), kde se jedná o sériovou výrobu čtyř dílců, z nichž jeden dílec z hliníkové slitiny je frézovanou součástí a jeho výroba je realizována na dvou frézovacích centrech DMU 60 eVo linear. Oba tyto stroje jsou dovybaveny robotickým zakladačem obrobků PH150 disponujícím deseti pozicemi pro automatickou výměnu obráběné součásti, což přináší významné zvýšení vytíženosti stroje i při jednosměnném provozu a stroje tak pracují nepřetržitě.

Výrobní procesy zbylých tří dílců kombinují technologie soustružení a frézování. Soustružení zajišťují dvě soustružnicko-frézovací centra, jejichž výrobcem je firma DMG MORI. Konkrétně se jedná o stroje CTX Beta 800 – devíti-osé soustružnicko-frézovací obráběcí centrum s protivřetenem a frézovací hlavou, sloužící výhradně k produkci rotoru z austenitické korozivzdorné oceli. Druhým strojem je NTX 1000 HSC – tento stroj disponuje jedenácti osami a oproti prvnímu stroji je navíc vybaven dvou-osou spodní revolverovou hlavou. Zde probíhá soustružnicko-frézovací proces zejména dílců z hliníkových slitin.

Frézování následně dokončují dva stroje FANUC ROBODRILL α -D21LiB5, z nichž jeden je pěti-osý s možností automatické výměny obrobků pomocí šesti-osého robotického ramene. Druhý stroj je čtyř-osý bez možnosti automatické výměny obrobků.



Obr. 1.1 Sestava gyroskopu.

1.1.2 Výroba dílců pro letecký průmysl

Další, již zmíněnou oblastí, je výroba součástí leteckých motorů. Zde se jedná o výrobu několika typů bossů, tedy součástí, které se následně procesem svařování připevňují na pláště leteckých motorů, a do nich jsou montovány další komponenty, jako jsou teplotní čidla apod., dále jsou vyráběny např. držáky leteckých motorů. Výroba je realizována pomocí dvou strojů DMU 60 monoBLOCK a dvou strojů ULTRASONIC SAUER S-20, jejichž výrobcem je DMG MORI. Materiálem téměř všech těchto součástí je austenitická chrom-niklová superslitina Inconel 718. Výroba těchto dílců tedy oproti ostatním oblastem velmi výrazně převyšuje nároky na nástroje a jejich spotřebu.

1.1.3 Elektroerozivní obrábění

Olomoucká firma disponuje také stroji pro elektroerozivní obrábění. Konkrétně jedním strojem pro technologii elektroerozivního vrtání otvorů Makino EDBV8 a třemi stroji pro elektroerozivní drátové řezání od stejného výrobce. Tyto stroje slouží jak k výrobě finálních výrobků, kterými jsou např. lopatky leteckých motorů, tak i k předpracování polotovarů pro samotné třískové obrábění. Tento proces je využit např. při výrobě držáku leteckého motoru, kde je nutné z dodaného polotovaru odebrat velké množství materiálu [1, 2].

1.1.4 Kusová výroba a vývoj

Pro výrobu ostatních dílců, zejména pro kusovou výrobu a vývoj, jsou určeny také dvě frézky DMU 80 a DMU 85 taktéž od DMG MORI. Jedná se o pěti-osé stroje, na kterých lze obrábět ve srovnání s ostatními frézky i relativně velké součásti. Jejich velikost určuje dvojciferné číslo v názvu stroje, které je zároveň průměrem otočného stolu stroje v centimetrech podobně jako u soustružnicko-frézovacích center, kde číselná hodnota v názvu stroje určuje vzdálenost protivřeten, zde je tato hodnota v milimetrech.

V současné době jsou tyto stroje využívány jednak pro výrobu difuzoru leteckého motoru, ale také v oblasti vývoje servopohonu, jehož konstrukce i výroba je až na některé velmi specifické operace realizována právě v olomoucké firmě. Zde se jedná prozatím o kusovou výrobu rotačních i nerotačních součástí. Výroba rotačních součástí v oblasti vývoje je realizována na stroji NTX 100 HSC.

Mimo jiné probíhají také vývojářské práce na projektu UAM – Urban Air Mobility. Zde se jedná o projekt zahraničního zákazníka, který vyvíjí inovativní dopravní prostředek, který lze zjednodušeně popsat jako osobní dron. U tohoto projektu se firma zabývá obráběním titanových slitin s aplikací několika speciálních nástrojů [3].

1.2 Požadavky výrobních procesů na nástroje

Třískové obrábění je proces, kdy nástroj, v tomto konkrétním případě ze slinutého karbidu, vniká do materiálu s nižší mezí pevnosti, než je mez pevnosti samotného nástroje. Při řezném procesu nejprve obráběný materiál vyčerpá svou plasticitu a poté se začíná oddělovat samotná tříska.

Místo řezu je tak charakteristické vysokým tlakem a současným vznikem tepla, které je z místa řezu nutné odvádět. Největší podíl vzniklé tepelné energie je odveden v třísce, zbytek přechází do nástroje a obrobku. Zvýšená pracovní teplota řezného procesu vede k výraznému zvýšení rychlosti opotřebení nástroje a tím i snížení jeho trvanlivosti. Z tohoto důvodu má při

procesu obrábění velký vliv také procesní kapalina, která zajišťuje nejen odvod tepla z místa řezu, ale má i mazací účinek. I přesto se však opotřebení nástroje nelze vyhnout [4].

Hlavním parametrem, který určuje rychlost opotřebení řezného nástroje, je trvanlivost břitu nástroje. Ta vyjadřuje dobu nebo dráhu nástroje, kdy je schopen efektivně plnit svou funkci. Tuto hodnotu lze vyjádřit pomocí času jako dobu trvání řezu od prvního kontaktu nástroje s obrobkem do poruchy, což je moment, kdy končí provozuschopný stav nástroje. Dále např. u vrtání či vyhrubování lze trvanlivost nástroje vyjádřit pomocí délky obrobené díry.

Základním vztahem, který popisuje trvanlivost nástroje je Taylorův vztah (1.1) [5].

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} \quad (1.1)$$

Kde:

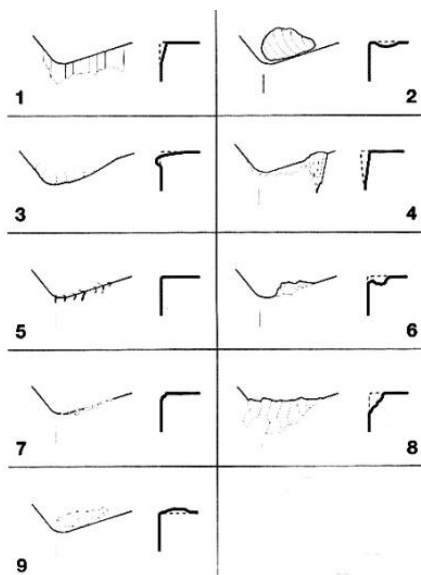
C_T = konstanta [-] – hodnota nabývající hodnot 10^8 až 10^{12} v závislosti na obráběném materiálu)

m = exponent [-] – pro slinuté karbidy nabývá hodnot 5 - 2,5 (v krajních případech až 2)

v_c = řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Trvanlivost nástroje je vztažena vždy k jeho kritickému opotřebení a dané řezné rychlosti. Obecně platí, že trvanlivost nástroje logaritmicky klesá se zvyšující se řeznou rychlostí.

Druhy opotřebení a jejich charakteristiku znázorňuje obr. 1.2.



Obr. 1.2 Druhy opotřebení nástroje a jeho charakteristiky [5].

1) opotřebení hřbetu 2) opotřebení vznikem žlábků na čele 3) plastická deformace břitu 4) vrub na hřbetě břitu 5) hřebenové trhliny na břitu 6) únavový lom 7) vydrolování břitu 8) lom břitu 9) tvorba nárůstků.

Po dosažení kritického opotřebení je nutné daný nástroj vyměnit za nový, vyměnit břitové destičky, pokud to konstrukce nástroje umožňuje, nebo nástroj přestrojit. Poslední

možnost lze výhodně využít právě v případě, že se firma zabývá obráběním materiálů třídy 19 jako jsou např. chromniklové slitiny, kde je trvanlivost nástrojů ve srovnání s aplikacemi pro oceli tříd např. 11, 12 či neželezných kovů výrazně nižší a disponuje vlastním obráběcím centrem pro výrobu a ostření nástrojů.

1.2.1 Nástroje pro obrábění chrom-niklových superslitin Inconel

Díky vlastnostem jako je korozivzdornost, žárupevnost a pevnost jsou inconelové slitiny velmi výhodně používány pro výrobu součástí, které jsou vystavené extrémním podmínkám, jako je vysoký tlak nebo teplota. Takovou součástí může být např. letecký motor. Tato austenitická slitina je však také velmi těžce obrobitelná. Je tedy nutná častá výměna rezných nástrojů.

V konkrétním případě produkce bossů a držáků pro letecké motory, kterých se v Olomouci vyrábí několik druhů, byly nástroje unifikovány, díky čemuž lze při jejich výrazné spotřebě velmi efektivně využít CNC nástrojovou brusku s robotickým zakladačem obrobků, a to jak pro výrobu nových, tak i přestřování opotřebovaných nástrojů. U těchto nástrojů je kladen důraz na možnost opakovaného přestřování, čímž se významně prodlužuje jejich celková životnost a snižují náklady na polotovary pro výrobu nových kusů.

1.2.2 Nástroje pro obrábění dílců projektu OneWeb

V této oblasti se jedná zejména o obrábění hliníkových dílců, proto je zde spotřeba nástrojů výrazně nižší. Z toho důvodu není kladen důraz na možnosti opakovaného přestřování a unifikace nástrojů. Jelikož se jedná o sériovou výrobu, důležitým faktorem je spíše strojní čas. Je tedy žádoucí, aby bylo použito co nejméně nástrojů, které umožní obrobení např. tvarových prvků, zápchů apod. v jedné operaci.

1.2.3 Nástroje pro kusovou výrobu a vývoj

V této oblasti výroby je výhodné použití co největšího množství běžných nástrojů. Jedná se zejména o monolitní stopkové frézy a vrtáky, které lze využít při široké škále operací. Pokud to však obráběcí proces vyžaduje, je nutná výroba speciálního tvarového nástroje.

Takovým případem může být při výrobě součástí pro letecký průmysl kupříkladu závitová korunková fréza pro závity UNJS. Důvodem je geometrická odlišnost závitu zejména v jeho patním rádiu. Nelze tedy použít běžné závitníky či závitové frézy. Výroba takového nástroje vždy zabere poměrně dost času, na rozdíl od sériové produkce, čímž se snižuje produktivnost výrobního zařízení. Proto je množství takových nástrojů používaných při kusové výrobě minimalizováno.

2 VÝROBNÍ ZAŘÍZENÍ A JEHO CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI

Vzhledem k obměně zakázek a zvýšení objemu výroby bylo nutné zvýšit také výrobní kapacitu a rozšířit možnosti obráběcího centra pro výrobu nástrojů. Stávající CNC nástrojová bruska ISOG S20+ byla tedy nahrazena výkonnější a sofistikovanější nástrojovou bruskou Walter Helitronic Vision 400L (obr. 2.1). Tento stroj má oproti předchozímu zcela odlišnou kinematiku, konstrukci i software pro samotnou CAD/CAM technologii.



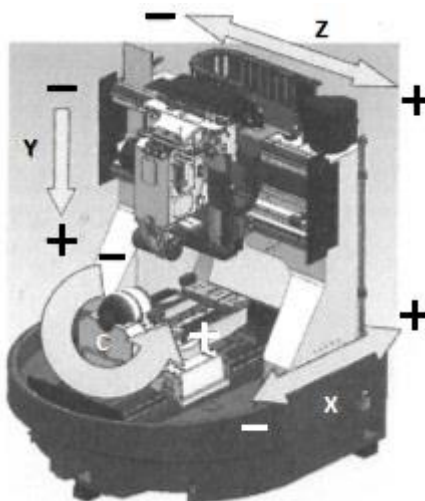
Obr. 2.1 CNC Nástrojová bruska Walter Helitronic Vision 400 L s robotickým zakladačem obrobků.

2.1 Konstrukce stroje

Jedná se pěti-osé obráběcí centrum sloužící výhradně k výrobě nástrojů jako jsou stopkové frézy, vrtáky, ale i stupňovité a profilové nástroje a soustružnické nože, které lze vytvořit z válcových polotovarů.

Konstrukci portálu stroje tvoří odlitek z minerálního materiálu tzv. polymer-betonu. To napomáhá minimalizovat přenos vibrací a zamezuje vzniku nepřesností vzniklých vlivem tepelné roztažnosti portálu během pracovního cyklu.

Pracovní prostor stroje zahrnuje tři lineární navzájem kolmé osy X, Y a Z a dvě rotační osy A a C. Kinematiku stroje a popis jednotlivých os popisuje obrázek 2.2. Všechny osy jsou poháněny lineárními motory, kde maximální rychlost posuvu u lineárních os je $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, maximální rychlost rotační osy C je 60 min^{-1} a v případě osy A jsou maximální otáčky 750 min^{-1} . Délka rozjezdu os, tedy vzdálenost mezi koncovými polohami určuje také maximální velikost obrobku. U tohoto konkrétního stroje výrobce udává rozměry obrobku uvedené v tab. 2.1 [6].



Obr. 2.2 Schéma pracovního prostoru stroje [7].

Tab 2.1 Rozměry obrobku [7]

Minimální průměr	3,0 mm
Maximální průměr (při kompletním obrábění)	315 mm
Maximální délka nástroje (při kompletním obrábění)	255 mm
Maximální délka nástroje (při čelním broušení)	250 mm
Maximální délka nástroje (při obvodovém broušení)	350 mm
Maximální průměr (u profilových nástrojů na dřevo)	320 mm
Maximální hmotnost obrobku	50 kg

Významným parametrem pro samotné broušení je i výkon brousícího vřetene, který naprosto zásadně ovlivňuje rychlosti při jednotlivých operacích, zejména při těch hrubovacích, kdy je důležité odebrání velkého množství materiálu za co nejkratší časový úsek, případně např. u broušení drážek šroubovice u nástrojů s větším průměrem. Firma Walter do tohoto typu stroje montuje dvě varianty vřeten. První varianta má dvě zakončení a brousící kotouče jsou poháněny servomotorem pomocí řemenového převodu. Druhá varianta má jedno zakončení a servomotor je připojen přímo v ose rotace kotouče. Olomoucká firma disponuje strojem s druhou variantou, jehož parametry jsou dlouhodobý výkon 22 kW, výkon ve špičce může dosáhnout až na hodnotu 33 kW. Maximální otáčky jsou omezeny na $10\,500\text{ min}^{-1}$ [6].

Při srovnání s předchozím strojem, kde byl limitujícím parametrem výkon vřetene (7 kW), je u nynějšího stroje limitním parametrem díky dostatečnému výkonu vřetene spíše konstrukce, tvar a pojivo použitých brousících kotoučů aplikovaných při brousících operacích.

Další důležitým prvkem je upínač. Tato komponenta je nabízena dle požadavků zákazníka ve více variantách, které se dále montují do upínacího kužele ISO 50 v rotační hlavě osy A. Zde konkrétně se jedná o mechanický kleštinový upínač HPS 20 μ Grind od výrobce GDS s opakovatelnou přesností upnutí 2 μm . Lze upínat válcové polotovary o průměru 3–20 mm, přičemž záleží na právě instalované kleštině. Tyto kleštiny mají průměr celých sudých čísel počínaje 4 mm až po 20 mm, výjimkou je kleština s průměrem 3 mm (obr. 2.3) [8].

Obr. 2.3 Sada kleštin pro upínač GDS HPS 20 μ Grind.

Výměna brousících kotoučů probíhá automaticky ze zásobníku v pravé části stroje (při pohledu zepředu). Zde se nachází osm pozic pro sady brousících kotoučů o maximálním průměru 254 mm. Samotný zásobník má dva stupně volnosti – v horizontální lineární ose rovnoběžné s osou Z stroje a ve vertikální rotační ose rovnoběžné s osou Y stroje. Ke každé sadě brousících kotoučů připadá také zvlášť „kostka“ pro přívod procesní kapaliny. Důvodem jsou odlišné průměry a tvary sad, lze tudíž pro každou sadu brousících kotoučů optimalizovat přívod procesní kapaliny do místa řezu, snížit tak řezné síly a tím i opotřebení brousících kotoučů, což vede k výraznému zvýšení stability výrobního procesu. Zásobník osazený sadami kotoučů a příslušenstvím pro rozvod procesní kapaliny znázorňuje obr. 2.4.



Obr. 2.4 Zásobník sad brusných kotoučů s jejich příslušenstvím.

Vlevo od hlavního pracovního stroje se nachází robotický zakladač obrobků. Prostor zakladače je oddělen přepážkou, která se otevírá pouze po dobu výměny obrobků, a nedochází

tak ke znečišťování prostoru zakladače. Jedná se o šesti-osé robotické rameno FANUC. Toto zařízení velmi významně usnadňuje práci obsluhy a jeho využití je vhodné pro sériovou výrobu. Díky tomu lze stroj nechat pracovat i v době nepřítomnosti obsluhy, která má i tak možnost sledovat celý proces za pomoci aplikace TeamViewer v PC nebo mobilním telefonu.

Rameno pracuje s dvojitým uchopovacím zařízením. Výměna obrobku je tak poměrně efektivní a rychlá, což zkracuje vedlejší jednotkový čas. Obsluha stroje na robotickém rameni pouze mění uchopovací zařízení dle průměru válcového polotovaru.

Samotné obrobky stroj odebírá a ukládá do palet odpovídajícího průměru. Tyto palety mají jednotný rozměr a kapacita obrobků je tak nepřímě úměrná jejich průměru. Např. paleta pro obrobky o průměru 4 mm má kapacitu 300 ks, ale paleta určená pro polotovary s průměrem 20 mm disponuje kapacitou pouze 42 ks. Zakladač disponuje čtyřmi pozicemi pro palety, kde vždy dvě musí být totožné. Z jedné palety robot odebírá polotovary a do druhé vrací obrobené kusy. Celý proces je hlídán optickým snímačem, který je schopen detekovat přítomnost a správnost upnutí obrobku v robotickém rameni. Robotické rameno s uchopovacím zařízením, palety pro obrobky a optický snímač jsou na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Pracovní prostor robotického zakladače obrobků.

Pro správnou funkčnost celého stroje je nutné ke stroji připojit také filtrační zařízení, a to jak pro filtraci vzduchu, tak i pro filtraci procesní kapaliny. Filtraci vzduchu zajišťuje mechanicko-ionizační zařízení umístěné nad strojem. Jeho úkolem je odsávání vzduchu z pracovního prostoru stroje a odlučování aerosolu. Zařízení v první fázi odlučuje procesní kapalinu mechanicky pomocí drátěných filtrů a dále pak pomocí vysokonapěťových ionizerů,

pracujících s napětím 25 kV. Tím je zajištěno, že vzduch vycházející ze stroje zpět do prostoru výrobní haly není nijak zdravotně závadný pro pracovníky.

Co se týče filtrace procesní kapaliny, zde je filtrace provedena ve dvou krocích. V první fázi pomocí látkového, snadno čistitelného či vyměnitelného filtru a ve fázi druhé pomocí papírových filtrů. Cílem je odloučit částice karbidu vzniklé jako odpad při odebírání materiálu z obroku, ale také další nečistoty vznikající např. při orovnávání brousících kotoučů nebo jejich samotném opotřebovávání při broušení.

Kromě filtrace prochází procesní kapalina také klimatizačním zařízením. To udržuje stálou teplotu procesní kapaliny a přispívá tak ke stabilitě procesu zejména z hlediska rozměrové stálosti a minimalizuje tak odchylky vznikající vlivem tepelné roztažnosti materiálů. Zařízení pro filtraci a klimatizaci jsou umístěny za strojem viz obr. 2.6.



Obr. 2.6 Zařízení pro filtraci vzduchu (nahore), procesní kapaliny (vlevo) a její klimatizaci (vpravo).

Ovládací panel stroje je umístěn na otočné konzoli před strojem a lze jej vždy ergonomicky polohovat do pozice vhodné pro daný pracovní úkon. Jeho funkce podrobněji rozebrány v kapitole 2.2.

2.2 Funkce stroje

Obráběcí centrum Walter Helitronic Vision 400L je vybaveno mnoha prvky, jejichž funkce výrazně usnadňují práci obsluhy stroje. Podrobný popis všech funkcí by byl velmi rozsáhlý, a proto následující podkapitoly popisují ty nejstěžejnější a nejzajímavější.

2.2.1 Ovládací panel stroje

Ovládací panel (obr 2.7) je pro obsluhu nejdůležitější prvek stroje, proto je velmi důležitá jeho přehlednost, ergonomičnost, ale i odolnost a funkčnost.



Obr. 2.7 Ovládací panel stroje.

