

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie–technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním

Autor: Bc. **Martin NEPRÁŠEK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Neprášek	Martin
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie - technologie obrábění“	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM		TEXTOVÁ ČÁST		GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	--	---------------------	--	----------------------	--

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá vývojem nových nástrojů pro přesnou výrobu otvorů metodou vystružování. V první části práce je zhodnocen současný stav výroby otvorů z technologického hlediska. Dále jsou zde popsány faktory, které mohou výrobu negativně či pozitivně ovlivňovat. A v druhé části (tedy praktické) je zkoumán vliv jednotlivých faktorů na kvalitu a produktivitu vystružování. Pro vybrané faktory byl navrhnuty experiment, který bohužel nebylo možné z nedostatku zkušebních vzorků, prototypů nástroje a času uskutečnit.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Vystružování, definovatelné faktory, nedefinovatelné faktory, jemné soustružení a frézování, vrtání, vyvrtávání, protahování, broušení, dokončovací operace, párová analýza, multikriteriální hodnocení.</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Neprášek	Martin	
FIELD OF STUDY	N2301 „ Manufacturing process – Technology of metal cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Technology of high-precision reaming		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of Machining Technology	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY		TEXT PART		GRAPHICAL PART	
----------------	--	------------------	--	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The diploma thesis deals with development of new tools for accurate hole production by method of reaming. There is evaluated common state of hole production from the point of view of technology in the first part. Next there are described factors which can negatively or positively influence the production. In the second part (practical) there is researched the impact of individual factors on quality and productivity of reaming. The experiment was projected for selected factors but it was not possible to realize because of the lack of testing samples, prototypes and time.</p>
KEY WORDS	<p>Reaming, definable factors, undefined factors, turning, milling, drilling, boring, broaching, grinding, finishing operation, paired analysis, multi-criteria evaluation.</p>

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D a Ing. Josefu Skleničkovi za cenné připomínky a odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat firmě Ham-Final s.r.o., která mi poskytla mnoho materiálů, praktických ukázek a cenných rad, které jsem mohl při vypracování této diplomové práce použít.

Tato diplomová práce vznikla za podpory Technologické agentury ČR (TAČR) v rámci řešení projektu reg.č.:TA02010236 "Výzkum a vývoj vysoce přesných produktivních řezných nástrojů nové generace s využitím inovativních technologií a progresivních materiálů" a dále za podpory projektu ESF OP VpK "Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052", který napomohl při propojení výstupů diplomové práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

Obsah

1 Úvod	1 -
1.1 Představení spolupracující firmy	1 -
2 Charakteristika současného stavu výroby přesných otvorů – technologické hledisko ..	2 -
2.1 Požadavky kladené na přesné otvory	2 -
2.1.1 Úchyly rozměrů	2 -
2.1.2 Geometrické úchyly	2 -
2.1.3 Parametry struktury povrchu	4 -
2.1.4 Vlastnosti povrchové vrstvy	5 -
2.1.5 Shrnutí kapitoly 2.1	7 -
2.2 Výrobní metody velmi přesných otvorů	7 -
2.2.1 Jemné soustružení	7 -
2.2.2 Jemné frézování	8 -
2.2.3 Vrtání	9 -
2.2.4 Vyvrtávání	10 -
2.2.5 Protahování, protlačování	11 -
2.2.6 Broušení	12 -
2.2.7 Další dokončovací operace	13 -
2.2.8 Vystružování	15 -
2.2.9 Drsnost a přesnost otvorů	16 -
2.2.10 Produktivita a trvanlivost	16 -
2.2.11 Přídavky na obrábění	16 -
2.2.12 Řezné podmínky	17 -
2.2.13 Možnosti použití	18 -
2.2.14 Chyby při vystružování	20 -
2.2.15 Typy a zásady pro vystružování	22 -
3 Specifikace definovatelných a nedefinovatelných faktorů technologického procesu vystružování a jejich míra vlivu na kvalitu a produktivitu vystruženého otvoru	24 -
3.1 Definovatelné faktory	24 -
3.1.1 Řezné podmínky	24 -
3.1.2 Geometrie břitu	26 -
3.1.3 Procesní prostředí	26 -
3.1.4 Materiál nástroje	28 -
3.1.5 Materiál obrobku	28 -
3.1.6 Velikost přídavku a kvalita výchozího otvoru	29 -
3.1.7 Druh nástroje	30 -

3.1.8	Způsob upnutí nástroje.....	- 30 -
3.1.9	Způsob upnutí obrobku	- 31 -
3.1.10	Způsob upnutí vyměnitelných destiček.....	- 31 -
3.1.11	Tvar vystružované díry.....	- 31 -
3.1.12	Přívod řezné kapaliny k místu řezu.....	- 32 -
3.1.13	Stabilita řezného prostředí	- 33 -
3.2	Nedefinovatelné faktory.....	- 33 -
3.2.1	Nehomogenita obráběného materiálu.....	- 33 -
3.2.2	Nehomogenita materiálu nástroje	- 33 -
3.2.3	Nehomogenita řezné kapaliny.....	- 33 -
3.2.4	Stárnutí materiálu.....	- 33 -
3.2.5	Tuhost soustavy S-N-O.....	- 34 -
3.2.6	Opotřebení břitu.....	- 34 -
4	Hodnocení vlivů faktorů a definovat podmínky pro vysoce přesné a produktivní obrábění	- 35 -
4.1	Multikriteriální hodnocení.....	- 35 -
5	Experimentální testování vlivů vybraných faktorů na kvalitu a produktivitu vystružování určenými prototypovými výstružníky	- 38 -
5.1	Charakteristika experimentu	- 38 -
5.1.1	Návrh a členění experimentu	- 38 -
5.1.2	Technická charakteristika experimentálního zařízení	- 39 -
5.1.3	Postup měření	- 41 -
5.2	Vyhodnocení experimentální části	- 44 -
6	Technicko-ekonomické hodnocení	- 50 -
7	Závěr	- 51 -
8	Použitá literatura	- 52 -

Seznam obrázků

Obr. 1 Znázornění geometrické úchylky [9]	- 3 -
Obr. 2 Toleranční pole kruhovitosti (a) a válcovitosti (b) [12]	- 4 -
Obr. 3 Profil povrchu [12]	- 4 -
Obr. 4 Parametry drsnosti Ra a Rz [12]	- 5 -
Obr. 5 Průběhy tahových a tlakových napětí po broušení [15]	- 6 -
Obr. 6 Zpevňování povrchové vrstvy [16]	- 6 -
Obr. 7 Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě [15]	- 7 -
Obr. 8 Vnitřní jemné soustružení [2]	- 7 -
Obr. 9 Jemné frézování válcové plochy spirálovou interpolací [7]	- 8 -
Obr. 10 Monolitní vrtáky ze slinutých karbidů [2]	- 9 -
Obr. 11 Vyvrtávání otvorů [2]	- 10 -
Obr. 12 Kulaté protahovací trny [6]	- 11 -
Obr. 13 Broušení vnitřních otvorů [4]	- 12 -
Obr. 14 Vyhlazování diamantovým kuželem vnější a vnitřní plochy [16]	- 15 -
Obr. 15 Požadavky kladené na vystružované otvory	- 16 -
Obr. 16 - Blok motoru [18]	- 18 -
Obr. 17 Použití výstružníků při implantaci kloubní náhrady [17]	- 19 -
Obr. 18 - Hudební průmysl [19]	- 19 -
Obr. 19 Schéma utváření třísky [20]	- 25 -
Obr. 20 Průběhy řezných sil v závislosti na řezných podmínkách [21]	- 25 -
Obr. 21 - Druhy vystružovaných děr	- 32 -
Obr. 22 - Vhodné podmínky pro chlazení [23]	- 32 -
Obr. 23 Vliv teploty a doby stárnutí na pevnost v tahu duralu AlCu4Mg1 [22]	- 34 -
Obr. 24 Schematické znázornění experimentu	- 39 -
Obr. 25 Prototypový výstružník s pájenou cermetovou destičkou	- 40 -
Obr. 26 Upnutí zkušební vzorku na pracovním stole stroje	- 40 -
Obr. 27 Průběh vrtání otvorů	- 41 -
Obr. 28 Naznačený směr a pořadí vystružovaných otvorů	- 42 -
Obr. 29 Znázornění měření otvorů	- 42 -
Obr. 30 Vzduchové měřidlo s (vlevo) a bez vymezovacího válečku (vpravo)	- 43 -
Obr. 31 Opotřebení na čele výstružníku	- 43 -
Obr. 32 Opotřebení na hřbetu výstružníku	- 44 -
Obr. 33 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm	- 45 -
Obr. 34 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm	- 46 -
Obr. 35 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm	- 46 -
Obr. 36 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm	- 46 -
Obr. 37 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm	- 47 -
Obr. 38 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm	- 47 -
Obr. 39 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm	- 47 -
Obr. 40 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm	- 48 -
Obr. 41 Závislost průměru na celkovém počtu vystružených děr v hloubce 3 mm	- 48 -
Obr. 42 Závislost průměru na celkovém počtu vystružených děr v hloubce 22 mm	- 49 -
Obr. 43 - Řezné materiály - specifikace posuvové a řezné rychlosti	VII
Obr. 44 - Rozsah použití [10]	XVI
Obr. 45 - Závislost tvrdosti a houževnatosti polykrystalických diamantů [10]	XVI

Obr. 46 - Závislost řezné rychlosti na náročnosti operace [10]	XVII
Obr. 47 - Mechanické vlastnosti CVD povlaků [10]	XVIII
Obr. 48 - Detail krystalů diamantu [2]	XXII
Obr. 49 - Závislost tvrdosti na odolnosti proti opotřebení [3]	XXV

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tolerance tvaru	- 3 -
Tabulka 2 Tolernace polohy	- 3 -
Tabulka 3 - Používané přídavky	- 17 -
Tabulka 4 - Řezné podmínky pro výstružník VRV s povlakem i bez	- 17 -
Tabulka 5 - Překročení průměru díry	- 20 -
Tabulka 6 - Kuželová díra	- 20 -
Tabulka 7 - Kuželová díra	- 20 -
Tabulka 8 - Špatná kruhovitost díry	- 21 -
Tabulka 9 - Špatná kvalita povrchu	- 21 -
Tabulka 10 - Podélné drážky	- 21 -
Tabulka 11 - Chvění při obrábění	- 22 -
Tabulka 12 - Nárůstky na vodících ploškách	- 22 -
Tabulka 13 - Párová analýza - porovnání jednotlivých kritérií	- 35 -
Tabulka 14 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování	- 36 -
Tabulka 15 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování	- 36 -
Tabulka 16 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování	- 37 -
Tabulka 17 - Hodnocení vlivu nedefinovatelných faktorů na vystružování	- 37 -
Tabulka 18 - Vzor zaznamenávání hodnot	- 44 -
Tabulka 19 - Řezné podmínky pro zkušební vzorek č. 1	- 44 -
Tabulka 20 - Řezné podmínky pro zkušební vzorek 2, 3 a 4	- 45 -
Tabulka 21 - Možnosti použití [1]	XIX
Tabulka 22 - Vlastnosti a použití Ceradite PKD [2]	XXI
Tabulka 23 - Porovnání série IPD a ISD [3]	XXIII
Tabulka 24 - Vlastnosti a použití ISD [3]	XXIII
Tabulka 25 - Vlastnosti a použití IBN [3]	XXIV
Tabulka 26 - Vlastnosti a použití IBN [3]	XXIV
Tabulka 27 - Vlastnosti a použití IMP [3]	XXV
Tabulka 28 - Vlastnosti a použití IPOL [3]	XXV
Tabulka 29 - Vlastnosti série IBON [3]	XXVI
Tabulka 30 - Materiály vhodné pro vystružování otvorů	XXVII
Tabulka 31 - Párová analýza - porovnání vybraných kritérií	XXVII
Tabulka 32 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál GG25	XXVIII
Tabulka 33 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál GGG60	XXIX
Tabulka 34 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 11 373.1	XXIX
Tabulka 35 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 15 246.X	XXX
Tabulka 36 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 17 240.X	XXX
Tabulka 37 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 19 312.X	XXXI
Tabulka 38 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 42 4230	XXXI
Tabulka 39 - Doporučené řezné materiály pro testování nových vystružovacích nástrojů	XXXII

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
ZČU	Západočeská univerzita
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
S-N-O	Soustava stroj-nástroj-obrobek
RO	Rychlořezná ocel
SK	Slinutý karbid
CBN	Kubický nitrid boru
CVD	Polykrystalický diamantový povlak
PCBN	Polykrystalický kubický nitrid boru
PCD	Polykrystalický diamant
HRC	Tvrдость podle Rockwella
HB	Tvrдость podle Brinela

Seznam použitých symbolů a značek

Označení	Jednotky	Popis
Ra	[μm]	
Rz	[μm]	
IT	[1]	přesnost
\emptyset	[mm]	průměr
$\emptyset A_{(3)\text{min}}$	[mm]	minimální naměřený průměr v hloubce 3 mm
$\emptyset A_{(3)\text{max}}$	[mm]	maximální naměřený průměr v hloubce 3 mm
$\emptyset B_{(22)\text{min}}$	[mm]	minimální naměřený průměr v hloubce 22 mm
$\emptyset B_{(22)\text{max}}$	[mm]	maximální naměřený průměr v hloubce 22 mm
h	[mm]	hloubka zpevnění
a	[mm]	hloubka odřezávané vrstvy
r_N	[μm]	poloměr zaoblení ostří
Rm	[MPa]	mez pevnosti v tahu
Rp	[MPa]	mez pevnosti v tahu
A	[%]	tažnost
C	[%]	uhlík
Si	[%]	křemík
Mn	[%]	mangan
P	[%]	fosfor
S	[%]	síra
Cr	[%]	chrom
Ni	[%]	nikl

1 Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na efektivní výrobu, tzn., vyrábět součásti v požadované kvalitě a přesnosti při minimálních výrobních nákladech na energii, mzdy, nástroje, materiál, atd. Z těchto důvodů se výrobci snaží snižovat výrobní časy např. změnou řezných podmínek, kvalitnějším nástrojem či náhradou jedné technologie za jinou nebo zvolenou technologii zcela vypustit. Pro zhotovení velmi přesných otvorů existuje celá řada výrobních technologií, jako je jemné frézování a soustružení, broušení, lapování, vystružování apod. Všechny tyto metody mají své výhody a nevýhody, díky kterým se více či méně hodí pro daný typ otvoru. Tato diplomová práce je nejvíce zaměřena na technologii vystružování, která nabízí v dnešní době velmi široké spektrum využití s dosažením výborných přesností i kvality povrchu. V mnoha případech není ani potřeba po kvalitním vystružování otvor brousit, což je z hlediska efektivnosti výroby velmi výhodné.

Na efektivitu výroby nemá však vliv pouze zvolená metoda obrábění, existuje mnoho dalších vlivů, které mají pozitivní či negativní vliv na proces obrábění. Tyto vlivy se nazývají definovatelné a nedefinovatelné faktory. Rozdíl mezi nimi je, že definovatelné faktory je možné před nebo v průběhu výrobního procesu ovlivňovat či měnit. Nedefinovatelné faktory lze sice předvídat, ale nelze je žádným způsobem ovlivňovat. Jedná se o vlivy, které se objevují nahodile jako např., vměstky v obráběném materiálu, vady v nástroji, stárnutí materiálu, atd. Všechny tyto vlivy a jejich důsledky na proces obrábění jsou popsány v kapitole 3. Hlavním cílem této práce je však ze všech uvedených vlivů vytipovat pouze ty faktory, které větší měrou ovlivňují řezný proces. Další částí diplomové práce je experiment, ve kterém se ověří předpokládaná velikost jednotlivých vlivů na kvalitu, přesnost a produktivitu vystružování daných otvorů prototypovými výstružníky poskytnuté od firmy HAM-FINAL s.r.o..

Dalším přínosem práce je rozšíření spolupráce mezi Katedrou technologie obrábění FST na Západočeské Univerzitě v Plzni a firmou HAM-FINAL s.r.o., kterou lze řadit mezi přední výrobce pro výrobu přesných otvorů, jako jsou například vyvrtávací nástroje, výhrubníky, výstružníky, speciální nástroje na zakázku, atd. Samozřejmě je v této oblasti obrábění velká světová konkurence a neustálý tržní boj, který nutí všechny výrobce ke zlepšování svých výrobků, aby splňovaly požadavky svých zákazníků. Je zřejmé, že o úspěšném splnění požadavků zákazníka nerozhoduje pouze kvalitní stroj nebo nástroj, ale i mnoho dalších faktorů, které je potřeba při řezném procesu navolit. Proto může firma HAM-FINAL, díky svým dlouholetým zkušenostem a praktických znalostech, konkurovat firmám jako jsou například BECK, GHURING, HAM FINAL, ISCAR, MAPAL, SANDVIK CORMAT, atd..

1.1 Představení spolupracující firmy



Firma HAM-FINAL s.r.o. je německo-česká strojírenská firma a dlouholetou tradicí, která se zabývá vývojem, výrobou a prodejem moderních nástrojů pro vystružování, vyvrtávání a obrábění velmi přesných otvorů. Firma vznikla v roce 1997, kdy se spojila firma FINAL (založena 1991) a koncern HAM, GmbH (Hart metall-werkzeugfabrick andreas maier, GMBG). Díky své odhodlanosti a cílevědomosti, se může pyšnit získáním několika patentů za originální řešení nástrojů nové generace. Vynikající úroveň těchto nástrojů a technická podpora otevřela cestu k jejich uplatnění i v takových podnicích jako je ŠKODA auto, VW, GM – Opel, BOSCH, Aero, Letov, TRW, Embraco, ROTAX, RIETER a v mnoha dalších firmách v Německu, Rakousku, Itálii, Španělsku, Francii, Polsku, Švédsku, atd..

2 Charakteristika současného stavu výroby přesných otvorů – technologické hledisko

Pod pojmem přesný otvor si lze představit mnoho. V extrémních případech je možné mluvit například o přesně odlitém otvoru, který bude pro danou součást dostačující nebo v opačném extrému lze vyrobit díru například s přesností H7 a přesto nebude otvor splňovat požadavky na funkčnost součásti. Proto je část této kapitoly věnována požadavkům kladené na přesné otvory a metodám výroby, pomocí kterých se těchto požadavků docílí.

2.1 Požadavky kladené na přesné otvory

Obrobené díry jsou pro konkrétní technologické podmínky obrábění identifikovány souborem parametrů, mezi něž zejména patří[10]:

- Úchyly rozměrů
- Geometrické úchyly (úchyly tvarů a polohy)
- Parametry struktury povrchů
- Vlastnosti povrchové vrstvy

2.1.1 Úchyly rozměrů

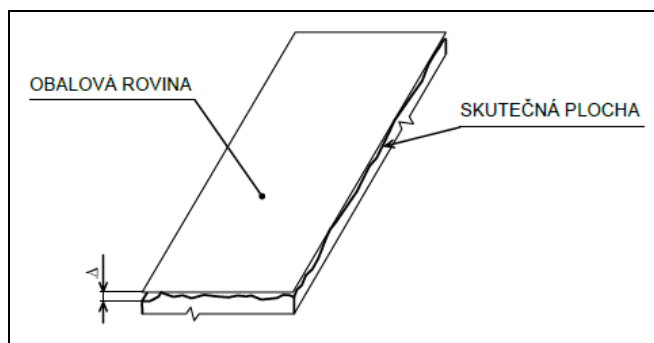
Úchylka rozměrů je dána rozdílem mezi skutečným (naměřeným) a jmenovitým (požadovaným) rozměrem díry. Jelikož žádný rozměr nelze vyrobit s absolutní přesností, jsou délkové a úhlové rozměry vyráběných otvorů tolerovány. Právě velikost tolerance rozměru udává, s jakou přesností je díra vyrobena.[10]

Polohy tolerančních polí vzhledem k jmenovitému rozměru se v lícovací soustavě ISO předepisují písmeny malé a velké abecedy. Poloha tolerančních polí děr se označuje písmeny velké abecedy (A až ZC), poloha tolerančních polí hřídelí písmeny malé abecedy (a až zc). Aby se vyhovělo požadavkům na přesnost výroby, zavádí se soustava 20 stupňů přesnosti, které se označují IT 01, IT 0, IT 1 až IT 18. Spojením písmene určujícího polohu tolerančního pole s číslicí určující toleranční stupeň dostaneme toleranční značku (např. H7, r5).[9]

Jestliže se připojí toleranční značka k jmenovitému rozměru, určí se tím číselně mezní úchyly. V lícovacích tabulkách jsou uvedeny velikosti úchylek pro různé rozměry, toleranční pole a různé stupně přesnosti.[9]

2.1.2 Geometrické úchyly

Při výrobě není možné dosáhnout přesného geometrického tvaru, stejně jako nelze dosáhnout přesného rozměru (viz kapitola 2.1.1), tím vznikají rozdíly mezi obalovou rovinou a skutečnou plochou, které jsou označovány jako geometrické úchyly. Mezi geometrické úchyly se řadí úchyly tvaru, polohy a souhrnné úchyly tvaru i polohy. Z hlediska výroby přesných otvorů jsou významné zejména úchyly tvaru a polohy.



Obr. 1 Znáznornění geometrické úchylky [9]

2.1.2.1 Úchylka tvaru

Geometrická úchylka tvaru zahrnuje úchylku přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, tvaru čáry a tvaru plochy.[10] Tyto úchylky je možné tolerovat pomocí tolerančních značek (viz Tabulka 1). U přesných otvorů se nejčastěji toleruje úchylka kruhovitosti a válcovitosti.

Tabulka 1 Tolerance tvaru

Tolerance tvaru	Tolerance přímosti	—
	Tolerance rovinnosti	
	Tolerance kruhovitosti	○
	Tolerance válcovitosti	
	Tolerance profilu podélného řezu	=

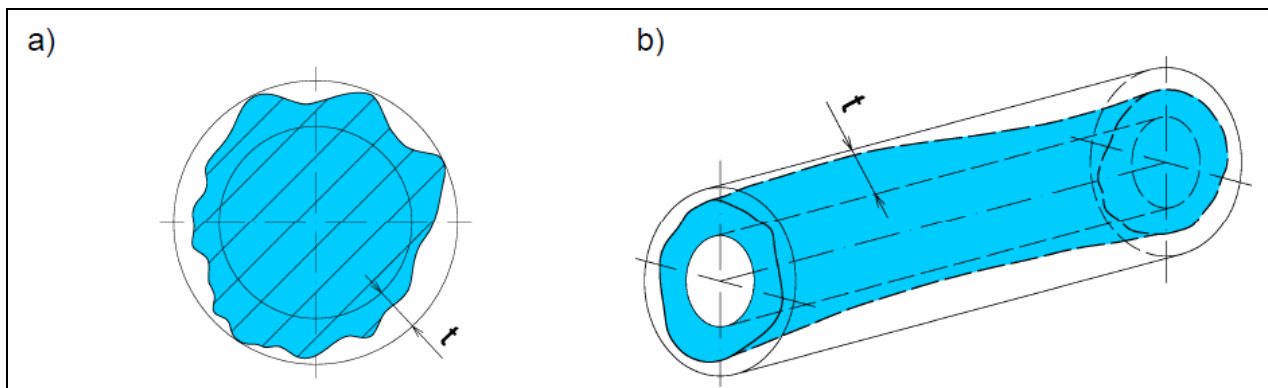
2.1.2.2 Úchylka polohy

I tyto úchylky je možné tolerovat pomocí příslušných tolerančních značek (viz Tabulka 2). Z geometrických úchylek polohy jsou z hlediska přesných děr významné zejména úchylky rovnoběžnosti, kolmosti a sousosti.[10] Tyto úchylky lze však ovlivnit dokončovacími metodami (jako např. vystružováním) jen velmi těžko, jelikož rovnoběžnost, kolmost či sousost díry vůči výchozím základnám je dána předchozím obráběním (vrtáním, vyhrubováním, vyvrtáváním, apod.).[11]

Tabulka 2 Tolerance polohy

Tolerance polohy	Tolerance rovnoběžnosti	//
	Tolerance kolmosti	⊥
	Tolerance sklonu	/
	Tolerance sousosti	◎
	Tolerance souměrnosti	≡
	Tolerance jmenovité polohy prvku	⊕
	Tolerance různoběžnosti os	×

Při obrábění velmi přesných otvorů se ze všech uvedených úchylek nejčastěji sledují úchyly kruhovitosti (Obr. 2a) a válcovitosti (Obr. 2b).[10]

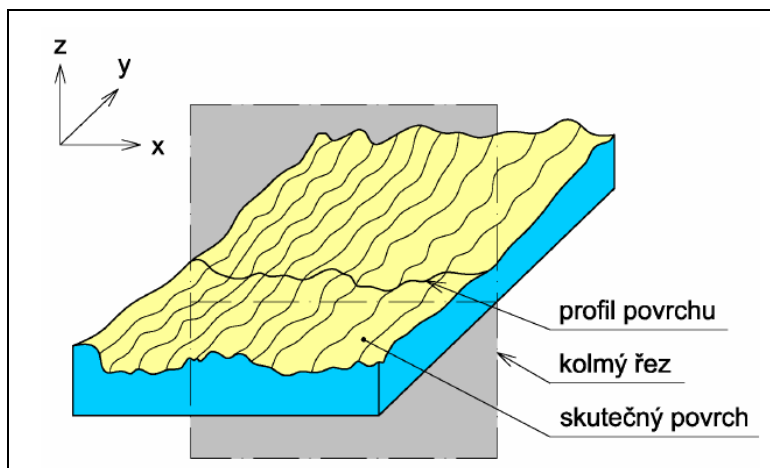


Obr. 2 Toleranční pole kruhovitosti (a) a válcovitosti (b) [12]

2.1.3 Parametry struktury povrchu

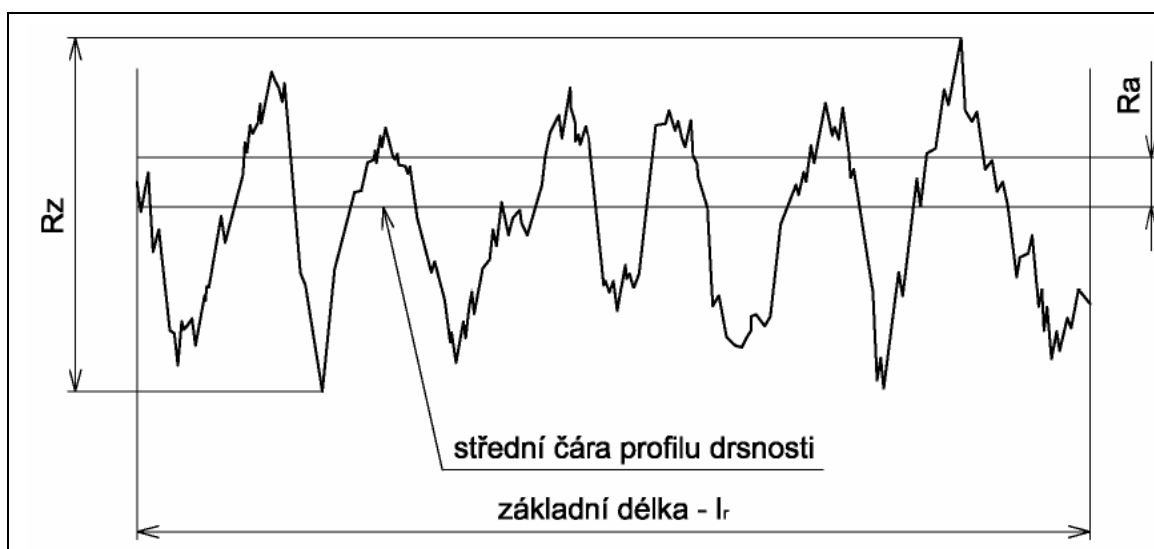
Struktura povrchu vyjadřuje trojrozměrné opakované úchyly od ideálního povrchu. Nejčastěji vznikají při obrábění povrchu, kdy řezný nástroj zanechává stopy na obrobeném povrchu. Strukturu povrchu lze rozdělit na tři parametry, které jsou rozdílné ve vlnové délce:

- Tvar základní povrchu
- Vlnitost
- Drsnost



Obr. 3 Profil povrchu [12]

Je tedy zřejmé, že profil drsnosti a jeho parametry jsou jen částí charakteristiky struktury povrchu. V současné době stále zůstává základem hodnocení struktury povrchu profilová metoda. Ve standardním provedení předních výrobců měřicích přístrojů jsou vyhodnocovány geometrické parametry výpočtem ze základního profilu (parametr P), z profilu drsnosti (parametr R) a z profilu vlnitosti (parametr W), kde parametry R jsou základem pro hodnocení drsnosti.[13] Typickými představiteli R parametrů je průměrná aritmetická úchylnka profilu R_a a největší výška profilu R_z .



Obr. 4 Parametry drsnosti R_a a R_z [12]

2.1.4 Vlastnosti povrchové vrstvy

2.1.4.1 Zbytková napětí

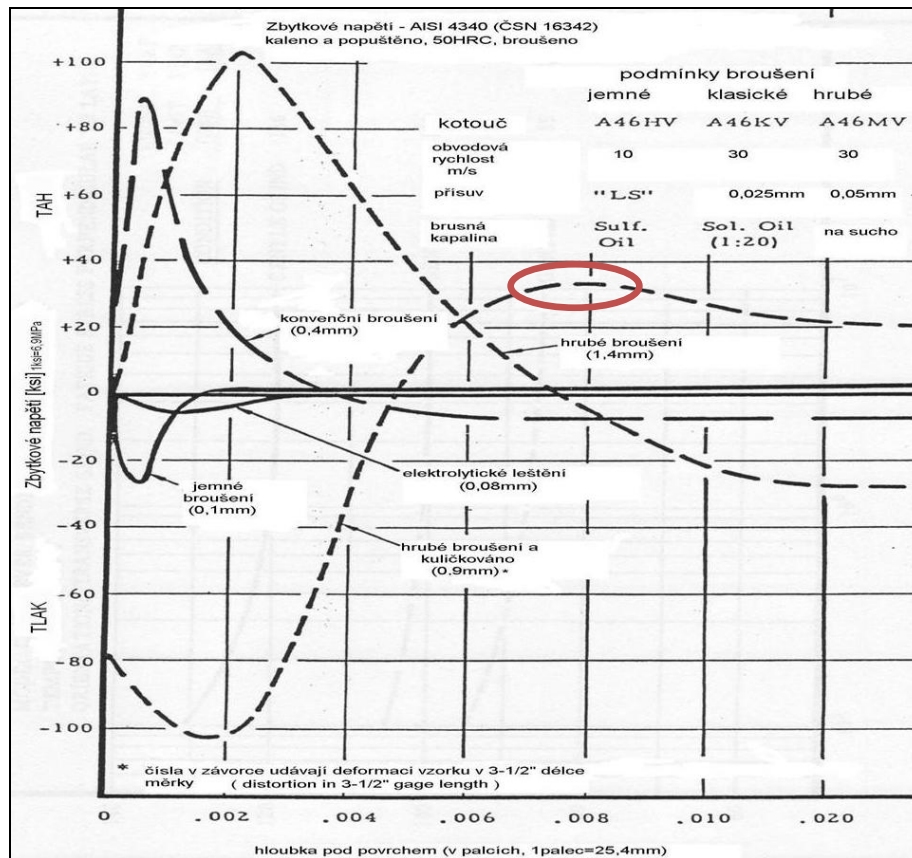
Při obrábění dochází k silovému působení nástroje na povrch obrobku, kde dochází k deformaci povrchové vrstvy a vzniku tření mezi nástrojem a obráběnou plochou, které způsobuje zahřívání povrchové vrstvy. Z těchto důvodů dochází ke vzniku napětí v materiálu a mění se i jeho fyzikálně mechanické vlastnosti.