Panel se skládá z obrazovky v jeho horní části. Ta je dotyková a je tak možné v mnoha případech pracovat bez využití myši. Spodní část zahrnuje čtyři bloky kláves, klíčový přepínač režimů (vpravo nahoře), nouzový hříbový vypínač (vlevo), tlačítka pro vypnutí a zapnutí stroje (vlevo dole) a dva potenciometry pro plynulou regulaci posuvů stroje a otáček vřetene (vpravo dole).

Horní největší blok kláves je CNC klávesnice FANUC, kterou lze přirovnat ke klasické QWERTY klávesnici na PC. Blok zahrnuje také numerickou klávesnici. Nejčastější využití nachází při tvorbě NC programu při zadávání číselných hodnot, názvu programu apod.

Blok dvaceti kláves v levé dolní části slouží k ovládání provozních režimů. Zde lze přepínat stroj do automatického režimu (AUTO), spouštět a zastavovat programy (NC START/NC STOP), najíždět strojem na jeho referenční hodnoty (REF ALL), obsluhovat zámky dveří zakladače obrobků (LOADER) a zásobníku brousících kotoučů (WHEEL CHANGER se symbolem „mřížky“). Lze také mazat případné chyby (CLEAR), použít jednotlivé bloky programu (SINGLE BLOCK), případně program automaticky zastavit v momentě, kdy brousící kotouč není v kontaktu s obrobkem a nehrozí tak jeho poškození (OPT STOP).

K ovládání funkcí stroje slouží blok kláves uprostřed spodní části. Zde je možné přepnout stroj do manuálního režimu, ovládat dveře pracovního prostoru stroje, přívod procesní kapaliny, upínání kotouče ve vřetení i samotného obrobku. Případně prvky jako jsou koník a luneta, pokud jsou tyto komponenty na stroji namontovány. Dále lze určovat inkrementální pojíždění jednotlivými osami v ručním režimu, manuálně roztáčet vřeteno, ale také aktivovat automatické vypnutí pohonů po dokončení automatického režimu např. při práci s robotickým zakladačem obrobků.

Blok v pravé spodní části slouží k ovládání jednotlivých os. V manuální režimu volíme danou osu a za pomoci tlačítek + a – pojíždíme s jednotlivými osami. Tlačítkem se symbolem vlnovky (mezi tlačítky + a –) aktivujeme rychloposuv. Zajímavým prvkem je zde tlačítko POS, jehož stiskem lze aktivovat měřicí režim. V tomto režimu lze manuálně najíždět strojem na měřicí sondu Renishaw LP-2 umístěnou na hlavě vřetene stroje. Při kontaktu stroj automaticky zastaví a lze tak odečíst aktuální hodnoty jednotlivých os.

2.2.2 Orovňávání a oživování brousících kotoučů

I přes volbu správných řezných podmínek zvolených s ohledem na životnost a tvarovou stabilitu brousících kotoučů vždy dochází k jejich opotřebení. To se projevuje změnou profilu kotouče, nejčastěji vznikem rádiusu na jeho hranách, dále pak změnou průměru kotouče nebo změnou jeho délky v ose Z. Tento stav opotřebení kotoučů je nutné pečlivě sledovat a udržovat kotouče správně zaměřené a v případě přílišného opotřebení je orovnat, tzn. odebrat z nich správným způsobem co nejmenší (většinou 0,2–0,5 mm), avšak dostatečné množství materiálu z brousící vrstvy tak, aby vznikly nové plochy, které minimalizují jeho geometrické odchylky od ideálního tvaru. Kotouče je pak nutno znovu zaměřit a zkalibrovat. Tím jsou minimalizovány rozdíly mezi softwarovým modelem nástroje a fyzicky vyrobeným kusem.

Pro orovňávání kotoučů není nutné použití zvláštního stroje, ani demontáž sestavených sad brousících kotoučů. Je možné je orovňovat přímo ve stroji, a to dvěma způsoby. Prvním je orovňání na diamantové kladce (obr 2.8). Toto zařízení je umístěno na hlavě osy A a je poháněno zvláštním motorem. Výhodou tohoto zařízení je rozměrová stálost orovňovací kladky bez nutnosti jakéhokoli adaptéru či jiného prvku. Nevýhodou je časová náročnost a malý úběr materiálu 5–10 μm na jeden průchod. Toto zařízení lze tedy využít pouze k jemnému doladění geometrie brousících kotoučů např. v průběhu automatického režimu vždy po stanoveném počtu vyrobených kusů, nikoli však k efektivnímu opracování kotouče s výraznou mírou opotřebení.

Druhý způsob orovňávání kotoučů ve stroji probíhá za pomoci namontování adaptéru s orovňovacím kotoučem do osy A (obr 2.8). V tomto případě je výhodou možnost úběru

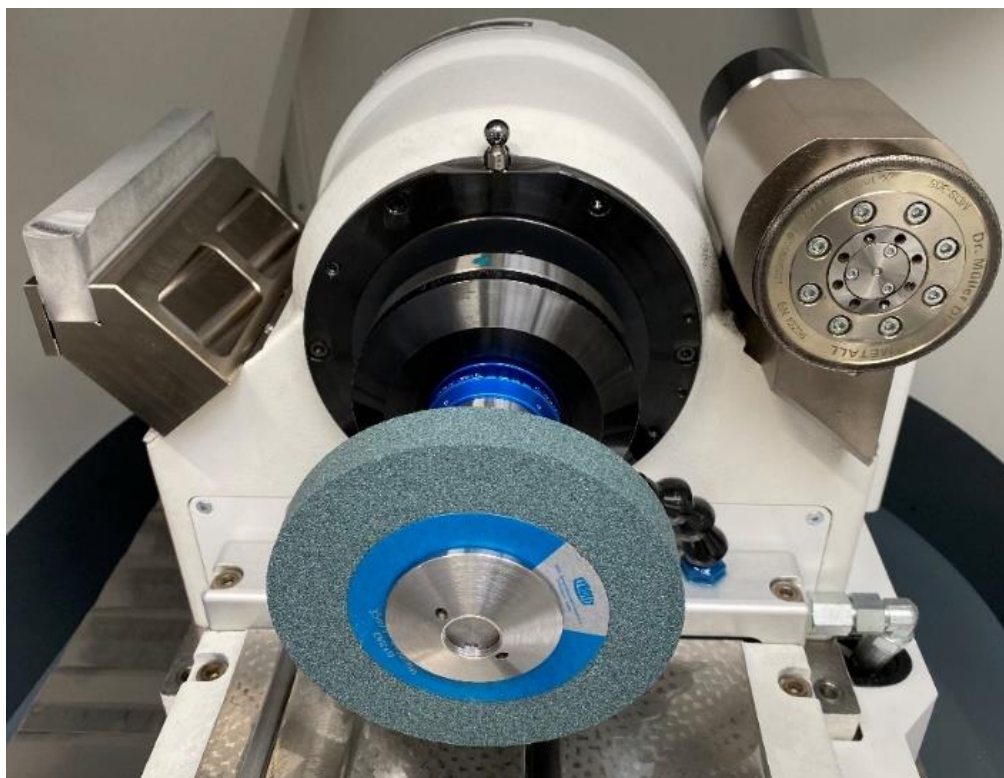
většího množství materiálu z kotouče. Nevýhodou je, že s úběrem z brousícího kotouče odebíráme materiál také z kotouče orovnávacího, tím se zanáší procesní kapalina a její filtrace, mimo to je také nutné hlídat míru opotřebení orovnávacího kotouče a jeho aktuální průměr přenášet do parametru NC programu. V neposlední řadě je nutná montáž adaptéru, což zamezuje použití tohoto způsobu orovnávaní během automatického režimu.

Pro oba způsoby technologie orovnávaní kotoučů platí, že relativní pohyb orovnávacích segmentů vůči orovnávanému kotouči musí být sousledný, přičemž obvodová rychlost orovnávacího segmentu je v poměru obvodové rychlosti orovnávaného kotouče třetinová.

Dalším způsobem, kterým se provádí údržba brousících kotoučů, je jejich ožívání. V některých aplikacích, zejména při hrubování, kdy dochází k odebrání většího objemu materiálu v krátkém časovém úseku, se brusná zrna kotouče zanáší. Tento jev vede k významnému zvyšování řezné síly. Což může vést ke zhoršení kvality obrobeného povrchu, nadměrnému opotřebení kotouče, prodloužení času operace při zapnuté funkci „Adaptive Control“ (kap 2.2.3), v krajním případě až k poškození kotouče u větších obrobků nebo poškození obrobku malých rozměrů.

Stav kotouče lze pozorovat buď na zatížení vřetene, kdy k oživení může napovídat zvyšující se zatížení vřetene sledované na panelu stroje při totožné operaci, nebo vizuálně, kdy činná část kotouče má výrazně tmavší povrch než zbytek brusné vrstvy.

Oživení kotouče lze provádět manuálně v ručním režimu. Tato varianta se využívá při kusové výrobě, protože není časově náročná a není potřeba vytvářet žádný NC program. Při sériové výrobě lze vyzkoušet interval nutnosti oživení vybraných kotoučů a zahrnout oživení automaticky po daném počtu kusů obdobně jako v případě orovnávaní. K oživení slouží oživovací kámen namontovaný na konzoli na hlavě osy A, na opačné straně, než je orovnávací kladka (obr. 2.8).



Obr. 2.8 Zařízení pro orovnávaní a ožívání brousících kotoučů – diamantová kladka (vpravo), orovnávací kotouč osy A (uprostřed) a oživovací kámen (vlevo).

2.2.3 Adaptive Control

V případě operací, kde je obtížné dopředu určit zatížení vřetene, tedy i brousícího kotouče, je možné využít funkci Adaptive Control. Tato funkce je charakterizována svázáním zatížení vřetene a posuvů os. Tento prvek lze efektivně využívat při hrubovacích operacích, ale i při broušení drážek fréz a vrtáků. V softwaru pro tvorbu programu Tool Studio aktivujeme funkci Adaptive Control a do parametru maximální zatížení vřetene zadáme hodnotu v Nm. Stroj pak automaticky upravuje rychlosti posuvu tak, aby zatížení nepřekročilo zadanou mez, a udržuje rychlost posuvu na horní hranici přípustného zatížení. V případě, že zatížení nedosáhne zadané horní meze zatížení, posuv je řízen dle standardně zadané hodnoty. Taktéž lze zadat minimální hodnotu posuvu. Při nízkém posuvu a velkém úběru materiálu totiž dochází k zanášení brusných zrn kotoučů a je nutné jejich oživení.

Tato funkce tak pomáhá obsluze velmi efektivně a jednoduše optimalizovat rychlost posuvu s ohledem na životnost brousícího kotouče, strojní čas operace a zatížení vřetene. Příkladem pro využití této funkce je hrubovací operace profilu kónické frézy z válcového polotovaru, kdy v oblasti u čela nástroje je hloubka záběru větší, odebírá se více materiálu a zatížení je výrazně vyšší než v oblasti konce drážky pro třísky, kde se průměr činné části frézy blíží k průměru polotovaru.

2.2.4 Hasící systém stroje

Při výrobním procesu může být za určitých podmínek vyvolán požár uvnitř stroje. To může být způsobeno nedostatečným chlazením a následným vznikem jiskry. Toto nebezpečí hrozí zejména při obrábění rychlořezných ocelí.

Jedním z bezpečnostních prvků stroje je hasící systém. Ten dodává pro tyto stroje česká firma Peka. Tento systém neustále monitoruje pracovní prostor stroje, a to pomocí dvou čidel. První snímá složení vzduchu a v případě detekce látek vzniklých hořením vypustí za pomoci elektromagnetického ventilu hasící plyn. Druhým způsobem je optická detekce, která spouští hasící systém na základě světla, jehož chromatičnost odpovídá ohni. Zajímavostí je, že tato čidla mohou vyhodnotit i blesk z fotoaparátu jako plamen a spustit tak systém zbytečně. Je tedy zakázáno fotit pracovní prostor stroje za použití blesku.

3 PŘEHLED BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ A JEJICH SADY

3.1 Brousící kotouče

Základním a zásadním prvkem pro technologii výroby broušením jsou brousící kotouče. Ty nabízí široká škála výrobců, avšak firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. je dodává firma Tyrolit. Brousící kotouče pro broušení slinutých karbidů jsou diamantové, ve většině případů s duralovým jádrem, případně s jádrem bronzovým. Velmi důležitým faktorem, ovlivňujícím životnost kotoučů, rozměrovou stálost a řezný výkon, je použité pojivo. To může být pryskyřičné, kovové nebo hybridní. Vlastnosti brousících kotoučů dále ovlivňuje velikost zrna. Obecně platí, že při použití kotouče s většími zrny lze realizovat větší úběry materiálu, a to i těch s nižší tvrdostí, avšak na úkor kvality obrobeného povrchu. Naopak za použití jemnozrnných kotoučů roste kvalita obrobeného povrchu, snižuje se rychlost broušení a obráběné materiály musí mít větší tvrdost, jinak dochází k velmi rychlému zanášení brusné vrstvy a růstu řezné síly.

Zrnitost kotoučů pro obrábění slinutých karbidů při běžných operacích se pohybuje mezi 46 až 64 μm , přičemž tato hodnota odpovídá střední velikosti zrna. Pro mikroobrábění, tedy výrobu nástrojů o průměru menším než cca 2 mm, lze s výhodou aplikovat kotouče o zrnitosti 15 až 20 μm . To přináší lepší kvalitu obrobené plochy [9].

3.1.1 Tvary brousících kotoučů

Brousící kotouče lze zakoupit v mnoha variantách, v ohledu na jejich tvar se liší svým průměrem, konstrukcí a tvarem. Základní tvary a příklady použití jsou rozebrány níže. Ostatní tvary kotoučů lze vytvořit za pomoci CNC orovnávače kotoučů. Tím lze vytvořit prakticky libovolný tvar. Tato metoda se typicky využívá při broušení drážek vrtáků. Lze tak optimalizovat profil drážky pro co nejefektivnější odvod třísky z řezu v závislosti na obráběném materiálu.

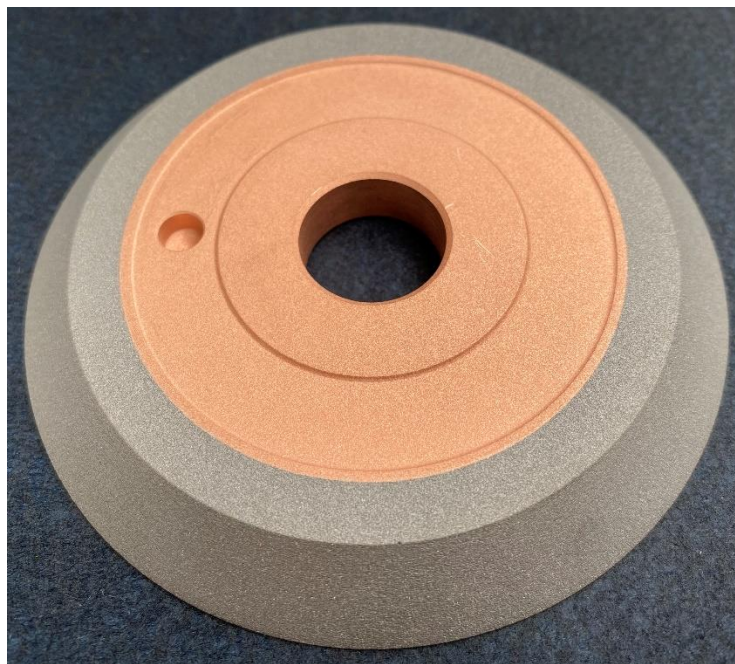
Kotouče 1A1 a 14A1 jsou popsány na obr. 3.1. Rozdíl mezi těmito typy tvoří jádro kotouče. Zatímco kotouč 1A1 má tloušťku jádra i brusné vrstvy totožnou, pro typ 14A1 je typické zesílené jádro. Kotouče 1A1 mají běžně šířku 4–15 mm. Pro 14A1 je charakteristická malá tloušťka brusné vrstvy (4–6 mm) a zesílené jádro. Běžné průměry pro tyto kotouče jsou 75–150 mm.



Obr. 3.1 Brusné kotouče 1A1 (vlevo) a 14A1 (vpravo).

Tyto typy kotoučů mají pro svou univerzálnost širokou škálu využití. Lze jimi tedy provádět operace jako je hrubování profilu fréz, drážky pro třísky, hřbety zubů, osazení krčků fréz apod.

Kotouče 1V1 (obr. 3.2) jsou obdobou typů 1A1, avšak je zde charakteristické zkosení brusné vrstvy pod úhlem 15–45°. Využití nachází zejména při broušení šroubovic jemnozubých fréz, kde právě zkosení brusné vrstvy umožňuje vytvořit drážku malé šířky s dostatečnou hloubkou. Nevýhodou je nízká stabilita ostré hrany kotouče, proto je tento typ kotouče nutno často orovnávat.



Obr. 3.2 Brousící kotouč 1V1.

Kotouče 11V9 a 12V9 (obr. 3.3) se řadí mezi kotouče miskového tvaru. Rozdílem mezi těmito kotouči je úhel, který svírá úhel brusné části s osou kotouče. U typu 11V9 je to 20°, pro typ 12V9 je tento úhel 45°. Průměry kotoučů 11V9 se pohybují mezi 75 a 125 mm, pro typ 12V9 jsou běžné průměry 100–150 mm.



Obr. 3.3 Brousící kotouče 11V9 (vlevo) a 12V9 (vpravo).

Míra využití těchto typů kotoučů je poměrně značná. Typem 11V9 lze brousit obvodové i čelní fasety, ale i tvarové prvky některých nástrojů. Pro typ 12V9 je naprosto typická operace broušení čelních prostorů pro třísky, ale lze jimi také ostřit drážky pro třísky a vyhotovovat vybroušení vrtáků.

Nejvýhodnější aplikaci pro frézy s rohovým nebo plným rádiusem poskytuje kotouč tvaru 12V5. Díky jeho tvaru (obr.3.4) je možné v jedné operaci brousit fazety jak čelní, tak i fazety radiusu a obvodu. Tím se snižuje jednotkový čas na výrobu a snižují geometrické odchylky jinak způsobené rozdělením do třech zvláštních operací. Výhodou tohoto kotouče je také způsob odebírání materiálu. Ostří kotouče totiž přichází do řezu jako poslední a odebírá tak minimum materiálu, díky tomu lze kotouč s výhodou využít i pro větší výrobní série bez nutnosti údržby.



Obr. 3.4 Brousící kotouč 12V5.

Výše popsányi kotouči lze pokrýt velmi širokou škálu vyráběných nástrojů, avšak některé operace vyžadují z určitých důvodů aplikaci kotoučů specifického tvaru. Důvodem může být specifická geometrie vyráběného nástroje či časová úspora při sériové výrobě. Takovým příkladem může být např. tvar kotouče 1M1 (obr 3.5). Kotouč je modifikací tvaru 1A1, kdy je na něm vytvořeno zkosení. Využití pak nachází při profilování průřezů fréz vyráběných z polotovaru většího průměru, kde vyhotovení samotného profilu frézy je spojeno z operací broušení krčku. To přináší velmi výraznou úsporu času.

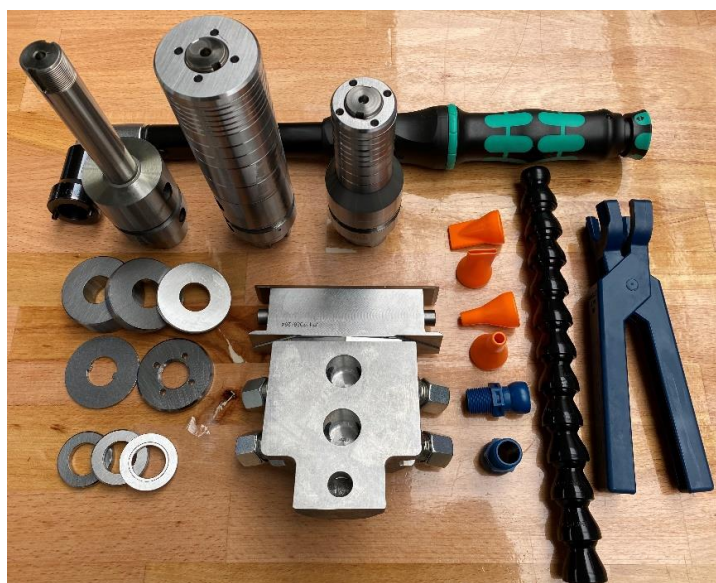


Obr 3.5 Brousící kotouč 1M1.

Obecně platí, že aplikace nestandardních kotoučů je vhodná pouze pro velkosériovou výrobu. Jednak z důvodu ceny kotouče a jednak z důvodu logistické náročnosti pořízení takového kotouče. Výrobci kotoučů je sice nabízí, avšak doba dodání je velmi výrazně delší než u kotoučů standardních, kde se doba dodání pohybuje mezi dvěma až čtyřmi týdny.

3.2 Sestavování sad brousících kotoučů

Brousící kotouče se upínají na trny s daným adapterem. V tomto případě se jedná o upínací systém HSK-50 s trnem o průměru 20 mm. Na tento trn se za pomoci distančních podložek nasazují brousící kotouče do vhodné polohy tak, aby sestavená sada odpovídala požadavkům zvolené technologie. V závislosti na průměru brousících kotoučů volíme mezi podložkami o průměrech 35 nebo 50 mm. Pokud je to možné, je výhodnější volit větší průměr, což vede k větší tuhosti sestavy, menší náchylnosti k vibracím, a tím i lepší kvalitě obrobeného povrchu. Ze stejného důvodu je výhodné vždy volit co nejkratší upínací trn. Po sestavení takové sady je nutné vložit na trn bezpečnostní podložku proti povolení matice, kterou utahujeme momentem 40 Nm. Komponenty pro sestavování sad znázorňuje obr 3.6.



Obr. 3.6 Komponenty a příslušenství pro sestavování sad brousících kotoučů.

Obecně lze říci, že nejlepší využití poskytují sady složené s důrazem na jejich univerzálnost. V případě sériové výroby lze složit sadu jednoúčelovou, díky které lze eliminovat počet výměn sad brousících kotoučů a urychlit tak výrobní proces. Je však důležité vyhodnotit správně přínos takto vytvořené sady v závislosti na její ceně. Takovou sadu lze sestavit např. pro ostření rádiusových fréz. Zde byla aplikována sada se dvěma kotouči 1A1 a 12V5 (obr 3.7).



Obr. 3.7 Jednoúčelová sada pro ostření rádiusových fréz včetně rozvodu procesní kapaliny.

Sestava kotoučů ve většině případů obsahuje jeden až tři brousící kotouče. Lze tak provést několik operací toutéž sadou. Výhodné je např. spojení kotoučů 11V9 a 12V9 (obr. 3.8). Tuto sadu je pak možné použít na kompletní operace ostření, a to jak stopkových fréz bez rohového rádiusu, tak i vrtáků. Avšak při namontování více kotoučů nastává komplikace s přívodem procesní kapaliny, protože chladicí kostka, která k dané sadě přísluší, disponuje vždy pouze dvěma oddělenými kanály pro distribuci této kapaliny k místu řezu.

Naopak kotouče tvarů 1A1, 14A1, 1V1 a 1M1 je výhodné montovat na trn samostatně a zachovat tak univerzálnost jejich využití (obr 3.8).



Obr 3.8 Přehled ostatních sad brousících kotoučů.

4 TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÝCH NÁSTROJŮ

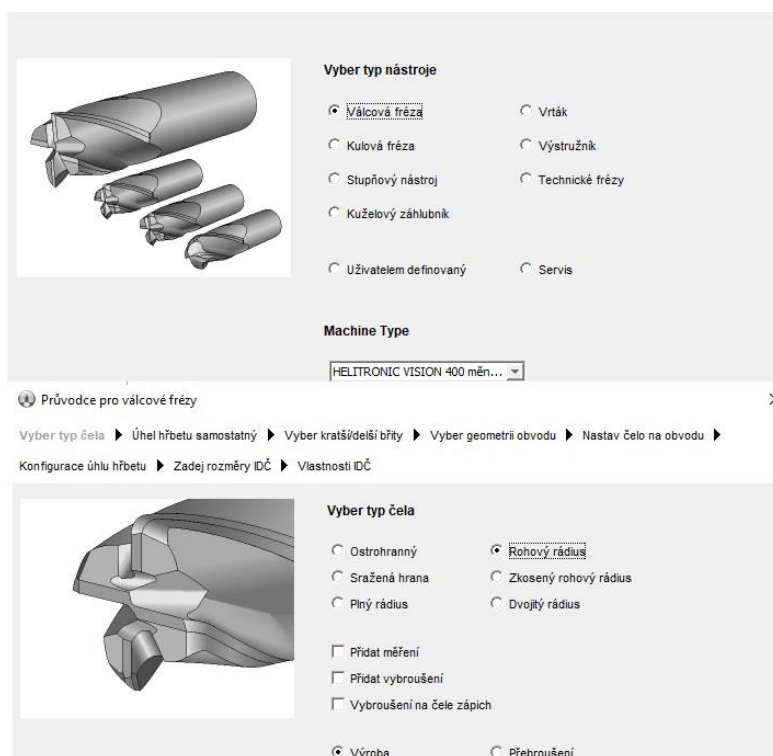
V této kapitole budou přiblíženy jednotlivé technologické postupy při výrobě nástrojů s ohledem na sériovost výroby, její přesnost, požadovanou stabilitu procesu a časovou náročnost. Charakteristické prvky použité technologie výroby, jejich výhody a případné nevýhody pro jednotlivé nástroje, budou rozebrány u konkrétních nástrojů v podkapitolách.

Výrobě každého nástroje předchází tvorba jeho modelu, tedy jeho parametrů od délky a průměru až po stanovení jednotlivých nástrojových úhlů v závislosti na aplikaci daného nástroje a následné přiřazení technologie výroby, což zjednodušeně zahrnuje stanovení pořadí operací, přiřazení vhodných brousících kotoučů, dále pak zadání vhodných řezných podmínek a kontrolu případných kolizí.

Hlavním prvkem vstupujícím do tohoto procesu je software stroje - Helitronic Tool Studio. Jedná se o CAD/CAM software, umožňující zpracovat veškeré požadavky od konstrukce až po výrobu nástroje. Jeho hlavní výhodou oproti softwaru předchozí nástrojové brusky ISOG je jeho interaktivita a poskytování výborné zpětné vazby pro obsluhu stroje. Přímou na panelu stroje zobrazuje model totožný s následně fyzicky vyrobeným kusem. To přináší obrovskou výhodu při efektivitě práce zejména v oblasti kusové výroby. Předpokladem pro minimalizaci odchylek mezi modelem nástroje a vyrobeným kusem je správné zaměření brousících kotoučů.

4.1 Technologie výroby nástroje za pomoci průvodce Wizard

K tvorbě jednoduchých nástrojů bez tvarových a jiných složitějších prvků se používá Wizard. Jedná se o prvek zakomponovaný do Tool Studia, kde lze v devíti krocích vytvořit model požadovaného nástroje (obr 4.1). Úkolem obsluhy pak je pouze změnit parametry nástroje, jako jsou úhel čela drážky, hloubka drážky, úhel hřbetu, šířka hřbetu apod.



Obr. 4.1 Průvodce tvorbou nástroje Wizard.

Po vyplnění všech údajů ve Wizardu software automaticky vytvoří model nástroje. Ten lze pak dále upravovat, přidávat operace (např. osazení krčku frézy), měnit jejich pořadí apod. Nástrojové úhly lze tak přizpůsobit konkrétní aplikaci daného nástroje. Důležitou částí je pak přiřazení brousících kotoučů a řezných podmínek (obr. 4.2) ke každé operaci. Vhodné brousící kotouče software přiřazuje automaticky z databáze sad kotoučů, přičemž obsluha stroje tyto kotouče může ke každé operaci předem přiřadit. Pokud jsou přednastavené sady brousících kotoučů správně zvoleny, je úkolem obsluhy pouze kontrola softwarem zvolených kotoučových sad. Co se týče řezných podmínek, ty stroj přiřazuje z databáze, kde lze taktéž přenastavit defaultní hodnoty. Řezná rychlost je zde udávána v jednotkách $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a posuvová rychlost v jednotkách $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Úpravy pak spočívají např. ve změně posuvové rychlosti při broušení šroubovice frézy. Obecně platí nepřímá úměra mezi množstvím odebíraného materiálu a rychlostí posuvu.

Spus...	St...	M	K		Operace	vp	Rychlost posuvu	Nájezd, %	Směr rotace
☒	☒	☒			Měření konce nástroje		2500.0	100.0 %	
☐	☐	☐			Měření radiálního úhlu		1000.0	100.0 %	
☒	☒	☒			Čelo na obvodu	16.0	50.0	100.0 %	↻
☒	☒	☒			Roh. radius-přímé čelo na čele	22.0	80.0	50.0 %	↻
☒	☒	☒			Roh. radius-čelo na čele	22.0	120.0	100.0 %	↻
☒	☒	☒			Roh. radius-profil předhrubován	25.0	120.0	100.0 %	↻
☒	☒	☒			Rádus hřbetu	25.0	180.0	10.0 %	↻
☒	☒	☒			2. úhel vybr. rád. špičky 1 záběr	25.0	120.0	5.0 %	↻
☒	☒	☒			1. úhel podbroušení poloměru špičky jedním záběrem	25.0	110.0	10.0 %	↻

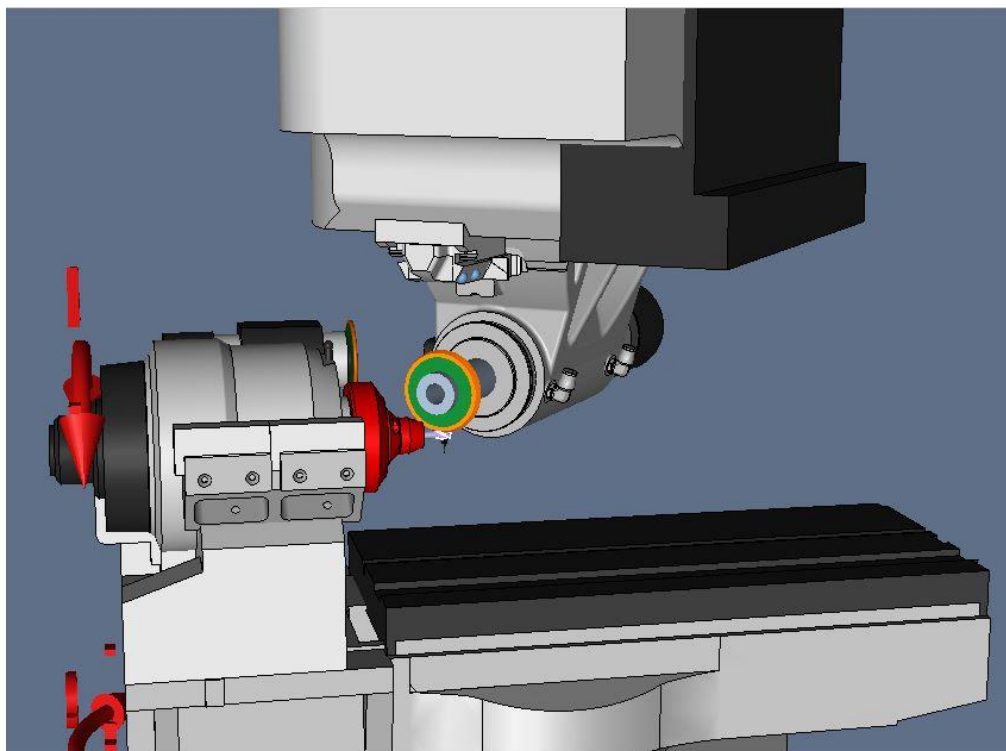
Spus...	St...	M	K		Operace	Set	Kotouč	Sada kotoučů
☒	☒	☒			Měření konce nástroje			
☐	☐	☐			Měření radiálního úhlu			
☒	☒	☒			Čelo na obvodu	→	1 (1V1)	2 S2_1V1_100_15
☒	☒	☒			Roh. radius-přímé čelo na čele	→	2 (12V9)	1 S1_11V9_12V9
☒	☒	☒			Roh. radius-čelo na čele	→	2 (12V9)	1 S1_11V9_12V9
☒	☒	☒			Roh. radius-profil předhrubován	→	2 (1A1)	4 S4_11V5_DIA100_1A1_DIA100
☒	☒	☒			Rádus hřbetu	→	2 (1A1)	4 S4_11V5_DIA100_1A1_DIA100
☒	☒	☒			2. úhel vybr. rád. špičky 1 záběr	→	1 (12V5)	4 S4_11V5_DIA100_1A1_DIA100
☒	☒	☒			1. úhel podbroušení poloměru špičky jedním záběrem	→	1 (12V5)	4 S4_11V5_DIA100_1A1_DIA100

Obr. 4.2 Stanovení řezných podmínek (nahore) a přiřazení brousících kotoučů (dole).

V dalším kroku je nutné zvolit strategii přívodu procesní kapaliny do místa řezu. Zde jsou na výběr tři samostatně ovládané ventily. Dva ventily na brousící hlavě dodávají procesní kapalinu za pomoci chladicí kostky a segmentové trubky do místa řezu v závislosti na konkrétním brousícím kotouči, třetí ventil přivádí procesní kapalinu stolem osy A a jeho aktivace je vhodná např. při broušení na kulato.

Posledním krokem před spuštěním samotné výroby je kontrola kolizí. Tomu předchází kontrola zvoleného upínacího systému, který zásadně ovlivňuje následný výpočet kolizí stroje. Kontrola probíhá za pomoci dvou tlačítek. První kontroluje kolize při samotných operacích, druhé přidává také výpočet při případných kolizích při přejezdech stroje mezi jednotlivými operacemi rychloposuvem, nájezdy stroje k obrobku a výjezdy od něj.

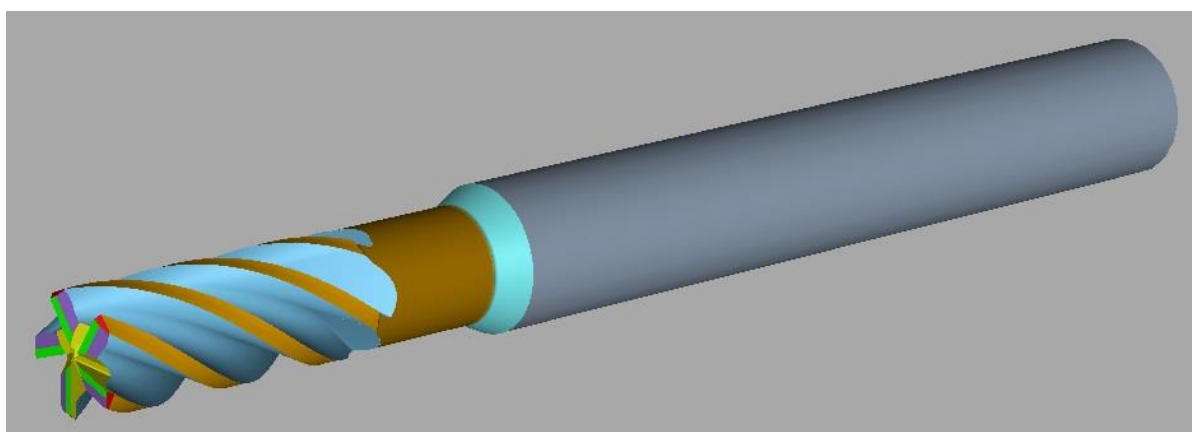
V případě bezkolizního stavu je možné spustit program za pomoci programu Tool Studio Server, ten umožňuje převedení CAD/CAM modelu do NC kódu, který následně řídí pohyby stroje. V případě kolize software označí problémovou operaci a popíše kolizi. Tu lze zobrazit v simulaci stroje (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Simulovaná kolize kotouče s upínačem vlivem krátkého vyložení polotovaru z upínače.

4.1.1 Technologie výroby válcových fréz ostrohranných a se sraženou hranou

U těchto typů fréz lze využít Wizard Tool Studia, který téměř celý nástroj vytvoří automaticky. Po úpravě parametrů v závislosti na aplikaci nástroje lze takový nástroj vytvořit pomocí třech až čtyřech brousících kotoučů. V případě, že nástroj má výrazně menší průměr než polotovar, ze kterého je vyráběn, je nutné jako první zařadit hrubovací operace profilu frézy. Tento případ lze sledovat na příkladu pěti-břité válcové frézy pro korozivzdorné materiály, jejíž model zobrazuje obr. 4.4 a parametry lze najít na obr. 4.5.



Obr. 4.4 Model pěti-břité frézy pro korozivzdorné materiály.

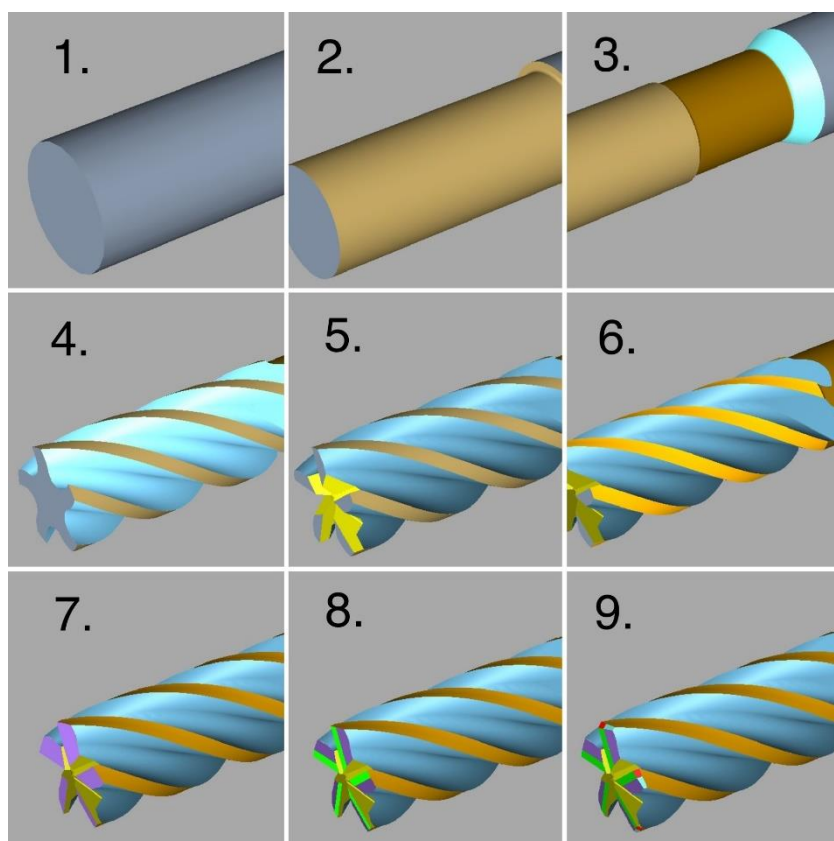
Průměr polotovaru	6.0	mm
Délka polotovaru	58.0	mm
Průměr nástroje	5.0	mm
Průměr jádra	2.6	mm
Hloubka drážky	1.3	mm
Šířka zábřitu čela na obvodu	0.8	mm
Úhel čela na obvodu	12.0	°
1. úhel hřbetu na obvodu, Úhel hřbetu	10.0	°
1. úhel hřbetu na obvodu, Šířka fazety	0.7	mm
Vybroušení na čele ostré hrany, Úhel čela	4.0	°
1. úhel hřbetu čela, Úhel hřbetu	8.0	°
2. úhel hřbetu čelo, Úhel hřbetu	16.0	°
1. úhel hřbetu čela, Šířka fazety	0.35	mm
Axiální úhel	1.0	°
Šířka sražené hrany	0.2	mm
Úhel sražení	45.0	°
Průměr krčku	4.75	mm
Délka krčku	5.9	mm

Obr. 4.5 Parametry pěti-břité frézy pro korozivzdorné materiály.

Obrázek 4.6 znázorňuje postup výroby nástroje po jednotlivých operacích z válcového polotovaru (1). V operacích 2 a 3 je broušení realizováno pomocí kotouče tvaru 1A1 o průměru 100 mm a šířce 10 mm. Broušení drážky pro třísky (operace 4) se realizuje kotoučem 1V1 o stejném průměru a šířce. Úhel brusné části kotouče je pak 20°.

Zbylé operace pak lze brousit jedinou sadou kotoučů 11V9/12V9, přičemž kotouč 12V9 z této sady se uplatňuje pouze v operaci 5, kde je vybroušen čelní prostor pro třísky. Zbylé operace lze vyhotovit tvarem kotouče 11V9, brousícím bodem je poloměr kotouče mezi jeho čelem a zkosenou hranou. Výhodou je tedy široká variabilita využití tohoto kotouče a poměrně jednoduché zaměření a kalibrace.

Naopak nevýhodou je opotřebovávání kotouče. Důvodem je působení řezných sil na rohový poloměr kotouče. Po orovnění kotouče je tento poloměr poměrně malý, cca 0,08 mm. Opotřebení, tedy rohový poloměr a průměr kotouče ihned po orovnění, roste poměrně rychle na hodnotu cca 0,2 mm, pak se opotřebení výrazně zpomalí a narůstá pozvolna. Mezní opotřebení, kdy je kotouč nutné znovu orovnat, je závislé na konkrétní aplikaci, avšak zpravidla je nutné kotouč orovnat v momentě, kdy rohový rádius kotouče dosáhne hodnot 0,3–0,35 mm. Opotřebení narůstá vždy s množstvím odebíraného materiálu, proto je u miskových kotoučů vhodné s ohledem na stabilitu rozměru kotouče odebírat maximálně 0,3 mm na jediný průchod.