Jestliže se působící napětí pohybují pouze v pružné oblasti, tzn., nebyla splněna podmínka plasticity, po odstranění vzniku napětí, a proto napjatost zcela vymizí. Dojde-li však ke vzniku plastické deformace alespoň v některém bodě obrobku, zůstanou v tělese jistá zbytková napětí i po odstranění jejich příčiny vzniku.

Zbytková napětí se objevují téměř v každém konstrukčním materiálu. Jejich účinky nemusí však být vždy škodlivé. Existují i užitečná zbytková napětí např. kuličkováním či válečkováním se do povrchové vrstvy zanesou tlaková napětí, která zvyšují životnost součástí. Škodlivá zbytková napětí neovlivňují pouze mechanické vlastnosti (snížení meze únavy, snížení pevnosti, atd.), ale také korozní odolnost povrchu.

Zbytková napětí se rozlišují na tahová a tlaková. Tahová napětí vznikají při současném tepelném a mechanickém zatěžování povrchu. Tlaková napětí vznikají, jestliže při obrábění převažuje plastická deformace bez výrazného tepelného účinku. Tlaková napětí jsou z hlediska životnosti součástí výhodnější, protože mají tendenci uzavírat případné zárodky trhlin.[14]

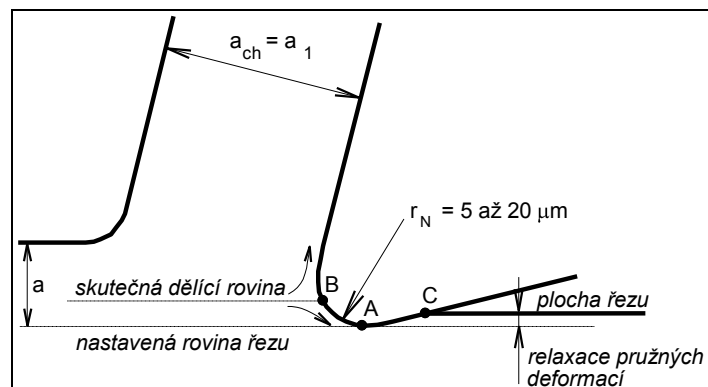
V diagramu (Obr. 5) jsou znázorněny průběhy tahových a tlakových napětí, které vznikají po různém typu obrábění. V tomto případě se jedná o jemné, konvenční a hrubé broušení, dále hrubé broušení s následným kuličkováním a elektrolytické leštění. Z diagramu je patrné, že při použití kuličkování po broušení se výrazně změní průběh napětí. Nejbliže k povrchové vrstvě se docílí tlakových napětí, které přechází v napětí tahová. Červeně je vyznačená oblast, kde je nutné sledovat velikost tahového napětí, které při vyšších hodnotách (i v podpovrchové vrstvě) může zapříčinit poškození součásti.



Obr. 5 Průběhy tahových a tlakových napětí po broušení [15]

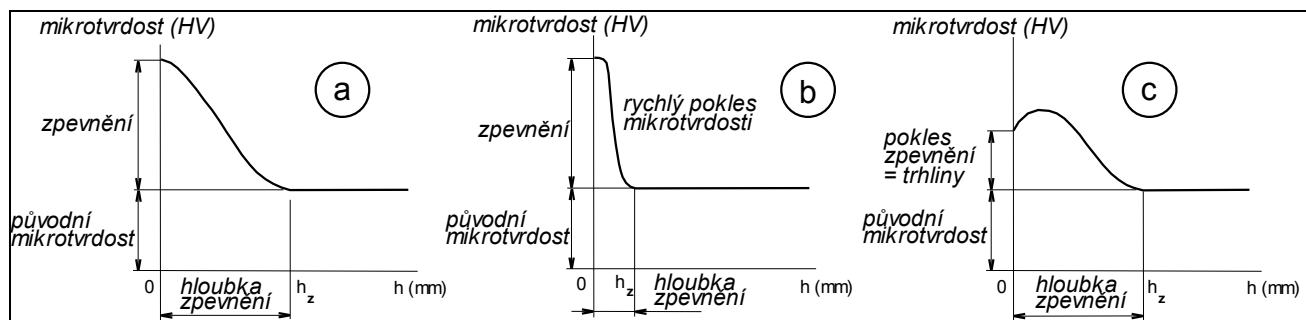
2.1.4.2 Zpevnění povrchu

Zpevnění povrchové vrstvy vzniká vlivem plastické deformace. Příčinami vzniku plastických deformací je, že teplem ovlivněná oblast OMNO⁴ zasahuje pod rovinu řezu, díky čemuž dochází ke změně struktury materiálu. Druhou příčinou vzniku plastických deformací je zaoblení ostří v řezném nástroji. Rádus na ostří způsobuje posunutí nastavené roviny řezu na skutečnou, čímž dochází k vtačování materiálu pod zaoblení BA (viz obrázek).



Obr. 6 Zpevnění povrchové vrstvy [16]

Zpevnění je tedy výsledek zbytkových pnutí zůstávající v povrchové vrstvě po její plastické deformaci. Lze ji kvalifikovat hodnotou mikrotvrlosti, která se zjišťuje v různých hloubkách povrchové vrstvy. Zpevnění je pak charakterizováno stupněm zpevnění a hloubkou vrstvy, která má oproti základnímu materiálu vyšší odolnost (obr.7). [10]



Obr. 7 Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě [15]

Nejvhodnějším průběhem zpevnění je v případě a), jelikož materiál dosahuje na povrchu nejvyšší tvrdost a pozvolný pokles zapříčiňuje pevnější spojení mezi zpevněnou vrstvou a základním materiálem. [10]

2.1.5 Shrnutí kapitoly 2.1

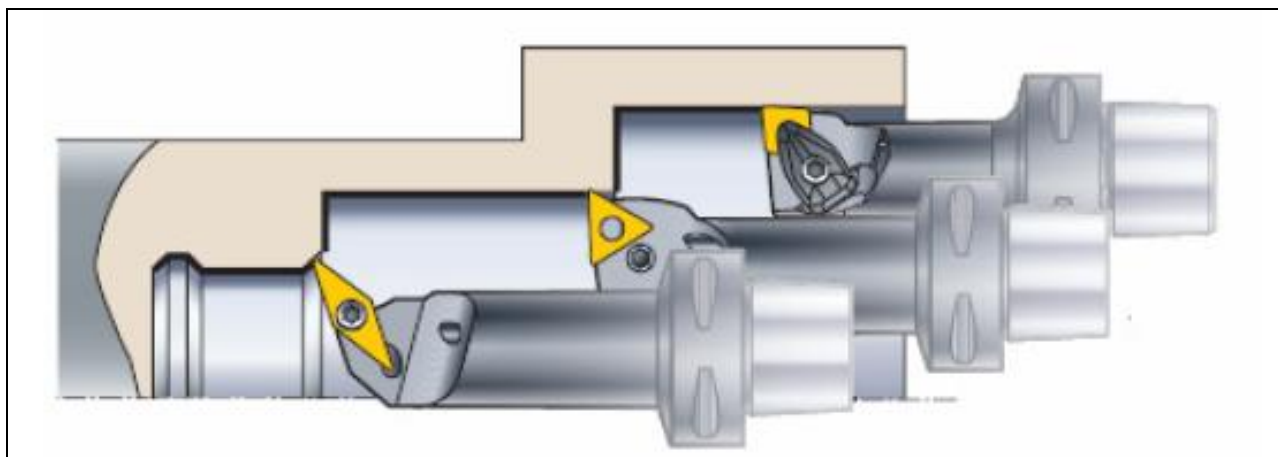
Ze všech požadavků popsány výše, je patrné, že k posouzení otvorů je potřeba přistupovat komplexně. Nelze jednoznačně označit otvor za přesný, splňuje-li pouze jeden ze zmíněných požadavků. Proto se pro tuto diplomovou práci zavede pojem přesný otvor pro díry vyrobené v přesnosti IT 8 a lepší, které dosahují drsnosti povrchu Ra nižší, než $0,8 \mu\text{m}$.

2.2 Výrobní metody velmi přesných otvorů

Tato část diplomové práce se věnuje technologickému hodnocení nejčastějších možností výroby velmi přesných otvorů. U vybraných metod je stručně popsán princip výroby, dosahovaná přesnost a drsnost povrchu, výhody a nevýhody jednotlivých metod.

2.2.1 Jemné soustružení

Jemné soustružení je řazeno mezi dokončovací metody. Provádí se na předem zhotovených vnitřních plochách např. vrtáním, frézováním, odléváním, vylisováním či jiným způsobem, u kterých je požadována lepší kvalita a přesnost povrchu.



Obr. 8 Vnitřní jemné soustružení [2]

U vnitřního soustružení hrozí riziko vzniku vibrací, které vychází ze vztahu mezi vyložením nástroje a jeho průměrem, respektive mezi průměrem a hloubkou vyráběné díry. Jedná se tedy o faktory, které nelze ovlivnit. Je však možné minimalizovat faktory zesilující sklon ke vzniku vibrací. Při jemném soustružení je snaha vytvářet třísky ve tvaru krátké jemné šroubovice. Tento typ třísky se snadno odvádí z místa řezu a udržuje konstantní zatížení břitu. Další možností, jak snížit riziko vzniku vibrací, je zvolit soustružnický nůž s vnitřním chlazením. Tato volba zajistí lepší odvod třísky z místa řezu.[1]

U jemného soustružení je dosahováno drsnosti povrchu R_a až $0,2 \mu\text{m}$. Třída přesnosti vyrobeného otvoru se pohybuje mezi IT 5 až IT 7.

Výhody

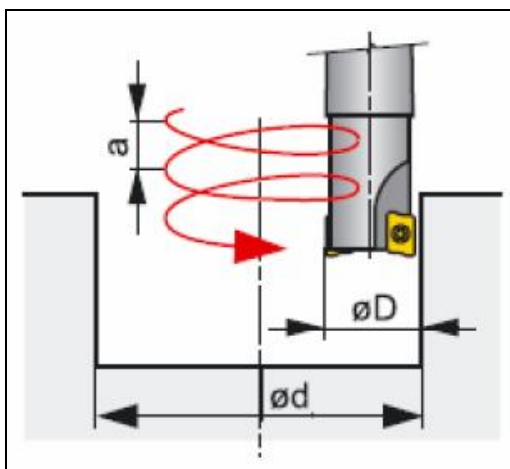
- **Cena nástroje** – Většinou se používají monolitní nástroje z rychlořezné oceli nebo nože s vyměnitelnými řeznými destičkami.
- **Multifunkčnost nástroje** – Jeden nástroj lze použít na otvory o různých průměrech.

Nevýhody

- **Větší náchylnost ke vzniku chvění** – Velkým vyložením nástroje dochází ke snížení tuhosti.
- **Pouze pro rotační otvory** – Nelze obrábět otvory nerotačních tvarů.
- **Pouze pro větší průměry** – Řeznou destičku je třeba připevnit na soustružnický nůž, je tedy možné obrábět otvory až od určitého průměru.

2.2.2 Jemné frézování

Pro frézování je charakteristické, že každý řezný nástroj (zub frézy) odebírá jen určité množství materiálu ve formě třísky, a to jen po určité dráze. Z toho plyne, že požadavky na chlazení nejsou příliš vysoké (např. při frézování neželezných kovů a litin, se chladicí kapaliny vůbec nepoužívají), na rozdíl od jiných třískových operací.[1]



Obr. 9 Jemné frézování válcové plochy spirálovou interpolací [7]

Jelikož je u soustružení řezná rychlost o tři řády vyšší, než posuvová rychlost u frézování a posuv je nižší pouze o dva řády, je patrné, že jemné soustružení je oproti frézování mnohem efektivnější. Z tohoto důvodu se jemné frézování pro dokončování otvorů příliš často nepoužívá.

Na kvalitu a přesnost povrchu má vliv mnoho faktorů, ale ne vždy můžeme všechny ovlivnit. Při jemném frézování nejvíce závisí na tuhosti celé soustavy S-N-O, na řezných podmínkách, geometrii nástroje a na vlastnostech a kvalitě řezného i obráběného materiálu. Vhodným nastavením a dodržováním těchto faktorů se při jemném frézování dosahuje třídy přesnosti IT 7 až IT 8 a drsnosti povrchu Ra mezi 0,4 až 1,6 μm .

Výhody

- **Lepší chlazení** – Když nejsou zuby v záběru, část tepla se odvede do okolí.
- **Nerotační díry** – Je možné obrábět i otvory a dutiny nerotačního tvaru.
- **Neúplné otvory** – Lze frézovat otvory, které protínají okraj obrobku, tudíž otvory s neuzavřeným obvodem.

Nevýhody

- **Přerušovaný řez** – Způsobuje kolísání řezných tlaků, nerovnoměrné zatížení stroje a větší náchylnost ke vzniku chvění.[1]
- **Pouze pro větší průměry**

2.2.3 Vrtání

Vrtání monolitickými vrtáky ze slinutých karbidů patří mezi nejproduktivnější a nejpřesnější způsoby vrtání otvorů. U větších průměrů se ovšem vzhledem k ceně stále častěji dává přednost vrtákům s VBD. Monolitní vrtáky na bázi karbidu wolframu jsou vyráběny ve dvou- nebo tříbřitém provedení, s přímými drážkami nebo ve šroubovici. Často mají vnitřní kanálky pro chladicí médium a povrch mají deponovaný otěruvzdorným povlakem.[8]

Díky vlastnostem SK se v porovnání s vrtáky z RO při použití výrazně intenzivnějších řezných podmínek zvýší trvanlivost nástroje i přesnost vrtaných děr. Např. tradiční výrobce vrtáků firma Guhring (v ČR zastoupena Guhring, s.r.o., Praha 10) uvádí u nástrojů deponovaných povlakem TiN, že při přechodu z RO na SK se zvýší řezná rychlost 3x, velikost posuvu minimálně o 30%, současně se zvýší trvanlivost vrtáků a nejméně o 3 IT přesnost vyrobených děr. [8]



Obr. 10 Monolitní vrtáky ze slinutých karbidů [2]

Pro vyšší přesnost a jakost vrtaných děr je rozhodující podstatně větší tuhost vrtáků z SK a vyšší řezné rychlosti vrtání v porovnání s nástroji z RO. Přesnost tvaru a polohy děr vrtaných monolitním vrtákem SK je větší nejen v porovnání s nástroji RO (min o 3 IT), ale i v porovnání s vrtáky s pájenými destičkami SK (min o 1 IT). Přesnost vrtání ovlivní i konstrukční provedení monolitního vrtáku SK – přesnější díru vyvrtá nástroj s přímými drážkami, než se šroubovými drážkami. Zmíněný výrobce uvádí, že při optimálních podmínkách vrtání do plna tří-břítým vrtákem SK lze dosáhnout přesnosti a jakosti povrchu IT 7, tedy parametrů běžně dosahovaných při vystružování. [8]

Vrtáním při vyšších řezných rychlostech se jednak omezuje možnost vytváření nárůstku na břitu, které mohou negativně ovlivňovat jakost povrchu děr, jednak se snižuje doba vrtání, a tím se omezí množství tepla vznikající v místě řezu a opotřebením vrtáku. Vyšší tuhost monolitních vrtáků SK podstatně snižuje chvění nástroje v řezu v porovnání se všemi vrtáky s ocelovým tělesem. Výsledkem současného působení uvedených faktorů je vyšší jakost povrchu děr vrtaných monolitními vrtáky z SK. [8]

Výhody

- ***Efektivnost výroby*** – Požadovaný otvor se vyrobí na jeden pracovní zdvih. Je možné vrtat do plného materiálu, což zvyšuje efektivnost výroby a snižuje náklady na výrobu.

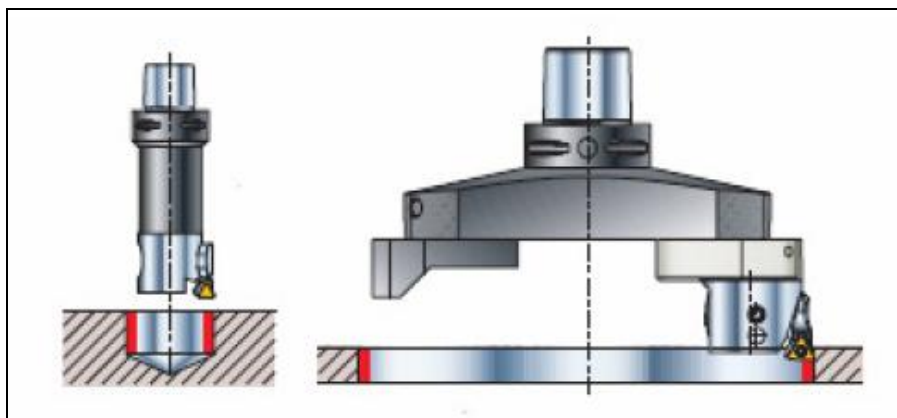
Nevýhody

- ***Pouze pro menší průměry*** – Při obrábění větších průměrů se volí vrtáky s VBD, jelikož by monolitní nástroj z SK pro větší průměry byl velmi drahý. Nástrojem s VBD se už nedocílí takové kvality povrchu jako u monolitního nástroje z SK.

2.2.4 Vyvrtávání

Je to metoda, při které se rozšiřuje předlitý, předkovaný, předlisovaný, předvrtaný nebo jiným způsobem předzhotovený otvor, na požadovaný rozměr. Tuto metodu lze použít jak pro hrubování, tak i pro práci načisto. [1]

Při vyvrtávání se obrábí vyvrtávacími noži upevněnými ve vyvrtávacích tyčích nebo hlavách. Obráběné rotační plochy mají geometrický tvar válce, kužele, čelního mezikruží nebo rotační tvarové plochy. Obvykle se vyvrtávají otvory o průměru větším jak 40 mm, ale při jemném vyvrtávání se dá obrábět od průměru 15 mm. [1]



Obr. 11 Vyvrtávání otvorů [2]

Vyvrťovacími metodami dosahujeme vysoké přesnosti rozměrů odpovídajícímu stupni přesnosti IT 4 až IT 5. Drsnosti povrchu je možné dosáhnout na hodnotu $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. Avšak při vyvrťávání ložiskových kovů diamantem se docílí drsnosti Ra až $0,025 \mu\text{m}$. Kvůli hospodárnosti výroby se však obrábí na hodnoty $Ra = 0,5 - 0,8 \mu\text{m}$. [1]

Výhody

- **Přesnost a kvalita povrchu** – Při vyvrťávání se dosahuje lepší kvality a přesnosti než u vrtání.

Nevýhody

- **Pro větší průměry** – Nůž je potřeba upevnit na vyvrťovací tyč. Takto sestavený nástroj může obrábět otvory až od určitého průměru.

2.2.5 Protahování, protlačování

Tato metoda se používá spíše pro obrábění tvarových a rovinných ploch, lze s ní však vyrábět i válcové otvory. Složitá výroba a ostření nástrojů zvyšuje jejich cenu a tím posouvá vhodnost použití této metody do oblasti větší sériovosti.[5]

Vnitřní protahovací trny se vyrábějí jako celistvé z houževnatých materiálů, protože jsou namáhány rázy, přídavným ohybem či krutem. Ostří se na čele, aby nedocházelo k větším změnám rozměru a tvaru. Výkon, jakost povrchu, případně trvanlivost nástroje, lze zvýšit použitím rezných kapalin, většinou aditivovaných olejů. Litiny a bronzы se protahují za sucha.[5]

Při protlačování je nástroj namáhán na vzpěr, proto jsou protlačovací trny kratší, než u protahování. Z technologického hlediska, kromě toho, že je možné protlačování provádět na jednodušších strojích (jednoduchý lis), který vyvodí potřebnou sílu, není mezi protahováním a protlačováním žádný rozdíl.



Obr. 12 Kulaté protahovací trny [6]

Protahováním lze běžně dosáhnout přesnosti IT 6 až IT 8 a drsnosti povrchu $Ra = 0,4$ až $1,6 \mu\text{m}$. Při použití hladicích zubů je možné zvýšit přesnost na IT 5 a drsnost na $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. [5]

Výhody

- **Rychlá výroba otvoru** – Na jeden záběr se zhotoví požadovaný otvor.
- **Složitější otvory** – Je možné vyrábět různé profily děr.
- **Kvalita povrchu** – Dosažení velmi dobré kvality a drsnosti povrchu.

Nevýhody

- **Cena nástroje** – Složitá výroba navyšuje cenu nástroje.
- **Jednoúčelnost** – Pro různé průměry otvorů je potřeba vlastnit tomu odpovídající průměry nástrojů.

2.2.6 Broušení

Broušení se řadí mezi nejčastější způsob dokončovacích operací při obrábění kovů. Je možné obrábět různé druhy kovových i nekovových materiálů. Kromě vnitřních tvarových ploch, lze obrábět i vnější plochy a rovinné i rotační tvary.

Při broušení dochází vlivem vysokých řezných rychlostí a negativních úhlů čela ke vzniku vysokých teplot. V místě řezu se tříška ohřívá až na teploty mezi 800 až 1200 °C. Množství tepla, které přechází při broušení do obrobku, se pohybuje mezi 70 až 80 % (při HSC obrábění přechází pouhých 5 %). Takto vysoké tepelné zatížení obráběného materiálu zapříčiňuje v povrchové vrstvě vznik vysokých zbytkových napětí (500 až po 2000 MPa), které mají značný vliv na životnost a kvalitu povrchu broušené díry.



Obr. 13 Broušení vnitřních otvorů [4]

Kvalita broušení je dána hlavně zrnitostí, tvrdostí a koncentrací zrna. Zrnitost, jež vychází z velikosti zrna, výrazně ovlivňuje výkon broušení a výslednou drsnost povrchu. Dalším faktorem, který má vliv na přesnost a kvalitu je druh broušení. Při broušení načisto se dosahuje přesnosti IT 5 až IT 7 a drsnosti povrchu $R_a = 0,4$ až $1 \mu\text{m}$. U jemného broušení se přesnost otvoru pohybuje mezi IT 3 a IT 4 a drsnost povrchu se sníží na $R_a = 0,025$ až $0,4 \mu\text{m}$. [1][3]

Výhody

- **Povrch** – Velmi dobrá přesnost a kvalita.
- **Samoostření** – Otupováním zrn se zvyšuje řezná síla, která způsobí vylomení opotřebeného zrna a odkrytí nového neboli ostrého zrna.

Nevýhody

- **Tepelné ovlivnění povrchu** – Při broušení dochází ke vzniku pnutí, které může způsobit popraskání povrchu.
- **Změna velikosti nástroje** – Při obrábění dochází ke stálému ubrušování brusného kotouče tzn. mění se tvar a rozměr nástroje.

2.2.7 Další dokončovací operace

Dokončovacími metodami, díky kterým se dosáhne přesnějšího a kvalitnějšího povrchu je celá řada (honování, superfinišování, lapování, leštění, válečkování, vyhlazování, atd.). Pro účel této diplomové práce není však nezbytné je všechny detailně popisovat. Proto jsou v následující části této kapitoly, vybrány nejznámější dokončovací operace, které jsou stručně popsány z hlediska technologie výroby.

2.2.7.1 Změna rozměru i kvality

1. Lapování

Jedná se o dokončovací operaci, která nejčastěji následuje po broušení. Z čehož plyne, že se lapováním dosahuje kvalitnějšího a přesnějšího povrchu, než u broušení. Dosahovaná přesnost rozměrů je mezi IT 1 až IT 5 a drsnost povrchu od $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ až po $0,03 \mu\text{m}$. Pro dosažení takovéto přesnosti a drsnosti je potřeba (jako pro každou dokončovací operaci) ponechat nějaké přídavky na obrábění. Pro lapování se pohybují v rozmezí 0,005 až 0,03 mm.

Nevýhody:

- **Čas** – Proces lapování trvá poměrně dlouhou dobu.
- **Čištění** – Po lapování je nutné součást očistit (například petrolejem).
- **Cena** – Oproti ostatním dokončovacími operacím je tato metoda drahá.

2. Honování

Honování slouží pro obrábění vnitřních i vnějších válcových ploch, v případě kuželových ploch je nutné využít přídavného zařízení. Při jejich obrábění je potřeba nechat přídavek pro honování obvykle mezi 0,02 až 0,08 mm. Díky tomu je potom možné dosáhnout drsnosti povrchu $R_a = 0,2 - 0,5 \mu\text{m}$ u hrubovacího honování a u jemného dokonce až $R_a = 0,025 \mu\text{m}$ a přesnosti rozměrů IT 2 až IT 5.

Výhody:

- **Velikosti otvorů** – Pro různé velikosti průměrů (1,6 mm až 750 mm, u moderních strojů je možné obrábět průměry až 1250 mm) i délek (až do 24 m).

Nevýhody:

- **Přesnost díry** – Nelze opravit směr nebo polohu osy díry.
- **Chlazení** – Při honování je potřeba obrobek chladit, aby nedocházelo k nepříznivým změnám.

3. Superfinašování

U superfinašování se dosahuje podobné kvality a přesnosti povrchu jako při honování. Přesnost povrchu se tedy pohybuje mezi IT2 a IT5 a drsnost povrchu Ra je rovna 0,025 – 0,05 μm . Přídavky ponechávány na superfinašování se pohybují mezi 0,005 až 0,02 mm.

2.2.7.2 Změna kvality

1. Leštění

Při leštění dochází k odebírání velmi malé části upravovaného materiálu, proto nelze mluvit o změně tvaru, ale pouze kvality povrchu (zvyšování jakosti povrchu). Leštění lze dělit na hrubovací a jemné leštění, rozdíl mezi nimi je v umístění brusiva. Při hrubování je brusivo připevněno k leštícímu nástroji, zatímco u jemného leštění je brusivo volně naneseno mezi nástroj a obrobek.

Mezi nejpoužívanější metody leštění patří [3]:

- Mechanické leštění
- Chemické leštění
- Elektrochemické leštění
- Leštění laserem

2. Válečkování

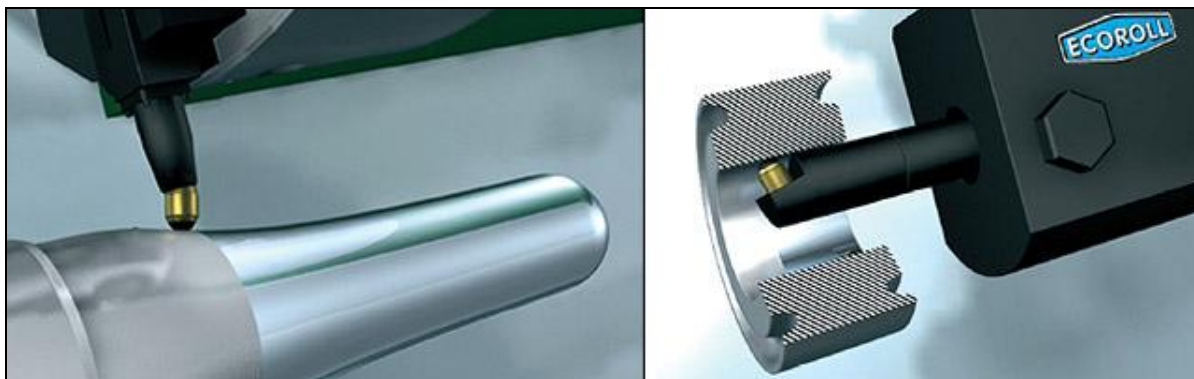
Válečkování je metoda, u které nedochází k žádnému úběru třísky, ale pouze zahlazování a zpevňování obráběného povrchu. Drsnost a tvar povrchu závisí na zvoleném průměru válečků. Pomocí menšího průměru se docílí větší hloubky zpevnění, naopak větší průměry snižují hodnotu drsnosti Ra, která se pohybuje v rozmezí Ra = 0,1 až 0,4 μm při statickém válečkování a Ra = 0,2 – 0,8 μm při dynamickém válečkování. Tvarová přesnost při válečkování je rovna IT 4 až IT 7.

Podmínky při tváření povrchu se mění podle materiálu součásti, válečkováného průměru. Přítlačná síla se pohybuje v rozmezí od 500 do 5000 N. Obvodová rychlost dosahuje 50 až 100 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. [3] Posuv u válečkování se pohybuje mezi 0,2 – 1 mm a platí pro něj následující podmínka: posuv nesmí být roven posuvu předchozího obrábění. Při nedodržení této podmínky, by nedošlo ke zkvalitnění povrchu, ale naopak by se zviditelnily vady vzniklé při předchozí operaci.

3. Vyhlazování

Při hlazení dochází především ke zvýšení tvrdosti a zlepšení drsnosti povrchu. Výsledek závisí hlavně na tvaru a materiálu nástroje, přítlačné síle (80 až 1000 N) a rychlosti pohybu. Ta je u vyhlazování přibližně 40 – 100 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv pak 0,02 – 0,1 $\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$. Jelikož vzniká kvůli tření nežádoucí teplo, tak je nástroj třeba chladit a mazat. Pro tento účel se

používají různé oleje a emulze. Pomocí diamantového kužele je dosahovaná tvrdost při hlazení asi 65 HRC a drsnost kolem $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. [3]



Obr. 14 Vyhlazování diamantovým kuželem vnější a vnitřní plochy [16]

2.2.8 Vystružování

Jedná se o operaci, při které se zlepšuje tvar a jakost povrchu předem zhotovených vnitřních rotačních ploch např. vrtáním, frézováním, odléváním či jiným způsobem zhotovených děr. Jen zřídka po vystružování následuje další operace jako válečkování, broušení nebo honování, proto se může vystružování řadit mezi dokončovací operace.