Obr. 4.6 Postup výroby nástroje.

1. Válcový polotovar; 2. Hrubování profilu nástroje; 3. Osazení krčku frézy; 4. Broušení drážky;
5. Broušení čelního prostoru pro třísky; 6. Obvodová fazeta; 7. Druhá čelní fazeta; 8. První čelní fazeta; 9. Sražení hrany.

V případě výroby nástrojů ostrohranných končí výrobní proces v osmé operaci. Zbýlý postup výroby je naprosto totožný s tím na obr. 4.6.

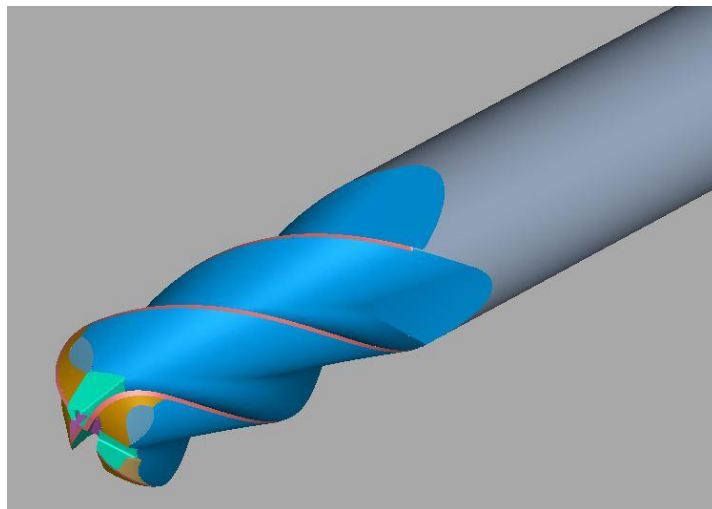
S ohledem na množství vyráběných kusů v sérii (20 ks) a požadavky na přesnost nástroje zde není nutné zařazovat do technologie výroby hrubovací operace a vyrobit tak celou sérii bez nutnosti průběžné kontroly stability procesu. Rozdíl v průměru prvního a dvacátého kusu je maximálně 0,015 mm. Z průměru nástroje lze totiž predikovat opotřebení jak miskového kotouče 11V9, tak i kotouče 1V1. Opotřebení kotoučů vždy vede k růstu průměru nástroje.

4.1.2 Výroba nástrojů s rohovým a plným rádiusem

Výroba takových nástrojů s výhodou využívá aplikaci kotouče 12V5. Jeho výhodou je možnost vyhotovení čelní fazety, fazety rohového rádiusu a obvodové fazety v jedné operaci. Tím jsou minimalizovány geometrické a rozměrové odchylky, které vznikají rozdělením výše popsané operace na tři samostatné. V případě rohového rádiusu většího než cca 1 mm nebo v případě větší série kusů je vhodné do technologického postupu zařadit také hrubování rohového rádiusu pomocí kotouče 1A1 s přídkem cca 0,03 mm. Kotouč 12V5 pak odebrá méně materiálu, minimalizuje se jeho opotřebení a zvyšuje se tak přesnost výroby a stabilita procesu.

Příkladem takového nástroje může být např. fréza o průměru 12 mm a rohovým rádiusem R4. Fréza na obr. 4.7 je určena pro obrábění hliníkových slitin, kde lze frézovat s poměrně

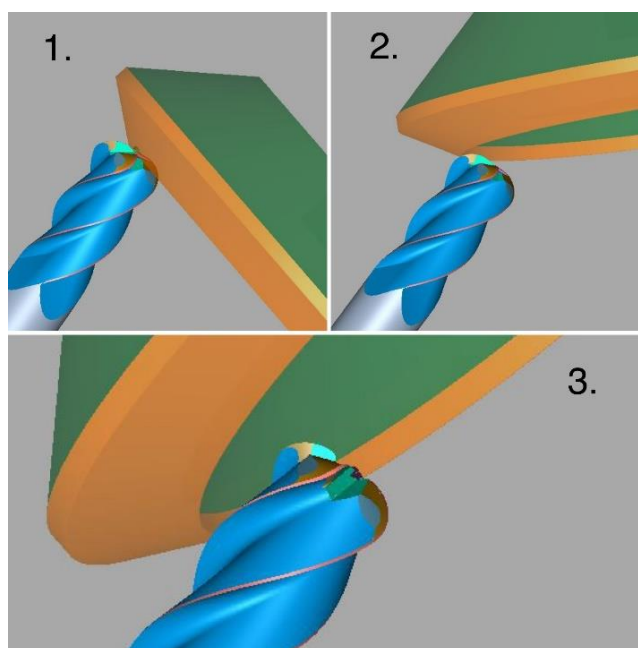
vysokým posuvem na zub. Proto je její geometrie specifická velkou hloubkou drážky pro třísky, velmi tenkou obvodovou fazetou a také ostrým úhlem čela drážky 14° .



Obr. 4.7 Fréza s průměrem 12 mm a rohovým rádiusem R4 pro obrábění hliníkových slitin.

Strategii pohybu kotouče 12V5 během broušení fazet schematicky znázorňuje obr. 4.8. Výhodou využití tohoto typu brousícího kotouče je také způsob jeho opotřebení. Rohový rádius zde není vystaven takovému namáhání jako kotouč 11V9 v předchozím případě. Díky zkosení kotouče, které přichází do řezu vždy první, odebírá většinu materiálu a hrana kotouče pouze dokončuje obrobený povrch. Tuto technologii výroby tedy lze aplikovat na větší výrobní série s vysokou přesností.

Problematická je však kalibrace tohoto typu kotouče na optickém měřidle. Lze ji ale provádět za pomoci speciálně vytvořeného programu, kdy jsou vybroušeny tři plochy, jejichž rozměry jsou dále zaneseny do výpočtu. Jeho výstupem jsou pak kalibrované hodnoty průměru, délky a rohového radiusu kotouče.



Obr. 4.8 Strategie broušení kotoučem 12V5.

1. Broušení čelní fazety; 2. Broušení fazety rohového radiusu; 3. Broušení obvodové fazety.

4.1.3 Sériová výroba nástrojů

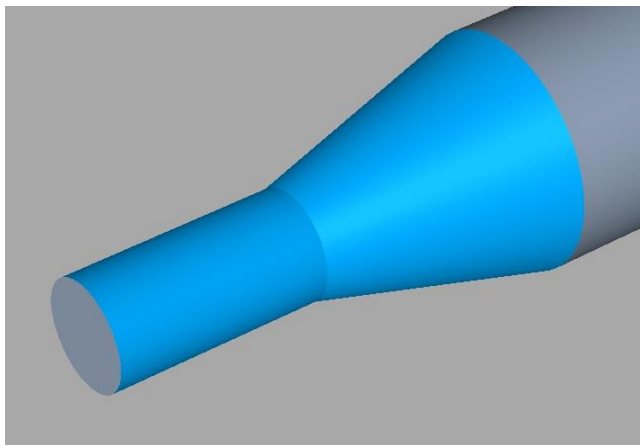
V případě požadavku na výrobu větší série nástrojů lze velmi efektivně využívat robotický zakladač. Výhodou je pak bezobslužný provoz stroje, avšak samotná technologie výroby vyžaduje precizní zpracování. Na rozdíl od výroby kusové je kladen důraz na vysokou stabilitu obráběcího procesu. Je tedy vhodné využívat jednoúčelové brousící kotouče, určené pro danou aplikaci a docílit tak zkrácení jednotkového času výroby. Rovněž je nutné do procesu zahrnout hrubovací operace tak, aby při dokončovacích operacích docházelo k co možná nejmenšímu úběru materiálu. To zaručuje snížení opotřebení brousícího kotouče a zvýšení stability procesu, což je spolu s jednotkovým časem nejdůležitější aspekt sériové výroby. Úkolem programátora je tedy najít optimální rovnováhu mezi těmito dvěma veličinami.

V případě olomoucké firmy jsou v největších sériích vyráběny frézy pro obrábění incelových součástí pro letecké motory. Jedná se o tří-břité frézy o průměru 1,8 mm, délkou činné části 3,5 mm a kuželovým osazením krčku vyráběné z polotovaru o průměru 4 mm. Tyto frézy se po opotřebení dále nepřeostřují a v rámci úpory nákladů na polotovary jsou vyráběny oboustranně.

Technologie výroby vyžaduje zejména precizně zaměřené a zkalibrované kotouče. Tím je zaručeno, že každý brousící kotouč vstupující do procesu odebrá požadovaný objem materiálu.

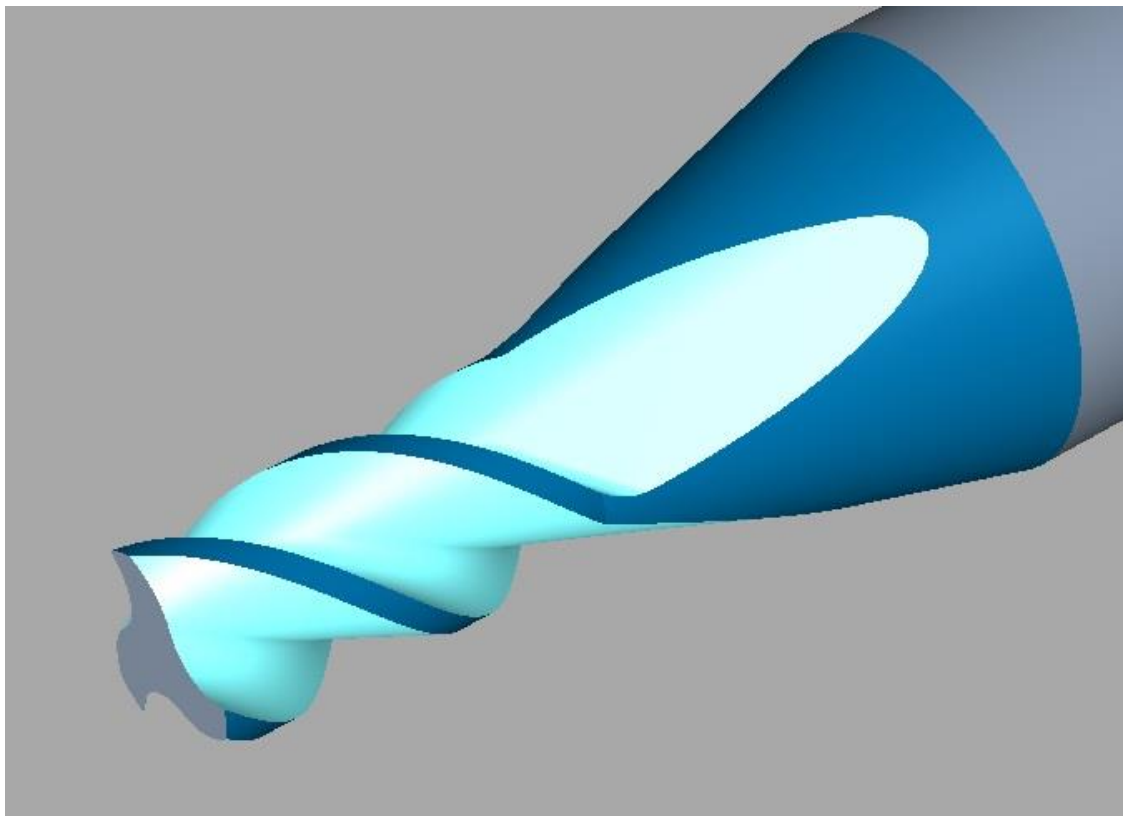
Výrobní proces daného nástroje začíná založením polotovaru do upínače. Předpokladem je správně vyrovnaný upínač. Obvodová házivost polotovaru v upínači nepřesahuje 1 μm . Dále je obrobkovou sondou zaměřen konec polotovaru.

První operací je hrubování profilu frézy, kde je aplikován brousící kotouč 1M1 a válcová část provádí hrubovací operaci činné části nástroje s přídkem 0,03 mm a zkosení zároveň vytváří kuželové osazení krčku frézy (obr.4.9). Proces probíhá tak, že se kotouč s řeznou rychlostí $v_c = 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nejprve zapíchne posuvovou rychlostí $v_f = 10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ v ose Y a poté je materiál odebrán za rotace osy A. Pro zvýšení přesnosti je dodána jedna otáčka osy A bez přísuvu, avšak s výrazně vyšší rychlostí ($1000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Brousící kotouč pro tuto operaci má hrubší strukturu než kotouče zvolené ve všech zbylých operacích. Oproti dříve používanému kotouči s jemnějšími zrny tak bylo možné zvýšit rychlost posuvu (rotace osy A) při broušení ze $180 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na $550 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Zároveň se nově použitý kotouč méně zanáší a jeho oživení tak probíhá pouze po každém čtyřicátém vyrobeném kusu nástroje. I přesto je tato operace hlídána také funkcí Adaptive Control s mezním zatížením vřetene 3 Nm. Strojní čas této operace je $t_{AS1} = 2 \text{ min } 1 \text{ s}$.



Obr. 4.9 Hrubovací operace profilu frézy a osazení krčku.

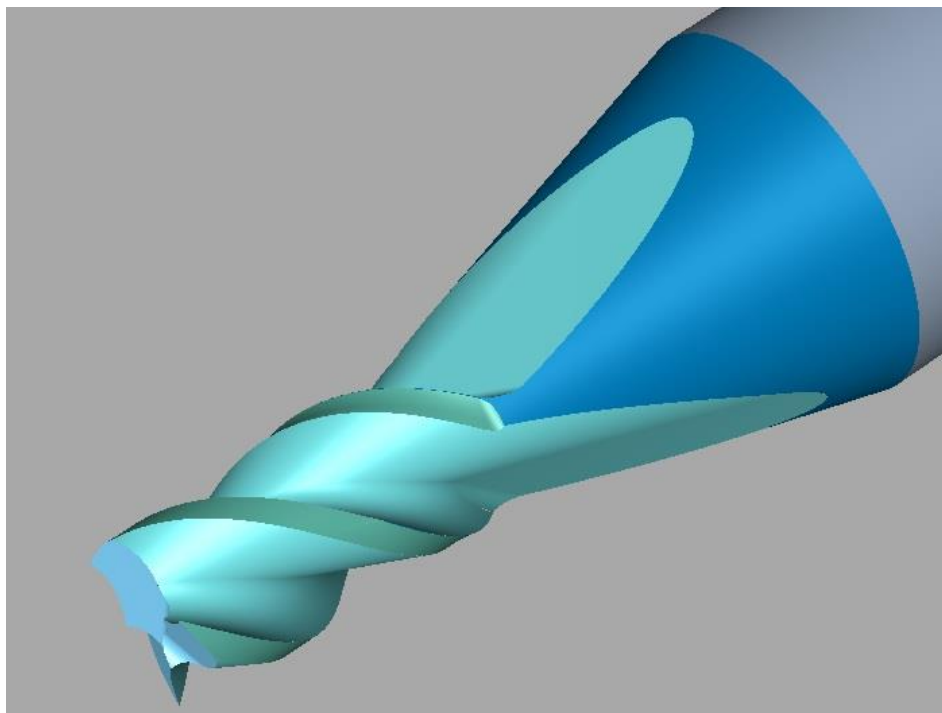
Druhou navazující operací je vybroušení drážky frézy s úhlem čela 10° a stoupáním 45° (obr.4.10). Tato operace je realizována kotoučem 1V1 o průměru 100 mm a úhlem zkosení 15° . Drážka je zde vytvořena na hotovo v jedné operaci, a proto je nutné mít správně zaměřený brousící kotouč, zejména jeho rohový radius, který ovlivňuje nejen úhel čela drážky, ale i její polohu a tím i výsledný průměr nástroje. Jádrem frézy je kónické z důvodu zvýšení její tuhosti, což zamezuje křehkému lomu v oblasti konce drážky nástroje. Zde je nástroj vystaven největšímu ohybovému momentu. Hloubka drážky se pohybuje mezi 0,5 mm v blízkosti čela a 0,25 mm u krčku frézy. Vzhledem k malé hloubce drážky je taktéž velmi malé opotřebení brousícího kotouče a není nutné zařazení hrubovací operace drážky pro třísky. Proces je charakterizován řeznou rychlostí $v_c = 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a posuvovou rychlostí $v_f = 50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, čas této operace je $t_{AS2} = 1 \text{ min } 16 \text{ s}$.



Obr. 4.10 Vybroušení kónické drážky frézy.

V další operaci je aplikována sada kotoučů 11V9/12V9, avšak využít je pouze kotouč 11V9 o průměru 75 mm a jedná se o hrubovací operace druhých úhlů hřbetu na obvodu a čele neboli, obvodových a čelních fazet. Důvodem pro hrubování pouze druhých úhlů hřbetu (obr. 4.11) je větší úběr materiálu než u prvních úhlů hřbetu, které lze následně vyhotovit pouze dokončovací operací bez nutnosti hrubování.

Tyto hrubovací operace jsou totožné s dokončovacími, avšak je zde použita jiná sada brousících kotoučů a přídavek je stanoven za pomoci korekce v ose Z, konkrétně 0,01 mm u obvodových fazet a 0,03 mm u čelních. Řezná rychlost v této operaci je vyšší než u předchozích, tedy $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Stejně tak i rychlost posuvová je výrazně vyšší a to $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Strojní čas těchto operací je pak $t_{AS3} = 1 \text{ min } 6 \text{ s}$.

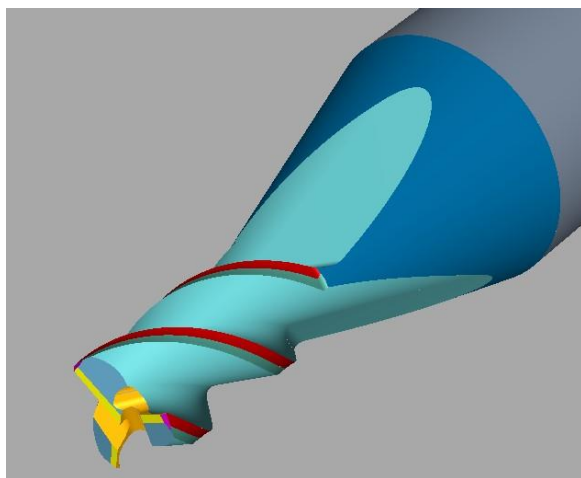


Obr. 4.11 Nástroj po dokončení hrubovacích operací.

Po dokončení těchto operací je obrobek nachystán na dokončovací operace, kterými jsou vybroušení čelního prostoru pro třísky, dále broušení obvodových a čelních úhlů hřbetu a na závěr také sražení rohu. Všechny tyto operace jsou prováděny jednou sadou kotoučů 11V9/12V9.

Vybroušení čelního prostoru pro třísky zajišťuje brousící kotouč 12V9, úhel čela je zde 4° . Řezná rychlost zde je $v_c = 22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a rychlost posuvová s ohledem na stabilitu procesu a minimální opotřebení kotouče je $v_f = 60 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Pro všechny zbylé operace platí totožné řezné podmínky – $v_c = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v_f = 80 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Jako první jsou vybroušeny obvodové úhly hřbetu, druhý se sklonem 18° a šířkou 0,2 mm a první se sklonem 10° a šířkou 0,15 mm, dále úhly hřbetu čela – druhý se sklonem 16° a první se sklonem 8° a šířkou 0,15 mm. Zbylé dokončovací operace jsou zahrnuty ve strojním čase $t_{AS4} = 2 \text{ min}$. Takto vyrobený nástroj je na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Dokončený nástroj – model (vlevo) a fyzicky vyrobený kus (vpravo).

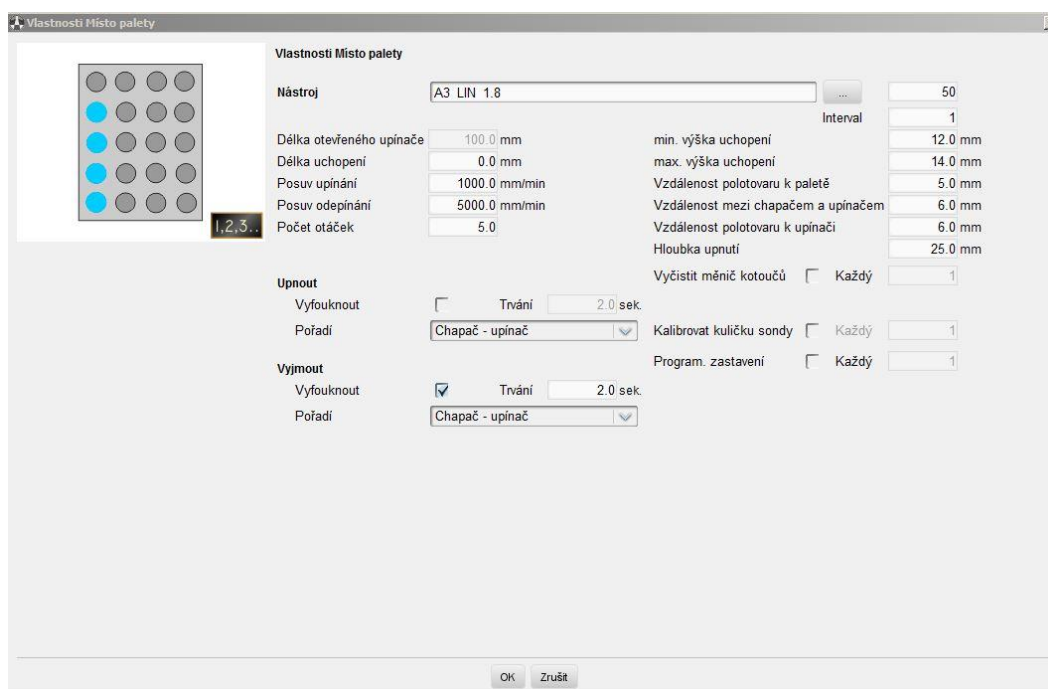
Pro přehlednost celého výrobního procesu jsou důležité technické údaje obsaženy v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Přehled parametrů jednotlivých operací.