Nástroj se nazývá výstružník, který má jeden nebo více břitů. Část výstružníku za řeznou hranou nástroj pouze vede a kalibruje díru. Proto má úzkou válcovou fazetku. V zadní části výstružníku se průměr zužuje o úhel 2 až 5 °, aby nástroj nezvětšoval otvor a nezhoršoval povrch. Ruční výstružníky mají řezné hrany na protáhnutém kuželu s úhlem asi 30°. Se sraženou čelní hranou se výstružník snáze zavádí do vystružované díry. Pokud by měl protáhnutý řezný kužel i strojní výstružník, je možné získat velmi hladký povrch vystružovaného otvoru.[1]

Vystružování je rovnocenná operace s vyvrtáváním. Volbu vhodného způsobu ovlivňuje sériovost výroby a rozměry otvoru. Vystružování je více používáno v hromadné výrobě, zatímco vyvrtávání se hodí spíše pro kusovou. Při obrábění otvorů o průměru větším než 100 mm, není příliš ekonomické vyrábět vícebřitý nástroj (výstružník), proto se zde nabízí zvolit levnější variantu vyvrtávání. Jestliže jsou však požadovány vyšší parametry na přesnost a drsnost otvorů, musí se i tyto díry vystružovat.

Výhody

- **Rychlost** – V porovnání s ostatními metodami je vystružování rychlejší.
- **Vyšší přesnost oproti vrtání** -
- **Vysoká opakovatelnost** -
- **Snažší výroba kuželových otvorů** -

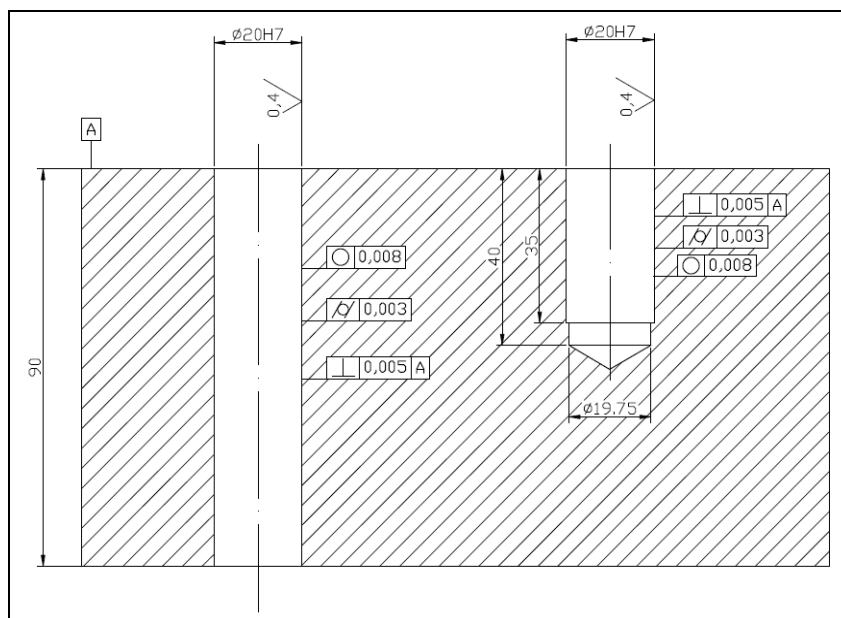
Nevýhody

- **Jednoúčelnost** – Pro každý průměr obráběné díry, je potřeba mít odpovídající průměr výstružníku.
- **Pouze pro menší průměry** – Čím větší průměr, tím roste cena nástroje.

- **Pouze pro rotační tvary** – Nelze vystružovat nerotační či neúplné tvary otvorů.

2.2.9 Drsnost a přesnost otvorů

U vystružování lze docílit přesnosti povrchu od IT 5 až IT 8. V dnešní době se přesnosti IT 5 dosahuje zatím těžko. IT 6 až IT 8 jsou hodnoty, kterých se již standardně dosahuje. Drsnosti povrchu se pohybují mezi $R_a = 0,3 - 0,8 \mu\text{m}$. U jednobřitých výstružníků je možné vystružit otvor až na drsnost povrchu $R_a = 0,15 - 0,2 \mu\text{m}$.



Obr. 15 Požadavky kladené na vystružované otvory

Na obrázku výše jsou vidět dva základní typy otvorů, které je možné vystružovat, jedná se o otvor průchozí (vlevo) a neprůchozí (vpravo). Je zde znázorněno, jaké požadavky, z hlediska přesnosti a drsnosti, jsou na otvory kladené.

2.2.10 Produktivita a trvanlivost

Produktivita a trvanlivost jsou vlastnosti, které spolu úzce souvisí. I když nástroje představují pouze 5% z celkových nákladů, významně se podílejí na samotný proces obrábění. Ovlivňují například: celkový čas výroby, počet nástrojů na skladě, délku ztrátových časů, počet operací, atd. Produktivita obrábění je samozřejmě ovlivněna řadou dalších vlastností a podmínek (řezným prostředím, řeznými podmínkami, materiálem, geometrií, atd.)

2.2.11 Přídavky na obrábění

Na začátku kapitoly bylo řečeno, že vystružování patří mezi dokončovací operace. Je tedy nutné při hrubování počítat s přídavkem na dokončení. Velikost přídavku závisí na mnoha faktorech. Asi největší vliv na velikost přídavku má způsob výroby předem připravovaných otvorů (frézováním, vrtáním, odléváním, atd.). Je zřejmé, že pro vrtanou díru bude potřeba větší přídavek, než pro díru frézovanou. Dalšími faktory, které ovlivňují velikost přídavku je obráběný materiál a materiál nástroje.

Obecně pro určování přídavku platí:

- Pro průměr díry **do** 12 mm se volí přídavek na stěnu 0,1 – 0,3 mm
- Pro průměr díry **nad** 12 mm se volí přídavek na stěnu 0,2 – 0,6 mm

Tyto hodnoty platí pouze pro strojní vystružování. Pro ruční vystružování do průměru 12 mm, by neměl přídavek přesáhnout hodnotu 0,125 mm.

V tabulce jsou uvedeny hodnoty přídavků, pro vystružování. Tyto hodnoty jsou orientační, přesné hodnoty by měly být uvedeny od výrobce nebo mohou být zvoleny podle praktických znalostí.

Tabulka 3 - Používané přídavky

Průměr díry [mm]	Velikost přídavku na stěnu [mm]
do 10	0,08 – 0,15
10 - 18	0,15 – 0,25
18 - 40	0,15 – 0,3
40 - 80	0,2 – 0,4
nad 80	0,25 – 0,5

2.2.12 Řezné podmínky

Řezné podmínky výrazně ovlivňují kvalitu a přesnost obráběné díry. Správně navolené řezné parametry, je velmi důležitý předpoklad k docílení požadovaného výsledku. Při volbě řezných podmínek je potřeba brát v úvahu materiál obrobku, velikost díry, materiál nástroje, možnosti stroje, atd. Pro vystružování se volí řezná rychlost v_c [m/min] a rychlost posuvu v_f [mm/min] nebo posuv [mm/ot].

Tabulka 4 - Řezné podmínky pro výstružník VRV s povlakem i bez

Obráběný materiál	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f_o [mm]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f_o [mm]
	Bez povlaku		S povlakem	
11 373.1	22 - 30	0,2 – 0,4	30 - 45	0,2 – 0,4
15 246	12 - 20		18 - 24	
17 240	nevhodné	nevhodné	25 - 35	
19 312	15 - 25	0,2 – 0,4	18 - 26	
Šedá litina (GG25)	28 - 48		110 – 170	
Tvárná litina (GGG 60)	20 - 38		38 – 80	
Slitina Al-Si	40 - 110		nevhodné	

Řezná rychlost a rychlost posuvu se mohou volit z předchozích zkušeností nebo doporučených podmínek od výrobce nástrojů. Pro představu o velikosti řezné rychlosti a posuvu, jsou v tabulce níže uvedeny jejich hodnoty, které jsou zvoleny podle průměru, materiálu nástroje a druhu obráběného materiálu.

Hodnoty uvedené v tabulce jsou vybírány pro výstružník VRV ze slinutého karbidu (od firmy Ham-final) a vystružované díry o průměru 6 mm.

2.2.13 Možnosti použití

V dnešní době se při vystružování dosahuje už takové kvality a přesnosti povrchu, že začínají pomalu odpadat klasické dokončovací operace, jako je broušení, honování, superfinišování, atd. Díky tomu je vystružování stále častěji používáno ve všech průmyslových odvětvích (potravinářský, textilní, zemědělský, letecký, kosmický, atd.). Na obrázcích níže je zobrazeno pár zajímavých možností vystružování z této rozsáhle řady použití.

1. Dopravní průmysl (letadla, automobily, lodě, MHD, atd.)

Největší zastoupení má vystružování v průmyslovém spektru, kde se využívá nespočet součástí, u kterých je nutné zhotovit velmi přesné otvory. Například to mohou být bloky motorů, kde se mimo jiné soustruží vedení a sedla ventilů.

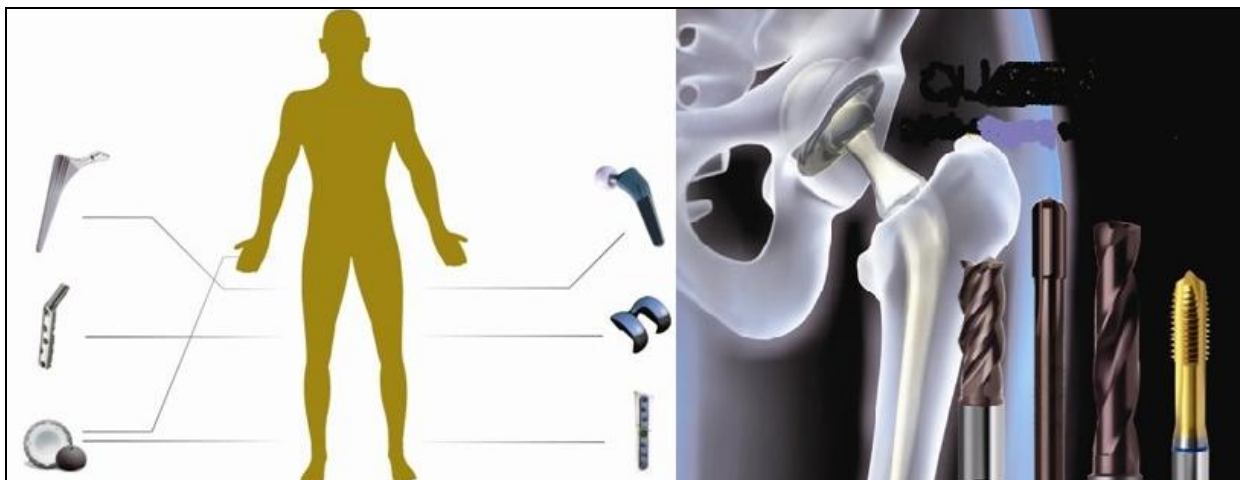


Obr. 16 - Blok motoru [18]

2. Lékařství

V lékařství se vystružování používá při výrobě implantátů, kdy je potřeba, aby součástky byly naprosto přesně vyrobené a trvale fungovaly.

Příklad z praxe: Výstružník HR 500 o průměru 5,15 mm. Na nástroji je nanesena tenká vrstva TiAlN. Implantát je z titanové slitiny TiAl4V6, do kterého se vystružuje průchozí díra o délce 13 mm. Nástroj je s vnitřním chlazením (chladičí kapalina je řezný olej). Řezné podmínky jsou následující: řezná rychlost 72 m/min, posuv 0,4 mm/ot a nástrojem lze takto obrobít délku 21m.[17]



Obr. 17 Použití výstružníků při implantaci kloubní náhrady [17]

3. Zbrojní průmysl

Požadovaná přesnost a kvalita povrchu jednotlivých součástí zbrojního průmyslu je velmi vysoká. Při používání zbraní nesmí docházet k závadám jako např. zaseknutí náboje, zpomalování kulky putující skrz hlavici, a podobně. Je tedy i zde potřeba využít přesného vystružování, ke splnění všech požadavků kladených na tyto součásti.

4. Hudební průmysl

Jak je vidět na obrázku níže, uplatnění vystružování se najde i v hudebním průmyslu, kde je použit ruční vystružovací nástroj ke zkvalitnění otvoru pro kovovou ladicí mechaniku na hlavě kytary. Díry se však nevystružují pouze u nástrojů strunných, ale i u dechových (otvory pro klapky) či bicích.



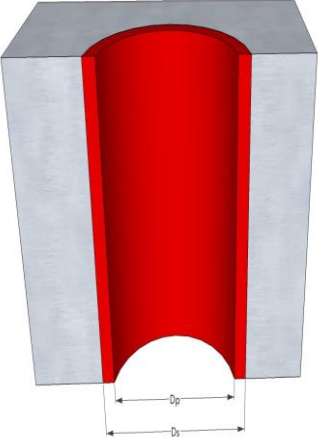
Obr. 18 - Hudební průmysl [19]

2.2.14 Chyby při vystružování

U vystružování přesných otvorů, může dojít k různým nežádoucím jevům, které způsobí nepřesnosti při výrobě. V této kapitole jsou popsány příčiny vzniku těchto jevů, chyby, které mohou díky nim vzniknout a řešení, jak chyby odstranit.

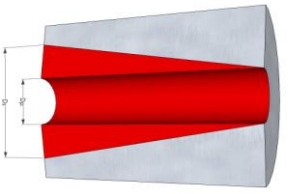
1. Překročení průměru díry

Tabulka 5 - Překročení průměru díry

	Příčina	Řešení
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Je nutné se ujistit, zda je osa výstružníku souosá s osou předvrtané díry
	Nárůstek na břitu	Tento problém se odstraní změnou řezných podmínek nebo výměnou nástroje (např. se použije výstružník s povlakovanými břity)
	Zvýšené vibrace	Je potřeba snížit házení. Toho docílíme zvýšením řezné rychlosti nebo posuvu. Nebo použijeme upínač nástroje.
	Radiální házení nebo nesprávná osa otáčení	Radiální házení se odstraní použitím upínače.

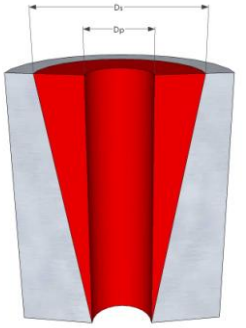
2. Kuželová díra (větší průměr na výstupu)

Tabulka 6 - Kuželová díra

	Příčina	Řešení
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Opět je to způsobené nesouosostí nástroje s před obrobem dírou.

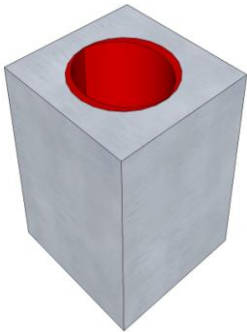
3. Kuželová díry (větší průměr na vstupu)

Tabulka 7 - Kuželová díra

	Příčina	Řešení
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Osa výstružníku musí být v jedné ose s osou předvrtané díry.
	Příliš velký tlak na výstružník při vstupu do díry	Snížením rychlosti posuvu, když vstupuje nástroj do díry.
	Radiální házení nebo nesprávná osa otáčení	Použitím upínače.

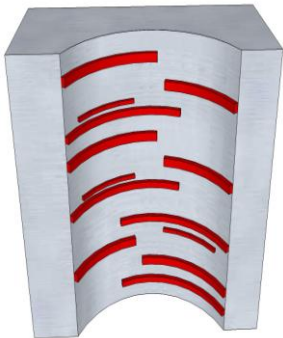
4. Špatná kruhovitost díry

Tabulka 8 - Špatná kruhovitost díry

	Příčina	Řešení
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Osa výstružníku musí být v jedné ose s osou předvrtané díry.
	Nesymetrický řez (nástroj vstupuje do řezu zešikma)	Pro zlepšení vedení se použije upínač.
	Příliš velká tlak na výstružník	Snížením posuvové rychlosti.
	Radiální házení nebo nesprávná osa otáčení	Radiální házení se odstraní použitím upínače.
	Počet nebo uspořádání zubů	Volba jiného nástroje.

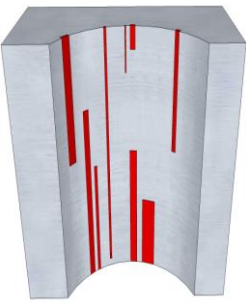
5. Špatná kvalita povrchu

Tabulka 9 - Špatná kvalita povrchu

	Příčina	Řešení
	Stopy opotřebení na břitech, zasekávání třísek	Je nutné vyměnit celou hlavu.
	Nesprávné parametry obrábění	Změna řezné rychlosti nebo použití povlakovaného nástroje.
	Nesprávně zvolená geometrie hlavního břitu	Změna geometrie hlavního břitu.
Nárůstek na břitu	Změna řezné rychlosti nebo použití povlakovaného nástroje.	

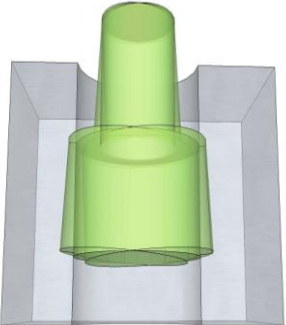
6. Podélné drážky

Tabulka 10 - Podélné drážky

	Příčina	Řešení
	Nesprávně zvolený přídavek na obrábění	Zvolit jiný přídavek.
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Kontrola souososti nástroje s předvrtanou dírou.
		Zvětšit zpětný kužel.

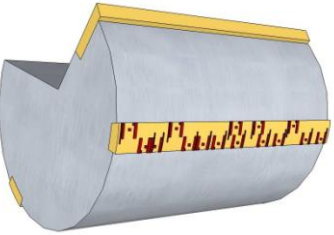
7. Poškození povrchu následkem vibrací

Tabulka 11 - Chvění při obrábění

	Příčina	Řešení
	Nesymetrický řez (nástroj vstupuje do řezu zešikma)	Použitím upínače se zlepší vedení nástroje.
	Nesprávná poloha nástroje vůči obrobku	Kontrola souososti nástroje s předvrtanou dírou.
	Nesprávně zvolená geometrie hlavního břitu	Změna geometrie hlavního břitu.
	Radiální házení nebo nesprávné vyrovnaní do osy	Radiální házení se odstraní použitím upínače.
	Příliš velký tlak na výstružník při vstupu do díry	Snížením rychlosti posuvu, když vstupuje nástroj do díry.

8. Nárůstky na vodicích ploškách

Tabulka 12 - Nárůstky na vodicích ploškách

	Příčina	Řešení
	Špatně zvolený typ chlazení	Zlepšit podmínky chlazení (typ výstupu, tlak, kvalita)
	Příliš malý průměr u nastavitelných výstružníků	Seřídít průměr na správnou velikost.

2.2.15 Typy a zásady pro vystružování

Pro dosažení požadovaného otvoru, tzn. přesného rozměru a kvalitního povrchu, nestačí mít pouze výborný stroj nebo nástroj. Důležité je i vědět, jak se s nimi správně zachází a jak se o ně správně starat. V této části diplomové práce jsou vypsány některé zásady, díky kterým se dosáhne požadujícího výsledku a zároveň nedochází ke zbytečnému opotřebení nástroje.

Zásady pro používání výstružníků

1. Nikdy se výstružníkem neotáčí v opačném směru, než je směr řezání. Nedodržení této zásady způsobuje otupení břitu.
2. Při vyjmutí nástroje ze sklíčidla by měl být výstružník uložen zpátky do ochranného obalu, aby nedocházelo k poškozování břitu.

3. Při manipulaci s výstružníky dávat pozor, aby nedošlo k upuštění nástroje nebo jeho valení.
4. Jestliže se výstružník delší dobu nepoužívá, je dobré ho naolejovat, aby nedocházelo ke korozi.
5. Poškozené ostří má vliv na povrch díry a zároveň snižuje životnost nástroje, proto by se měl nástroj přebrousit.

Typy pro vystružování

1. Snaha o odstraňování otřepů z místa řezu a pozorovat výstružníky, jestli nejsou nijak poškozeny. Tím se docílí dobré jakosti povrchu.
2. Používat chladicí kapalinu.
3. Jestliže je požadována vysoká přesnost, používá se skládaný výstružník.
4. Pro dosažení dobré kvality povrchu a přesnosti lze použít nejdříve hrubovací výstružník (jako hrubovací nástroj je možné použít již vyřazený dokončovací výstružník), poté dokončovací.
5. Jak už bylo řečeno výše, nikdy se netočí výstružníkem proti směru řezání, aby nedocházelo k poškození břitu.
6. Nikdy nezačínat vystružovat na nerovném povrchu. Výstružník bude obrábět v místech nejmenšího odporu, což může způsobit nekvalitní povrch nebo nepřesnosti rozměru.
7. Jestliže dochází při výrobě ke chvění, použije se výstružník s nerovnoměrně rozloženými zuby nebo upínače pro zlepšení tuhosti.

3 Specifikace definovatelných a nedefinovatelných faktorů technologického procesu vystružování a jejich míra vlivu na kvalitu a produktivitu vystruženého otvoru

Definovatelné a nedefinovatelné faktory při obrábění mohou velmi ovlivňovat celý proces obrábění. Každý z faktorů proces ovlivňuje různou měrou. Je tedy důležité, uvědomit si všechny činitele, které by mohly mít vliv na kvalitu obrábění, vyhodnotit důležitost každého z nich a poté navrhnout změny ke zlepšení procesu obrábění. Ovlivňující faktory existují dvojího druhu definovatelné a nedefinovatelné. Rozdíl mezi nimi je, že definovatelné faktory lze při procesu změnit nebo nějakým způsobem předdefinovat, abychom dosáhli lepšího výsledku. Zatím co nedefinovatelné faktory nelze ovlivnit, přesto je lze pojmenovat a předvídat.

V následující části diplomové práce jsou vypsány faktory, které více či méně ovlivňují technologický proces vystružování.

3.1 Definovatelné faktory

Jak už bylo řečeno, definovatelné faktory jsou vlivy, které lze během pracovního procesu nějakým způsobem ovlivnit. Jedná se tedy o řezné podmínky, geometrii břítu, procesní prostředí, materiál nástroje, materiál obrobku, velikost přídávku, druh nástroje, způsob upnutí nástroje i obrobku, připevnění vyměnitelných břitových destiček, tvar vystružované díry, přívod řezné kapaliny k místu řezu a stabilita řezného prostředí.

3.1.1 Řezné podmínky

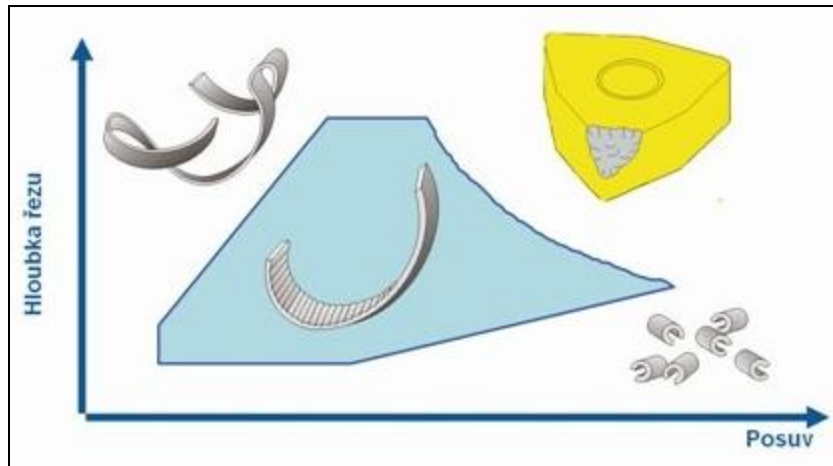
Řeznými podmínkami je možné ovlivnit mnoho věcí při řezném procesu jako např. řezné síly, tvorbu třísky, produktivitu výroby, rychlost otupení nástroje, kvalitu povrchu, atd. Proto je nutné si uvědomit, jaké důsledky mohou nastat při jejich změně v průběhu řezného procesu. Některé z možných důsledků jsou popsány níže.

Správně zvolené řezné podmínky mají veliký vliv na tvorbu třísky, která může řezný proces negativně ovlivnit. Na obrázku 20 je znázorněna tvorba třísky v závislosti hloubky řezu (pro vystružování je to vlastně velikost přídávku) na posuvu. Z diagramu je jasně vidět, že při špatně zvoleném poměru těchto dvou hodnot bude docházet k problémům při obrábění (poměr mezi hloubkou řezu a posuvem je vysoký) a ke snižování životnosti nástroje (při nízkém poměru). Jestliže zvolíme vysokou hodnotu posuvu a příliš velkou hloubku řezu, dojde k mechanickému přetížení nástroje a následnému vylomení.

Vliv řezné rychlosti na proces utváření třísky není jednoduché obecně pospat, ale je možné říci, pokud se zvolí nízké posuvy, budou třísky tím delší, čím vyšší bude navolená řezná rychlost.[20]

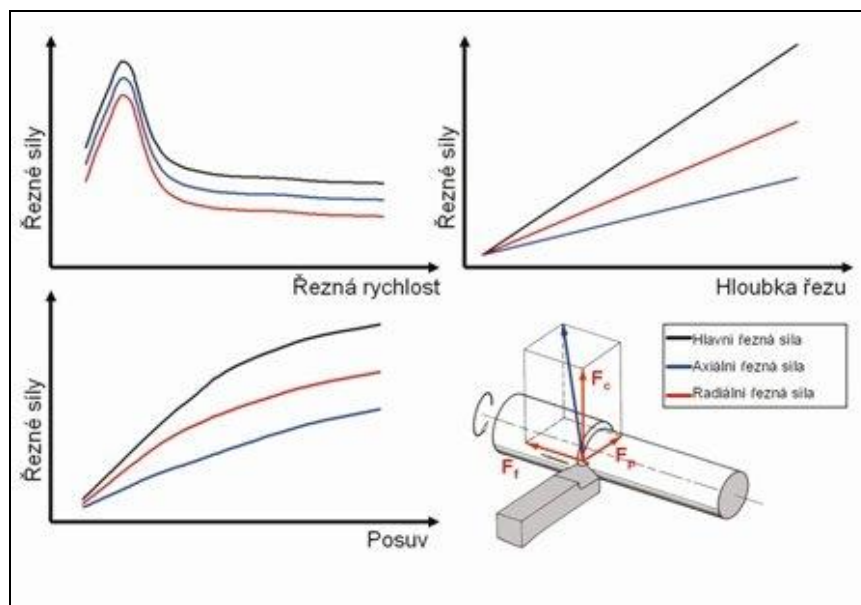
Celkově lze říci, že se požadují třísky krátké spirály, protože dlouhé třísky ohrožují obsluhu, způsobují prostoje při namotání třísky do stroje a horším odvodem z místa řezu, mohou způsobit znehodnocení obráběného povrchu. Naopak velmi krátké třísky způsobují snížení životnosti nástroje, jelikož způsobují mikrotrhliny na řezné hraně, což vede k předčasnému vylomení hrany.

Řezné síly dosahující při procesu obrábění vysokých hodnot zvyšují výkon a použitelný výkon je vždy omezen. Dále způsobují vysoké deformace jak nástroje, tak i obrobku, což může vést ke vzniku chvění, zhoršení výsledného povrchu (kvalitou i přesností). V případě velmi vysokých řezných sil, zde hrozí riziko vylomení řezné hrany.



Obr. 19 Schéma utváření třísky [20]

Vliv na velikost řezných sil má zejména tvrdost obráběného materiálu, zvolená geometrie nástroje a použité řezné podmínky. Při vysoké tvrdosti obráběného materiálu je potřeba, aby nástroj překonal větší řezný odpor kladený materiálem a tudíž je potřeba i vyšších řezných sil. Snadnější průchod nástroje do materiálu se dosáhne ostřejším nástrojem, tzn. větším úhlem čela. Obráběný materiál nebo geometrie nástroje jsou faktory, které už za provozu nelze měnit. Jedinou možností jak ovlivnit řezné síly je pomocí řezných podmínek. Na obrázku níže jsou znázorněny průběhy řezných sil v závislosti na řezných podmínkách.



Obr. 20 Průběhy řezných sil v závislosti na řezných podmínkách [21]

Změna řezné rychlosti výrazně ovlivňuje produktivitu vystružování a kvalitu otvoru. Např. zvýšením řezné rychlosti se sice sníží řezný odpor, avšak vzrůstá intenzita otupování řezného bříty a to zejména z důvodu nárůstu teploty v místě řezu. Jako příklad lze uvést poznatky z odborného článku (Příručka pro technologii) v MM Průmyslovém spektru, kde je uvedeno, že zvýšením řezné rychlosti cca o 10% se životnost nástroje snížila cca o 50%. Zvyšování řezné rychlosti může způsobovat i chemické reakce mezi nástrojem a obrobkem, které mají také neblahý vliv na

životnost nástroje. Naopak nízká řezná rychlost by mohla způsobit vytváření nárůstku na nástroji, který je při procesu řezání také nežádoucí.

3.1.2 Geometrie bříty

Geometrie nástroje je další velmi důležitou částí efektivního a kvalitního obrábění. Zvolením správné geometrie, lze ušetřit čas, nástroj, množství chladicí kapaliny, zvýšit kvalitu obrobeneho povrchu, aj..

- **Úhel čela**

S větším úhlem čela, se nástroj snadněji prořezává obráběným materiálem, tím samozřejmě vzniká menší tření mezi třískou a čelem nástroje, což vede ke snížení teploty v místě řezu a prodloužení životnosti nástroje. Na druhou stranu se zvětšením úhlu čela dochází ke zmenšení bříty, což způsobuje snadnější vylomení řezné hrany. Další nevýhodou je, že vznikají delší třísky, které mohou negativně ovlivnit výrobní proces, jak bylo řečeno v kapitole výše.

- **Úhel hřbetu**

S úhlem hřbetu je to přesně naopak, než u úhlu čela. Při větším úhlu hřbetu dochází k menšímu tření nástroje po obrobene ploše a tím vzniká méně tepla, které by negativně ovlivňovalo řezný proces. Nevýhodou je však, že při zvětšení úhlu dochází ke zmenšení bříty. Díky čemuž se zvýší náchylnost k porušení bříty.

- **Poloměr zaoblení ostří**

Poloměr zaoblení ostří ovlivňuje hned několik vlastností řezného procesu. Například, když se zvětší poloměr ostří, zvýší se i životnost nástroje. Je to z toho důvodu, že s větším poloměrem je ostří stabilnější (teplo působí na větší plochu, oproti menšímu rádiusu). Dále má větší poloměr ostří negativní vliv na drsnost povrchu a naopak pozitivní vliv má na opotřebení na hřbetu i na čele nástroje.

- **Velikost zubové mezery**

Velikost zubové mezery závisí na objemu třísky (je dána velikostí přídavku), kterou odebrá zub výstružníku na vystružovaném obvodu díry. Při malém objemu zubové mezery může docházet k ucpání zubové mezery, což vede k poškození povrchu vystružovaného otvoru nebo samotného nástroje. Naopak při velkém objemu zubové mezery dochází ke zmenšení pevnosti zubu a tím ke snížení životnosti nástroje.

- **Utvařec třísky a řezná hrana**

Tyto faktory, mají největší vliv na tvorbu třísky, správně zvolený utvařec třísky napomáhá k tvorbě třísky ve formě krátké spirály, která je, jak bylo řečeno výše nejvhodnější variantou, pro klidný a kontinuální řezný proces. Úhly na řezné hraně mají také svůj vliv na proces obrábění. Menší úhly řezné hrany způsobují tvorbu dlouhých třísek, proto je lepší volit úhly větší.

3.1.3 Procesní prostředí

Řezné kapaliny mají za úkol odvést vzniklé teplo z místa řezu, snížit velikost tření (tzn. zvýšit mazací účinek mezi hřbetem nástroje a obrobenu plochou a mezi čelem nástroje a vznikající

třískou) a mají čisticí funkci. Díky těmto vlastnostem je zachována přesnost nástroje a stálost rozměru obrobku.

Největší význam na kvalitu povrchu má chladicí účinek, jelikož převážná část mechanické energie je při obrábění přeměněna na teplo, které je z největší části odváděnou třískou a řeznou kapalinou (až 85%). Velikost vznikajícího tepla lze ovlivnit definovatelnými faktory jako je řezná rychlost, výkon, houževnatost obráběného materiálu, geometrie nástroje, chlazení a mazání.

Volba řezné kapaliny závisí na podmínkách obrábění, zda je kladen větší důraz na chladicí či mazací účinek. Obecně platí, že největší chladicí účinek mají látky mísitelné s vodou. Mazací účinek požadujeme při obrábění za vzniku velké třísky, při nízkých řezných rychlostech a při požadavku na vysokou přesnost obrobku. Podle potřeby je možné si vybrat z různých druhů řezných kapalin.

1. Emulze

Tento druh je velmi často používaný, jelikož má oproti olejům větší chladicí vlastnosti a zároveň je levnější, protože obsahuje 90-99% vody. Nevýhodou je, že voda představuje velmi dobré prostředí pro tvorbu mikroorganismů, které zhoršují vlastnosti emulze. Nejdůležitějším faktorem používané emulze je hodnota pH, která by měla mít hodnoty mezi 8,8 až 9,3. Emulze v tomto rozsahu se označuje jako „nedráždivá“. „Ideální“ emulze by měla mít pH rovno 7 (v dnešní době se na trhu objevuje pouze ve výjimečných případech). Při používání emulzí se hodnota pH mění, což je nežádoucí pro kvalitu obrábění. Snížením pH může docházet k vytváření koroze jak na obrobku, tak i na stroji. Jestliže, je emulze napadena více bakteriemi, dochází ke ztrátě stability a tím k snižování řezného výkonu. Zvýšení pH může způsobovat pění emulze, tím se sníží mazací schopnost emulze a to má vliv na nástroj a kvalitu povrchu. Vhodnou variantou pro vystružování by mohly být emulze od firmy Agip, označovány jako Agip aquamet. Tyto emulze svými vlastnostmi napomáhají k dosažení lepších výsledků při vystružování. Například při obrábění slitiny AlMgSi s malým obsahem křemíku, bylo dosaženo drsnosti pod 1,0 $\mu\text{m Rz}$. Dále napomáhá k odolnosti proti zalepování nástroje. Nepění ani při pracovním tlaku 5 MPa. Dalšími výhodami řezné kapaliny je, že se dobře filtruje, je dlouhodobě stabilní a nezatěžuje životní prostředí.

2. Syntetické roztoky

Syntetické chladicí kapaliny je speciální směs ve vodě rozpustných různých aditiv, neobsahují žádné minerální ani syntetické oleje. Tyto kapaliny mají spoustu výhod. Obsahují ty nejlepší vlastnosti ze všech řezných kapalin. Mají velmi dobré mazací vlastnosti známé z oblasti řezných olejů a chladicí vlastnosti vody. Díky tomu je možné zvýšit řeznou rychlost, ale i trvanlivost nástroje (cca o 20%). Přidaná aditiva zabraňují pění při vysokotlakém chlazení. Velmi dobré smáčecí vlastnosti snižují spotřebu kapaliny, dále mají velmi dobrou odlučivost cizích olejů, což zvyšuje životnost kapaliny.

3. Oleje

Oleje mají velmi dobré mazací vlastnosti, ale naopak mají poměrně velké množství nevýhod, jako např. menší hustotu než voda (proud oleje bude mít menší sílu, než proud vody a díky menší hustotě, menší odvod tepla), vysoká viskozita (vysoký odpor vůči pumpování). Ale existují případy, kdy se bez chlazení olejem neobejdeme. Typickým příkladem je závitování, kde se vyšší viskozita a přilnavost, dokonalé mazání a menší rozstřík olejů stávají klíčovými vlastnostmi pro docílení kvalitního povrchu. Níže je uvedeno pár typů a rad, pomocí kterých se dosáhne kvalitní a efektivní práce při používání vysokotlakého chlazení olejem.

- Na 1kW řezného výkonu by mělo být dodáváno 2,36l chladicí kapaliny nebo pro vyvrtávání 15 l na 1 cm.
- Kvalitní filtrování (horní hranice filtru by měla být 50 μm , ideální stav pro olej je 20 μm).
- Jestliže je nedostatečný odvod tepla a třísek z místa řezu nebo je proud kapaliny nedostatečně soustředěný => zvýšit tlak (pro většinu operací je vhodný tlak 70 barů).

Vliv chlazení na proces utváření třísky je diskutabilní. Tradiční způsoby chlazení, kterými jsou obrábění za sucha, chlazením emulzí nebo MQL chlazení, nemají ve skutečnosti na proces utváření třísky znatelný vliv. Naproti tomu systém chlazení HPDC (přímé vysokotlaké chlazení) podstatně ovlivňuje nejen tvorbu třísek, ale také životnost nástroje a kvalitu obrobku.[20] Použití vysokotlakého chlazení olejem se výrazně zkracuje délka třísek, tříska je lépe odváděna z místa řezu, což snižuje riziko ucpání zubové mezery a zlomení nástroje.

3.1.4 Materiál nástroje

Volba správného materiálu nástroje, je úzce spjata s obráběným materiálem. Mechanické a technologické vlastnosti obráběného materiálu jsou hlavním kritériem při volbě vhodného nástroje. O vhodnosti různých řezných materiálů pro vybrané obráběné materiály se pojednává rešerše na řezné materiály v příloze číslo 2.

3.1.5 Materiál obrobku

- **Z hlediska vzniku třísky**

Dle druhu obráběného materiálu mohou vznikat různé typy třísek (dlouhé, stužkovité, šroubovitě, elementární, atd.). Například neželezné materiály tvoří extrémně dlouhou třísku, oceli mají třísku dlouhou, litiny a kalené materiály se vyznačují tvorbou krátkých třísek a třísky nepravidelného tvaru se vytváří při obrábění nerezových ocelí, vysoce legovaných a titanových slitin.

- **Z hlediska tvrdosti a pevnosti**

Tvrdość materiálu obrobku má velký vliv na velikost řezného odporu kladeným na nástroj. Čím je větší řezný odpor (vysoké řezné síly), tím dochází hůře k deformaci materiálu obrobku a proto vzniká při obrábění více tepla, což způsobuje zvýšení teploty na řezné hraně. Tento jev je možné vyvážit snížením řezné rychlosti. Dále tvrdost a pevnost materiálu ovlivňuje tvorbu třísky, čím tvrdší obráběný materiál, tím se tvoří kratší tříska, což má spíše pozitivní vliv na řezný proces.

- **Z hlediska tažnosti**

U tažnosti je právě naopak, než u tvrdosti a pevnosti. Zde platí, je-li tažnost vyšší, tím delší tříska vzniká. Velký rozdíl tažností je mezi obyčejnou konstrukční a nerezovou ocelí. Nerezová ocel má vyšší tažnost, proto jsou její třísky delší.

- **Z hlediska chemického složení**

Obsah legujících prvků v obráběném materiálu je z hlediska obrobitelnosti velmi důležitý. Například mangan je velmi abrazivní materiál a je-li ho v obráběném materiálu velké množství, dochází při obrábění (tříska se tře po čele nástroje) k většímu opotřebení nástroje.

- **Výše adheze materiálu**

Při obrábění nerezových ocelí, které mají vyšší adhezi, než běžné oceli, dochází k vytváření nestabilních nárůstků na břitě. Tyto nárůstky negativně ovlivňují řezný proces (zhoršením kvality, přesnosti a drsnosti povrchu, vnášením chvění, apod.).

- **Zpevnění vrstvy**

Jestliže se při obrábění odebírá materiál ve více vrstvách, existuje riziko, že po obrobení první vrstvy dojde ke zpevnění povrchu, který musí nástroj v dalším kroku překonat. Tím se zvyšuje teplota řezání a řezný odpor, který snižují životnost nástroje. Typickým představitelem takového materiálu je slitina niklu nazývaná INCONEL. V těchto případech je tedy nutné volit co největší úběry s nízkým počtem drah a co možná nejvyšší posuvy.

- **Z hlediska struktury materiálu**

Struktura materiálu je také velmi důležitým faktorem pro tvorbu třísky. Například při obrábění austenitických ocelí dochází k tvorbě nepravidelných třísek, které jsou velmi obtížně kontrolovatelné. Dále vysoká tvárnost a nízká tepelná vodivost austenitu způsobuje vznik velkého množství tepla v místě řezu, což snižuje životnost nástroje.

- **Z hlediska výroby**

V praxi existují případy, kdy při obrábění stejného materiálu bylo dosaženo různých životností nástrojů, kvality či přesnosti povrchů. Zpětně se zjistilo, že dodavatel obráběného materiálu nepatrně změnil například způsob výroby, což mělo za následek změnu vlastností materiálu (chemické složení, mechanické vlastnosti, velikost a orientace zrn, atd.). Jak důsledně dodržuje dodavatel materiálůvé normy je jen velmi těžko zjistitelné a ovlivnitelné. Lze však ovlivnit to, že příště si materiál objednáme od konkurence, která normy dodržuje.

- **Tvar a orientace zrn**

Největší význam se nachází při obrábění litin, kde je důležité, v jaké formě je vyloučen grafit. Nejvýhodnějším tvarem je ve formě kuliček (tedy globulární), při obrábění takové litiny dochází k menšímu opotřebení břitě, než u litiny s lupínkovým grafitem.

- **Tepelná vodivost**

Tepelná vodivost obráběného materiálu výrazně ovlivňuje odvod tepla z místa řezu. Čím vyšší tepelnou vodivost obráběný materiál má, tím více tepla se odvede z místa řezu a tudíž dochází k menšímu tepelnému zatěžování nástroje. Což snižuje jeho opotřebení a zvyšuje životnost.

3.1.6 Velikost přídávku a kvalita výchozího otvoru

Při zvolení zbytečně velkého přídávku se prodlouží výrobní proces každé díry, což může znamenat v celkovém součtu velké časové i peněžní ztráty. Dalším negativem je, že při odebírání více materiálu dochází k vytváření většího tepla v místě řezu, musí se tedy použít více chladicí kapaliny, neboť by docházelo k rychlejšímu utopování břitě.

Jestliže se naopak zvolí přídavek příliš malý, může dojít k tomu, že nerovnosti, které vznikly předchozím obráběním (vrtáním, frézováním, atd.), budou větší, než samotný přídavek. Nebude tedy možné tyto nerovnosti povrchu pomocí výstružníku odstranit.

Je tedy nutné zvolit optimální velikost přídatku, pro vyrobení přesného a kvalitního otvoru s ohledem na ekonomičnost celého procesu. Správnou velikost přídatku, by měl udávat výrobce nástroje nebo se může využít poznatků z praxe.

3.1.7 Druh nástroje

- **Podle počtu břitů**

Jednobřítý

U jednobřítých nástrojů je dosahováno lepší kvality povrchu. Řezná část nástroje se skládá z jednoho břitu a dvou vodiček, které stabilizují řezný proces a nedochází tak ke kopírování případných chyb výchozího otvoru.

Vícebřítý

Při obrábění vícebřítým nástrojem je však možné nastavit vyšší posuvy, než u výstružníků s jedním břitem, což vede k úsporám času. Na druhou stranu u vícebřitého výstružníků hrozí větší riziko zaplnění zubové mezery třískou. To může způsobit znehodnocení vystružované vrstvy nebo samotného výstružníku.

- **Podle konstrukce**

Vyměnitelné břitové destičky

Velikou výhodou u VBD destiček je, že při opotřebení není potřeba měnit celý nástroj, ale lze vyměnit pouze opotřebovanou destičku za novou. Při používání VBD destiček hrozí větší riziko vzniku nepřesností při vystružování otvorů, hlavně z důvodů různých tepelných roztažností destičky a těla nástroje. Destičky se k nástroji buď pájí nebo lepí, u pájených destiček se přidává mezi destičku a ocel korekční člen (nejčastěji z mědi), který zmírní napětí mezi nástrojem a destičkou. V dnešní době je snaha volit spíše lepené destičky.

Monolitní nástroje

U těchto nástrojů je hlavní nevýhodou cena, jelikož se musí vyměnit celý nástroj. Z těchto důvodů se spíše používají pro vystružování menších průměrů.

Vystružovací hlavy

Pro průměry větších rozměrů je vhodné zvolit vystružovací hlavy, kde je při ztrátě jejich životnosti možné vyměnit pouze řeznou část (vystružovací hlavu).

3.1.8 Způsob upnutí nástroje

- **Velikost vyložení nástroje**

Tento faktor má významný vliv na stabilitu celého řezného procesu, proto by se měla tato hodnota volit co nejmenší. Při větším vyložení je nástroj náchylnější ke vzniku chvění, které negativně ovlivňuje kvalitu obrobeného povrchu. U nástroje s větším vyložení může snáze dojít k vyhnutí z požadovaného směru a tím se zhorší i geometrické přesnosti obrobeného otvoru. S minimálním vyložení se nedocílí pouze lepší kvality a větší přesnosti obrobeného otvoru, ale zvýší se i produktivita řezného procesu, jelikož při stabilnějším upnutí je možné zvýšit i řeznou rychlost a posuv.

Poznámka: V některých případech například u frézování může dojít i při větším vyložení ke zkvalitnění povrchu. Děje se tak z toho důvodu, že se fréza odkloní od osy vřetene, tím dojde ke zmenšení hloubky řezu a zároveň ke snížení řezných sil. Potom je hodnota drsnosti povrchu menší, ale geometrická přesnost je nevyhovující.

- **Druh upínače**

Aby bylo možné využít velkého potenciálu, který nabízejí moderní výstružníky s moderními technologiemi, musí upínání nástrojů z hlediska stability řezného procesu splňovat některé základní požadavky: velkou upínací sílu, která eliminuje pohyb nástroje vyvolaný odstředivou silou a současně zajišťuje maximální axiální oporu, minimální házení, které je pro upnutí nástroje životně důležité a uspokojivé vyvážení, protože nadměrná nevyváženost vyvolává vibrace, které mohou být průvodním jevem před poškozením nástroje nebo samotného vřetene stroje. Žádný systém upínání není v tomto ohledu zcela dokonalý. Proto je vždy nutné zvážit všechny možné důsledky použití daného upnutí.[24]

3.1.9 Způsob upnutí obrobku

Na přesnost má vliv i samotné upnutí obrobku. Je tedy důležité si před spuštěním výroby rozmyslet, jak obrobek správně upnout, aby nedocházelo k jeho deformaci (po vyjmutí obrobku by došlo k deformaci otvoru). Na druhou stranu je potřeba mít obrobek pevně uchycen, aby nedošlo k posunutí při obrábění. Je tedy nutné najít jistý kompromis.

3.1.10 Způsob upnutí vyměnitelných destiček

Tento faktor nemusí ovlivňovat kvalitu nebo přesnost vystruženého otvoru, ale spíše celkovou životnost nástroje a časové úspory. Připevnění destiček se používá dvojího druhu: pájením nebo lepením. Oba způsoby jsou pro správné uchycení destičky k tělu nástroje dostačující. Výhodnější metodou je však lepení, protože nedochází k ovlivnění materiálu nástroje, jako u pájení, tzn. tělo nástroje, se může teoreticky používat do nekonečna. Navíc při pájení je nutné mezi destičku a materiál nástroje vkládat člen pro zmírnění napětí (nejčastěji měď). Z toho plyne, že je tato metoda dražší a zároveň časově náročnější.

3.1.11 Tvar vystružované díry

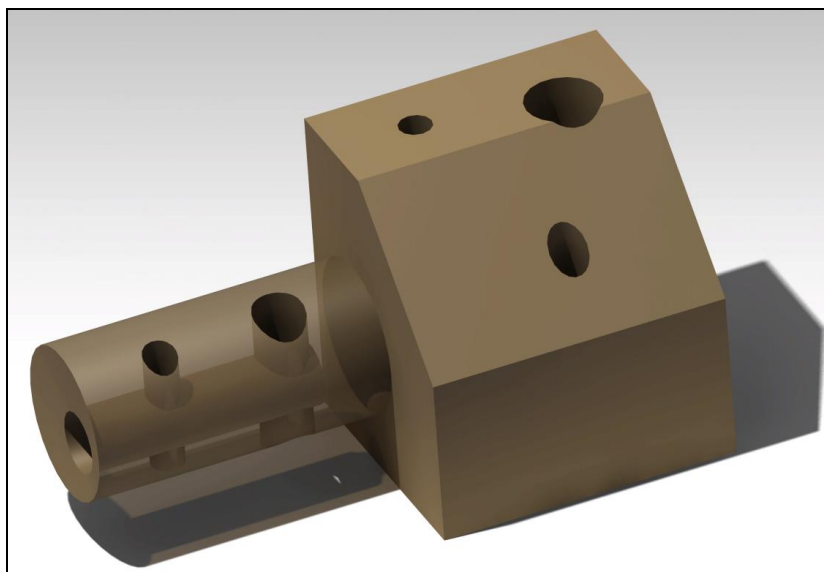
Dalším faktorem, který může velmi ovlivnit kvalitu obráběných otvorů, je tvar a rozměr díry. Základní typem je díra průchozí a neprůchozí (slepá). Při vystružování neprůchozí díry, je důležité zvolit správný přívod chlazení do místa řezu, aby byl zajištěn dobrý odvod třísky.

Hloubka díry je dalším parametrem, který je velmi důležitý. Při obrábění hlubokých děr, musí být nástroj správně upnutý, protože hrozí velké riziko vzniku chvění. U hlubokých děr je potřeba zajistit odchod třísky stejně jako u krátkých slepých otvorů.

Při obrábění větších průměrů nehrozí riziko vzniku chvění, jelikož je tuhost nástroje větší. Naopak při používání slabších výstružníků je důležité zvolit kvalitní upínač a menší vyložení nástroje.

Jestliže vystružovaná díra není kolmá k povrchu součásti, může to mít významný vliv na přesnost a kvalitu otvoru. Těchto případů může být celá řada (viz obrázek). U všech případů je důležité správné navedení nástroje do díry, aby nedošlo k chybám typu: kuželový vstup, deformovaná díra, špatná jakost povrchu, vyosení, kuželová díra nebo díra zakřivený do oblouku. Podobné chyby mohou nastat v případě, kdy vystružovaná díra prochází skrz jinou (už vyrobenou) díru. Zde nastává problém právě v průmětu těchto dvou otvorů.

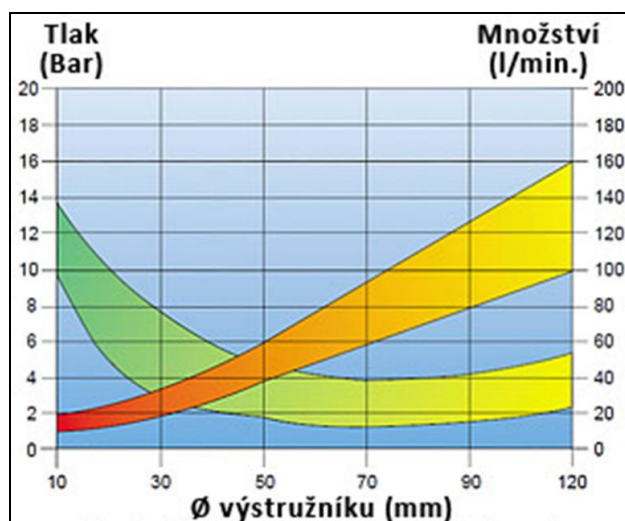
Ve většině případů je možné tento problém odstranit změnou konstrukce otvoru např. vytvořit zahloubení otvoru, ovšem nemá-li to vliv na funkčnost součásti. Potom by se musela volit jiná varianta, jako například vysoustružit otvor z druhé strany součásti.



Obr. 21 - Druhy vystružovaných děr

3.1.12 Přívod řezné kapaliny k místu řezu

Důležitým faktorem není jen správně zvolená chladicí kapalina, ale také její přístup k místu řezu. Například špatně zvolený směr chlazení může zapříčinit hned několik vad. Může docházet k velkému rozstříku chladicí kapaliny, nedostatečnému mazání nebo chlazení, špatnému odvodu třísky z místa řezu, větší spotřebě chladicí kapaliny, atd. Dalším důležitým faktorem je tlak, kterým je kapalina vháněna do místa řezu. Příliš malé průtokové množství, zhoršuje odvod tepla a třísek z místa řezu. Naopak příliš velké množství kapaliny může způsobit nežádoucí chemické reakce na povrchu obrobku a zvýšení nákladů na obrábění.



Obr. 22 - Vhodné podmínky pro chlazení [23]

Směr a tvar přívodu chladicí kapaliny je spíše otázkou praxe. Vhodné velikosti tlaků a průtokových množství pro různé průměry výstružníků jsou uvedeny na obrázku výše (Obr. 23).

3.1.13 Stabilita řezného prostředí

Stabilita řezného prostředí je faktor, který může velmi ovlivnit řezný proces. Dochází-li při vystružování k teplotním výkyvům (špatné chlazení, přerušovaný řez), může docházet k vytváření trhlin po celé délce bříty.

Dále můžeme ovlivnit teplotní stabilitu řezného procesu stálým prouděním vzduchu pomocí odlučovačů. U některých operací bylo zjištěno, že instalací odlučovače se dosáhlo dlouhodobě stabilnějšího průběhu křivky přesnosti. Jedná se například o dokončovací operace po velkých úběrech třísky, kdy se na výsledné přesnosti daného rozměru negativně projevovaly termální dilatace. (citace Tepelné změny v pracovním prostoru)

3.2 Nedefinovatelné faktory

Tyto faktory nelze během procesu vystružování žádným způsobem ovlivňovat, jedná se o vlivy nahodilé a nepředvídatelné jako je nehomogenita obráběného materiálu, nehomogenita materiálu nástroje, nehomogenita řezné kapaliny, stárnutí materiálu, tuhost soustavy S-N-O a opotřebení bříty.

3.2.1 Nehomogenita obráběného materiálu

V každém materiálu jsou obsaženy skryté vady (vměstky, různé velikosti zrn a jiné nežádoucí části), které mají výrazný negativní vliv na řezný proces (dochází k většímu utopování nástroje, hrozí riziko vylomení hrany, atd.). Tyto vady v materiálu není možné ovlivnit ani předvídat.

3.2.2 Nehomogenita materiálu nástroje

Stejně jako u obráběného materiálu se může i v materiálu nástroje objevit skrytá vada nebo vměstek, který nepředvídatelně sníží životnost nástroje. V některých případech však nehomogenita nástroje může naopak životnost nástroje několikrát zvýšit. Tento případ nastává při depozici tenkých vrstev na nástroj (dochází k nanášení jiného druhu materiálu na matrici, za účelem zlepšení vlastností nástroje). Tím se dosáhne lepších adhezních vlastností (nedochází k velkému tření, k vysokým řezným teplotám, navařování obráběného materiálu, atd.). Hrozí zde však jiné nebezpečí a to, že deponovaná vrstva se může kdykoliv odtrhnout a ohrozit tím řezný proces.

3.2.3 Nehomogenita řezné kapaliny

Obsah cizích látek (olej, tříška, otěry, atd.) v řezné kapalině zhoršuje její vlastnosti. Snáze dochází k napadání kapaliny bakteriemi a nepříznivě se ovlivňuje její stabilita. Největším problémem jsou pevné nečistoty, které mohou zapříčinit tvorbu zmetků. Druhým největším problémem je vnik cizích olejů do řezné kapaliny. Je tedy důležitá pravidelná kontrola, filtrace a odstředování řezných kapalin, aby nedocházelo k porušení obrobku nebo nástroje.

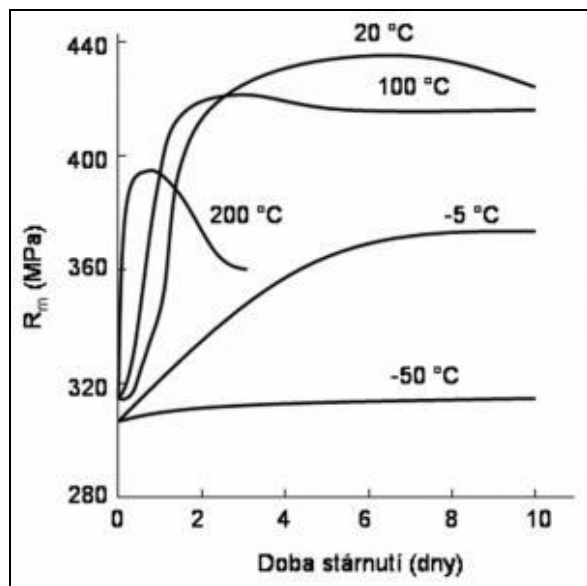
3.2.4 Stárnutí materiálu

Jedná se o nežádoucí proces, při kterém dochází například k fyzikálním i chemickým změnám vlastností materiálu a ke snižování mechanických vlastností. Stárnutí materiálu ovlivňuje nejvíce světlo, teplo, čas, mechanické a atmosférické vlivy, obsah dusíku a uhlíku v materiálu, předchozí zpracování materiálu, atd.

Obsah uhlíku při normální teplotě (20°C) nemá na rychlost stárnutí výrazný vliv. Tento vliv se zvyšuje se zvyšováním teploty (nad teplotou 100%). Oproti tomu dusík negativně ovlivňuje proces stárnutí materiálu i při okolní teplotě. Je tedy nutné se snažit dosáhnout při výrobě materiálu o co nejmenší obsah volných atomů uhlíku a dusíku. Toho lze docílit přidáním prvků

s vysokou slučivostí k dusíku a uhlíku, nejpoužívanějšími prvky jsou Al a Ti, což ocel proti stárnutí stabilizuje.

Dalším vlivem na proces stárnutí je čas a teplota působící na materiál. Na obrázku níže je znázorněn vliv teploty a doby stárnutí na pevnost tahu duralu $AlCu_4Mg_1$. Jednotlivé průběhy ukazují, jak výrazně se může změnit pevnost, která má velký vliv na obrábění a funkčnost součástí.



Obr. 23 Vliv teploty a doby stárnutí na pevnost v tahu duralu $AlCu_4Mg_1$ [22]

Z hlediska předchozího tváření má velký vliv na proces stárnutí tváření za studena. Způsobuje deformaci mřížky, ve které je potom méně místa k intersticiálnímu uložení atomů dusíku a uhlíku. Ty jsou pak z mřížky feritu vytěsněny, což se projevuje snížením rozpustnosti dusíku a uhlíku ve feritu. Proto je stárnutí po tváření za studena intenzivnější, než u oceli bez předchozího tváření.[21]

3.2.5 Tuhost soustavy S-N-O

Při vystružování nedochází k odebrání velkého množství materiálu, proto při obrábění otvorů nedochází k velkým řezným odporům, které by působily na stůl, obrobek či vřeteno stroje. V dnešní době CNC strojů, které zabezpečují velmi dobrou tuhost soustavy S-N-O, lze předpokládat, že tyto nepřesnosti budou při vystružování zanedbatelné.

3.2.6 Opotřebení břitů

Při obrábění je každé opotřebení břitů nežádoucí, musí-li však nějaké opotřebení nastat, je nezbytné, aby bylo bezpečné, kontrolovatelné a předvídatelné. Tyto vlastnosti splňuje opotřebení typu otěru na hřbetu a výlomu na čele nástroje. Všechny ostatní druhy opotřebení jsou nežádoucí, jelikož mohou vyústit k nebezpečnému chování břitů.

4 Hodnocení vlivů faktorů a definovat podmínky pro vysoce přesné a produktivní obrábění

Parametrů, ať definovatelných nebo nedefinovatelných, které mají vliv na řezný proces je celá řada (viz kapitola 3). Každý z těchto faktorů ovlivňuje proces obrábění různým způsobem, některé z faktorů mohou způsobit dokonce hned několik změn najednou. Hodnocení vlivů jednotlivých faktorů je velmi komplikované, jelikož většinou má změna jednoho faktoru vliv (pozitivní i negativní) na více důsledků řezného procesu (např. změnou úhlu čela se změní tvar a odchod třísky, což způsobuje změnu teploty v místě řezu, to má samozřejmě vliv na rychlost opotřebení bříty, atd.). Proto byla pro zjednodušení zvolena tři kritéria, která jsou dobře měřitelná a z výrobního hlediska velmi důležitá. Pomocí párové analýzy (viz Tabulka 13) jsou mezi sebou jednotlivá kritéria porovnávána a je jim přiřazena váha (důležitost) při hodnocení vlivů faktorů.

Tabulka 13 - Párová analýza - porovnání jednotlivých kritérií

	<i>Kvalita povrchu</i>	<i>Přesnost rozměrů</i>	<i>Produktivita</i>	<i>Pořadí</i>	<i>Váha</i>
<i>Kvalita povrchu</i>	X	0	1	2	2
<i>Přesnost rozměrů</i>	1	X	1	1	3
<i>Produktivita</i>	0	0	X	3	1

Z tabulky 13 je patrné, že nejvýznamnějším kritériem pro hodnocení vlivů faktorů je přesnost rozměrů, až na druhém místě je kvalita obrobeneho povrchu. Toto rozhodnutí lze názorně vysvětlit na jednoduchém příkladu: Mějme závěsný čep určený pro zalisování do vystruženého otvoru. Vystružený otvor je potřeba vyrobit s určitou přesností a kvalitou povrchu. Při výrobě však dojde na povrchu otvoru k vytvoření drážky ve tvaru šroubovice. Je zřejmé, že z hlediska kvality povrchu součást neodpovídá požadavkům, avšak díky dodržení přesnosti rozměrů, lze otvor pro daný případ stále použít (nemá vliv na funkčnost součásti). V případě, že by měl sloužit otvor pro pohyb pístu či jiného mechanismu, byla by samozřejmě i kvalita povrchu důležitým kritériem pro celkové hodnocení.

Posledním zvoleným kritériem je produktivita výroby, která je v dnešní době velmi důležitá. S vyšší produktivitou výroby je možné snižovat cenu konečného výrobku, což přiláká nové zákazníky. Ovšem nemělo by docházet ke zvyšování produktivity na úkor kvality nebo přesnosti otvorů, proto má produktivita v porovnání s kvalitou povrchu a přesností rozměrů nejmenší váhu (viz tabulka 13).