Název operace	Sada brousících kotoučů	Brousící kotouč	Řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]	Posuvová rychlost v_f [mm·min ⁻¹]	Strojní čas operace [min]
Měření konce polotovaru				2500	0:09
Osazení krčku	1M1	1M1	18	10/550/1000	2:01
Vybroušení drážky	1V1	1V1	18	50	1:16
2. úhel hřbetu obvod hrubování	11V9/12V9 (hrubovací)	11V9	25	100	0:52
2. úhel hřbetu čelo hrubování	11V9/12V9 (hrubovací)	11V9	25	100	0:14
Čelní prostor pro třísky	11V9/12V9	12V9	22	60	0:48
2. úhel hřbetu obvod dokončení	11V9/12V9	11V9	25	80	0:20
1. úhel hřbetu obvod	11V9/12V9	11V9	25	80	0:19
2. úhel hřbetu čelo dokončení	11V9/12V9	11V9	25	80	0:12
1. úhel hřbetu čelo	11V9/12V9	11V9	25	80	0:12
Sražení hrany	11V9/12V9	11V9	25	80	0:09

Takto nastavená technologie s celkovým jednotkovým strojním časem $t_{AS} = 6 \text{ min } 35 \text{ s}$ je vhodná pro sériovou výrobu bez obsluhy, čemuž odpovídá i jednotkový strojní čas, který by při kusové výrobě mohl být výrazně nižší. Výměnu obrobků zajišťuje robotický zakladač, jehož programování je poměrně jednoduché a samotná výměna zahrnutá do vedlejšího strojního času trvá $t_{VS} = 43 \text{ s}$.

Základem automatizace pomocí robotického zakladače je osazení správných palet a kleští uchopovacího pneumatického zařízení v závislosti na průměru obráběného polotovaru, kterému musí odpovídat také kleština osazená v upínači stroje. V případě, že je stroj osazen správnými komponentami, lze pokračovat nastavením výrobní dávky. Nejprve je nutné fyzicky namontované palety zadat do stroje a následně do zvolené palety vytváříme danou dávku. Celé nastavení je provedeno v jediném okně dle parametrů na obr. 4.13.

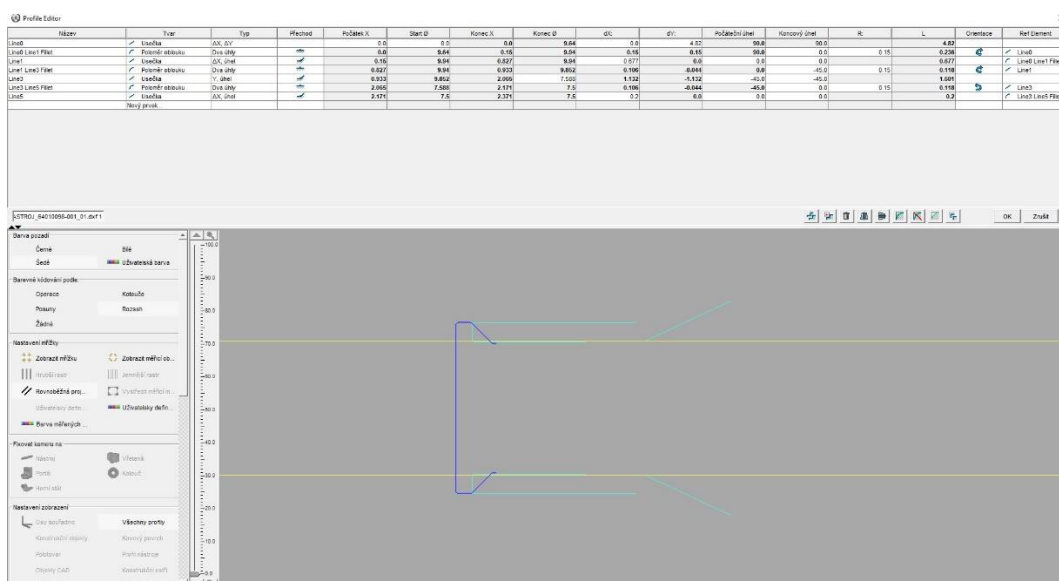


Obr. 4.13 Okno nastavení dávky robotického zakladače.

Výhodou je, že každý kus dávky je zvlášť nahráván do stroje ze softwaru Tool Studio. Společně s možností otevření dveří zakladače v prodlevě mezi výměnami obrobků je možné provádět průběžnou kontrolu výrobního procesu a provádět např. korekce či jiné úpravy bez nutnosti přerušení výroby. Nejvýznamnější výhodou, kterou však zakladač poskytuje, je možnost bezobslužného provozu.

4.2 Broušení nástrojů za pomoci editoru profilů

Dalším způsobem tvorby nástroje, je použití editoru profilů (obr. 4.14). Zde si obsluha stroje buď vytvoří nebo importuje požadovaný profil, Ten pak dále definuje dráhu brousícího kotouče při operaci. Tento způsob je o mnoho složitější a pomalejší než předchozí, na druhou stranu tak lze vytvořit prakticky libovolný tvar nástroje. Tímto způsobem jsou vytvářeny modely veškerých tvarových nástrojů. Úkolem tvarového nástroje je vytvoření buď specifického prvku, který nelze vytvořit standardními nástroji, nebo zjednodušení výrobního procesu za použití jediného nástroje namísto více standardních nástrojů.



Obr. 4.14 Prostředí editoru profilů s vytvořeným profilem kotoučové frézy.

Po vytvoření požadovaného profilu nástroje pak obsluha stroje přiřazuje k jednotlivým elementům profilu vhodné operace jako je hrubování, úhly hřbetu profilu apod.

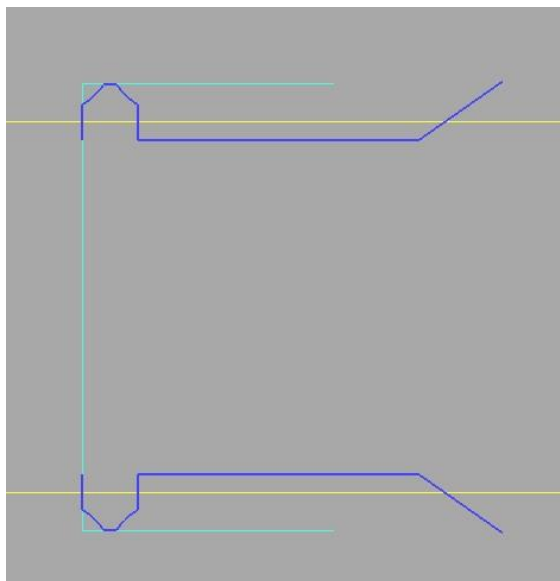
4.2.1 Výroba tvarové kotoučové frézy

Příkladem tvarových fréz mohou být modulové frézy pro výrobu ozubení, či drážkování. Výhodou je možnost exportování profilu zubu přímo z CAD softwaru, kde je profil zubu upraven tak aby odpovídal konkrétnímu počtu zubů ozubeného kola. V praxi takto vyrobené součásti přinášejí zvýšení životnosti, ale i účinnosti. Využití ve výrobě pak nachází v oblasti vývoje servopohonů.

Vytvoření nástroje lze pojmut dvěma způsoby. Prvním a jednodušším způsobem je vytvoření základního nástroje za pomoci Wizardu. Takto vytvořený nástroj následně upravujeme. Předmětem úprav jsou povětšinou parametry drážky pro třísky. Další elementy lze v případě nepotřebnosti vypnout, a naopak další elementy zvlášť přidat.

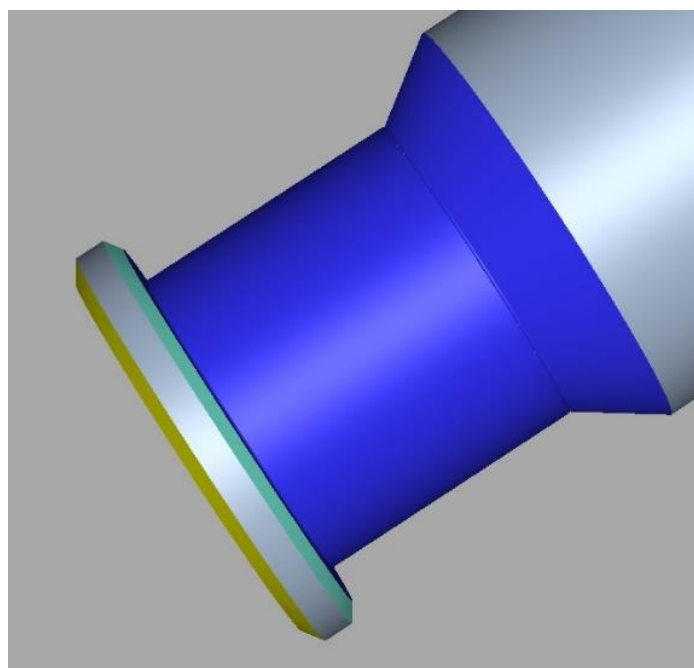
Druhým způsobem je vytvořit uživatelem definovaný nástroj, kde veškeré operace měření i broušení vytváří obsluha stroje. Zde je proces složitější, protože na rozdíl od Wizardu nevychází z žádného předem definovaného vztahu. Takovým vztahem mohou být např. typy nájezdu a výjezdu brousícího kotouče k obrobku a od něj, případně průměr jádra nástroje apod.

Případ této konkrétní frézy vychází z první varianty, kde základ tvoří osmi-břítá fréza o průměru 16 mm a stoupáním šroubovice 0°. Tímto způsobem lze velmi snadno vytvořit drážku pro třísky. Další operace vycházejí z importovaného profilu zubu. Tento profil zachycuje obr. 4.15, přičemž znázorňuje také profil frézy vytvořené Wizardem a průměr jádra nástroje.



Obr. 4.15 Profil tvarové kotoučové frézy.

Tento profil tvoří základní prvek pro další operace a je dle něj řízen pohyb kotoučů. První operací je opět hrubování, jehož účelem je co nejrychleji odebrat co největší množství materiálu. Vhodným kotoučem pro tuto aplikaci je kotouč 1A1 a strategií broušení je opět zapíchnutí do materiálu a následná rotace osy A. Po dokončení hrubovacích operací je získána hrubá silueta výsledného nástroje viz obr 4.16.



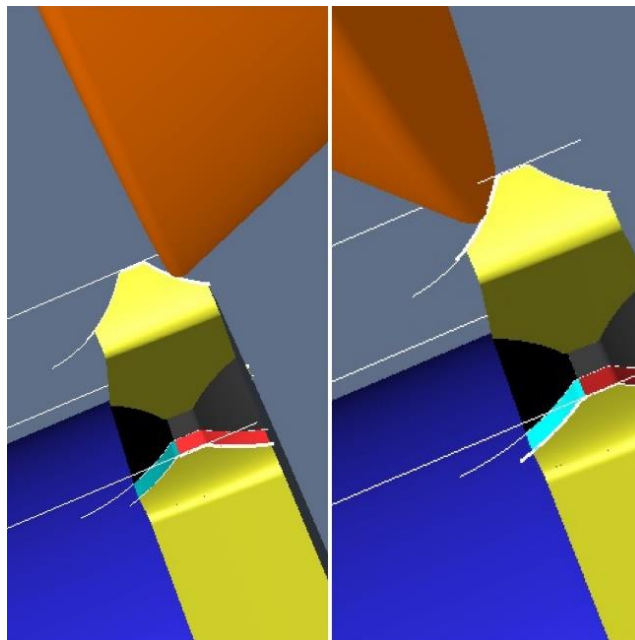
Obr. 4.16 Kotoučová fréza po dokončení hrubovacích operací.

Další operací je vybroušení drážky pro třísky pomocí kotouče 1V1. Na rozdíl od kotouče 1A1 v této aplikaci využíváme výhody zkosení kotouče a lze tak vytvořit osmi-břítý nástroj s úhlem čela 10° . Následující operace jsou už přímo spojeny s importovaným profilem zubu a jedná se o úhly hřbetu neboli fazety.

Hlavními aspekty profilového broušení je správná volba strategie broušení a správná volba brousícího kotouče. Zde bylo nutné z důvodu dostupnosti vhodných brousících kotoučů

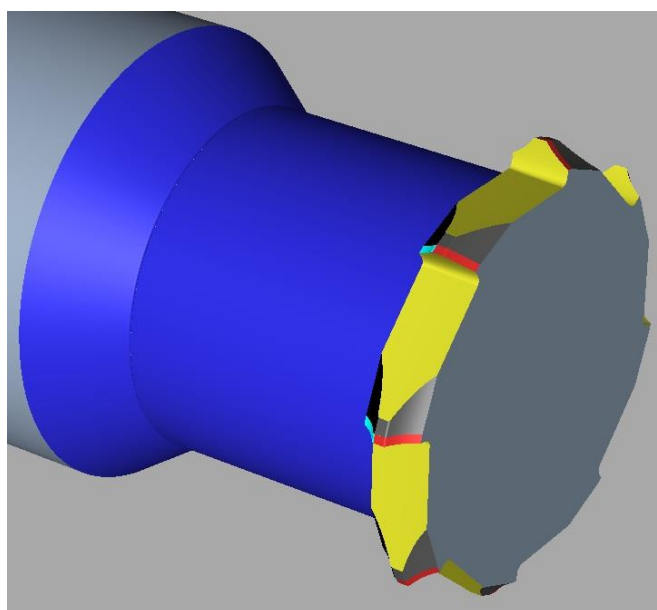
rozdělit profil zubu na přední a zadní část kontury, kdy přední část je obráběna kotoučem 11V9 a zadní část kotoučem 12V9. Z důvodu vyložení polotovaru z upínače však vzhledem k jeho dostupné délce nebylo možné použít běžnou sadu kotoučů 11V9/12V9 a bylo tak nutné osadit na jeden upínací trn samostatný kotouč 12V9. Technologický postup výroby je znázorněn obrázkem 4.17.

Úskalím takto zvolené technologie je však nutnost dokonale zaměřených kotoučů tak, aby napojení drah obou kotoučů bylo zanedbatelné.



Obr. 4.17 Technologie výroby úhlů hřbetu dvěma kotouči 11V9 (vlevo) a 12V9 (vpravo).

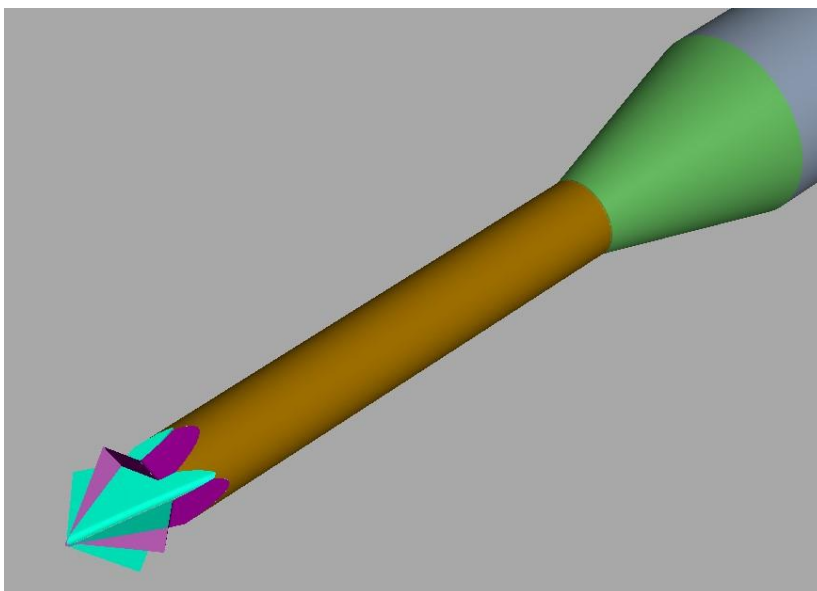
Geometrie hřbetu byla zvolena se dvěma úhly hřbetu, kde první má šířku 0,3 mm, jeho radiální úhel je 5° a axiální úhel 1° . Specifickým prvkem je zde axiální úhel hřbetu zadní kontury, kde software nerozezná přední a zadní konturu, a proto je nutné u zadních kontur vždy volit zápornou hodnotu, tedy -1° . Výsledná podoba nástroje je na obr. 4.18.



Obr. 4.18 Výsledná podoba profilové kotoučové frézy.

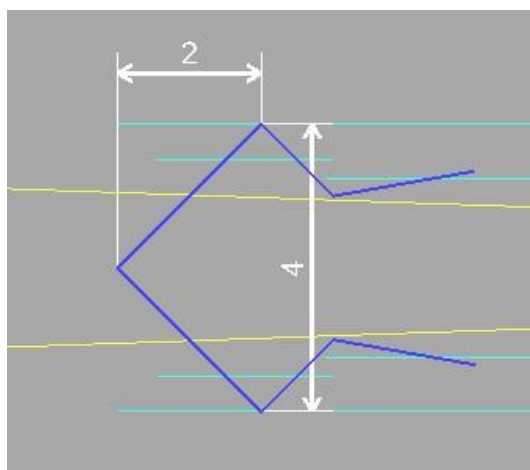
4.2.2 Výroba nástroje pro zpětné odjehlování

V případech, kdy je nutné strojně odjehlovat ostré hrany obráběné součásti, je v některých případech nutné využít tzv. zpětné odjehlování. Princip technologie spočívá v najetí nástroje o průměru menším, než je průměr obráběného prvku, např. díry. Díky profilu nástroje a břitu umístěného na zadní kontuře (obr. 4.19) pak lze efektivně obrábět i standardními nástroji nedostupné elementy.



Obr. 4.19 Nástroj pro zpětné odjehlování $\varnothing 4$ mm.

Při výrobě tohoto nástroje bylo opět s výhodou využito broušení profilu viz obr. 4.20. Jedná se o nástroj s vrcholovým úhlem 90° a stejný úhel svírá také čelní úhel hřbetu se zadní konturou.



Obr. 4.20 Profil nástroje pro zpětné odjehlování.

Nutným prvkem pro funkčnost daného nástroje je osazení krčku, jehož průměr musí být menší než průměr nástroje. Tento rozdíl pak na poloměru nástroje určuje maximální šířku tímto nástrojem vyrobitelného sražení.

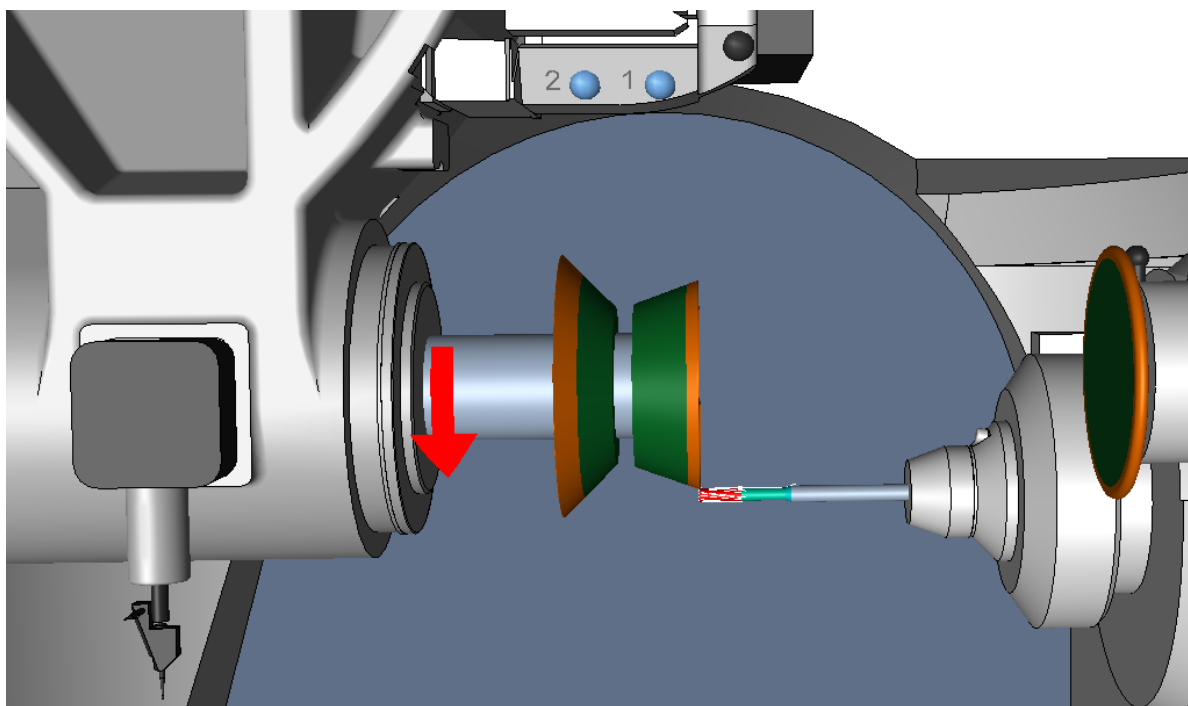
4.2.3 Výroba nástrojů s válcovou fazetou

Válcová fazeta na obvodu nástroje je prvek, který má za úkol přesné vedení nástroje v díře. Proto se vyskytuje u nástrojů jako jsou vrtáky a výstružníky, kde obvod nástroje není činnou částí a tříska je odebírána čelem nástroje u vrtáků, případně sraženou hranou u výstružníků.