4.1 Multikriteriální hodnocení

Pomocí multikriteriálního hodnocení se podle vybraných kritérií a jim přiřazených hodnot vyberou faktory nejvíce ovlivňující proces vystružování. Pro dané kritérium se každé variantě přiřadí hodnota od 10 do 100 bodů, které se poté vynásobí vahou daného kritéria. Výsledná hodnota užitečnosti se určí součtem vážených hodnot pro každý hodnotící faktor. Pro lepší přehlednost výsledků se uvádí hodnota relativní užitečnosti.

Tabulka 14 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	Řezné podmínky		Geometrie břitu		Procesní prostředí		Stabilita řezného prostředí		Materiál nástroje	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Kvalita povrchu	2	2	85	170	80	160	70	140	40	80	75	150
Přesnost rozměrů	1	3	90	270	90	270	30	90	60	180	75	225
Produktivita	3	1	95	95	85	85	80	80	10	10	80	80
Celkem			535		515		310		270		455	
Relativní užítost variant			53,5%		51,5%		31%		27%		45,5%	

Tabulka 15 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	Materiál obrobku		Velikost přídávku		Druh nástroje		Tvar vystružované díry	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Kvalita povrchu	2	2	75	150	80	160	80	160	80	160
Přesnost rozměrů	1	3	70	210	90	270	70	210	85	255
Produktivita	3	1	80	80	85	85	80	80	30	30
Celkem			440		515		450		445	
Relativní užítost variant			44%		51,5%		45%		44,5%	

V tabulkách číslo 14, 15 a 16 jsou porovnány faktory, které lze ovlivnit (definovatelné faktory). Na první pohled je patrné, že mnoho těchto faktorů může proces vystružování výrazně ovlivnit. Je tedy důležité tyto vlivy nepodceňovat a nezanedbávat, jelikož jejich přítomnost v řezném procesu může mít rozhodující vliv na požadovaný výsledek. V tabulce 17 se hodnotí vliv nedefinovatelných faktorů, se kterými se při obrábění musí počítat, bohužel je však nelze nijak ovlivnit.

Tabulka 16 - Hodnocení vlivu definovatelných faktorů na vystružování

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	Způsob upnutí nástroje		Způsob upnutí obrobku		Způsob upnutí VBD		Přívod řezné kapaliny	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Kvalita povrchu	2	2	85	170	50	100	30	60	70	140
Přesnost rozměrů	1	3	90	270	80	240	70	210	30	90
Produktivita	3	1	70	70	70	70	10	10	80	80
Celkem			510		410		280		310	
Relativní užítlost variant			51%		41%		28%		31%	

Tabulka 17 - Hodnocení vlivu nedefinovatelných faktorů na vystružování

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	Nehomogenita obráběného materiálu		Nehomogenita materiálu nástroje		Nehomogenita řezné kapaliny		Tuhost S-N-O	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Kvalita povrchu	2	2	90	180	75	150	80	160	25	50
Přesnost rozměrů	1	3	85	255	80	240	60	180	30	90
Produktivita	3	1	85	85	85	85	50	50	10	10
Celkem			520		475		390		150	
Relativní užítlost variant			52%		47,5%		39%		15%	

Relativní užítlost neboli procentuální vliv každého faktoru na proces vystružování je uveden v posledním řádku tabulek. Z výsledků je patrné, že ne všechny faktory mají na vystružování značný vliv, proto se pro testování zvolí pouze faktory, které přesáhly 40% vlivu na řezný proces. Z definovatelných faktorů se jedná tedy o řezné podmínky (53%), geometrii břitu (51,5%), velikost přídavku (51,5%), materiál nástroje (45,5%), materiál obrobku (44%), druh nástroje (45%), způsob upnutí nástroje (51%) a obrobku (41%) a tvar vystružované díry (44,5%). U nedefinovatelných faktorů mluvíme o nehomogenitě materiálu obrobku (52%) i nástroje (47,5%), ovšem školní laboratoř není vybavena k provedení řádného testu těchto vlivů. Z tohoto důvodu se otestují pouze již zmíněné definovatelné faktory.

5 Experimentální testování vlivů vybraných faktorů na kvalitu a produktivitu vystružování určenými prototypovými výstružníky

Hodnoty vycházející z kapitoly 4 jsou pouze orientační a ne zcela vypovídající o velikosti vlivu na samotný proces vystružování. Je tedy potřeba provést experimentální měření, se za měřením na vybrané faktory a teoretický předpoklad v kapitole výše buď to potvrdit a nebo vyvrátit. Jedná se tedy o testování následujících faktorů:

- řezné podmínky
- geometrie břitu
- velikost přídavku
- materiál nástroje
- materiál obrobku
- druh nástroje
- způsob upnutí nástroje
- způsob upnutí obrobku
- nehomogenita materiálu obrobku i nástroje

5.1 Charakteristika experimentu

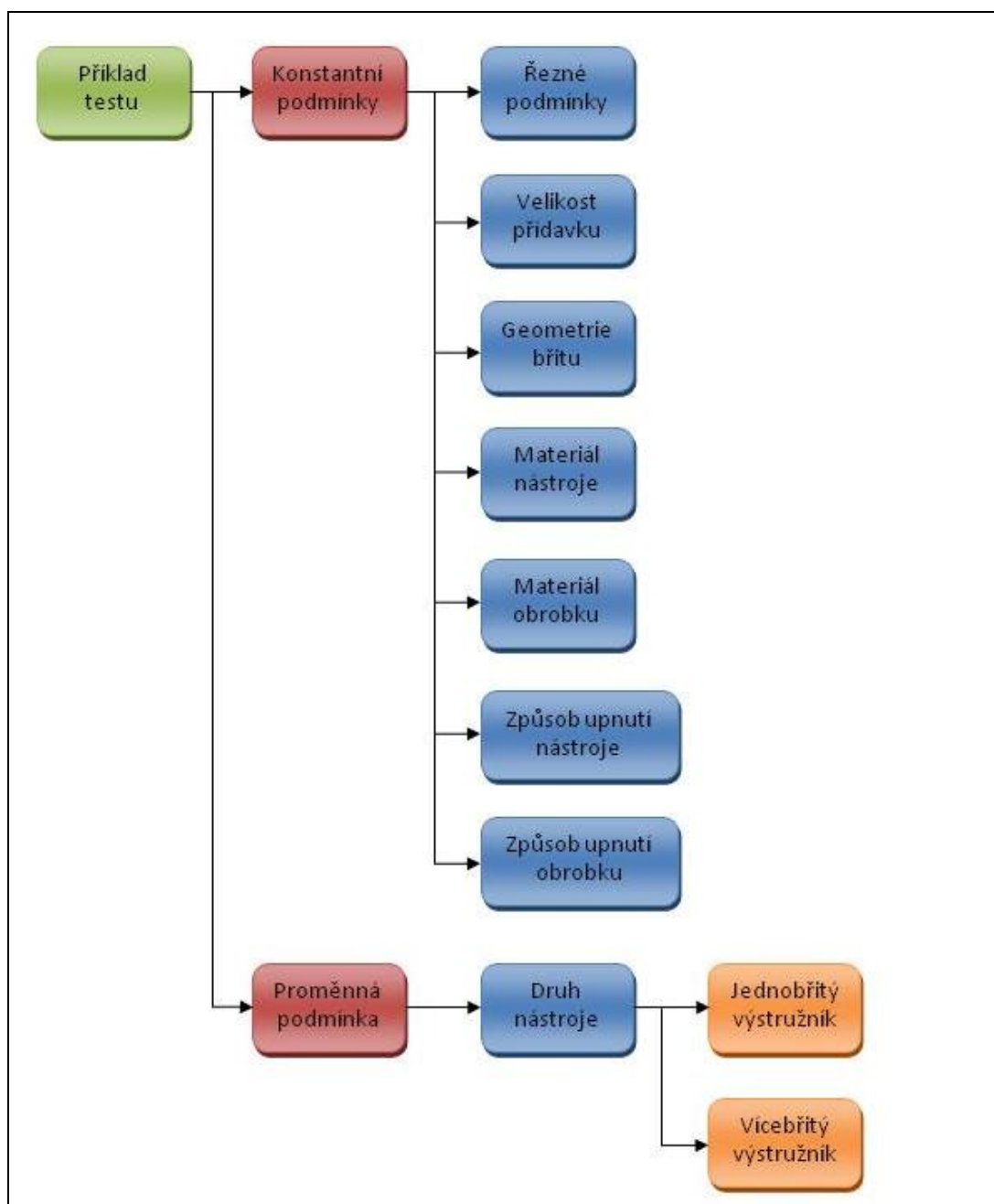
Cílem experimentu je získat závislost trvanlivosti nástroje na přesnosti rozměrů, kvalitě povrchu nebo produktivitě nástroje. Pro zjištění potřebných závislostí byly vystružovány otvory (pomocí dodaných výstružníků od firmy HAM-FINAL) o průměru 6 mm do předem stanoveného materiálu, který byl vybrán po konzultaci s odborníky z firmy HAM-FINAL.

Prostředky k provedení experimentu poskytla firma HAM-FINAL, která dodala 4 ks zkušebních vzorků obráběného materiálu a 1 ks řezného nástroje. Katedra technologie obrábění zajistila měřicí přístroje, stroje a prostory potřebné pro daný experiment.

5.1.1 Návrh a členění experimentu

Pro zjištění velikosti jednotlivých vlivů na řezný proces vystružování, je potřeba provést mnoho měření, u kterých se zachovají všechny faktory konstantní a změní se pouze ten, jehož vliv se zrovna testuje. Pro názornost je zde uveden příklad pro zjišťování velikosti vlivu druhu nástroje na řezný proces.

Pro takto zvolený experiment se nejdříve uskuteční obrábění jednobřítým výstružníkem, dokud nebude třeba výstružník přestříit nebo vyměnit. Stejný test se provede pro vícebřítý výstružník a hodnoty získané z těchto měření se vzájemně porovnají a vyhodnotí. Jelikož firma HAM-FINAL dodala pouze jeden kus výstružníku, nebylo tedy možné provést žádné další měření, se kterým by se mohly naměřené hodnoty porovnat.



Obr. 24 Schematické znázornění experimentu

5.1.2 Technická charakteristika experimentálního zařízení

K samotnému provedení experimentu bylo potřeba strojů, měřidel, nástrojů a zkušebních vzorků, které poskytla Západočeská Univerzita v Plzni za spolupráce firmy HAM-FINAL. Konkrétně se jednalo o obráběcí stroj, upínací pouzdro, řezný nástroj, obrobek, vzduchový kalibr a mikroskop.

5.1.2.1 Obráběcí stroj

Měření bylo prováděno na stroji DMU 65 monoBLOCK od firmy DMG Europe Holding GmbH. Stroj je umístěn ve Vědecko-technickém parku Plzeň a.s. Jedná se 5-osé obráběcí centrum s dynamickým naklápěcím otočným stolem, který dokonale zvládá technologie typu frézování, vrtávání, vystružování, atd. Technická data o stroji jsou přiloženy k této práci v příloze č. 3.

5.1.2.2 Řezný nástroj

Řezný nástroj je prototyp vyrobený a dodaný firmou HAM-FINAL. Jedná se jednobřítý výstružník s pájenou cermetovou břitovou destičkou a s deponovanou vrstvou TiAlSiN o průměru 6 mm. Těleso z rychlořezné oceli je připájeno k hlavičce ze slinutého karbidu, ke které je připájena břitová destička z cermetu.



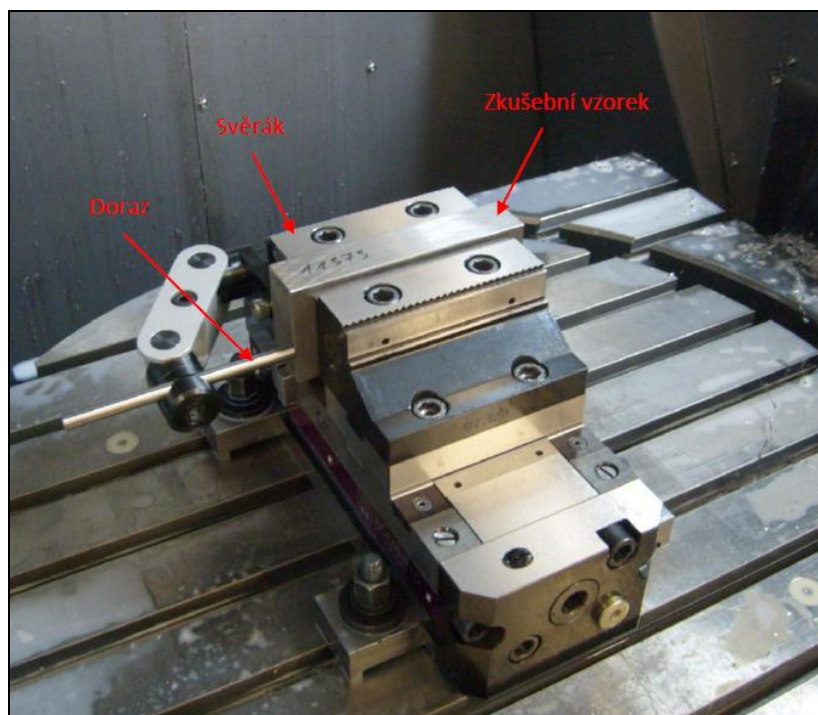
Obr. 25 Prototypový výstružník s pájenou cermetovou destičkou

5.1.2.3 Upínací pouzdro

Pro správné upnutí nástroje byl použit hydraulický upínač s kuželem HSK 63A. Tento druh upínače zvyšuje bezpečnost a spolehlivost obráběcího procesu. Další výhodou, kterou upínač nabízí, je rychlá výměna a seřízení nástrojů, díky svému jednoduchému ovládní.

5.1.2.4 Zkušební vzorek

Tvar a rozměry zkušební vzorku navrhla firma HAM-FINAL. Hlavními faktory pro zvolení tohoto tvaru byla ekonomičnost (snaha o co největší využití materiálu při vzniku co nejmenšího odpadu) a takové upnutí vzorku, aby nemělo výrazný vliv na vystružovací proces. Zkušební vzorek spolu s upnutím je vidět na obrázku níže a potřebná technická dokumentace je součástí diplomové práce v příloze č. 4.



Obr. 26 Upnutí zkušební vzorku na pracovním stole stroje

5.1.2.5 Vzduchový kalibr

Jedná se o pneumatické měřidlo od firmy MAHR, která se řadí mezi evropské výrobce měřicí techniky. Konkrétně se jedná o pneumatické měřidlo, které přepočítává tlak vzduchu v otvoru na délkové rozměry. Technické parametry měřicího zařízení jsou součástí diplomové práce v příloze č. 5.

5.1.2.6 Mikroskop

Mikroskop typu Multicheck pc 500 je umístěn v laboratořích ZČU v Plzni. V této diplomové práci byl využíván k zaznamenávání velikosti opotřebení břítu vystružovacího nástroje. Rozměry, možnosti zvětšení a další důležité technické parametry jsou uvedeny na konci této práce v příloze č. 6.

5.1.3 Postup měření

1. Vrtání

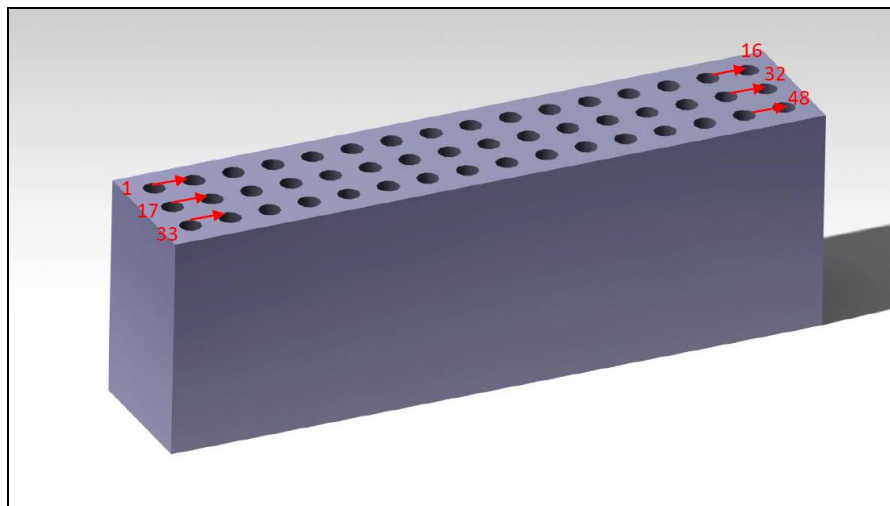
Připravený zkušební vzorek byl upnut do svěráku na pracovní desce obráběcího centra, do kterého se vyvrtalo 48 otvorů o průměru 5,8 mm a hloubce 27 mm. Řezná rychlost (v_c) činila 100 m/s a posuv na otáčku (f_o) byl roven 0,1 mm. Po vyvrtání otvorů následuje výměna nástroje a provede se vystružení všech vyvrtaných otvorů.



Obr. 27 Průběh vrtání otvorů

2. Vystružování

Vystružování otvorů se provádí ve stanoveném pořadí (viz obrázek níže), pomocí prototypového výstružníku o průměru 6 mm. U prvního vzorku se z díry 1-48 vyjždělo posuvem $f_o = 0,1$ mm, u díry 47-96 se zvolil pro výjezd nástroje rychloposuv $f_o = 45\ 000$ mm/min. Díky této úpravě se ušetřilo 3,5 minuty z vystružení 48 děr. Po vystružení otvorů na jedné straně zkušební vzorku se obrobek přeupne a opakuje se krok 1. a 2.



Obr. 28 Naznačený směr a pořadí vystružovaných otvorů

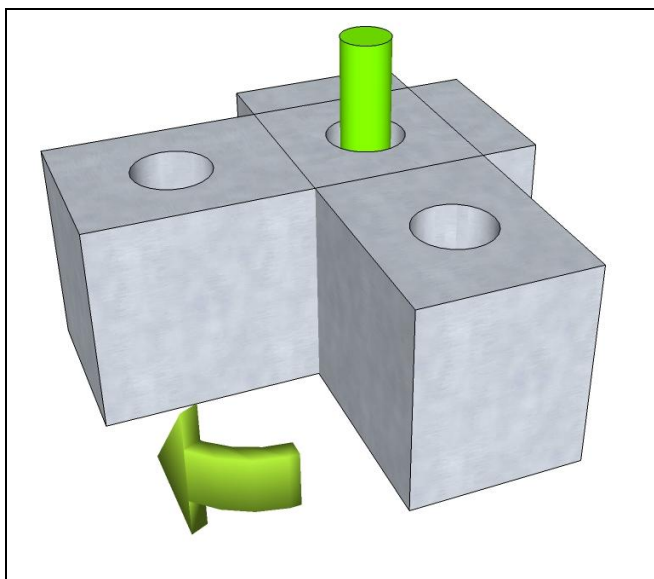
Jelikož se u vzorků 2, 3 a 4 použilo při vyjíždění ze záběru rychloposuvu pro všech 96 děr, celkový čas vystružování se zkrátil o celých 7 minut.

3. Měření vzduchovým kalibrem

Pro měření velikosti průměrů vystružených otvorů byl použit měřicí přístroj od firmy MAHR. Před začátkem měření si je potřeba vzduchové měřidlo zkalibrovat podle kalibrovacího kroužku pro daný rozměr otvoru. Poté je možné přistoupit k samotnému měření:

a) Měříme v hloubce 22 mm

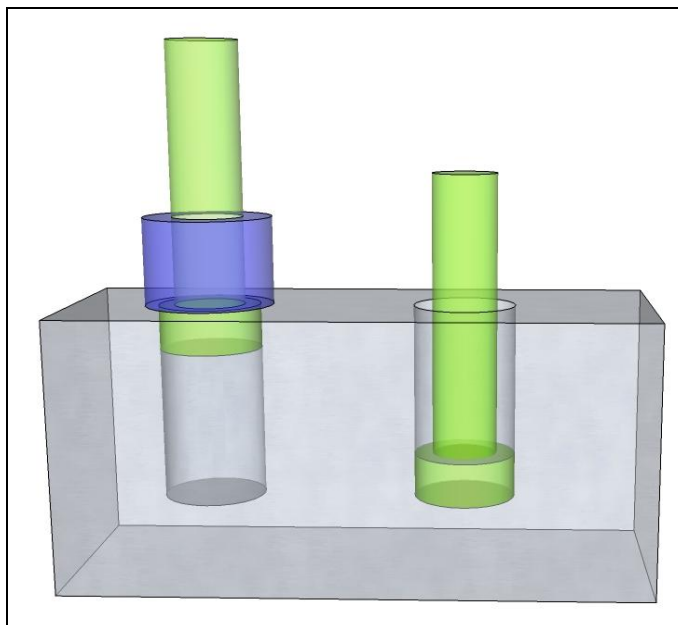
Vložíme kalibr až na dno vystružené díry (otvory, kterými proudí vzduch do otvoru, jsou cca 3 mm od spodní hrany měřidla), proto lze konstatovat, že měříme v hloubce 22 mm. Ke zjištění minimálního a maximálního průměru se součástí pootáčí o 90° v rozsahu 360°, tím se zjistí čtyři hodnoty průměru, ze kterých se zapíše do tabulky nejmenší a největší naměřená hodnota. Tímto způsobem se provede měření všech otvorů na daném vzorku.



Obr. 29 Znázornění měření otvorů

b) Měříme v hloubce 3 mm

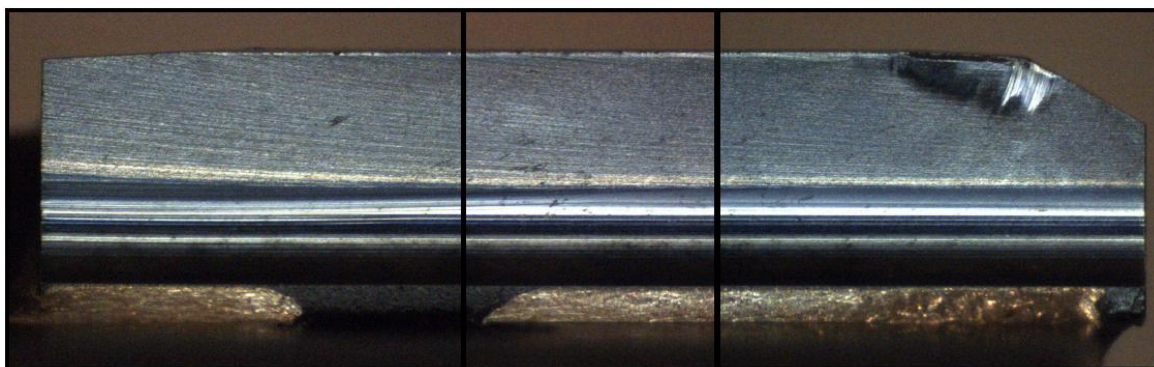
Při zjišťování průměru v hloubce 3 mm je postup měření totožný s předchozím měřením v hloubce 22 mm, s tím rozdílem, že se na vzduchový kalibr připevní vymezovací váleček. Pomocí tohoto válečku se vymezí požadovaná hloubka měření a zabezpečí se tím opakovatelnost měření. Pro představu je na Obr. 29 znázorněný vzduchový kalibr (zeleně) bez i s vymezovacím válečkem (modře).



Obr. 30 Vzduchové měřidlo s (vlevo) a bez vymezovacího válečku (vpravo)

4. Měření opotřebení bříty

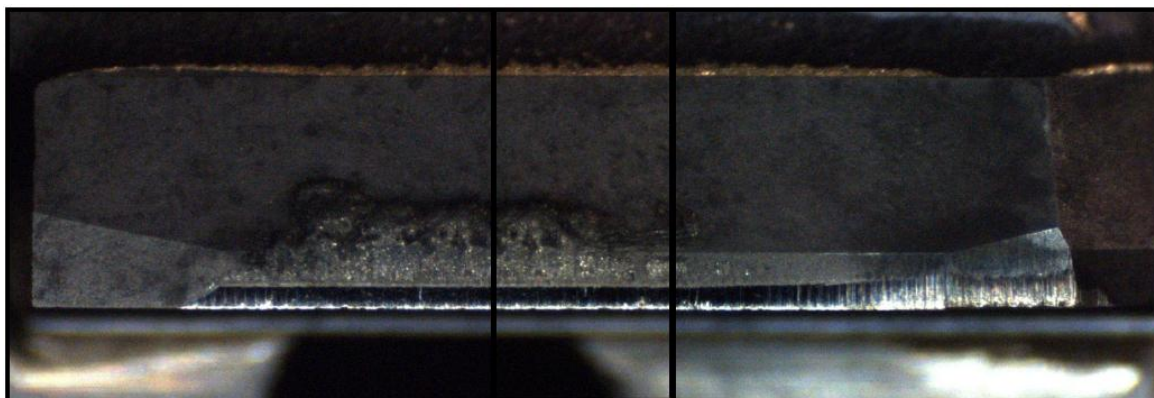
Opotřebení bříty se při provádění experimentu kontrolovalo průběžně po vždy po vystružení jednoho kusu vzorku, tzn. po vystružení 96-ti otvorů, pomocí lupy. Jelikož nástroj nevykazoval žádné výrazné známky opotřebení, provedla se podrobnější fotodokumentace pomocí mikroskopu až po vystružení všech čtyřech kusech zkušebních vzorků. Stav nástroje po vystružení délky otvorů o celkovém součtu 9,6 m, je zachycen na snímcích níže.



Obr. 31 Opotřebení na čele výstružníku

Výstružník nebylo možné na mikroskopu zdokumentovat vcelku, proto jsou obrázky čela i hřbetu výstružníku rozdělány na tři části. Na snímcích je již patrné opotřebení jak na čele, tak i na hřbetu nástroje. Opotřebení na čele nástroje je způsobeno třením třísky po čele

nástroje. Opatření vzniklé na hřbetě nástroje je rovnoměrné, což je pro řezný proces velmi výhodné.



Obr. 32 Opatření na hřbetu výstružníku

5. Zaznamenání dat

Všechna zjištěná data se zaznamenávala do připravené tabulky navrhnoutou firmou HAM-FINAL, kterou je možné vidět níže. Jedná se pouze o vzor, kompletní naměřené hodnoty jsou součástí této diplomové práce v příloze č. 7.

Tabulka 18 - Vzor zaznamenávání hodnot

Č. testu	Ø Díry + tolerance		Typ výstružníku	
001/1	Ø6H7 (+0,012)		1-břítý cermetový výstr. s povlakem	
Číslo díry	ØA _{(3)min} [mm]	ØA _{(3)max} [mm]	ØB _{(22)min} [mm]	ØB _{(22)max} [mm]
1	6,0038	6,0038	6,0042	6,0045
2	6,0028	6,0032	6,0044	6,0056
3	6,0025	6,0035	6,0067	6,0041

5.2 Vyhodnocení experimentální části

Při experimentu byly vystruženy čtyři zkušební vzorky. Na každém z těchto vzorků bylo vystruženo 96 otvorů, což je po převedení na obrobené metry 2,4 m. Po obrobení všech 4 kusů nástroj obrobil tedy dráhu 9,6 m. V následujících tabulkách jsou popsány řezné podmínky pro jednotlivé zkušební vzorky.

Tabulka 19 - Řezné podmínky pro zkušební vzorek č. 1

Kostka č. 1	Díra 1-48	Díra 49-96
Obráběný materiál	11 373	
Přídavek na průměr [mm]	0,2	
v _c [m/min]	165	
v _f [mm/min]	439	
f _o [mm/ot] – v řezu	0,1	
f _o [mm/min] – při vyjetí z řezu	0,1	45 000
Čas vrtání + vystružování [min]	7	3,5

Pro kostky 2, 3 a 4 byly řezné podmínky konstantní, proto budou hodnoty zaznamenané pouze v jedné tabulce.

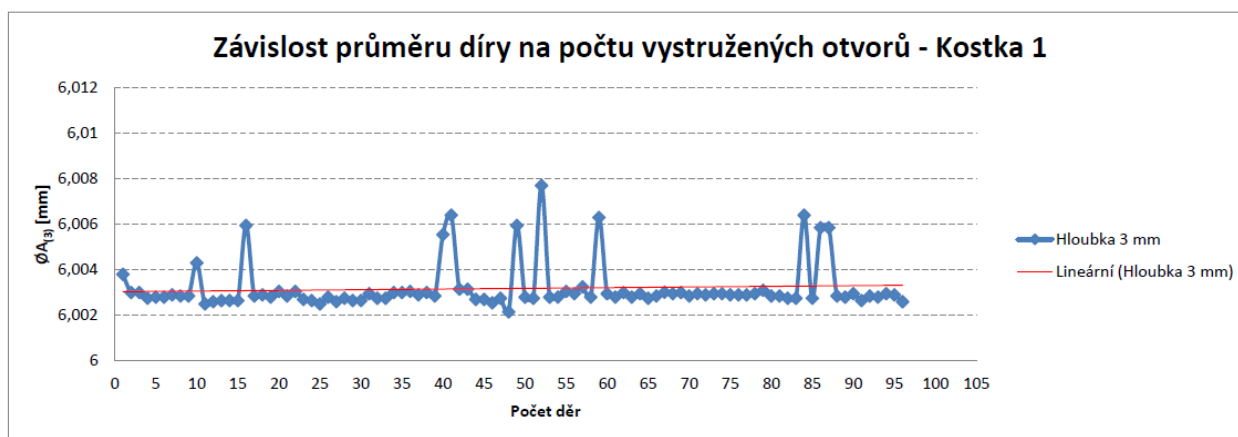
Tabulka 20 - Řezné podmínky pro zkušební vzorek 2, 3 a 4

Kostka č. 2, 3 a 4	Díra 1-96
Obráběný materiál	11 373
Přídavek na průměr [mm]	0,2
v_c [m/min]	165
v_f [mm/min]	439
f_o [mm/ot] – v řezu	0,1
f_o [mm/min] – při vyjetí z řezu	45 000
Čas vrtání + vystružování [min]	7

Z naměřených hodnot (viz příloha č.7) se vytvořily grafy závislosti velikosti průměru v hloubce 3 nebo 22 mm na počtu vystružených děr. Jelikož při měření se z jedné hloubky naměřily vždy dvě hodnoty ($A_{(3)min}$ a $A_{(3)max}$, $B_{(22)min}$ a $B_{(22)max}$), provedl se aritmetický průměr těchto hodnot. Tímto výpočtem se dostaly střední hodnoty pro hloubku 3 mm ($A_{(3)}$) a hloubku 22 mm ($B_{(22)}$). Hodnoty byly zaneseny do grafů pro každý zkušební vzorek zvlášť a jejich průběhy je možné vidět na obrázcích níže.

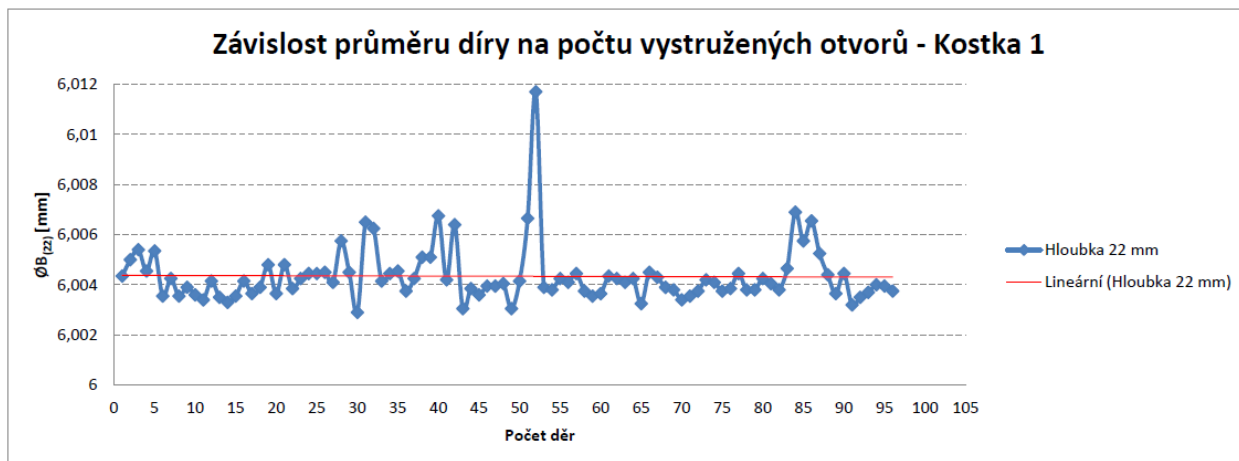
Kostka č. 1

Z průběhu obou grafů na kostce číslo 1 je patrné, že jsou otvory vystružovány v dané toleranci ($6 + 0,012$ mm).



Obr. 33 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm

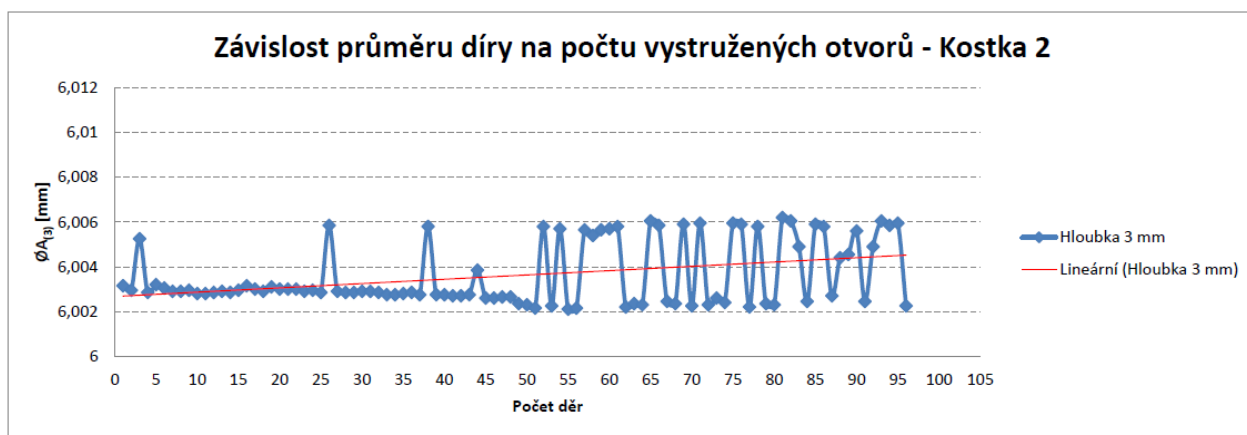
V grafu pro hodnoty naměřené v hloubce 22 mm výrazně vyčnívá hodnota naměřená pro otvor 52, kterému byla naměřena hodnota $B_{(22)min} = 6,0116$ a $B_{(22)max} = 6,0118$ a v hloubce 3 mm byly hodnoty $A_{(3)min} = 6,0055$ a $A_{(3)max} = 6,0099$. Tyto rozdílné hodnoty byly zapříčiněny vzniklou drážkou na povrchu vystružovaného otvoru. Příčinou vzniku může být vytvoření nárůstku na břitu nástroje, zachycení třísky nebo nečistoty mezi nástroj a stěnu otvoru nebo nestability nástroje při výjezdu z místa řezu. Avšak i přes tento výjimečný stav nebyla překročena tolerance rozměru, otázkou je, zda by otvor vyhověl i po stránce kvality povrchu.



Obr. 34 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm

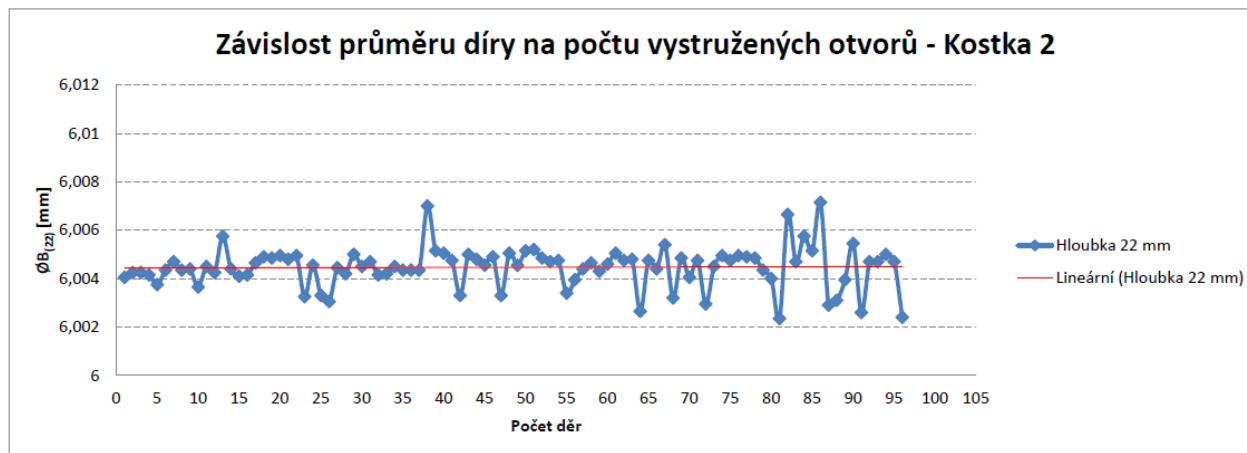
Kostka č. 2

U zkušební vzorku číslo 2, se všechny naměřené hodnoty pohybují v rozmezí 0,006 mm, což je velmi dobrý výsledek.



Obr. 35 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm

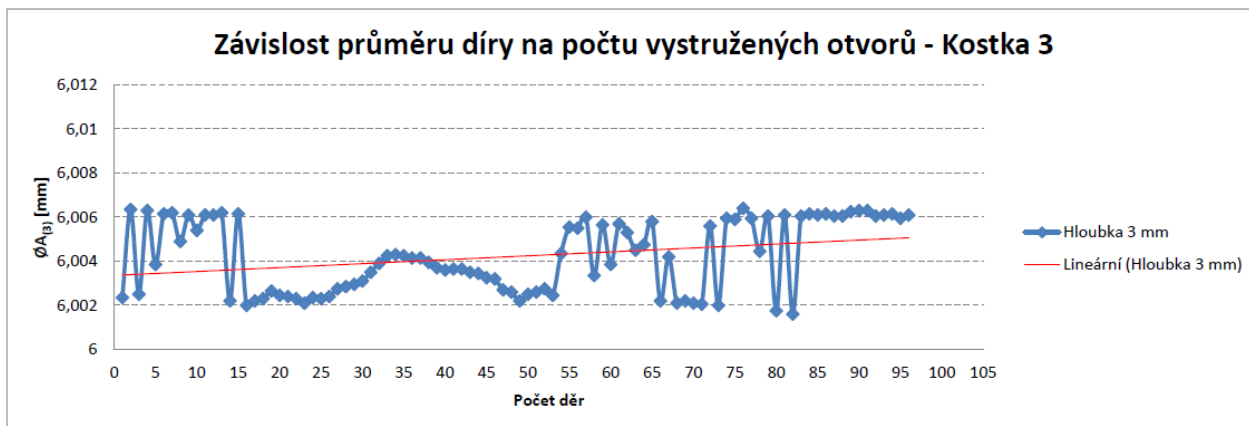
V grafu výše je možné si všimnout, že v první polovině testu se hodnota průměru téměř neměnila. Po přepnutí (tedy od 49 otvoru) obrobku i nástroje začaly hodnoty mírně kolísat.



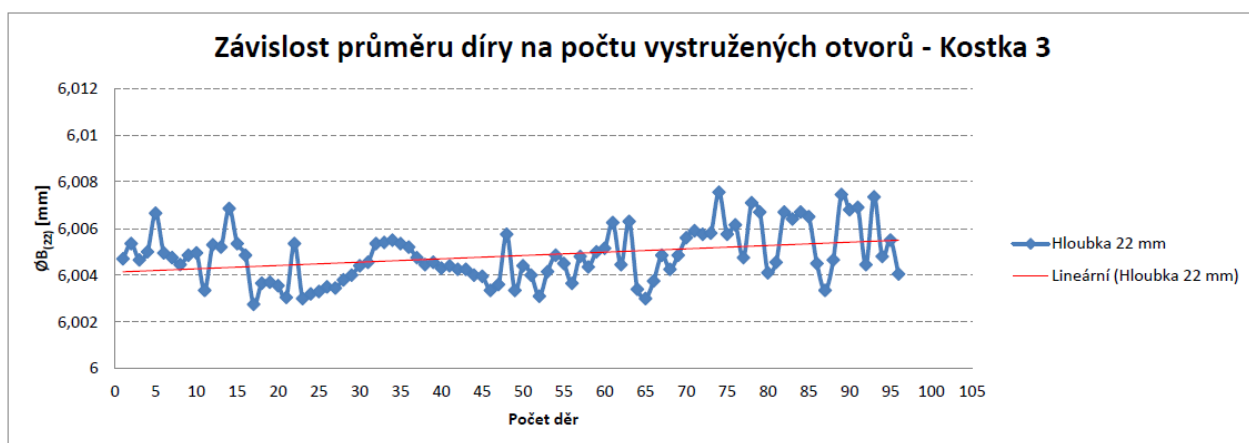
Obr. 36 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm

Kostka č. 3

U vzorku číslo 3, se výrazně zvětšil rozptyl naměřených hodnot oproti zkušebnímu vzorku číslo 1 (hlavně v hloubce 3 mm). Tento stav by mohl být způsoben vytvářením menších nestabilních nárůstků na břitě nástroje, které zapříčiňují vyšší hodnoty průměrů a samozřejmě i zhoršení kvality povrchu.

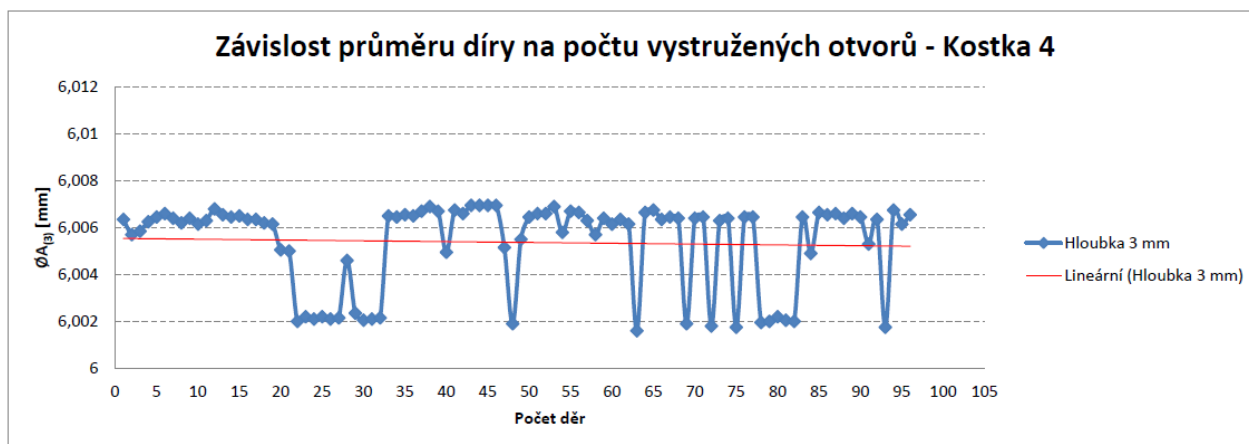


Obr. 37 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm



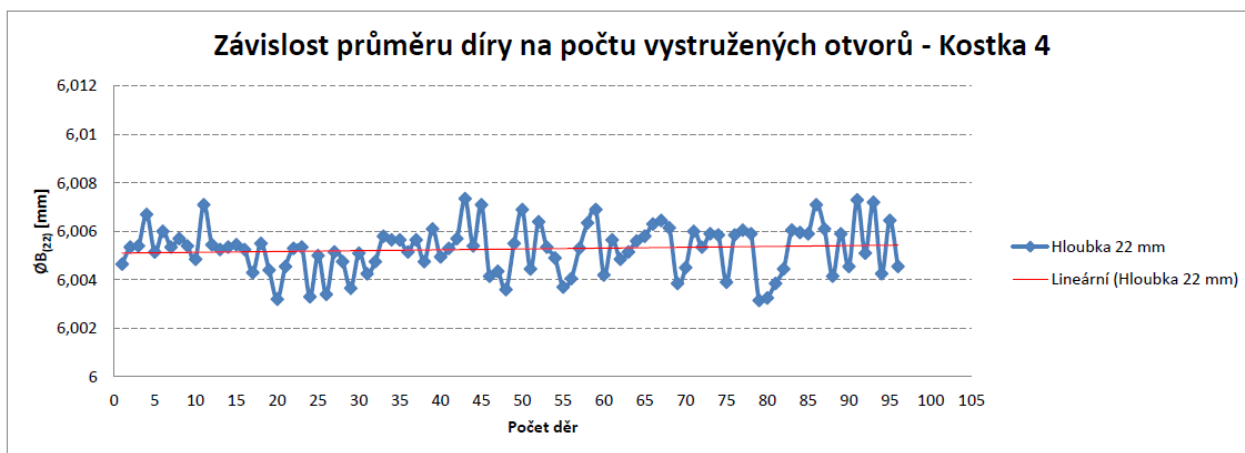
Obr. 38 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm

Kostka č. 4



Obr. 39 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 3 mm

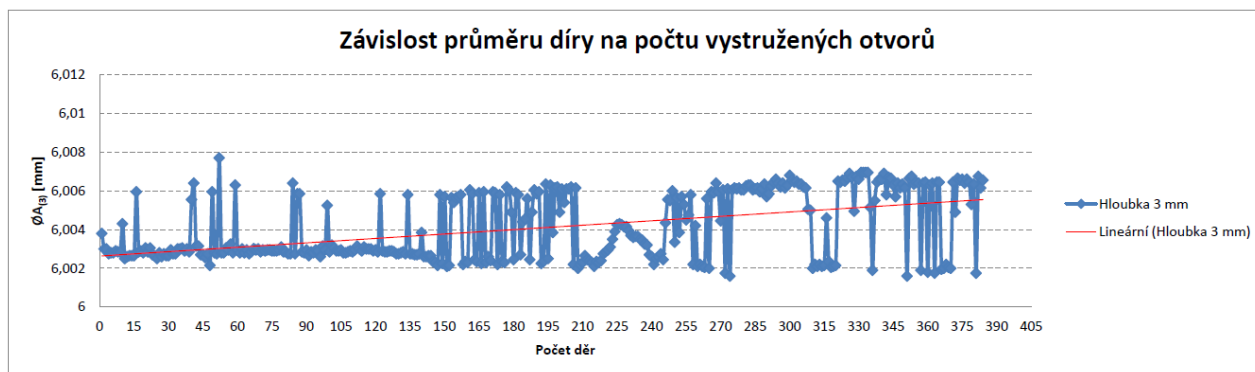
Na obrázku 39 jsou patrné největší rozptyly ze všech zkušebních vzorků. V grafu je červenou čarou naznačena střední hodnota, která má klesající tendenci. Neznamená to však, že by se otvory vystružovaly s větší přesností. Průběh je klesající, jelikož se naměřily hned od prvních otvorů větší průměry, než u následujících. Toto tvrzení je možné ověřit na obrázku 41, kde jsou zaznamenány všechny vystružené díry a podle rostoucí střední hodnoty, rostou i odchylky od jmenovitého rozměru díry.



Obr. 40 Závislost průměru na počtu vystružených děr v hloubce 22 mm

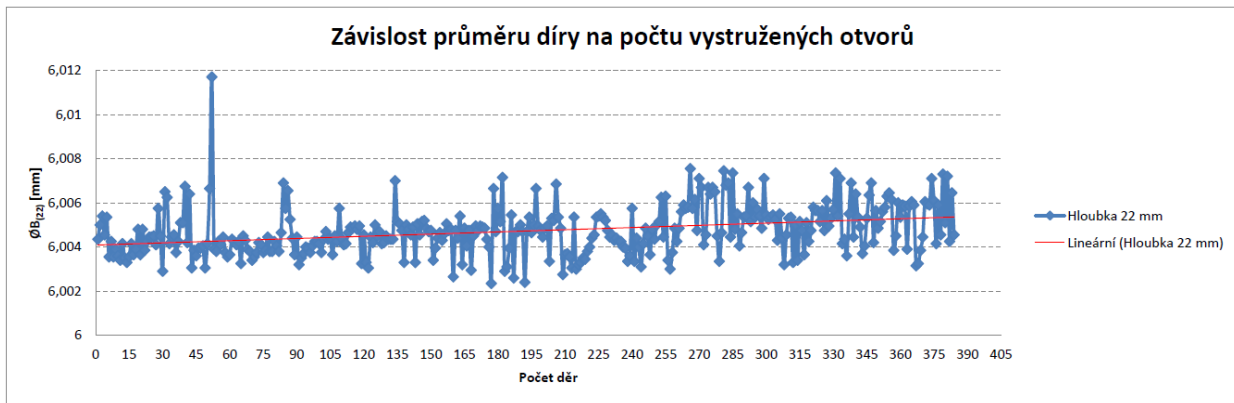
Kostky 1, 2, 3 a 4

Ze závislostí průměrů na všech vystružených otvorech (tj. 384 děr) je zřejmé, že nepřesnost výstružníku neustále roste. To je způsobeno samozřejmě opotřebením nástroje a vytvářením drobných nárůstků na břitě nástroje.



Obr. 41 Závislost průměru na celkovém počtu vystružených děr v hloubce 3 mm

V hloubce 22 mm je nárůst odchylek pozvolnější, jak je z porovnání grafů patrné. Pomalejší nárůst nepřesností je z toho důvodu, jelikož je u dna vystružovaného otvoru v záběru již celý břit a tím je celý řezný proces stabilnější, než na vstupním průměru vystružované díry. Pro stanovení životnosti nástroje, by bylo potřeba provést ještě další měření, dokud by výstružník nepřesáhnul stanovenou toleranci. Dalším hlediskem je samozřejmě drsnost povrchu, která je potřeba doměřit a společně s tolerancí vyhodnotit, zda jsou otvory vyráběny stále v požadované kvalitě.



Obr. 42 Závislost průměru na celkovém počtu vystružených děr v hloubce 22 mm

6 Technicko-ekonomické hodnocení

Metoda vystružování je velmi dobře známá a mnoho let používaná metoda pro výrobu přesných otvorů, která je v dnešní době stále více používaná. Už však nelze mluvit o klasickém výrobním postupu, který předchází samotné vystružování (vrtání – vyhrubování – vystružování). V mnoha případech výroby, díky zdokonalování nástrojů (vrtáků i výstružníků) a strojů, odpadá krok mezi vrtáním a vystružováním tj. vyhrubování. Tato úspora jednoho celého výrobního kroku (úspora nástroje, energie potřebná pro provoz stroje, čas, náklady na mzdy, atd.) má výrazný vliv na celkové výrobní náklady. U některých aplikací, kde není potřeba dokonale hladký povrch, nahrazují nové moderní vystružovací nástroje dokonce i broušení, čímž je docíleno dalších úspor.

Výstružník, kterým se prováděl experiment je z důvodu snížení nákladů složen ze 3 částí. Jedná se o těleso nástroje, které je z rychlořezné oceli. K tomuto tělesu je připájena hlavička ze slinutého karbidu, ke které je připájena břitová destička z cermetu. Na závěr jsou hlavička s destičkou, deponovány vrstvou TiAlSiN, která chrání břit před opotřebením. Takto sestavený výstružník nabízí dobrý poměr mezi cenou a kvalitou nástroje. Například při použití monolitního nástroje ze slinutého karbidu nebo cermetu, jsou pořizovací náklady mnohonásobně vyšší, než pořizovací cena zmiňovaného skládaného výstružníku. Dalším faktorem ovlivňující náklady je kde a jakým způsobem se bude nástroj přeastřovat. Možností je hned několik. První možností je vyměnit opotřebenou destičku za novou, je tedy potřeba destičku demontovat a připájet novou, což je časově nenáročné, ale ekonomicky ne příliš výhodné. Další možnost se nabízí nástroj přeastřit. Zvolí-li se možnost přeastření nástroje na vlastní náklady, ušetří se čas, potřebný pro expedici a dodání nástroje. Na druhou stranu je nutné se zamyslet nad cenou, v některých případech se vyplatí zvolit přeastření u externí firmy, než využívat vlastních možností.

Při testování daného výstružníku byly získány hodnoty průměrů otvorů vystružených do 4ks zkušebních vzorků (celkem 384 otvorů). Otvory měly být vyrobeny v toleranci 6H7. Tento požadavek byl splněn pro všechny vystružované otvory. Při testování byly nastaveny dvojí rezní podmínky, které na přesnost otvorů neměly žádný vliv. Ovlivnily pouze výrobní časy, které se při použití rychloposuvu při výjezdu nástroje z řezu zkrátily o 50%. Tato úspora času může znamenat v hromadné výrobě úspory až stovek tisíc korun.

7 Závěr

Diplomová práce byla řešena za pomoci firmy HAM-FINAL, která se problematikou vystružování zabývá již řadu let. Jejich vývoj nových prototypů a modernizace stávajících nástrojů jim dává potřebný náskok pro uplatnění se na trhu mezi velkou konkurencí. Ne vždy je však potřeba inovovat řezný nástroj. V některých případech postačí pochopit průběh řezného procesu a děje, při něm vznikající pro dosažení lepších výsledků obrábění. Definice a popis těchto dějů a vlivů vznikajících při vystružování je hlavním úkolem této diplomové práce. Díky spolupráci s firmou HAM-FINAL bylo možné proniknout hlouběji do této problematiky a získat cenné rady z praktických případů, se kterými se firma za dobu svého provozu setkala.

Tato práce je první částí dlouholetého projektu podporovaného Technologickou agenturou ČR (TAČR) a projektu ESF OP VpK. Náplní tohoto projektu je vyvinout nové typy nebo modifikovat stávající typy vystružovacích nástrojů ke zvýšení přesnosti a produktivity vystružování. Dalším bodem projektu je vytvoření databáze, která, jednoduše řečeno, má za cíl usnadnit výběr nástroje a řezných podmínek pro stanovený obráběný materiál. Jedná se o časově náročný a nákladný projekt a tato diplomová práce je jakýmsi „odrazovým můstkem“ pro další řešení.

Hlavním přínosem této DP práce je tedy určení všech definovatelných i nedefinovatelných faktorů, které mají vliv na proces vystružování, při obrábění přesných otvorů o jednotném průměru 6H7. Jednotlivé faktory působící na proces vystružování jsou na sobě závislé a změni-li se hodnota jednoho faktoru, výrazně to ovlivní i další vlivy. Z toho plyne, že při hodnocení jednotlivých faktorů a při přiřazování jejich vlivu je potřeba vycházet spíše ze zkušeností a vědomostí, které mi poskytla firma HAM-FINAL nebo které jsem získal z odborných článků. Toto hodnocení je ovšem velmi subjektivní a je potřeba provést experimentální měření, které by tyto předpokládané hodnoty potvrdily nebo vyvrátily. Během návštěvy firmy HAM-FINAL, která sloužila k seznámení s měřením a vyhodnocováním výsledků, se během vystružování začala na povrchu vystružovaného otvoru vytvářet šroubovice. Příčina vzniku není zcela jednoznačná, předpokládá se však, že vznik drážky mohl způsobit výjezd nástroje ze záběru rychloposuvem.

Další experimenty byly již naplánovány ve Vědecko-technickém parku Plzeň a.s. na obráběcím stroji DMU 65 monoBLOCK. Konkrétně se měly testovat definovatelné faktory, vycházející z multikritériální analýzy v kapitole 4 této diplomové práce. Jelikož však došlo k velkému zpoždění dodání vzduchového kalibru, který byl nezbytnou součástí k provedení potřebných experimentů a dodáním pouze jednoho prototypu vystružovacího nástroje. Z těchto důvodů nebylo tedy možné ověřit předpokládanou velikost vlivů jednotlivých faktorů. I přes zpoždění dodání vzduchového kalibru se povedlo provést jeden experiment jednobřitého cermetového výstružníku s deponovanou vrstvou na čtyřech kusech zkušebních vzorků. Bohužel není možné provést porovnání s dalšími výsledky z jiného experimentu, ze kterého by byl patrný vliv některého z vybraných faktorů. Při měření vystruženého otvoru bylo možné vypořadovat, že není otvor kruhový, ale má mírně eliptický tvar. Což mohlo být zapříčiněno upnutím obrobku, které obráběný materiál nepatrně zdeformovalo a po jeho vyjmutí ze svěráku se materiál vrátil zpět do původního tvaru. Tyto elastické deformace ovšem působí již na vystružený otvor, který se díky těmto napětím deformuje. Jestli se však jedná o skutečnou příčinu, by bylo ještě nutné prověřit dalšími testy.

Pro provedení dalších experimentů by bylo zapotřebí získat více testovacích prototypů výstružníků (jednoho či více druhů) i vzorků obráběných materiálů. Při poskytnutí těchto materiálů by se určitě vyplatilo těmito testy nadále zabývat, jelikož mohou ušetřit nemalé náklady na celkovou výrobu.

8 Použitá literatura

1. RYBAŘÍK, Jaroslav. *Dokončovací metody obrábění děr pro uložení ložisek hřídelů*, VUT Brno, 2009
2. <http://www.sandvik.coromant.com>
3. LONDA, Jaroslav. *Technologie a metody výroby velmi přesných vnitřních rotačních ploch*, VUT Brno, 2011.
4. <http://www.mostrading.cz>
5. MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*,
6. <http://www.pilsentools.cz>
7. <http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>
8. <http://www.mmspektrum.cz>
9. VELIČKOVÁ, Eva. *Rozměrová a tvarová přesnost, přesnost polohy, drsnost povrchu*, VŠB–TU Ostrava
10. ČMIEL, Milan, DP. *Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr*, Brno, 2009
11. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.
12. SVOBODA, Pavel, et al. *Základy konstruování*. 2. Přepřac. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 200 s. ISBN 80-7201-306-4.
13. <http://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
14. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, roč. VI, č. 1, s. 5-10. ISSN 80-214-1996-2.
15. Přednášky – Materiály v obrábění, KRŮŽ, Antonín
16. <http://www.ecoroll.de/en/products/hydrostatische-werkzeuge.html>
17. <http://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-obrabeni-pro-lekarske-ucely.html>
18. <http://www.novinky.cz>
19. <http://gtr1ab.wordpress.com/2011/11/30/reaming-tuner-holes/>
20. <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
21. <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>

22. <http://www.mmspektrum.com/clanek/starnuti-konstrukcnich-materialu.html>
23. <http://www.crstools.cz/vystruzovani/technicka-cast/doporucene-podminky-chlazení/>
24. ZEMENE, Petr, DP, *Vliv frézování na stabilitu upnutí nástroje v tepelném upínači*, Plzeň, 2012

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním

Autor: **Martin NEPRÁŠEK**

SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha č. 1	Přehled vlastností vybraných materiálů	.I-V
Příloha č. 2	Volba vhodného řezného materiálu pro vybrané obráběné materiály	VI-XXXII
Příloha č. 3	Charakteristika obráběcího stroje DMU 65 monoBLOCK	XXXII-XXXIV
Příloha č. 4	Technická dokumentace zkušební vzorku	XXXV-XXXVI
Příloha č. 5	Charakteristika vzduchového kalibru	XXXVII-XXXVIII
Příloha č. 6	Charakteristika mikroskopu Multicheck pc 500	XXXIX-XL
Příloha č. 7	Naměřené hodnoty experimentu	XLI-XLIX

PŘÍLOHA č. 1

Přehled vlastností vybraných materiálů

GG25 – je označení pro šedou lupínkovou litinu. Dle normy DIN EN 1561 se materiál označuje jako EN-GJL-250. Jedná se o litinu s dobrou kombinací pevnosti a tvrdosti. Materiál velmi dobře tlumí chvění je dobře obrobitelný, ale obtížně se svařuje. Univerzálně použitelný materiál pro strojní součásti jako jsou válce motoru, ozubená kola nebo lože obráběcích strojů.

Chemické složení: C = 2,9 – 3,3%; Si = 1,2 – 2,9%; Mn = 0,4 – 1,2%; P ≤ 0,3%; S ≤ 0,1% a další jako Cr; Ni.

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost = 150 – 250 HB
- Mez pevnosti v tahu Rm = 250 – 350 [MPa]
- Tažnost A = 0,3 – 0,8 %

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – dobrá
- Svařitelnost – obtížná
- Odolnost proti opotřebení - velmi dobrá

GGG60 – tvárná litina která se dle normy DIN EN 1561 označuje jako EN-GJS-600. Materiál se ztíženou obrobitelností, vysokou oteřuvzdorností a velmi dobrou leštitelností je nejvíce používán k výrobě dynamicky a oteřem namáhaných součástí jako klikové a vačkové hřídele nebo pístní kroužky.

Chemické složení: C = 3,4 – 3,85%; Si = 2,3 – 3,1%; Mn = 0,1 – 0,35%; P ≤ 0,05%; S ≤ 0,01%; Cu = až 0,8%; Mg = 0,045 – 0,065%.

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost = až 260 HB
- Mez pevnosti v tahu Rm = 600 – 750 [MPa]
- Mez pevnosti v tahu Rp_{0,2} = 370 – 480 [MPa]
- Tažnost A = 3 – 8 %

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – středně obrobitelná
- Svařitelnost – velmi obtížná (pouze se speciálními elektrodami)
- Odolnost proti opotřebení – dobrá

11 373.1 – konstrukční uhlíková ocel ve stavu normalizačně žíhaném. Materiál je možné také najít pod označením dle DIN jako USt37-2 nebo dle EN 10027 jako 1.0036. Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodná pro staticky a mírně dynamicky namáhané součásti jako jsou potrubí nebo svařované konstrukce.

Chemické složení: C = max 0,17%; P = max 0,035%; S = max 0,035% a Ni = max 0,007%.