Výroba takových nástrojů probíhá vždy nejprve předpracováním válcového polotovaru. Jako první probíhá operace hrubování profilu nástroje, případně osazení krčku u výstružníku nebo přechod činné části vrtáku na průměr polotovaru. Dále je dokončen profil nástroje operací broušení na kulato, kde lze docílit rozměrové přesnosti v rozsahu $1\text{ }\mu\text{m}$ a standardními kotouči také povrchu s $R_a = 0,3$.

Příkladem takového nástroje může být např. výstružník, jehož funkcí je dokončení přesné díry turbíny pro modely letadel s proudovým motorem. Nároky na vysokou přesnost daného prvku vychází z otáček, kterých tato součást dosahuje. Ty se v maximu pohybují až kolem $120\,000\text{ min}^{-1}$. Proto je nutno předvrtanou díru dokončit na přesný průměr operací vystružování.

Obrázek 4.21 znázorňuje strategii broušení na kulato z hlediska kinematiky stroje, kdy kotouč je postaven nad obrobek tak, že osa kotouče a obrobku jsou rovnoběžné a následný směr posuvu je rovnoběžný s osou kotouče, dále jsou oba elementy roztočeny v nesousledném směru, přičemž zde jsou voleny vysoké řezné rychlosti a nízké rychlosti posuvu, což zaručuje snížení drsnosti povrchu ($v_c = 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $v_f = 5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a otáčky osy $A = 700\text{ min}^{-1}$).



Obr. 4.21 Dokončovací operace broušení na kulato.

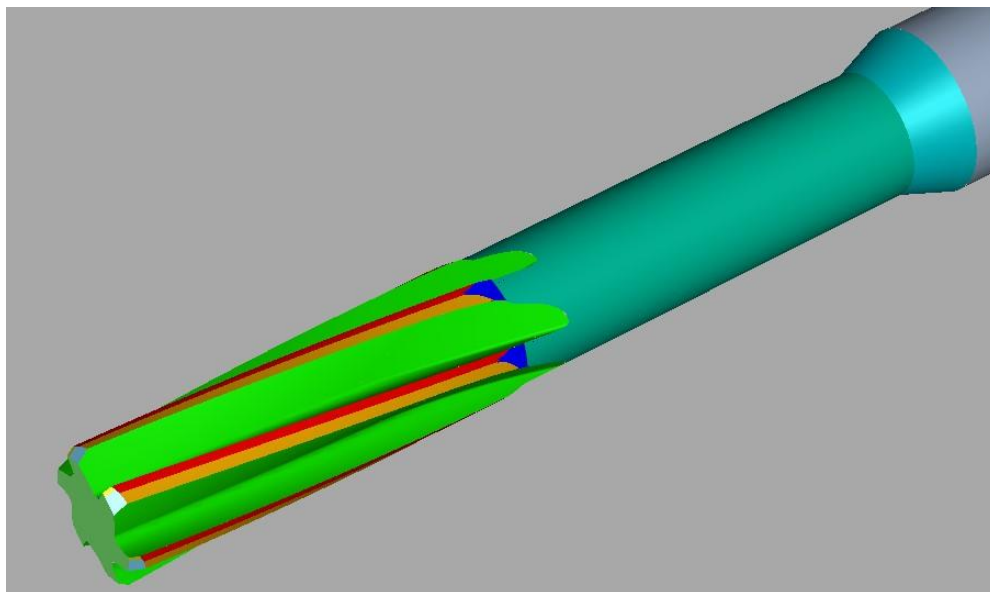
Při této operaci lze velmi efektivně využít operaci dokončování se snímáním, kterou lze ručně přidat do programu. Zde byly nastaveny parametry viz obr. 4.22.

Předhrubování profilu dokončování se snímáním	
Vybrat všechny posuny	☒
Všechny posuny vypočítány	✓
Část kotouče	Poloměr
Maximální přísuv	0.08 mm
Mez přijatelnosti	2.0 mm
Korekce hodnoty snímání	70.0 %
Posuv při dotyku	50.0 mm/min
Trasa vyhledávání až do hloubky dotyku	2.0 mm
Offset - bod měření (X)	15.0 mm
Průměr profilu	6.345 mm
Profil - délka	21.0 mm
Počátek profilu (X)	0.0 mm
Profil úhel kužele	0.0 °
Profilovat počet otáček	700.0 ot./min.
Naše tolerance	0.001 mm
Horní tolerance	0.001 mm
Pokročilý ▲	
Směr měření	Vlevo a vpravo
Maximální počet průchodů	6
Bod broušení	0.0 °
Referenc. offset	0.0 mm
Úhel rotace	0.0 °
Začít na A	0.0 °
Max. točivý moment vřetena (průběh)	Nm
Naposledy změřeno:	29.5.2020 10:49
Společné	Předpracování

Obr. 4.22 Parametry operace dokončování se snímáním.

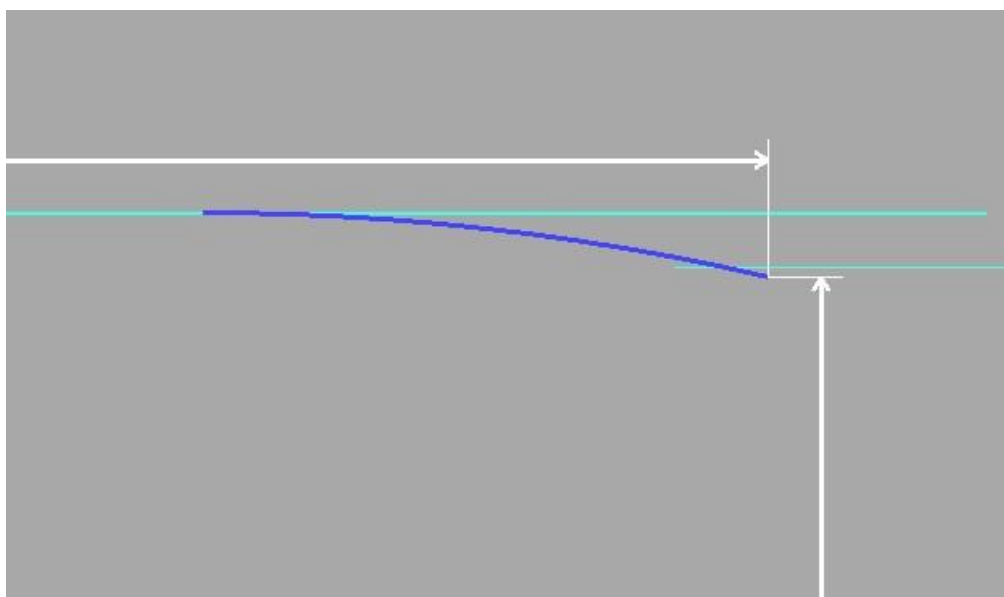
Celý prvek funguje tak, že po zadání jeho parametrů stroj automaticky měří obrobkovou sondou průměr válcové části obrobku a dle naměřených hodnot automaticky vyhodnocuje odchylku. V případě velkého přídavku však hrozí při této technologii broušení poškození brousícího kotouče, a proto je nutné stanovit také maximální přísuv, který je zde 0,08 mm. Dalším důležitým parametrem je korekce hodnoty snímání stanovena na 70 %. Např. při naměření odchylky 0,1 mm stanoví stroj přísuv 0,07 mm. Tím je zaručeno, že se stroj pomalu blíží k požadované hodnotě průměru a je zabráněno tzv. podbroušení průměru, kdy se obrobek stává neopravitelným zmetkem. Naopak však lze stanovit maximální počet průchodů. V případě, že požadovaného průměru není dosaženo v maximálním počtu průchodů a jeho rozměry jsou stále nad horní toleranci, je proces výroby přerušen.

Při výrobě výstružníků je nutné znát jeho pozdější aplikaci, kdy pro průchozí díry používáme pravořezný výstružník s levotočivou šroubovicí a do slepých děr je výhodnější z hlediska odvodu třísky pravořezný nástroj s pravotočivou šroubovicí. Na rozdíl od fréz a vrtáků je zde šroubovice skloněna pod velmi malým úhlem, který má v tomto případě hodnotu 7° viz obr 4.23.



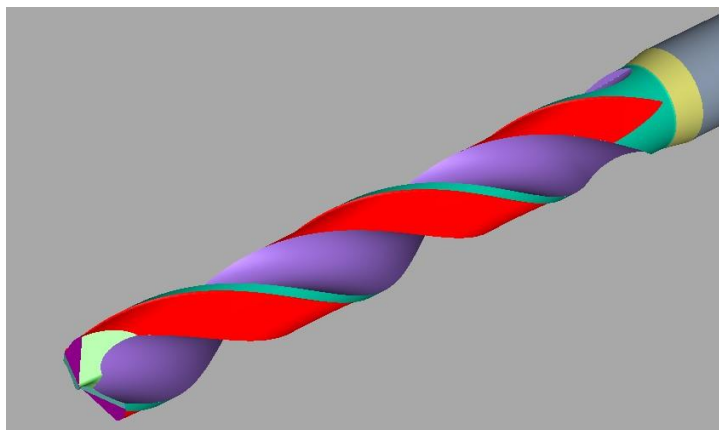
Obr. 4.23 Výstružník pro obrábění slepých děr.

Zajímavým prvkem, přidaným navíc oproti nástroji generovaným z Wizardu, kromě osazení krčku, je zde zaoblení zadní hrany výstružníku, kde bylo využito profilové broušení. Cílem takto dodaného prvku je zamezení vzniku rýh na obrobeném povrchu vlivem ostré hrany zejména při výjezdu výstružníku z obráběné díry. Na obr 4.23 je tento prvek znázorněn modrou barvou, naopak obr. 4.24 zobrazuje tvar profilu.

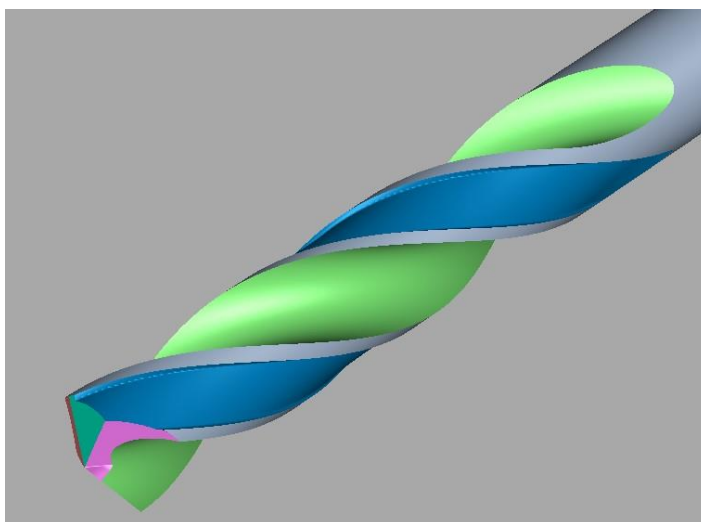


Obr. 4.24 Profil zaoblení zadní hrany výstružníku.

V případě výroby vrtáků je počátek výroby totožný jako u výstružníku. Avšak vedle ostatních prvků jako je počet břitů, tvar čela a stoupání šroubovice se liší také operací na obvodu. Na rozdíl od výstružníku, kde je za válcovou fazetou vybroušen úhel hřbetu, je u vrtáku většinou vybroušen hřbet zubu viz červený element na obr. 4.25. Tento prvek je vyhotoven pomocí kotouče 1A1.

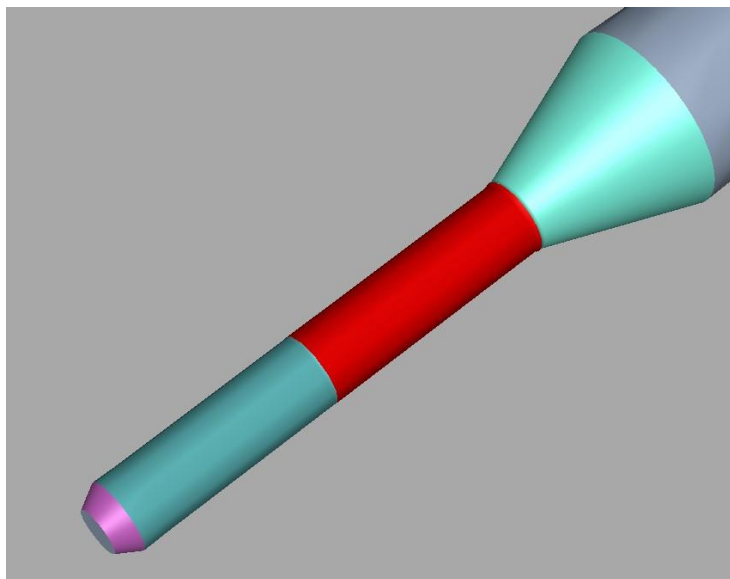
Obr. 4.25 Vrták $\varnothing 5,3$ mm – operace na obvodu – hřbet zubu.

Dalším typem obrobení obvodu vrtáku je tzv. dvojité vodítko, které se skládá ze dvou válcových fazet, mezi kterými je vybroušen prvek obdobný hřbetu viz obr. 4.26. Tento typ zpracování obvodu se s výhodou aplikuje pro vrtáky pro vrtání přesných děr. V tomto případě je profil vrtáku mírně kuželový, přičemž se od čela vrtáku směrem k jeho patě zužuje. Problematické je u těchto typů vrtáků jejich přeastřování. Důvodem je zmenšení jeho průměru po odebrání materiálu z čela. Po přeastření tedy vrták vytváří díru o menším průměru.



Obr. 4.26 Vrták s dvojitým vodítkem na obvodu.

Broušení na kulato se snímáním však lze využít nejen pro nástroje pro obrábění. Tímto způsobem lze vytvářet např. válcové kalibry. Ty jsou většinou využívány pro kontrolu průměru děr v případech, kdy je průměr díry potřeba kontrolovat rychlým a jednoduchým způsobem. Válcový kalibr se většinou skládá ze dvou průměrů, které jsou broušeny přesně na horní a dolní hodnotu tolerance. Díru pak lze označit jako správně vyrobenou v případě, že válcová část kalibru broušená na dolní mezní rozměr lze do díry vložit, avšak navazující část s horním mezním rozměrem se do díry vložit nedá. Složený válcový kalibr pro díru $\varnothing 1,562 \pm 0,005$ mm vidíme na obr. 4.27. Rozdíl mezi dvěma průměry kalibru je pouhých 0,01 mm.



Obr. 4.27 Složený válcový kalibr pro díru $\varnothing 1,562 \pm 0,005$ mm.

5 TECHNICKÉ HODNOCENÍ PROCESU

Technologické procesy výroby nástrojů s sebou nesou mnoho proměnných parametrů a obdobně jako u jiných obráběcích procesů lze sledovat snahu o získání co nejlepších výsledků. Základem je navržení nástroje s vhodnými parametry pro danou aplikaci, dále je nutná aplikace správných brousících kotoučů za vhodných řezných podmínek, přičemž neposledním cílem je zkrácení strojních časů, čímž snižujeme náklady na výrobu. Hlavní parametry a výstupy těchto veličin budou rozebrány v následujících podkapitolách.

5.1 Volba polotovaru nástroje

Na trhu je v současné době poměrně široká škála výrobců polotovarů slinutých karbidů, kteří nabízejí široké spektrum druhů karbidu. Základem tohoto materiálu je karbid wolframu WC a kobalt Co sloužící jako pojivo. Tyto dvě složky s dalšími příměsemi jsou spojeny procesem slinování za vysokého tlaku a teploty. Takto vytvořený materiál dále disponuje vysokou tvrdostí a tepelnou odolností oproti rychlořezným ocelím, což vede k vyšším řezným výkonům. Naopak houževnatost tohoto materiálu je poměrně nízká a stoupá s objemem Co ve struktuře.

Při návrhu nástroje tedy hraje velkou roli právě polotovar, resp. jeho materiál. Výrobci povětšinou ve svém katalogu doporučují využití daných druhů karbidů např. pro neželezné kovy, korozivzdorné oceli apod.

Pro většinu aplikací v olomoucké firmě je využíván slinutý karbid CTS20D, který výrobce Ceratizit doporučuje jako materiál vhodný jak pro legované, tak i nelegované oceli, dále pak pro titanové a niklové slitiny. Řadu karbidových polotovarů znázorňuje obr 5.1 [10].



Obr. 5.1 Řada karbidových polotovarů CTS20D.

5.2 Volba geometrie nástroje

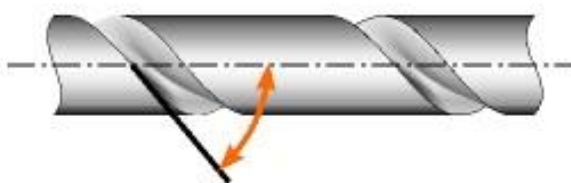
Stanovení geometrie nástroje je hlavním aspektem, který ovlivňuje funkčnost a trvanlivost nástroje. Je proto nutné věnovat této fázi návrhu maximální pozornost.

Základními parametry frézy, které vychází z konkrétní aplikace nástroje, jsou jeho průměr, délka břitu, případně odlehčení neboli krčku, a prvek na rohu frézy. Nejčastěji se lze setkat s frézami ostrohrannými, s rohovým rádiusem nebo sražením.

5.2.1 Stanovení geometrie drážky pro třísky

Výroba drážky pro třísky je základní operací, která je zahrnuta do výroby téměř všech nástrojů. Hlavními parametry drážky jsou její úhel čela, stoupání, hloubka a dělení.

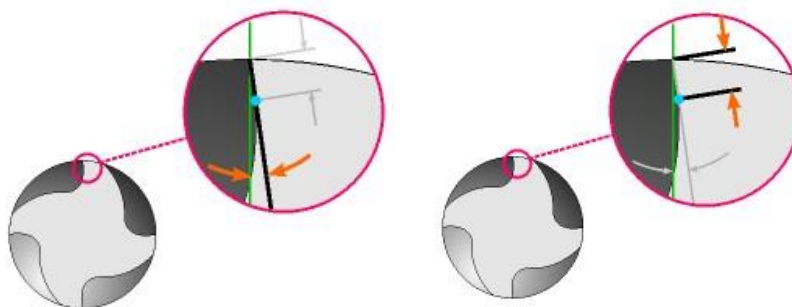
Stoupání drážky nebo také úhel šroubovice (obr. 5.2) ovlivňuje silové zatížení rezného nástroje zejména při obrábění obvodovou částí. Zde se snažíme docílit co možná nejmenšího zatížení při daném rezném výkonu. To vede ke zvýšení trvanlivosti břitu a snížení zatížení vřetene obráběcího stroje. Obrábění s malými reznými silami při zachovaném rezném výkonu označujeme jako měkký řez. Toho lze docílit zvětšením úhlu šroubovice, případně stanovením proměnlivého stoupání šroubovice do tvaru „S“, kde je důležité, aby břit do řezu a z řezu vstupoval se strmým úhlem [11].



Obr. 5.2 Stoupání šroubovice nástroje.

Dalším parametrem je úhel čela drážky. Ten se odvíjí od obráběného materiálu. Mechanismus tvorby třísky probíhá tak, že materiál, do kterého vstupuje rezný nástroj, se nejprve deformuje plasticky a v momentě vyčerpání plasticity se začíná oddělovat tříska. Proto je vhodné pro obrábění houževnatých materiálů volit větší úhel čela, avšak je třeba dbát také na aspekty ovlivněné teplem, které při rezném procesu vzniká. Při zvolení příliš velkého úhlu čela bude ostří namáháno obrovským tlakem i teplotou, což vede k výraznému snížení trvanlivosti břitu.