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost = až 235 HB
- Mez pevnosti v tahu $R_m = 510$ [MPa]
- Mez pevnosti v tahu $R_e = 220$ [MPa]
- Tažnost A = 26%

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – velmi dobrá
- Svařitelnost – zaručená
- Odolnost proti opotřeбенí – nízká

15 246 – slitinová chrom – molybden – vanadová ocel. Dle DIN se označuje jako 30CrMoV9. Ocel vhodná ke kalení a popouštění se používá především v automobilovém průmyslu a klikové hřídele a jiné namáhané součásti. Také je možné je materiál použít na vysokotlaké trubky, součásti parních turbín a jiné součásti namáhané a tepla.

Chemické složení: C = 0,27 - 0,34%; Si = max 0,40 %; Cr = 2,3 – 2,7%; Mo = 0,15 – 0,25%; V = 0,10 – 0,20%

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost = až 248 HB
- Mez pevnosti v tahu $R_m = \max 1450$ [MPa]
- Mez pevnosti v tahu $R_{p0,2} = \min 1050$ [MPa]
- Tažnost A = min 9 %

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – vcelku dobrá
- Svařitelnost – zaručená
- Odolnost proti opotřeбенí – vysoká

17 240 – austenitická korozivzdorná ocel s označením dle DIN jako x5CrNi 18 – 10. Patří do skupiny nejpoužívanějších korozivzdorných ocelí a to zejména díky své vysoké korozní odolnosti. Používají se např. na nádoby pro cementaci ocelí, součásti sklářských pecí, atd.

Chemické složení: C = 0,07%; Cr = 17 - 19%; Ni = 8 - 10 %; Mn = max 2%; Si = max 1%;
P = max 0,045%; S = max 0,015%; N = max 0,11%

Mechanické vlastnosti(ve stavu normalizačně žíhaném):

- Tvrdost = až 215 HB
- Mez pevnosti v tahu $R_m = 540 - 750$ [MPa]
- Mez pevnosti v tahu $R_{p0,2} = \text{min } 215$ [MPa]
- Tažnost A = min 45 %

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – těžko obrobitelná
- Svařitelnost – středně obtížná
- Odolnost proti opotřebení – vysoká

19 312 – nízkolegovaná mangan – chrom – vanadová nástrojová ocel označovaná dle normy DIN jako 90MnCrV8. Materiál má kromě zlepšené houževnatosti také velmi dobrou rozměrovou stálost. Nízko legovaná ocel vhodná ke kalení v oleji. Materiál je primárně určen pro nástroje pracující za studena, jako jsou formy pro lisování umělých hmot, závitořezech nástrojů nebo měřidla.

Chemické složení: C = 0,75-0,85%; Mn = 1,85 – 2,15%; Si = 0,15-0,35% ; Cr = max 0,25%; Ni = max 0,35%; V = 0,1 – 0,2%; P = max 0,03%; S = max 0,035%;

Mechanické vlastnosti:

- Tvrdost = max 230 HB
- Tvrdost po zušlechtění 62 HRC
- Mez pevnosti v tahu $R_m = \text{min } 735$ [MPa]
- Mez pevnosti v tahu po zušlechtění $R_m = \text{min } 2450$ [MPa]

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – dobrá
- Svařitelnost – zaručená
- Odolnost proti opotřebení – dobrá

42 4230 - Al-Si 12 – jedná se o siluminovou eutektickou slitinu hliníku, křemíku a dalších přísadových prvků. Dle DIN je materiál označován jako EN AW-4047A. Materiál je vhodný pro použití v leteckém a automobilovém průmyslu.

Chemické složení: Si = 12%; Fe = 0,6%; Mn = 0,15%; Cu = 0,05%; Ti = max 0,15%; a další prvky dle konkrétní normy.

Mechanické vlastnosti:

- Mez pevnosti v tahu $R_m = 125 - 180$ [MPa]
- Mez pevnosti v tahu $R_{p0,2} = 70 - 85$ [MPa]
- Tažnost $A = 15 - 30$ %

Technologické vlastnosti:

- Obrobitelnost – dobrá
- Svařitelnost – obtížná
- Odolnost proti opotřebení – střední

PŘÍLOHA č. 2

Volba vhodného rezného materiálu pro vybrané obráběné materiály

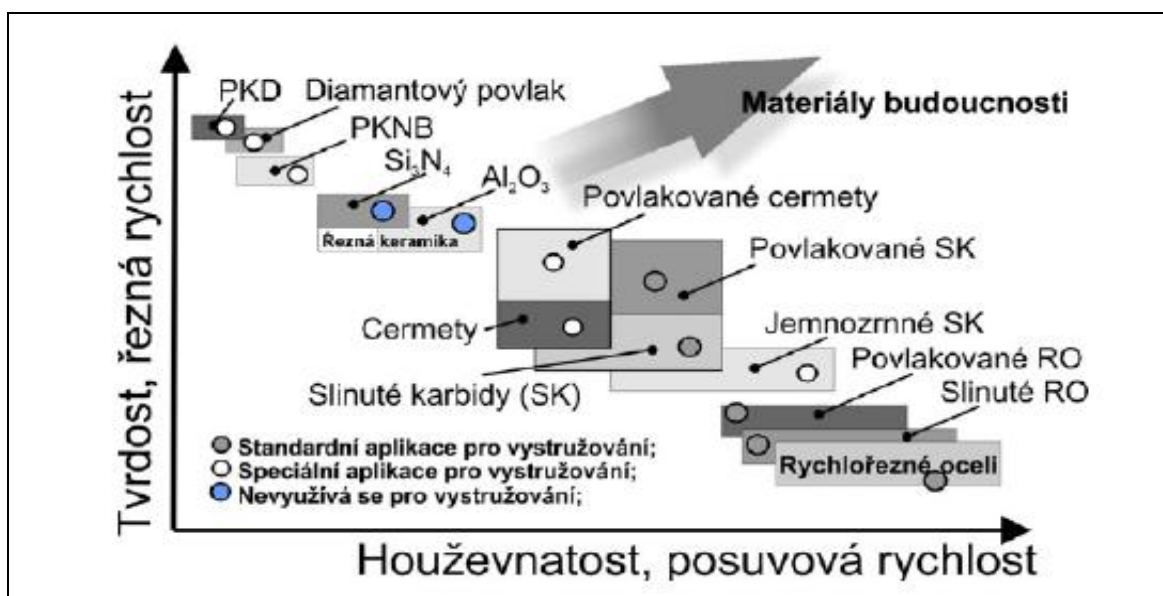
Tato část byla zpracována společně s panem Bc. Lubošem Kroftem. K jejímu vypracování byla použita literatura uvedená na závěr této přílohy.

1 Rešerše na řezné materiály

V dnešní době kdy se požadavky na správnou funkci nástroje stále zvyšují, je správná volba řezného materiálu velice důležitá. Také vzhledem k velkému spektru obráběných materiálů je vhodné i pro stejný typ nástroje používat více druhů řezných materiálů vždy se zaměřením na určitý typ obrábění. Proto při konstruování prototypu vystružovacího nástroje pro vysokoproduktivní obrábění byla zpracována rešerše na řezné materiály, kde výsledkem jsou vždy doporučené dva řezné materiály pro určitý obráběný materiál.

2 Řezné materiály s ohledem na vystružování (velmi přesné dokončování děr)

Při vystružování, vzhledem k charakteru daného typu operace je základním kritériem kvalita vystruženého otvoru s ohledem na zajištění optimální úrovně techniko-ekonomických kritérií obráběcího procesu (životnost nástroje, produktivita řezného procesu, náklady na vystružení díry apod.). Výběr řezného materiálu v aplikaci na vystružovacím nástroji tak musí odpovídat stanoveným požadavkům.



Obr. 43 - Řezné materiály - specifikace posuvové a řezné rychlosti

Pro vystružování se využívá standardně především aplikace slinutých karbidů (dále jen SK) ve většině případů opatřených PVD povlaky. Do současné doby je hojně využívána HSS (Rychlořezná ocel) s postupným vývojem techniko-ekonomických požadavků ztrácí na významu a je postupně nahrazována výkonnějšími řeznými materiály (především SK). S ohledem na své specifické vlastnosti vhodné pro vystružování dochází k nárůstu objemu výroby vystružovacích nástrojů s břity z cermetu. Pro speciální aplikace vystružování těžkoobrobitelných materiálů se využívá kubického nitridu bóru (dále jen CBN) a polykrystalického diamantu (dále jen PKD). Naopak i přes zvýšení houževnatosti současných vyráběných řezných keramik, umožňujících lehké a střední přerušované řezy se řezná keramika jako pracovní část vystružovacího nástroje „prozatím“ nevyužívá. V tomto ohledu lze očekávat v budoucnu možný posun i na aplikace vystružování.

Základní požadavky a směr vývoje řezných materiálů

Mezi řeznými materiály jsou tak z hlediska jejich vlastností značné rozdíly. Žádný řezný materiál však nespĺňuje požadavky univerzálně používaného nástroje. Ačkoliv se v současné době vžitě aplikace postupně rozšiřují o další aplikační možnosti, snaha vývojových pracovníků řezných materiálů o „vlastnostmi ideální“ řezný materiál je prozatím nevyplněna. V tomto ohledu lze za „nejideálnější“ řezný materiál považovat SK s deponovanou vrstvou velkým množstvím, různými způsoby nanášených specifických povlaků.

Ideální vlastnosti řezných materiálů:

dostatečná tvrdost – zajišťující odolnost proti opotřebení a plastické deformaci břitu,

dostatečná houževnatost – ochrana proti lomu,

chemicky neutrální chování vůči materiálu obrobku,

chemická stabilita – zajišťující odolnost proti oxidaci a difuzi,

dobrá odolnost proti zatížení tepelným šokem.

Výrobci řezných materiálů [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]

V dnešní době, je na trhu velké množství společností, které se zabývají výrobou průmyslových a řezných materiálů. Část z nich však má řezné materiály jen jako okrajový sortiment a tak jejich kvalita není zcela na vrcholu. Další skupiny výrobců materiálů se zabývají vývojem na jiné oblasti obrábění, než je velmi přesné a produktivní dokončování otvorů. Po prozkoumání současného trhu s řeznými byli vybráni následující výrobci (Ceratzit, Konrád Friedrichs, Extramet, Kyocera, NTK, Sumitomo, Element Six, Ceratonia, Diamond Innovation a Iljin).



CERATIZIT

Tato společnost vznikla v roce 2002 spojením dvou výrobců řezných nástrojů a to CERAMETAL GROUP, což byla Lucemburská společnost zabývající se především slinutými karbidy a PLANSEE TIZIT která se zabývala především výrobou cermetu a depozicí tenkých vrstev.

V současnosti společnost působí především v Evropě, neboť sídlí ve Švýcarsku a Lucembursku ale rozšiřuje svoji působnost do Asie a také Spojených států.

Sortiment:

- **CTU08L** – jedná se o ultra jemný karbid se zrnitostí 0,2 - 0,5 [μm]. Jde o nástrojový materiál pro ultra tvrdé obrábění, neboť jeho tvrdost dosahuje 2200 HV30. To je dáno menším podílem pojiva a to 4,2 % Co. Ze sortimentu společnosti je tento SK nejtvrdší ale zároveň nejméně houževnatý. Tento materiál je velice vhodný pro obrábění abrazivních materiálů, jako jsou litiny a to do tvrdosti až 65 HRC.
- **TSF 22** – ultra jemný slinutý karbid, který má středná hodnoty jak tvrdosti přibližně 1930 HV30 a také houževnatosti a je tedy přechodem mezi materiály CTU08L a TSF44. Karbid se zrnitostí 0,2 - 0,5 [μm] a podílem pojiva 8,2 % Co. Materiál se nejvíce uplatní především při dokončovacím a vysokorychlostním obrábění tvrdých materiálů do 60 HRC.
- **TSF 44** – speciální ultra jemný karbid se zrnitostí 0,2 - 0,5 [μm]. Materiál má tvrdost až 1730 HV 30 ale zvýšenu houževnatost a to především díky většímu podílu pojiva, 12%. Díky těmto

parametrům vhodný především pro vysokorychlostní obrábění kalených ocelí až do tvrdosti 59 HRC.

- **MG12** – submikronový slinutý karbid se zrnitostí 0,5 - 0,8 [μm] vhodný především pro rotační nástroje. Materiál má tvrdost až 1790 HV30. Podíl pojiva je 6% a materiál má střední houževnatost a nejvíce se hodí pro obrábění neželezných kovů, jako jsou slitiny hliníku nebo kompozicové plasty vystužené uhlíkovými nebo skleněnými vlákny. Je možné ho použít i na litiny malé nebo střední tvrdosti.
- **TSM20/MG15** – slinutý karbid se zrnitostí 0,5 - 0,8 [μm] označovaný jako submikronový. Tvrdost je 1710 až 1720 HV30. Houževnatost materiálu je $K_{IC} = 8,6 \text{ [MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$ což je střední hodnota která je dána hodnotou pojiva 7,5 % Co. Materiál se nejvíce hodí pro výrobu rotačních nástrojů na obrábění šedé a tvárné litiny, uhlíkové oceli a neželezných kovů jako jsou slitiny titanu nebo hliníku.
- **TSM33/MG18** – submikronový slinutý karbid se zrnitostí 0,5 - 0,8 [μm] Tvrdost materiálu je 1660 HV 30 ale oproti MG12 má vyšší houževnatost a to díky 10% pojiva, proto se hodí spíše na výrobu rotačních nástrojů pro obrábění ušlechtilých, korozivzdorných a žáropevných ocelí legovaných především Cr, Ni nebo Ti. Také je možné ho použít na obrábění neželezných kovů a plastu.
- **CTS18D** – slinutý karbid se zrnitostí 0,5 - 0,8 [μm] má tvrdost 1590 HV30. Díky vyššímu podílu pojiva 9% Co se jedná o speciální materiál s optimálním poměrem pevnosti a houževnatosti a dobrou odolností proti opotřebení. Vhodný je zejména pro vysoce výkonové obrábění oceli, nerezové oceli a slitin na bázi titanu nebo niklu, které jsou označovány jako těžko obrobitelné.
- **CTF12A** – slinutý karbid s označení jemný má velikost zrna 0,8 – 1,3 [μm] se vyznačuje především vysokou houževnatostí a to díky větším zrnům které zabraňují šíření trhlin. Podíl pojiva je 6% Co a tvrdost materiálu je 1630 HV30. Největší uplatnění materiál nachází v kombinaci s diamantovými tenkými vrstvami při obrábění hodně abrazivních materiálů, jako jsou slitiny hliníku s více jak 9% Si anebo šedé lupínkové litiny.

Ostatní sorty slinutých karbidů nejsou vzhledem k velké zrnitosti vhodné pro aplikace dokončovacího obrábění.

- **TCN54** – je vysoce výkonný cermetový materiál pro vysoce výkonné nástroje. Tvrdost materiálu je 1630 HV30 a houževnatost je srovnatelná se submikronovým slinutým karbidem. Materiál je vhodný především pro dokončovací nástroje, na které jsou kladeny vysoké požadavky na dobrou kvalitu povrchu a rozměrovou přesnost.



KONRAD FRIEDRICHS

Společnost na výrobu materiálů z tvrdokovu byla založena v roce 1987 ve městě Kulmbach v Německu. V roce 2008 byly výrobní závody společnosti rozšířeny a tak je možné produkovat až 700 tun tvrdokovového materiálu na bázi WC+Co.

V současné době společnost má sídlo i výrobní podnik v Německu ale distribuční síť se rozprostřela od Asie až po Spojené státy.

Sortiment:

- **K40UF** – slinutý karbid se zrnitostí 0,6 [μm] je základním typem pouze na bázi WC+Co s 10% pojiva. Tvrdost až 1610 HV 30 a hodnota houževnatosti K_{IC} 10,5 k houževnatějším

materiálům. Primárně je určen pro vrtací a frézovací nástroje, ale je možné ho použít za určitých podmínek i pro vystružování. Obrábět je možné materiály jako austenitické nerezové slitiny a šedé oceli střední tvrdosti. Díky vyšší houževnatosti je možné materiál použít i na slitiny titanu.

- **K40XF** – slinutý karbid se zrnitostí 0,8 [μm] má vyšší houževnatost a při stejném podílu pojiva jako K40UF. Proto je vhodný především pro aplikace v hůře obrobitelných materiálech ale s nižší tvrdostí do 45 HRC. To je dáno nižší tvrdostí oproti K40UF která je 1550 HV30. Je možné ho použít především pro obrábění uhlíkových a nerezových ocelí nebo slitin titanu a niklu.
- **K44UF** – jemnozrný slinutý karbid s velikostí zrn do 0,5 [μm] s tvrdostí 1680 HV30. Podíl pojiva je 12% Co ale i tak se jedná spíše o pevnější a tvrdší materiál než minulé dvě sorty a to především díky velikosti zrn. Největší uplatnění materiálu je pro vrtání a frézování tvrzených, vysokoteplotních a nerezových ocelí. Dále pak pro slitiny titanu ale také pro šedé litiny nebo kompozitní materiály. Možné uplatnění je také pro strojní závitníky.
- **K88UF** - slinutý karbid označený jako jemnozrný s velikostí zrn do 0,5 [μm]. Materiál má tvrdost 1780 HV30 a to díky menšímu podílu pojiva než K88UF, pouze 10% Co. Největší použití je pro dokončovací obrábění zejména frézování tvrdých materiálů, jako jsou kalené nebo nástrojové oceli a tvrzené litiny s tvrdostí mezi 45 a 65 HRC.
- **K6UF** – slinutý karbid s menším podílem pojiva, 6% Co a zrnitostí 0,6 [μm] dosahuje tvrdosti až 1900 HV30. Díky těmto parametrům je nejvíce vhodný pro dokončování a to zejména vystružování materiálů jak jsou slitinové a korozivzdorné oceli, šedé litiny nebo slitiny titanu. Také je možné použití pro kompozitní materiály jako např. CFRP nebo aplikace v oboru vrtání.
- **K55SF** – jedná se o ultra jemný karbid se zrnitostí 0,2 - 0,4 [μm] jehož tvrdost dosahuje 1920 HV30. Materiál obsahuje 91% WC a jde spíše o tvrdší a pevnější sortu SK. Materiál umožňuje široké spektrum aplikací a to zejména pro dokončování abrazivních materiálů jako jsou kalené oceli, šedé litiny nebo slitiny hliníku s vysokým obsahem Si. Dále pak kompozity jako kevlar a CFRP. Možné je použít materiál pro vysokorychlostní a suché obrábění.
- **K20F** – slinutý karbid se zrnitostí 0,7 [μm] má tvrdost 1710 HV30 a obsahuje 8% Co. Díky tomu je vhodný pro obrábění materiálů třídy K, jako jsou šedá a tvrzená litina. Dále pak tvrdé oceli a abrazivní materiály jako Hliníkové slitiny s vysokým obsahem Si a plasty vystužené vlákny.



EXTRAMET

Švýcarská společnost založená v roce 1980 v městečku Plaffeien. Výrobním sortimentem byly od začátku slinuté karbidy, ale až v roce 1988 kdy byly pořízeny nové slinovací zařízení, se společnost prosadila.

Největší rozmach nastal v roce 1995, kdy byla výroba modernizována a rok na to bylo zřízeno i pracoviště na broušení SK tyčí.

V současnosti se společnost zabývá nejen produktivní výrobou SK ale také jeho dopadem na životní prostředí. Společnost má své prodejní místa nejenom v Evropě ale také v USA.

Sortiment:

- **EMT100** – jemnozrný slinutý karbid vyráběný metodou HIP s průměrnou velikostí zrna 0,8 [μm] je základním typem s 6 % pojiva a 93% WC. Zbylé 1% tvoří karbidy ostatních prvků. Tvrdost až 1790 HV30. Díky tomuto složení patří k houževnatějším materiálům. Největší uplatnění najde při obrábění hliníku a jiných neželezných kovů nebo ocelí menších pevností. Je možné obrábět také kompozitní materiály vystužené vlákny.

- **EMT210** – karbid s vyšším podílem pojiva a zrnitostí 0,8 [μm] dosahuje tvrdosti 1600 HV30. Podíl složek je 89% WC, 10% Co a 1% ostatní karbidy což zajišťuje spolu s velikostí zrn velice houževnatý materiál vhodný především pro výrobu rotačních nástrojů na obrábění neželezných kovů jako je hliník nebo nikl nebo slitin na bázi titanu. Při vyšších řezných rychlostech a menších úběrech je možné obrábět oceli střední tvrdosti nebo nerezové oceli.
- **EMT409** – slinutý karbid s velikostí zrna 1,2 [μm] a 9% Co jako pojiva patří k velice houževnatým typům SK. Materiál dosahuje tvrdosti 1550 HV30. Díky těmto parametrům se nejvíce hodí pro hrubovací a před dokončovací v nerezových teplotně odolných ocelích, nebo slitinách na bázi niklu.
- **EMT412** – slinutý karbid s velikostí zrna 1,2 [μm] a až 12% Co jako pojiva je nejhouževnatějším slinutým karbidem z výrobního sortimentu společnosti. Veliká hodnota pevnosti a houževnatosti materiál předurčují k aplikaci na přerušované řezy s velkým úběrem.
- **EMT609** – ultra jemný slinutý karbid se zrnitostí 0,5 [μm] a tvrdostí 1950 HV30. Díky chemickému složení 89,5% WC, 9% Co a 1,5% ostatních karbidů jde i velice tvrdý a pevný materiál vhodný především pro dokončovací obrábění kalených ocelí s tvrdostí nad 50 HRC. Dále pak pro vysokorychlostní obrábění abrazivních materiálů nebo kompozitu vyztuženého uhlíkovými a skleněnými vlákny.
- **EMT612** – slinutý karbid označený jako ultra jemný má průměrnou velikost zrn 0,5 [μm]. Podíl pojiva 12% Co a 1,5% ostatních karbidů dává materiálu dobrý poměr houževnatosti proti pevnosti za velmi dobré hodnoty tvrdosti 1720 HV30. Materiál je určen pro obrábění kalených, vysoce legovaných a nástrojových ocelí s tvrdostí až 64 HRC nebo šedých litin.



KYOCERA

Korporace Kyocera byla založena v roce 1959 Dr. Kazuem Inamorem jako Kyoto Ceramic Co. Ltd. specializující se na výrobu konstrukční keramiky. Společnost se od počátku zabývala aplikací keramiky v mnoha průmyslových odvětvích od elektroniky a solárních panelů přes domácí potřeby až po medicínský průmysl. Také v řezných materiálech má společnost široké spektrum výrobků od slinutých karbidů přes cermety a řeznou keramiku až po super tvrdé materiály

V současnosti se společnost dělí na 3 základní sektory: informační a komunikační sektor, ochrana životního prostředí a produkty pro zlepšení životního stylu. Kyocera Corporation jedním z celosvětových vedoucích výrobců přesné keramiky a jejích aplikací,

Sortiment:

- **KW10** – jemnozrný slinutý karbid se středním podílem Co což dává materiálu dobrou houževnatost a odolnost proti vyštípnutí a zároveň přiměřenou tvrdost. Díky tomuto je předurčen především pro dokončovací a pře dokončovací operace. Vhodný pro obrábění neželezných kovů jako jsou slitiny hliníku a titanu nebo plastových a kompozitních materiálů.
- **PW30** – slinutý karbid s vyšším podílem Co vhodný pro hrubovací operace a přerušovaný řez. To je možné díky vyšší houževnatosti při zachování dostatečné tvrdosti. Materiál je vhodný pro obrábění ocelí a to jak uhlíkových tak slitinových se zvýšenými parametry proti korozi a žárupevnosti.
- **TC60** – cermet s nejvyšší houževnatostí ale nejnižší tvrdostí. Dle velikosti zrn se jedná o jemnozrný materiál. Díky vyšší houževnatosti se materiál hodí pro frézování drážkování a řezání závitů do uhlíkových, slitinových, austenitických a korozivzdorných ocelí.
- **TC40** – univerzální cermet s vyšší hodnotou tvrdosti ale dobrou houževnatostí. Materiál je na bázi TiC + TiN + pojivo. Jedná se o jemnozrný materiál, který dobře snáší vyšší řezné

rychlosti a tím dosahuje lepší produktivity. Vhodný je zejména pro drážkování a řezání závitů v uhlíkových ocelích a šedých litinách.

- **TN100M** – cermet na bázi TiCN + NbC je zároveň s TC60 nejvíce houževnatým materiálem ze skupiny cermetů. To je dáno větší velikostí zrn a vyšší podílem pojiva. I tak dosahuje značné tvrdosti a tím i lepších odolnosti oproti opotřebení než slinuté karbidy. Výhodou tohoto materiálu je že může pracovat za stejných nebo vyšší pracovních podmínek než konkurenční materiály ale s použitím chlazení MQL. Nejvíce se uplatní při frézování a vrtání uhlíkových a slitinových ocelí nebo austenitických ocelí menších pevností.
- **TN90** – univerzální cermet se střední hodnotou tvrdosti i houževnatosti. Díky velice jemné struktuře se nejvíce hodí pro dokončovací obrábění s finálním povrchem i rozměrovou přesností. Obrábět jím lze uhlíkové a slitinové oceli nebo materiály třídy M dle ISO klasifikace.
- **TN60** - jemnozrný cermet na bázi materiál TiCN + NbC s vyšší tvrdostí ale dostatečnou houževnatostí. Díky tomu je možné ho použít kromě dokončovacího obrábění s finálním povrchem také pro přerušovaný řez s vyšší řeznou rychlostí a malým úběrem čímž se ideálně hodí pro dokončování otvorů vystružováním. Obrábět jím lze kromě uhlíkových a slitinových ocelí také oceli austenitické a neželezné kovy.
- **TN30** – cermet s nejvyšší tvrdostí ale menší houževnatostí. Díky jemnozrné struktuře je materiál nejvíce vhodný pro dokončovací obrábění a vysokorychlostní obrábění a to zejména šedé a tvárné litiny, ve kterých materiál dosahuje výborných výsledků jak po stránce kvality povrchu tak i rozměrových přesností.
- **TN6020** – cermetový materiál s označením super jemnozrný, na bázi TiCN je nejuniverzálnějším materiálem v poměru tvrdost ku houževnatosti. Kromě výborného poměru tvrdosti k/houževnatosti a to i za teplot řezu má materiál výbornou odolnost oproti opotřebení. Největší uplatnění najde při obrábění austenitických, korozivzdorných ocelí a ocelí vyšší pevnosti.
- **A65/A66N** – jedná se o směsnou oxidickou keramiku. Hlavními složkami je Al_2O_3 a TiO. Materiál dosahuje výborné tvrdosti a to i za teplot řezání, má dobrou odolnost proto oxidaci a chemickou stálost. Z keramických materiálů má střední hodnoty jak tvrdosti, tak houževnatosti. Nejvíce se používá na dokončovací soustružení litin a kalených ocelí velké tvrdosti.
- **KA30** – oxidická keramika s nejvyšší tvrdostí ale nejmenší houževnatostí. Keramika se složením Al_2O_3 má nízkou afinitu k obráběnému materiálu a dobrou teplotní stálost. Materiál se hodí k dokončovacímu soustružení litin a ocelí a to velkými rychlostmi bez použití chladicí kapaliny.
- **KS500/KS6000** – neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 . Jedná se o materiál s dobrou houževnatostí, teplotní odolností a vysokou odolností proti opotřebení. Díky nižší tvrdosti se materiál hodí pro před dokončovací soustružení nebo jemné frézování šedých a tvárných litin nebo ocelí střední tvrdosti.
- **KBN510/KBN525/KBN65B/KBN900** – kubický nitrid bóru je společností kyocera vyráběn v různých variantách které se však zásadně neliší. Tvrdost je od 2700 HV30 u KBN525 až po 3150 HV30 u KBN65B a KBN900. Materiály mají také podobou houževnatost a jsou otěruvzdorné a teplotně i chemicky stabilní. Díky těmto vlastnostem se hodí pro vysokorychlostní obrábění vysoce tvrdých a kalených ocelí od 45 HRC.
- **KPD001/004** – je syntetický diamant vyrobený slinováním za vysokého tlaku. Zrnitost je od 40 [μm] pro KPD001 až 1000 [μm] u KPD004. Při obrábění je možné použít velkých řezných rychlostí a i posuvů a to především díky velké tvrdosti a pevnosti materiálu. Dle velikosti zrn se materiál nejvíce používá pro obrábění neželezných kovů, jako jsou slitiny hliníku a titanu a to jak pro hrubování tak pro dokončování, ale také pro obrábění plastů dřeva nebo keramiky.



NTK

NTK Cutting tools je součástí korporace NGK která byla založena v roce 1936 v Japonsku a v prvopočátcích se zabývala výrobou automobilových svíček. V roce 1949 se společnost začala zabývat výrobou technické keramiky a jejími aplikacemi v průmyslu. V roce 1958 vznikla společnost NTK a začala vyrábět řeznou keramiku. Další uplatnění keramiky a to v elektrotechnickém průmyslu našla společnost v roce 1967 a to výrobou keramických modulů pro telekomunikační zařízení.

Dnes NGK je největším světovým dodavatelem zapalovacích svíček a dalších keramických komponent a materiálů včetně řezných a působí po celém světě.

Sortiment:

- **SX5/SX7/SX9** – keramika na bázi SiALON dosahuje vysoké tvrdosti a dostatečné houževnatosti a tak umožňuje kromě soustružení vysokými rychlostmi také dokončovací frézování a to bez přívodu chladicí kapaliny nebo před dokončovací obrábění. Materiál má výbornou odolnost proti opotřebení a výbornou teplotní a chemickou stálost. S výhodou lze tyto materiály používat pro obrábění šedé a houževnaté litiny a slitin jako je např. Inconel.
- **HC1 – HC6/HW1/HW2** – směsná oxidická keramika o základu Al_2O_3 má výbornou tvrdost a také odolnost proti opotřebení. HC2 je směsí $Al_2O_3 + TiC$ a vyniká více svojí tvrdostí zatímco HW2 se skládá z $Al_2O_3 + ZrO_2$ a jedná se o více houževnatý materiál. Materiál HW je také možné vyztužit whiskery a tak je možné materiál použít na před dokončovací obrábění nebo pro přerušovaný řez. Materiály se hodí pro dokončovací obrábění šedých litin a tvárných litin a v případě HC2 také tvrdých a kalených ocelí.
- **XT3(dříve T3N)** – jemnozrnný cermet na bázi $TiC + TiN$. Tvrdost materiálu je 92,5 HRA tedy cca 1700 HV30. Materiál má nejlepší poměr mezi tvrdostí a s ní spojenou odolností proti opotřebení a houževnatostí. Největší uplatnění materiál najde při dokončovacím obrábění uhlíkových, slitinových, austenitických a korozivzdorných ocelí a před dokončovacím obráběním šedých a tvárných litin. Možné je použití i na neželezné kovy.
- **C7X** – je jemnozrnný cermet na bázi $TiCN$. Materiál se střední hodnotou houževnatosti má tvrdost 1580 HV30. Jedná se tedy o materiál s dobrým poměrem otěruvzdornosti a tvrdosti k/ke houževnatosti. Uplatnění najde především v obrábění uhlíkových, slitinových a austenitických ocelí neželezných kovů a také šedé litiny. Díky vyšší houževnatosti je možné materiál použít pro přerušovaný řez a před dokončovací obrábění.
- **XN4** – cermet na bázi TiN je nejhouževnatějším typem cermetů ze sortimentu NTK. Kromě toho dosahuje tvrdosti 1560 HV30 a je proto vhodný pro přerušovaný řez a hrubovací a před dokončovací operace. Největší uplatnění nalezne v obrábění nerezových a slitinových ocelí.
- **B23 – B52** – jsou sorty kubického nitridu bóru a různých příměsí. Jedná se samotná titan nebo jeho karbidy a nitridy a to od 10 až po 50%. Materiály s vyšším podílem CBN se více hodí pro obrábění vysokými rychlostmi a dokončování šedých litin a práškových ocelí. Na rozdíl do materiálů s vyšším podílem $TiN/TiC/TiCN$ jsou určeny na obrábění tvrdých kalených ocelí a to od přerušovaného řezu až pod přerušovaný.