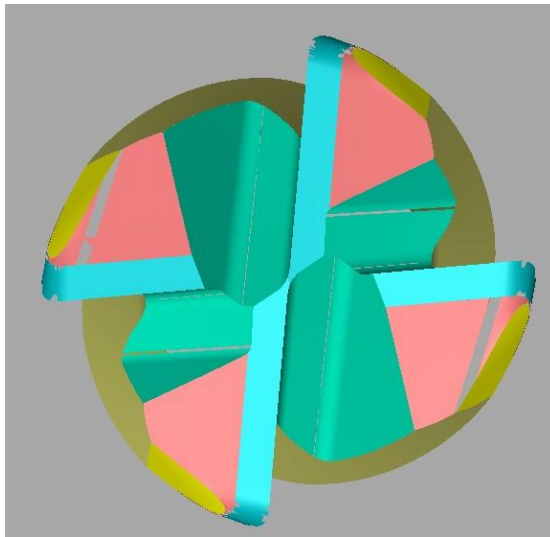
Úhel čela drážky má dva parametry, kdy jedním je samotný úhel a druhým je hloubka, ve které chceme jeho hodnotu měřit. Tyto parametry znázorňuje obr. 5.3.



Obr. 5.3 Úhel čela drážky (vlevo) a hloubka jeho měření (vpravo).

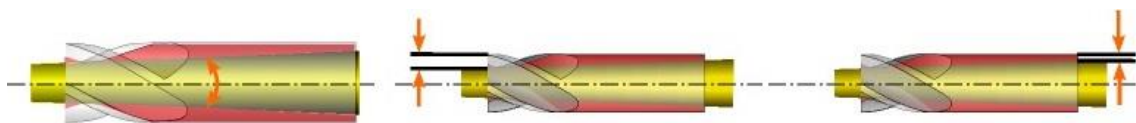
Funkčnost nástroje ovlivňuje také počet břitů. Při frézování je často využíván posuv na zub f_z . Pokud má tedy fréza více břitů, zvyšuje se posuv na otáčku a celý obráběcí proces se zrychluje. Z technologie výroby však vyplývá, že se zvyšujícím se počtem břitů se snižuje hloubka drážky pro třísky, což není vhodné pro hrubovací operace, kde je nutné efektivně odvádět třísky z místa řezu. Proto je vhodné hrubovací frézy volit spíše hrubozubé.

Naopak při dokončovacích operacích, kde je snaha o dosažení co možná nejlepší kvality povrchu, je vhodné zvolit frézu jemnozubou, případně zvážit nerovnoměrné dělení zubů. To je markantní u čtyř-břítých fréz viz obr. 5.4, kde tato konfigurace zubů snižuje vibrace vznikající při obráběcím procesu, díky tomu se kvalita obrobeného povrchu zvyšuje.



Obr. 5.4 Fréza s nerovnoměrným dělením zubů.

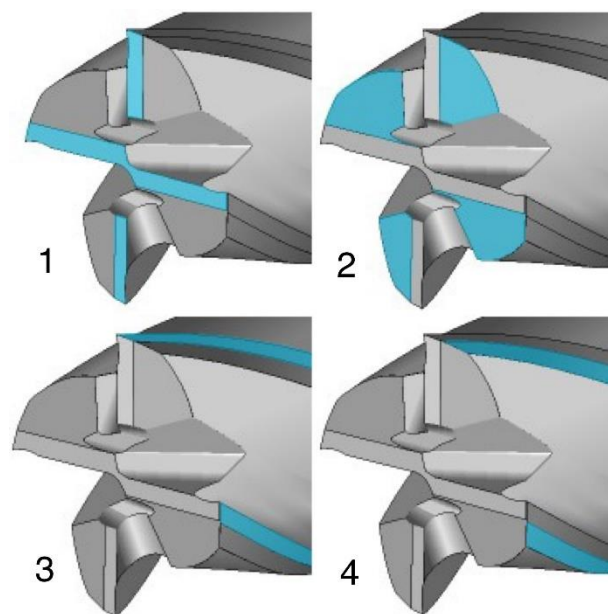
V případě nutnosti vyztužení činné části nástroje zejména u nástrojů o malém průměru lze využít tzv. kónického jádra, což znamená, že se hloubka drážky frézy směrem od čela k patě snižuje. Přínosem je pak větší odolnost vůči ohybovému napětí, které je nejvýraznější právě u paty drážky pro třísky. Parametrem zde je buď průměr jádra na počátku a na konci předem určené vzdálenosti v ose nástroje nebo úhel jeho kuželové části viz obr. 5.5.



Obr. 5.5 Způsoby stanovení parametrů kónického jádra.

5.2.2 Stanovení geometrie na čele a obvodu

Na čele nástroje i na jeho obvodu je pro správnou funkčnost nástroje nutné vybrousit úhly hřbetu. Po těchto prvcích neodchází tříska a jejich úkolem je zamezení tření mezi nástrojem a obrobenou plochou. Avšak při příliš velkém úhlu hřbetu opět vzniká abnormální tlak a teplota v místě ostří, což má negativní následky. Na čele nástroje se povětšinou lze setkat se dvěma na sebe navazujícími úhly hřbetu a na obvodu nástroje je nejčastěji jeden nebo dva tyto úhly.

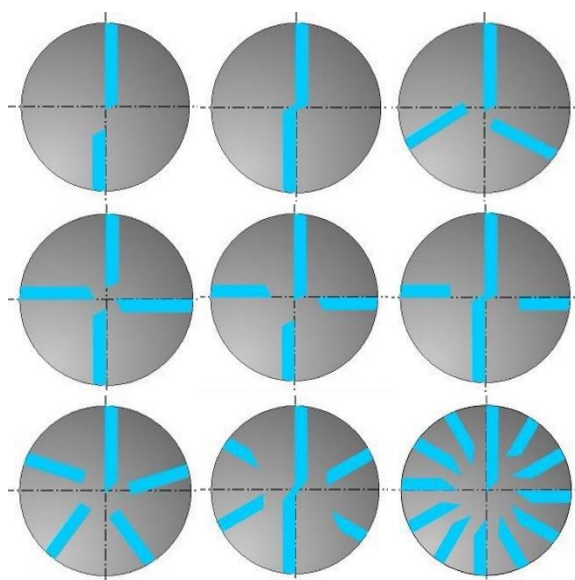


Obr. 5.5 Úhly hřbetu na čele a obvodu.

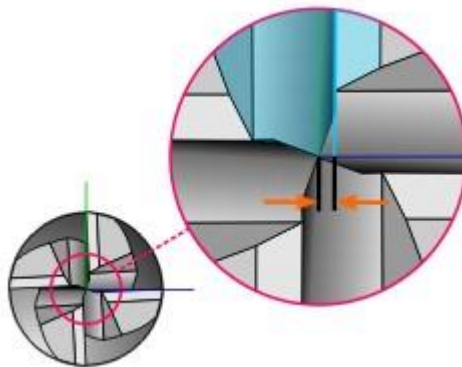
1. první úhel hřbetu na čele, 2. druhý úhel hřbetu na čele, 3. první úhel hřbetu na obvodu,
4. druhý úhel hřbetu na obvodu.

5.2.3 Stanovení konfigurace břitů na čele

Břity na čele mohou mít velké množství konfigurací (obr. 5.6), které vychází opět z následné aplikace nástroje. V případě, že nástroj bude určen pro zavrtávání, tedy posuv do materiálu v ose nástroje, je nutné se vyvarovat nulové řezné rychlosti v_c . Tento případ může nastat, pokud jeden nebo více břitů na čele prochází osou nástroje. Z tohoto důvodu je nutné najít optimální řešení, kterým je povětšinou jeden břit přes střed nástroje u nástrojů s lichým počtem břitů a dva břity přes střed v případě nástroje se sudým počtem břitů. V prvním případě je však řešení účinné pouze pokud je břit od osy nástroje odsazen o cca 0,1 – 0,2 mm (obr 5.7).



Obr. 5.6 Vybrané varianty konfigurace břitů na čele nástroje.



Obr. 5.7 Odsazení středového břitu od osy nástroje.

5.3 Volba optimálních brousících kotoučů

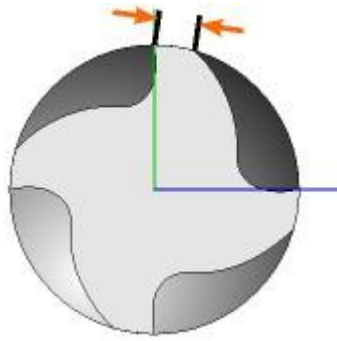
Správná volba brousících kotoučů ovlivňuje proces výroby z mnoha hledisek. Aplikace vhodných brousících kotoučů pak vede ke zkrácení jednotkových strojních časů, zlepšení kvality obrobeného povrchu, zvýšení stability procesu v případě sériové výroby, ale i ke zpřesnění geometrie nástroje.

Příkladem, kdy správná volba brousících kotoučů vede ke zkrácení jednotkového strojního času, jsou hrubovací operace. Zde se projevují vlivy jak zrnitosti, tak i rozměru brousícího kotouče. Při hrubovacích operacích je vždy cílem odebrat co nejvíce materiálu z polotovaru za co nejkratší časový úsek.

Při strategii zapíchnutí a následné rotace osy A má při použití kotouče 1A1 velmi významný vliv šířka zvoleného kotouče, od kterého se pak odvíjí nutný počet zapíchnutí a následně i strojní čas. Příkladem je hrubování profilu frézy o průměru 8,5 mm z polotovaru o průměru 10 mm a délce břitu 20 mm. Použití kotouče o šířce 10 mm místo kotouče o šířce 6 mm vede ke zkrácení času operace o bezmála 3 minuty.

Naopak použití správné směsi a zrnitosti brousícího kotouče umožňuje zrychlení posuvových rychlostí při zachování či snížení zatížení vřetene a také lze snížit míru zanášení brusné vrstvy a tím i nutnost oživování brousícího kotouče. Příkladem takového zefektivnění může být použití brousícího kotouče Tyrolit Basic namísto Tyrolit XP-P. Touto záměnou došlo při výrobě tří-břité frézy o průměru 1,8 (viz kap. 4.1.3) k možnosti zvýšení posuvové rychlosti ze $180 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ na $550 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, čímž došlo ke zkrácení doby hrubovací operace o 91 sekund, tedy přesně na polovinu původního času.

Dále je vhodná aplikace kotoučů s ohledem na charakter a rychlost jejich opotřebení. Lze tak docílit vyšší stability procesu. Tento případ nastává často při broušení drážek u fréz a vrtáků, kde je vhodné zvážit aplikaci kotouče 1A1 nebo 1V1. Kotouč 1A1 je vhodný pro broušení drážek hrubozubých nástrojů, kde je dostatečný prostor pro zábřít, tedy součet šířek úhlů hřbetu na obvodu nástroje (obr 5.8). Tento typ kotouče nemá žádné zkosení, díky čemuž není zátěži vystavena žádná ostrá hrana. Ostré hrany kotoučů jsou vždy předmětem nejrychlejšího a nejvýraznějšího opotřebení.



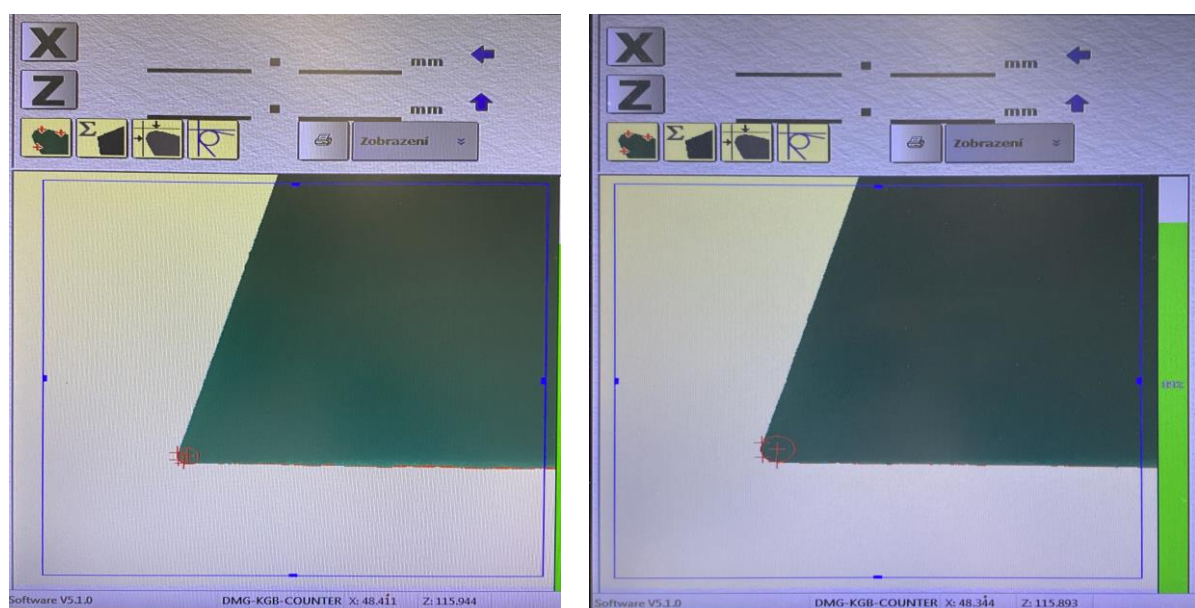
Obr. 5.8 Definice zábřitu a jeho šířky.

Naopak kotouče 1V1 lze efektivně využít v případě jemnozubých fréz nebo fréz s malými průměry. Zkosení kotouče napomáhá dosažení požadované hloubky drážky a zároveň i šířky zábřitu. Nevýhodou je rychlejší opotřebení ostré hrany kotouče, což do procesu vnáší odchylky. Je tedy nutné při návrhu technologie brát ohled na sériovost výroby a hledat kompromis mezi stabilitou a rychlostí výrobního procesu.

5.4 Stabilita výrobního procesu v závislosti na opotřebení brousících kotoučů

Brousící kotouče aplikované ve všech výrobních procesech jsou určeny výhradně pro obrábění slinutých karbidů. Jsou tedy tvořeny nejčastěji duralovým jádrem, na které je nanášena brusná vrstva skládající se z brusných zrn syntetického diamantu. Tato zrna jsou spojena hybridním pojivem. Hybridní pojivo je kombinací pojiva pryskyřičného a kovového a využívá kladné charakteristiky obou z nich.

Přesto však dochází k jejich opotřebení, které se projevuje nejen změnou parametrů rozměrových, ale i geometrických. U rozměrových parametrů se nejčastěji mění (zmenšuje) průměr kotouče a jeho délka neboli odstup v ose Z. Opotřebení z hlediska geometrie tvaru kotouče se projevuje nárůstem rohového rádiusu brusné vrstvy, což znázorňuje obr. 5.9.



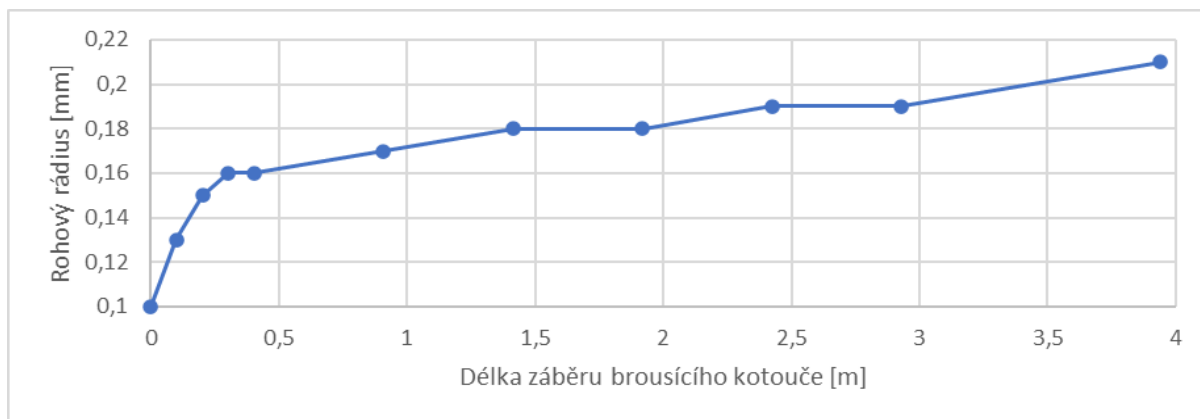
Obr. 5.9 Nárůst rohového rádiusu kotouče 1V1 vlivem opotřebení.

Rychlost opotřebení je velmi výrazně ovlivněna použitými řeznými podmínkami. Jejich optimalizací je možné velmi výrazně ovlivnit a prodloužit oblast použitelnosti kotouče před nutností jeho orovnění. Rychlost opotřebení však není přímo úměrná délce záběru kotouče. Tímto parametrem se rozumí součet všech drah, kdy je kotouč v řezu.

Obecně lze konstatovat, že míra opotřebení nástroje po orovnění narůstá velmi rychle a následně se tato rychlost snižuje. Tohoto poznatku je vhodné využívat a počítat s ním při návrhu technologie. Např. pro sériovou výrobu je vhodné aplikovat kotouče, jejichž opotřebení je těsně za hranicí nejrychlejšího opotřebovávání v oblasti relativní stability řezné hrany viz graf 5.1.

Data zpracovaná v grafu 5.1 byla získána měřením kotouče na optickém měřidle DMG MORI UNO 20140 Microset při výrobě pěti-břitého nástroje s hloubkou drážky 1,07 mm za řezných podmínek $v_c = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $v_f = 60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Délka záběru odpovídající jednomu vyrobenému kusu je 0,101 m.

Graf 5.1 Závislost opotřebení rohového rádiusu na délce záběru brousícího kotouče 1V1.



Mezním opotřebením kotouče 1V1 v případě sériové výroby tří-břité frézy z kap. 4.1.3 je rohový rádius 0,28 mm. Při větším opotřebení již nelze docílit požadovaných parametrů hloubky drážky a úhlu čela drážky. Software Helitronic Tool Studio tuto skutečnost zohledňuje a generuje chybové hlášení „Pozice kotouče pro drážku nenalezena“. Je tedy nutné orovnění kotouče.

Podobný princip opotřebovávání kotoučů platí u všech typů a tvarů brousících kotoučů. Komplexně je tedy nalezení optimálních podmínek z hlediska stability procesu sériové výroby do značné míry závislé na zkušenostech a znalostech programátora, případně obsluhy stroje.

5.5 Stanovení řezných podmínek v závislosti na sériovosti výroby

Ke správnému stanovení řezných podmínek je nutné zhodnotit aspekty, které následně ovlivní výrobní proces, případně kvalitu vyráběného nástroje. Jedním z nejvýrazněji ovlivňujících aspektů je zde samotná velikost obrobku. Důvodem je, že se realizuje vždy větší úběr materiálu např. při broušení drážky pro třísky. Zde je nutné vzhledem k výrazně většímu průřezu třísky snížit posuvovou rychlost v_f , čímž lze předejít jak přetížení vřetene stroje, tak i poškození, či nadměrnému opotřebením brousícího kotouče. Dalším aspektem je samotný výkon stroje, avšak stroj Walter Helitronic Vision 400L disponuje poměrně vysokým výkonem vřetene (špičkový výkon 33 kW), tudíž je nutné respektovat spíše vlastnosti aplikovaných brousících kotoučů. Těmi jsou např. tvar, velikost, zrnitost, typ pojiva, konstrukce jádra apod.

Cílem stanovování řezných podmínek pro kusovou výrobu je vždy minimální opotřebení brousícího kotouče. Tímto způsobem lze docílit vyšší efektivity práce. V případě, že obsluha stroje volí příliš náročné řezné podmínky, dochází k velmi rychlému opotřebení brousícího kotouče. Ačkoli tak lze zkrátit jednotkový strojní čas v řádech sekund, či jednotek minut, je pak nutné orovnání, zaměření a kalibrace kotouče, kdy tento pracovní úkon trvá nejméně půl hodiny. Proto je vhodné využít např. funkce Adaptive Control a stanovit tak horní mez zatížení vřetene, jejíž hodnota je závislá na vlastnostech aplikovaného brousícího kotouče.

V případě sériové výroby je vhodné vycházet z řezných podmínek kusové výroby. Monitorováním výrobního procesu pak lze upravovat posuvové rychlosti. Ukazatelem pro možnost zvýšení posuvových rychlostí může být např. zatížení vřetene, případně rychlost opotřebení jednotlivých brousících kotoučů. V případě, že se opotřebení neprojevuje, je možné zvýšit posuvovou rychlost, v opačném případě tuto rychlost snižujeme, případně zvažujeme přidání hrubovací operace.

6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V případě rozhodování o nákupu nového stroje vždy hraje velmi významnou roli ekonomické hledisko, jehož vyhodnocení dále ovlivňuje nejen zda bude stroj pořízen, ale také jaký konkrétní stroj je možné koupit. Olomoucká firma se zabývá také obráběním těžkoobrobitelných slitin, s jejichž obráběním je spojena také vysoká spotřeba nástrojů, zejména fréz. Z tohoto důvodu byla již v roce 2013 zakoupena nástrojová CNC bruska ISOG S20+.

Tento stroj je díky svým výkonovým parametrům jako je výkon vřetene 7 kW vhodný zejména pro přestřování a výrobu nástrojů o malém průměru. Postupem času však tento stroj přestal být dostačující, a to hned z několika důvodů. Největším nedostatkem pro obsluhu stroje byl software, který oproti současnému poskytoval velmi špatnou zpětnou vazbu pro programátora a nebylo možné vytvářet tvarové nástroje. Při kusové výrobě se tento fakt projevoval velmi negativně, protože odladění poměrně jednoduchého nástroje trvalo o mnoho déle než se softwarem současným, a navíc s sebou neslo časté vyrobení zmetků. V případě výroby nástrojů s větším průměrem 10 mm se projevoval nedostatečný výkon vřetene [12].

Velmi výrazným nedostatkem zejména pro zajištění nástrojů pro oblast vývoje byla absence možnosti broušení tvarových nástrojů. Oblast vývoje je však často velmi výrazně ovlivněna včasným dodáním různých tvarových, či jinak charakteristických nástrojů, které nejsou ve standardním sortimentu dodavatelů nástrojů pro obrábění. Zakázková výroba takových nástrojů pak trvá řádově týdny a jejich cena je velmi vysoká.

Díky těmto nedostatkům bylo vedením firmy rozhodnuto o nákupu nového stroje. Po nabídkách výrobců ISOG, Saacke a Walter byl dohodnut nákup stroje od třetího zmíněného výrobce. Hlavními důvody byla cena stroje v požadované konfiguraci a dostupnost servisních zákroků. Pokud totiž firma vlastní stroj, který produkuje nástroje pro další stroje, vyrábějící konečný produkt, vzniká v případě poruchou způsobené odstávky riziko zastavení velké části výroby. Výhodou firmy Walter je tak dostupnost servisních techniků i náhradních dílů v Kuřimi.

Z ekonomického hlediska je výhodné výrobu automatizovat. Proto bylo rozhodnuto o nákupu stroje s robotickým zakladačem. Díky tomu je možné stroj vytížit na mnohem delší časový úsek, než je pracovní doba obsluhy stroje. V době nepřítomnosti obsluhy, kdy zařízení pracuje v automatickém režimu, jsou tedy náklady na lidské zdroje nulové.

Provoz CNC nástrojové brusky ve firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. lze tedy považovat za dvousměnný z hlediska doby provozu stroje a jednosměnný z hlediska přítomnosti obsluhy. Veškeré následující výpočty budou vztaženy k tomuto charakteru provozu za předpokladu 100% vytížení. Data výpočtu reálného měsíčního pracovního fondu pro CNC nástrojovou brusku obsahuje tab. 6.1.

Tab. 6.1 Výpočet hodinového pracovního fondu.

Pracovní fond	2. směnný provoz stroje / 1. směnný fond operátora
Roční hodinový pracovní fond [h]	3766
Svátky / dnů v roce [den]	11
Měsíční hodinový pracovní fond [h]	313,83
Měsíční časový fond údržby [h]	16
Měsíční časový fond oprav [h]	8
Dovolená / měsíc [h]	40
Teoretická nemocnost / měsíc [h]	20
Reálný pracovní fond / měsíc [h]	229,83

Nevýhodou automatizovaného provozu je, že v případě nepřítomnosti operátora na směně se tento fakt projeví odstávkou stroje o délce dvou směn. Z tohoto důvodu byly v tabulce odečteny hodnoty teoretické délky dovolené a nemoci pro případ dvou operátorů.

Dalším aspektem, výrazně vstupujícím do následného výpočtu hodinové sazby stroje, jsou režijní náklady. Tím se rozumí náklady, které nelze konkrétně přiřadit jednotlivým strojům, případně jiným jednotkám produkce. Proto se rozpočítávají na jednotlivá střediska, tedy např. výrobní středisko, středisko administrativy apod. Střediska výroby se dále dělí na jednotlivé buňky. Těmi rozumíme např. buňky soustružnické, buňky frézovací, buňky elektroerozivního obrábění apod. Režijní náklady se rozpočítávají dle plochy, kterou jednotlivé buňky zaujímají vzhledem k celkové rozloze výrobních prostor. Výpočet podílu plochy připadající pro CNC nástrojové broušení zachycuje tab. 6.2.

Tab. 6.2 Výpočet podílu plochy buňky pro CNC nástrojové broušení.

Celková plocha výrobního střediska [m ²]	2276
Plocha buňky pro CNC nástrojové broušení [m ²]	119,783
Počet výrobních strojů v buňce [-]	1
Procentuální podíl plochy pro CNC nástrojové broušení [%]	5,26

V případě známého podílu plochy buňky CNC nástrojového broušení a celkových režijních nákladů na středisko výroby lze vypočítat režijní náklady připadající na konkrétní buňku výroby. Tento výpočet je znázorněn v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Výpočet režijních nákladů pro buňku CNC nástrojového broušení.

Celkové roční režijní náklady na středisko výroby [Kč]	15 054 367
Celkové měsíční režijní náklady na středisko výroby [Kč]	1 254 531
Procento režijních nákladů připadající na buňku CNC nástrojového broušení [%]	5,26
Celkové roční režijní náklady na buňku CNC nástrojového broušení [Kč]	792 335
Celkové měsíční režijní náklady na buňku CNC nástrojového broušení [Kč]	66 028

Významným faktorem, vstupujícím do výsledné hodinové sazby stroje je také pořizovací cena stroje, případně jeho splátka, cena předpokládaných oprav, cena na pořízení nového stroje po skončení odpisů apod. Tato část výpočtu je obsažena v tab. 6.4.

Tab. 6.4 Výpočet sumy režijních nákladů na provoz stroje.

Cena stroje po odečtení dotací [Kč]	7 109 083
Procento z ceny stroje na případné opravy [%]	2
Procento z ceny stroje na případné opravy [Kč]	142 182
Procento z ceny stroje na pořízení nového stroje [%]	0
Roční výše splátek úvěru na pořízení stroje [Kč]	1 401 300
Procentuální podíl režijních nákladů na středisko [Kč]	792 335
Suma režijních nákladů na provoz stroje [Kč]	2 335 817

Ve výše uvedené tab. 6.4. si lze povšimnout nulové sazby pro pořízení nového stroje. Důvodem je splacení úvěru na stroj, který bude splacen výrazně dříve, než byly stanoveny odpisy na stroj, tedy 10 let. Po splacení úvěru lze tedy částku splátek převést právě na finanční prostředky k pořízení nového stroje.

Do výpočtu hodinové sazby je samozřejmě nutné zahrnout také náklady na lidské zdroje. Ty zahrnují náklady personální, které se skládají ze mzdy, nákladů na školení pracovníků, dále pak pracovní oblečení, ochranné pomůcky apod. Dále tyto náklady zahrnují také sociální a zdravotní pojištění. Souhrn a výpočet těchto nákladů je v tab. 6.5.

Tab. 6.5 Výpočet nákladů na lidské zdroje.

Počet pracovníků [-]	1
Personální náklady [Kč]	33 487
Roční hrubá mzda [Kč]	404 498
Roční náklady na sociální pojištění (25 %) [Kč]	100 696
Roční náklady na zdravotní pojištění (9 %) [Kč]	36 405
Celkové náklady na lidské zdroje za rok [Kč]	575 086

V konečné fázi výpočtu výpočtem podílu celkových režijních nákladů a hodinového pracovního fondu získáme hodinovou sazbu stroje. Podíl celkových nákladů na lidské zdroje a hodinového fondu obsluhy stanovuje hodinovou sazbu operátora. Součtem těchto veličin získáváme celkovou hodinovou sazbu stroje, dle které lze dále rozhodovat o ekonomičnosti celého procesu. Konečný výpočet výsledné hodinové sazby stroje zahrnuje tab. 6.6.

Tab. 6.6 Konečný výpočet hodinové sazby stroje.

Měsíční hodinový pracovní fond [hod]	229,83
Režijní náklady na měsíční provoz stroje [Kč]	194 651
Hodinová sazby stroje [Kč]	847
Hodinová sazba operátora [Kč]	209
Celková hodinová sazba stroje [Kč]	1055
Celková minutová sazba stroje [Kč]	17,59
Celková teoretická minutová sazba stroje pro 10% zisk [Kč]	19,35
Celková teoretická minutová sazba stroje pro 20% zisk [Kč]	21,11
Celková teoretická minutová sazba stroje pro 30% zisk [Kč]	22,87
Celková teoretická minutová sazba stroje pro 40% zisk [Kč]	24,63

Hodnoty v tab. 6.6 jsou rozhodující při stanovení ekonomičnosti výrobního procesu. V praxi je však nutné připočítat také cenu polotovaru a také cenu brousících kotoučů, tuto sumu je vhodné stanovit vždy individuálně pro každou výrobní sérii z důvodu odlišnosti cen polotovarů, míry opotřebení brousících kotoučů apod.

Následující odstavce budou věnovány konkrétnímu zhodnocení procesu sériové výroby tří-břité frézy z kap. 4.1.3. Předpokladem bude vyhotovení výrobní série šesti set kusů, což odpovídá jednomu pracovnímu týdnu provozu stroje ve výše popsaném režimu.

Tab. 6.7 parametry vstupující do výrobního procesu.

Výrobní série [ks]	600
Počet polotvarů [ks]	300
Cena polotovarů [Kč]	15 048
Hodinová sazba stroje [Kč]	1055
Celkový strojní čas výroby [hod]	80
Poměrné náklady na procesní kapalinu Ölheld Sintogrind TTK [Kč]	2 495
Poměrné náklady na brousící kotouče [Kč]	1 525

Údaje v tab. 6.7 byly stanoveny na základě výrobní série, kdy počet a cena polotovarů vychází z konkrétní obsáhlosti výrobní série. Z důvodu ekonomičnosti jsou tyto nástroje vyráběny oboustranně, čímž lze docílit snížení nákladů na polotovary na polovinu při zachování 100% funkčnosti. Data jako jsou náklady na procesní kapalinu a brousící kotouče byly stanoveny z průměrné životnosti daného elementu a přepočteny na základě doby trvání výroby série na tento časový úsek. Konkrétně byl tedy stanoven průměrný interval výměny

procesní kapaliny na 2 roky s celkovou cenou 172 000. Taktéž průměrná životnost brousícího kotouče byla stanovena na 1 rok s průměrnou cenou 10 500 Kč za kus, což při aplikaci pěti brousících kotoučů na výrobní dávku odpovídá ceně uvedené v tab. 6.7.

Tab. 6.8 Jednotkové ceny elementů procesu a celková cena jednoho nástroje.

Jednotková cena polotovaru [Kč]	25,1
Jednotkový strojní čas [min]	7,3
Minutová sazba stroje [Kč]	17,59
Jednotkové náklady na procesní kapalinu Ölheld Sintogrind TTK [Kč]	4,16
Jednotkové náklady na brousící kotouče [Kč]	2,54
Suma nákladů na výrobu jednoho nástroje [Kč]	160,2

Výše vypočtenou cenu nástroje 160,2 Kč lze hodnotit příznivě a posoudit tak proces jako ekonomicky výhodný. Pro srovnání cen bylo provedeno srovnání s nástroji nabízenými na českých webových e-shopech, přičemž nejlevnější obdobný nástroj zde byl nabízen za cenu 229 Kč s povlakováním TiAlN. Naopak renomovaný výrobce nástrojů WNT ve svém katalogu u obdobného povlakovaného nástroje uvádí cenu 1 487 Kč. Další variantou ekvivalentního nástroje by mohla být fréza od výrobce SecoTools s cenou 1 228 Kč [13,14,15].

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zaměřeni se na nedostatky technologie výroby nástrojů při použití stroje ISO G S20+ a dále se znalostmi těchto nedostatků pracovat při návrhu nové, efektivnější technologie výroby. V první části tedy byl rozebrán stav a požadavky výroby. Další část byla věnována technice využití pro vlastní produkci nástrojů. Co se týče výrobního zařízení, byly přiblíženy spíše ty vlastnosti, které lze efektivně využít při výrobě. Takovým prvkem je např. funkce Adaptive Control, kterou lze využít v široké škále případů a její přínos je velmi výrazný, protože se tak lze vyhnout zbytečnému opotřebování brousících kotoučů a následnému zdlouhavému ovrhávání. Přesto však lze docílit maximální efektivity.

Cíl práce týkající se zefektivnění výrobního procesu se podařilo splnit s dobrými výsledky, a to hlavně díky kompletní změně technologie hrubování. V prvním kroku byly dvě oddělené operace hrubování profilu nástroje a osazení krčku brousícím kotoučem 1A1 spojeny do jediné operace s aplikací brousícího kotouče 1M1, což přineslo časovou úsporu.

V druhé fázi návrhu technologie byl aplikován brousící kotouč 1M1 řady Tyrolit Basic, čímž bylo díky odlišné zrnitosti zamezeno zanášení brusné vrstvy a tím zvyšování zatížení vřetene. Díky tomu bylo možné výrazně zvýšit posuvovou rychlost při hrubování profilu nástroje. Výsledkem je zkrácení strojního času hrubovací operace na polovinu času původního.

Dále byla pro tento typ nástroje stanovena technologie s aplikací vhodných brousících kotoučů a řezných podmínek pro sériovou výrobu. Řezné podmínky byly tedy stanoveny s ohledem na vysokou stabilitu procesu. Důraz byl kladen zejména na minimální úběr materiálu z polotovaru při dokončovacích operacích, což napomáhá snížení řezné síly a opotřebením brousícího kotouče.

Díky takto stanoveným technologickým podmínkám bylo možné efektivně využít robotický zakladač, kterým stroj Walter Helitronic Vision 400 L disponuje. Využití zakladače přineslo zefektivnění procesu a díky provozu stroje bez obsluhy také výrazné snížení celkové hodinové sazby stroje, což se projevilo na ekonomičnosti procesu.

Dále byly rozebrány technologie vybraných typů nástrojů. Zde lze vyzdvihnout jednoduchou možnost tvorby nástrojů pomocí softwaru Tool Studio, který nabízí velmi přehledné prostředí. Hlavní výhodou je oproti softwaru předešlého stroje jeho zpětná vazba pro obsluhu stroje. Software totiž vytváří komplexní pohled na vytvářený nástroj. Za předpokladu správně zaměřených a zkalibrovaných brousících kotoučů pak není žádný rozdíl mezi softwarovým modelem a fyzicky vyrobeným kusem.

Do procesu byly zařazeny nové technologické prvky. Vedle aplikace brousícího kotouče 1M1 bylo také využito kotouče 12V5, jehož využití při výrobě nástrojů s rohovým nebo plným rádiusem přineslo zvýšení geometrické přesnosti výsledného nástroje. Vedle toho je kotouč 12V5 charakterizován také velmi nízkou mírou opotřebením svého ostří, čímž jej lze označit jako vhodný pro sériovou výrobu.

Další naprosto novou oblastí možností tvorby nástrojů je výroba profilových nástrojů. Zde je velmi důležitá kvalifikace obsluhy stroje. Mnoho prvků se vyznačuje je poměrně složitým způsobem programování, což vyžaduje zkušenosti programátora. Na druhou stranu jsou profilové nástroje významným prvkem pro usnadnění, urychlení, případně realizovatelnost následného obráběcího procesu.

Při technickém hodnocení procesu byly stanoveny obecné postupy tvorby nástrojů a byl experimentálně stanoven průběh opotřebením brousících kotoučů v závislosti na délce záběru. Poznatkem tohoto zkoumání je vliv stability procesu na opotřebením kotoučů. Bylo zjištěno, že pro sériovou výrobu je vhodné využít brousící kotouče s mírou opotřebením ležící na ploché

části křivky grafu 5.1, nikoli kotouče těsně po jejich orovnání, kdy se jejich opotřebení velmi rychle zvyšuje.

Na závěr byl zhodnocen proces z ekonomického hlediska. Díky výpočtu hodinové sazby stroje byly objasněny všechny elementy promlouvající do výsledné vypočtené sumy. Bylo zjištěno, že i přes použití polotovaru vysoké kvality a stanovení řezných podmínek, které jsou vhodné pro sériovou výrobu, je cena vyrobeného nástroje výrazně nižší, než jsou ceny nástrojů od externích výrobců.

Nevýhodou je však závislost poměrně velkého počtu výrobních strojů na provozu nástrojové brusky. Je tedy vždy nutné udržovat optimálně velké skladové zásoby standardně používaných nástrojů pro případ odstávky stroje vlivem poruchy, dovolené, či nemoci jeho obsluhy.

Závěrem je vhodné zmínit, že přínos zařazení CNC nástrojové brusky mezi ostatní stroje ve firmě STERCH-INTERNATIONAL s.r.o. přineslo nejen snížení nákladů na sériově vyráběné nástroje, ale také zrychlení vývojového procesu různých oblastí vlivem možnosti pružné reakce na aktuální požadavky navazujících obráběcích procesů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Makino|Výrobce obráběcích strojů a obráběcí centra: EDBV 8 [online]. Kirchheim unter Teck: Makino, 2017 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.makino.eu/cs-cz/machine-technology/machines/edm-hole-drilling/edbv8>
 2. Makino|Výrobce obráběcích strojů a obráběcí centra: Drátové EDM [online]. Kirchheim unter Teck: Makino, 2017 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.makino.eu/cs-cz/machine-technology/machines/wire-edm>
 3. Honeywell Aerospace: Urban Air Mobility [online]. Charlotte (Severní Karolína): Honeywell International, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://aerospace.honeywell.com/en/learn/supported-platforms/urban-air-mobility?s_kwcid=AL!7892!3!396151073011!b!!g!!&qclid=CjwKCAjwrcH3BRAPeiwAxjdPTVuWfTsiXZNq-MqGMVNUpiyh_3_9nC8hVCpOUF7QvycoQVkfVspKhoCfcoQAvD_BwE
 4. Teplo a teplota řezání. HUMÁR, Anton. *Technologie I.: Technologie obrábění – 1. část* [online]. 2003. Brno, s. 30–33 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf
 5. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Úvod do teorie obrábění: Opotřebení řezných nástrojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
 6. Walter Maschinenbau GmbH. Technická dokumentace, Návod k provozu HELITRONIC VISION 400/400L, Překlad originálu návodu k obsluze, verze 2.0 Tübingen, 2018
 7. HELITRONIC VISION 400 L. *Walter Maschinenbau in Tübingen* [online]. Tübingen: Walter Maschinenbau, 2020, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.walter-machines.com/cs/stroje-pro-obrabeni-nastroju/detailni-zobrazeni/product/helitronic-vision-400-l/>
 8. GDS μGrind. *GDS Präzisionszerspanungs GmbH* [online]. Offerdingen: GDS Präzisionszerspanungs, 2020, [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://gds-praezision.de/en/produkte/gds-spanntechnik-%c2%b5grind/>
 9. Katalog brousících kotoučů TYROLIT, Schwaz, 2016
 10. Ceratizit \ Carbide grades for all requirements & price categories. *Ceratizit \ Carbide Solutions* [online]. Mamer: Ceratizit, 2020, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/en/products/rods-preforms/carbide-grades/>
 11. Nová fréza od WNT nabízí silnou geometrii s měkkým řezem. *Řezné nástroje|Nástroje na obrábění kovů|WNT* [online]. Velké Meziříčí: WNT, 2020, 13.9.2016 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/nastroje/news-nastroje/nova-freza-od-wnt-nabizi-silnou-geometrii-s-mekkym-rezem-1088.html>
 12. STREIT Richard. Centrum pro broušení nástrojů/nástrojová bruska Typ: S20: Verze S20 F31+, Překlad německého originálu návodu k obsluze, Weilheim, 2012
 13. Fréza tvrdokovová válcová 3-břítá Ø2 mm. *JK Nástroje* [online]. Podolí: JK Nástroje, 2018, 2018 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://jk-nastroje.cz/shop/valcove-frezy-3-brite-45/13-freza-tvrdokovova-valcova-3-brita-o-2-mm.html>
 14. Katalog nástrojů WNT Mastertool, Velké Meziříčí, 2016.
-

-
15. 170020-MEGA-64. *Seco Tools - Řešení pro obrábění kovů* [online]. Fagersta (Švédsko): Seco Tools, 2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02452924?pf=true

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA	VÝZNAM	PŘEKLAD
NC	Numeric Control	Číslicové řízení
CNC	Computer Numeric Control	Číslicové řízení počítačem
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované navrhování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba
PC	Personal Computer	Osobní počítač

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
v_f	Posuvová rychlost	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_c	Řezná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
t_{AS}	Jednotkový strojní čas	$[\text{s}]$
t_{VS}	Jednotkový vedlejší strojní čas	$[\text{s}]$
R_a	Drsnost povrchu	$[\mu\text{m}]$