Všechny tyto materiály je možné nalézt v katalogu výrobce také s různými typy tenkých vrstev vždy se zaměřením na určitý typ obrábění. Vzhledem k tomu že rešerše obsahuje pouze samotné materiály, tyto sorty zde nejsou popsány.



SUMITOMO

Společnost byla založena již v 16. stol. V Kjótu což je historické hlavní město Japonska, jako obchodní společnost s knihami a léky.

Rozšíření na současný směr zaměřeni přišlo v roce 1888, kdy byla spuštěna výroba a opravy strojírenských a důlních zařízení. První nástrojové materiály vyvinula společnost v roce 1931. V roce 1969, společnost spojila síly s Uruga Heavy Industries a začal působit pod názvem Sumitomo Heavy Industries.

V současné době společnost usiluje o použití nejmodernějších technologií ve všech průmyslových odvětvích, kterými se zabývá. Kromě řezných materiálů a výroby strojírenských zařízení se společnost zabývá elektronikou a polovodičovými součástkami ale i výrobou domácích spotřebičů a svoji působnost rozšířila do celého světa.

Sortiment:

- **T110A** – jemnozrný cermet s tvrdostí 1680 VH30. Díky jemnějším zrnům je materiál určen k vysokorychlostnímu a dokončovacím obrábění ocelí a šedých litin.
- **T1200A** – univerzální třída cermetu s tvrdostí 1680 HV30. Má optimální poměr mezi tvrdostí a odolností proti opotřebení a houževnatostí. Největší uplatnění najde při před dokončovacím a dokončovacím obrábění nerezových ocelí. A také šedých a tvárných litin.
- **T2000Z** – cermet jehož hlavní doménou je poměr tvrdosti a houževnatosti čímž je možné ho použít od hrubovacích až po dokončovací operace. Tvrdost je 1680 HV30 a materiál se nejvíce hodí pro obrábění uhlíkových a slitinových ocelí, ocelí třídy M dle ISO a také šedých a tvárných litin. Na materiál je možné nanést širokou škálu tenkých vrstev.
 - **T3000Z** – nejhouževnatější cermet s tvrdostí 1680 HV30 dosahuje svých parametrů především větší velikostí zrn. Proto se materiál nejvíce hodí pro středně až hodně přerušovaný řez. Uplatnění najde materiál při hrubovacích a před dokončovacích operacích, při obrábění šedých a tvárných litin a ocelí střední tvrdosti.
- **WX2000/NB90S** - směsná oxidická keramika o základu Al_2O_3 má výbornou tvrdost a také odolnost proti opotřebení. Tvrdost mezi 1980 a 2000 HV30. WX2000 je směsí $Al_2O_3 + SiC$ a NB90S se skládá z $Al_2O_3 + TiC$ a je to materiál nejvíce vhodný pro dokončovací obrábění tvrdých kalených ocelí s tvrdostí na 60 HRC. Materiál WX 2000 má vyšší houževnatost a je nejvíce vhodný pro vysokorychlostní obrábění super slitin na bázi titanu a niklu.
- **NS30/NS260/NS260C** jsou materiály neoxidické keramiky na bázi Si_3N_4 . Materiál se nejvíce hodí pro dokončovací a před dokončovací operace v šedě a tvárné litině. Je možné použít i na přerušovaný řez.



ELEMENT SIX

Historie firmy se datuje až do roku 1946, kdy sir Ernest Oppenheimer založil první firmu na světě, zaměřující se na průmyslové využití přírodního diamantu. O rok později byla zřízena výzkumná laboratoř v Johannesburgu a Jižní Africe jako klíčový zdroj v porozumění materiálů a vývoj nových aplikací týkajících se diamantu.

V roce 1953, navždy změnili svět „supermateriálů“, kdy provedli první syntézu syntetického diamantu. V roce 1969, společnost přidala nový důležitý „supermateriál“, kubický nitrid boru (CBN). Počáteční využití CBN bylo brousit kalené ocelové díly. V dalších letech se našlo další

využití CBN a syntetického diamantu, díky čemuž se stala Element Six jedním ze světových lídrů ve výrobě „supermateriálů“.

Sortiment:

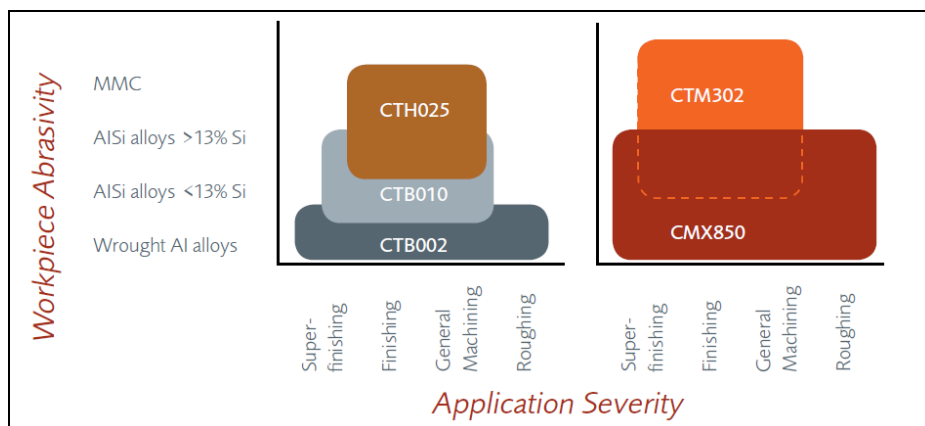
- **Monokrystalický syntetický diamant**

Syntetický monokrystalický diamant má velmi konzistentní a předvídatelné chování a vlastnosti. Oproti tomu se velmi liší přírodní diamant, který má odlišné klíčové vlastnosti a vyžaduje pečlivý výběr. Monokrystalický syntetický diamant je zpracován do geometricky pravidelných tvarů a díky tomu může být použit pro celou řadu aplikací.

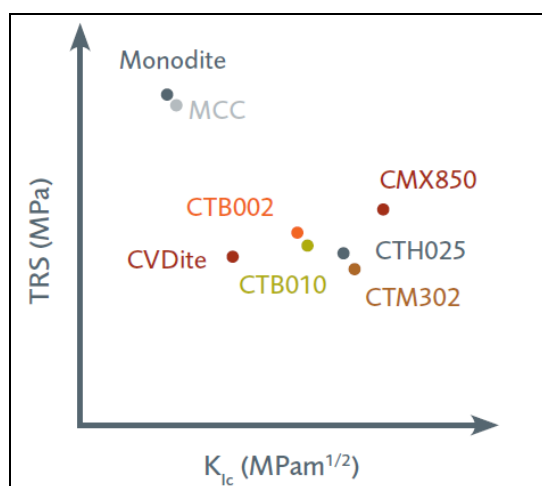
- **Polykrystalický diamant (PCD)**

Firma Element Six poskytuje širokou škálu produktů z PCD, pro splnění požadavků na přesnosti řezání v různém průmyslovém odvětví. Polykrystalický diamant se skládá z prášku mikroskopických rozměrů vázaný slinováním za vysokých teplot a tlaků.

- **CMX850** – Tento typ je ideální pro frézování a hrubé řezání hliníkové slitiny, kde je požadován velký odpor třísky. Na rozdíl od jiných jemnozrnných PCD (velikost zrna 0,5 - 1 μ m), je vhodný také pro obrábění hliníkových slitin se středním a vysokým obsahem křemíku, kde je nutná vysoká odolnost proti otěru. CMX850 ze všech PCD od firmy Element Six je nejnadhěji zpracovatelný ve smyslu broušení. Další úspěšnou aplikací je obrábění titanu a kompozitu.
- **CTB002** – Patří mezi nejtvrdhší materiál z celé nabídky polykrystalických diamantů. Průměr zrna je 2 μ m, což se hodí k výrobě přesných nástrojů pro aplikace, u kterých je požadovaná nejvyšší povrchová úprava. CTB002 je doporučováno pro komplexní nástroje, kde je nutné rozsáhlé zpracování např. závitníky, vrtáky, atd. CTB002 má vynikající odolnost proti vydrolování a je vhodný pro obrábění hliníkových slitin s nízkým obsahem křemíku.
- **CTB010** – Patří mezi nejúspěšnější PCD variantu na trhu. Jedná se o nástroj určený pro mnoho aplikací, kde je dobrý poměr houževnatosti a odolnosti proti opotřebení. CTB010 je ideální varianta, kde je hrubování a dokončování prováděno jedním nástrojem. Velikost zrna je 10 μ m.
- **CTH025** – Průměrná velikost zrna je 25 μ m. Tato varianta byla vyvinuta zejména pro aplikace s abrazivním obráběním. CTH025 je úspěšný v obrábění hliníkových slitin s vysokým podílem křemíku, kovových matic (MMC) a keramiky.
- **CTM302** – Má jedinečnou kombinaci odporu proti opotřebení, pevnosti a kvalitě hrany. Tato dobrá kombinace je zapříčiněna pečlivým namísením diamantu (velikosti zrn mezi 2-30 μ m). Díky tomu se docílí extrémní odolnosti proti otěru a dobré tepelné stability. Oblasti použití zahrnují obrábění abrazivních obrobků, jako jsou MMC, slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku a také je vhodný pro obrábění litin s vysokou pevností.



Obr. 44 - Rozsah použití [10]



Obr. 45 - Závislost tvrdosti a houževnatosti polykrystalických diamantů [10]

• Polykrystalický kubický nitrid boru (PCBN)

Polykrystalický kubický nitrid boru je vyráběn spékáním mikronů CBN (kubického nitridu boru) prášků z různé keramiky tak, aby byl extrémně tvrdý a tepelně stabilní. PCBN kompozity poskytují extrémní odolnost proti deformaci a opotřebení při vysokých teplotách. Z tohoto důvodu se používají pro obrábění kalených ocelí, šedé a vysokopevnostní litiny a za studena a za tepla tvářených nástrojových ocelí. Dále se stále častěji používají při obrábění Niklových a Kobaltových slitin.

Firma Element Six, řadí své produkty z PCBN do dvou skupin označované Low a High CBN. Rozdíl mezi skupinami je ve velikosti zrna, v obsahu CBN, v druhu pojiva a dalších vlastnostech. Pro každou skupinu firma nabízí několik výrobků, které jsou podrobněji popsány, viz níže.

Sortiment:

Low CBN

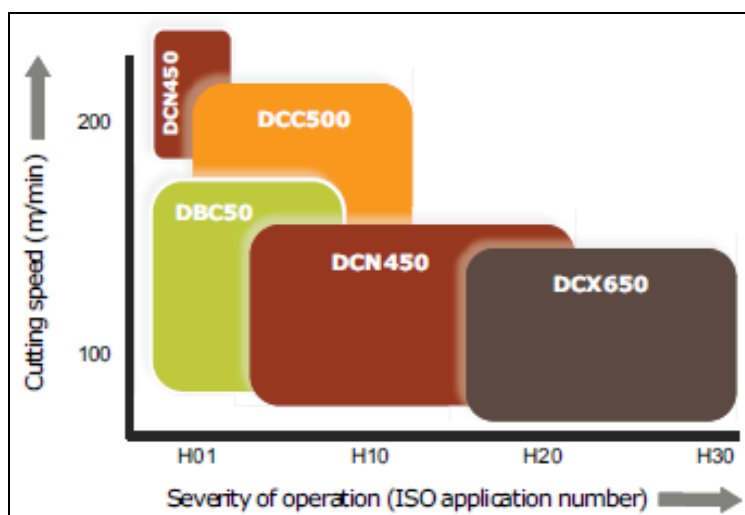
- **DCN450** – Určeno pro středně tvrdé přerušované soustružení a tvrdé dokončovací frézování. Dále se tato varianta PCBN osvědčila při vysokorychlostním kontinuálním soustružení. Materiál obsahuje přibližně 45% CBN a pojivo TiCN.
- **DBC50** – Pro kontinuální a lehce přerušovaný řez v automatových ocelích se řadí DBC50 mezi silné zástupce. Materiál vykazuje vynikající ořezuvzdornost, proto je ideální volbou pro

obrábění nástrojových ocelí. Zrna CBN jsou veliká 1,5 μm , hlavním pojivem je TiC a v materiálu je obsaženo přibližně 50% CBN.

- **DCC500** – Byl vyvinut jako vysoce výkonný doplněk DBC50. Zatímco mají obě tyto třídy podobné kompozice, proprietární výrobní metoda zajišťuje variantě DCC500 extrémně jednotnou strukturu, která při použití poskytuje vyšší odolnost proti vyštípnutí. DCC500 se doporučuje pro stejné aplikace jako DBC50, zejména tam, kde je požadována delší životnost nástroje a vysoké řezné rychlosti.
- **DCX650** – Posledním zástupcem „Low CBN“ je varianta DCX650, která je určena pro středně až velmi těžké přerušované soustružení tvrzených ocelí. Materiál poskytuje optimální rovnováhu tuhosti a kvalitou povrchu. Pojivo TiCN dokonale vyplňuje celý materiál (nevznikají krátery) a zvyšuje odolnost hrany. Obsah CBN je přibližně 65%.

High CBN

- **DBW85** – Patří mezi nejuniverzálnější a nejúspěšnější High CBN třídy na trhu. Je vhodný pro rozmanité spektrum aplikací, jako je vyvrtávání šedé litiny. Kvalitní obrábění lze přičíst vynikající pevnosti a odolnosti proti otěru. Také její extrémní odolnost proti vylamování dělá z DBW85 ideálního zástupce pro silně přerušovaný řez všech tvrdých a drsných materiálů. DBW85 obsahuje 85% CBN s 1-2 μm velkými zrny a pojivem z AlWCob.
- **AMB90** – je další typ, který je vhodný pro soustružení a frézování šedé a tvrzené litiny. Dále je používán pro soustružení kalených ocelí. AMB90 obsahuje 90% CBN o velikosti zrna 10 μm . Pojivová fáze obsahuje hliníkové nitridy a boridy.
- **DBS900** – Tento typ obsahuje zcela nové pojivo, které poskytuje odolnost proti otěru a drobení. S hrubší zrnitostí (2 – 4 μm) a vyšším obsahem CBN (90%) je ve srovnání s DBW85 a DBS900 ideální volbou pro aplikace, kde je nutná delší životnost. DBS900 vyniká při obrábění šedé a tvrzené litiny, kalené oceli a vysoce legovaných slitin železa.



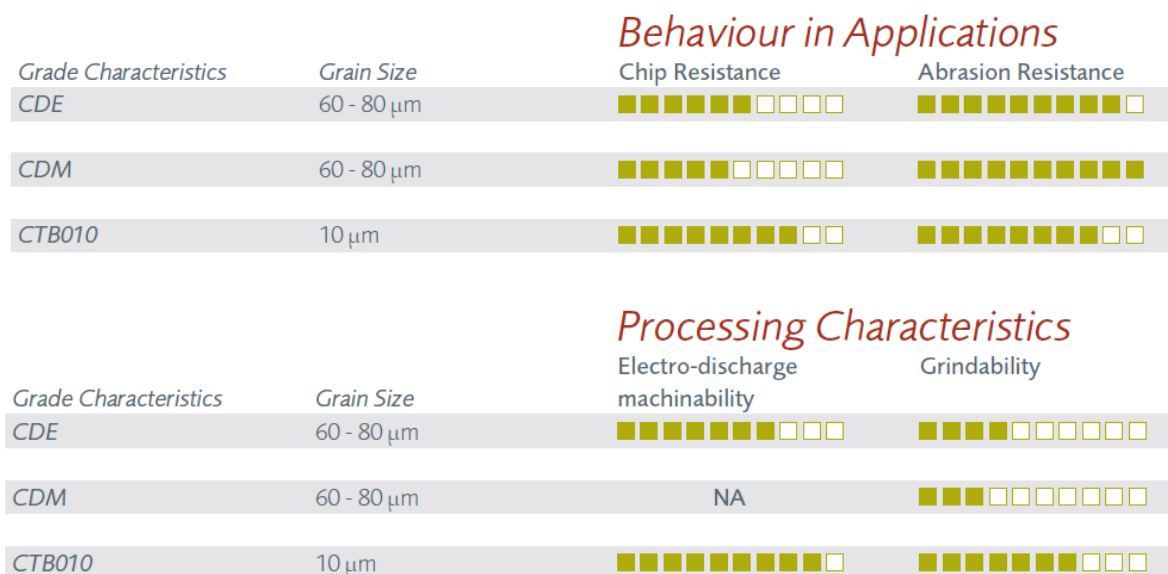
Obr. 46 - Závislost řezné rychlosti na náročnosti operace [10]

- **Polykrystalický diamantový povlak (CVD)**

Výsledkem chemické depozice je polykrystalický CVD diamant, který je velmi konzistentní a má předvídatelné vlastnosti potřebné pro řezné nástroje, tažení drátů a další aplikace. Pro každou aplikační oblast firma Element Six navrhla několik tříd (CDE a CDM), které vyhovují konkrétním požadavkům jednotlivých oblastí.

Odolnost vůči otěru je lepší, než u PCD, proto se používá při kontinuálním obrábění a vystružování při stabilních řezných podmínkách. Pokud je vrstva správně aplikována může se zvýšit odolnost proti opotřebení hned několikrát v porovnání se středněhrubým zrnem z PCD. Nejvyšších rozdílů v životnosti nástroje dochází při obrábění materiálů s extrémní odolností proti otěru, jako jsou kovové matice kompozitů a keramiky.

Element Six vyrábí elektricky vodivou variantu nazývanou CDE a nevodivou variantu CDM. Na obrázcích níže jsou vidět mechanické a technologické vlastnosti obou zástupců ve srovnání s polykrystalickým diamantem typu CTB010.



Obr. 47 - Mechanické vlastnosti CVD povlaků [10]



DIAMOND INNOVATION

Diamond Innovation, dříve GE® Specialty Materials and GE® Superabrasives, patří mezi první masové výrobce diamantu pro broušení tvrdokovu v roce 1955.

Prostřednictvím technických inovací a vytrvalosti, Diamond Innovation hrdě dosáhl stavu jako přední světový výrobce diamantů, kubických nitridů bórů a polykrystalických výrobků.

Hlavní sídlo firmy je ve městě Worthington v OH (USA), kde se nachází i největší výrobní závod s výzkumnými a vývojovými laboratořemi. Další výrobní závody jsou umístěny ve městě Deerfield Beach (Florida) a Dublinu (Irsko)

Sortiment:

- **BZN 6000** – Jedná se o velmi kvalitní krystaly CBN, které jsou náhodně orientované a silně spojené mezi sebou. Vrstva PCBN je spojena substrátem karbidu wolframu, díky čemuž dosahuje vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Navíc obsahuje vysoký podíl CBN, což tyto vlastnosti také velmi ovlivňuje. V důsledku toho vykazuje BZN 6000 vynikající výsledky při obrábění přerušovaným řezem.

Výhodou tohoto typu je vysoká odolnost proti otěru, vynikající rázová houževnatost, výborná kvalita a zachování hrany.

- **BZN 7000S** – Tento typ má hrubší zrno, vysoký obsah CBN, vykazuje vysokou lomovou houževnatost, vynikající odolnost proti opotřebení a vynikající chemickou stabilitu. BZN 7000S má vynikající stabilitu řezné hrany, rozměrovou stálost a zvyšuje produktivitu při obrábění těžko obrobitelných kovových materiálů. Je určen pro obrábění Ni-litin, tvrdých litin a vysoce chromovaných slitin.

Výhody jsou ve vysoké lomové houževnatosti, vynikající odolnosti proti opotřebení, vynikající chemické stabilitě, možnost velkého úběru materiálu a výborná životnost nástroje.

- **BZN 8200** – Krystaly CBN s nitridy titanu poskytují BZN 8200 dobrou kombinaci nárazové odolnosti a chemickou stabilitu. Tato varianta byla speciálně navržena pro dokončovací obrábění kalené oceli s vyšší pevností než je 45 HRC, díky tomu nahrazuje konvenční broušení.

Výhody BZN 8200 jsou vynikající odolnost proti otěru, vysoká lomová houževnatost, výborná chemická stabilita a konzistentní povrchová úprava v kontinuálních i přerušovaných řezech.

- **BZN 9000** – Diamond Innovation využil designu nástroje Six Sigma k výrobě BZN 9000, který úspěšně překonává obtíže při obrábění velkého množství typů PM materiálů na dnešním trhu. Vysoký obsah CBN spolu se speciálně konstruovanými keramickými pojivy poskytuje materiál vysokou chemickou odolnost proti opotřebení a dokonalou odolnost proti otěru.

Tento materiál nabízí vynikající odolnost proti nárazu, vysokou chemickou stabilitu, konzistentní povrchové úpravy a zvýšení produktivity výroby.

- **BZN 9100** – Skládá se z velkého procenta CBN v Ti na bázi cermetové matrice. Toto složení poskytuje nový BZN kompaktní produkt s vynikající odolností proti nárazu a výrazně lepší chemické stabilitě. Kombinace těchto vlastností umožňuje využít tento typ v aplikacích od kontinuálního až po vysoce přerušované řezy. Nejčastěji se používá pro obrábění litin a vynikajících výsledků se dosáhlo při obrábění nástrojových ocelí.

Tabulka 21 - Možnosti použití [1]

Výběr produktu podle obráběného materiálu	
Perlitické šedé litiny	BZN 6000
	BZN 7000S
Tvrdé litiny (>45 HRC)	BZN 7000S
	BZN 9100
Tvrzené ocelové slitiny (>45 HRC)	BZN 8200
	BZN 9100
	BZN HTC 2000
	BZN HTC 2100
Slinuté karbidy	BZN 9100
	BZN 9000
	BZN 6000
	BZN 7000S
Vysoce legované slitiny	BZN 6000

- **BZN HTC 2000** – je primárně doporučován pro obrábění tvrzené slitiny. Vzhledem ke své nízké chemické reaktivitě a optimální tepelné vodivosti, je možné snadno upravovat povrch a nástroj dosahuje mimořádně dlouhé životnosti.

Mezi největší výhody patří: nejvyšší odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, nízká chemická reaktivita, snadná povrchová úprava a mimořádná životnost nástrojů.

- **BZN HTM 2100** – Vhodné pro kontinuální a mírně přerušované obrábění. Kombinace vysoké odolnosti proti otěru, dobré rázové houževnatosti a chemické stability umožňuje snížení ceny, dobrou povrchovou úpravu a delší životnost.



CERATONIA

Ceratonia, byla založena v roce 1996. Vznikla ze slova "Ceratonia siliqua", což je název druhu stromu. Plody tohoto stromu mají tvar lusků, obsahující semena, která byla dříve využívána jako jednotka hmotnosti karátů.

Sortiment:

- Přírodní diamant (CN-P, CN-P1, CN-R)
 - CN-P – tento výrobek s ostrými řeznými krystaly a vysokou pevností za vyšších teplot je ideální pro všeobecné použití, dokonce i pro žáruvzdorné materiály. Ostré hrany jsou ideální pro řezání betonu nebo asfaltu nebo k vrtání. Ve srovnání s typem CN-P1 má menší odolnost proti rázům. Dodává se v zrnitosti 16/18 do 325/400.
 - CN-P1 – vhodný zejména pro operace, kde je nutné mít u nástroje velké zubové mezery (dochází k velkému odebrání třísky). Dobré tepelné vlastnosti umožňují vystavení vysokým teplotám během obrábění. Velikost a tvar zrna je velmi přesně tolerována. To je obzvláště vhodné pro elektrické vazby. Dodává se ve stejné zrnitosti, jako jeho předchůdce typ CN-P.
 - CN-R – CN-R má zaoblený tvar zrna. Díky tomu dosahuje větší pevnosti v tahu při zachování tepelných vlastností. Velikosti zrna jsou v rozmezí 20/25 až 80/100.
- Ceraton CVD

Zrnitost substrátu se liší podle vrstvy. Nejmenší zrnitost (nižší než 1 μm , u PCD je minimální velikost 2-4 μm) je na povrchu, směrem k nástroji velikost zrna roste až na 20 μm . U špičky nástroje se tedy nachází jemné zrno, které zabezpečuje snadnější ostření, naopak větší zrna v hlubších vrstvách lépe přenášejí vznikající síly.

Extrémně vysoká tvrdost 83 GPa je cca o 60% vyšší, než u PCD (50 GPa). Tepelná vodivost je podobná jako u přírodního diamantu. Kvalita povrchu obrobku a životnost je podstatně vyšší, než u PCD.

Ceraton CVD má vysoký potenciál v suchém obrábění neželezných materiálů. Součinitel tření PCD při obrábění slitin AlSi je v rozmezí 0,2 - 0,08, ve srovnání s CVD povlakem je asi 3 – 4x nižší.

- Ceradite PKD

Vysoká tepelná vodivost diamantového mikroprášku a kobaltového pojiva umožňuje odvod vysokých teplot z místa řezu, což zvyšuje odolnost proti otěru. PCD nástroje nahradily nástrojové materiály, keramiku i přírodní diamant v řadě vysoce výkonných aplikacích. Materiál je možné několikrát ostřit, čímž se zvýší jeho životnost. Vysoká cena PCD výrobků může být nahrazena nižšími náklady na zpracování obrobku.

Tabulka 22 - Vlastnosti a použití Ceradite PKD [2]

Typ	Velikost zrna [μm]	Použití	Technické vlastnosti			
			% Co	% Diamantu	Žáruvzdornost	Odolnost x opotřebení
CD 02W	2– 4	-Al, Cu slitiny -dřevo	Vysoký	Redukovaný	Nízká	Cca 10% pod CD 02S
CD 02S	2 – 4		Střední	Střední	Střední	Střední
CD 02M	1 – 3	-plasty -laminát	Redukovaný	Vysoký	Vysoká	
CD 10W	8 – 12	-AlSi slitiny -Compozity	Vysoký	Redukovaný	Nízká	Cca 10% pod CD 02S
CD 10S	8 – 12		Střední	Střední	Střední	Střední
CD 10M	2 - 12	Používá se jako CD10S a tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu povrchu a trvanlivost.	Redukovaný	Vysoký	Vysoká	
CD 25W	20 – 30	-AlSi slitiny	Vysoký	Redukovaný	Nízká	Cca 10% pod CD 02S
CD 25S	20 - 30	-pro vysokorychlostní obrábění a přerušované řezy	Střední	Střední	Střední	Střední
CD 25M	2 - 30	Používá se jako CD 10S a tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu povrchu a trvanlivost.	Redukovaný	Vysoký	Vysoká	

- Typickými aplikacemi je soustružení, frézování, vrtání, řezání a srážení hran. Obráběné materiály mohou být neželezné kovy, slitiny hliníku, keramika, plasty a kompozitní materiály. PCD nástroje jsou používány v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu (letecké materiály, vyztužené kompozitní materiály) dále v elektronice, optice, atd. Vzhledem k tvorbě karbidů (chemická reakce železa a diamantu při vysokých teplotách) nelze PCD nástrojem obrábět oceli, litiny nebo jiné železné materiály.

- Vlastnosti Ceradite PKD se liší v zrnitosti. Čím je zrno větší, tím roste i odolnost proti opotřebení. Naopak kvalita povrchu je horší (vzniká hrubší povrch). Volbou jemnějšího zrna se zlepší povrch diamantu a řezání obrobku, ale sníží se jeho životnost.
- CNF Series 3000 (3100, 3090, 3080, 3070, 2060, 3050, 3040, 3030)
 - CNF 3100 – Krystaly se skládají z dokonale orientovaných osmistěnnů, které mají velmi vysokou čistotu. Dále se vyznačují velmi dobrou rázovou houževnatostí. Užitek lze nalézt v řezání tvrdého betonu nebo výztuží, asfaltu, žuly, atd.



Obr. 48 - Detail krystalů diamantu [2]

- CNF 3080 – Jedná se také o krystaly jednotné formy a velmi jasné barvy, avšak se v nich nacházejí drobné vměstky. Teplota zatížení je menší, než u CNF 3090. Používá se při jádrovém vrtání a řezání betonu.
 - CNF 3050 – Zde už jsou obsaženy krystaly nepravidelného tvaru s průměrnou silou částic. Uplatnění lze najít např. u broušení / leštění žuly a mramoru.
 - CNF 3030 – Nepravidelné krystaly, otevřené plochy a nižší pevnost jsou vlastnosti, díky kterým je tento materiál vhodný pouze pro nenáročné operace (např. broušení podlah).
- Cerabon CBN
 - Hlavními výhodami brusiva CBN je vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení, pevnost a odolnost vůči tepelným a chemickým vlivům.
 - CBN 10 (R) – Jedná se o černý monokrystalický materiál s velmi nízkou pevností. Skládá se z velmi tvarově nepravidelného zrna s nižší vazebnou silou. Pro zesílení vazby se používá syntetická pryskyřice. Je vhodný pro dokončovací nástroje.
 - CBN 20 (V) – Nepravidelně tvarované zrno černé barvy s nízkou vazebnou silou. Zvláště vhodné pro obrábění keramických materiálů.
 - CBN 30 (E) – Jde opět o monokrystalický materiál s nízkou pevností, který se vyznačuje oranžovou barvou zrn. Povrch je ideální pro výrobu galvanických nástrojů.
 - CBN 40 (V,R) Má černou barvu a střední pevnost. Používá se v keramikách a pryskyřicích. Pevnost a dobrá lomová houževnatost umožňují optimální životnost a kvalitu povrchu.
 - CBN 50 (E,M) – Používá se hlavně na galvanické nástroje. Vysoká pevnost v tahu umožňuje extrémně vysoké hloubky řezu při dlouhé životnosti. Dále se používá při broušení kalených nástrojových ocelí, uhlíkových a legovaných ocelí a niklových a kobaltových slitin.
 - CBN 55 (M,E,B) – Jedná se o polykrystalický materiál šedé barvy, který vykazuje extrémní pevnost v tahu, takové hodnoty nedosahuje žádný materiál z monokrystalického zrna. Tvar částic, struktura povrchu a jednotné síly bez ohledu na velikost zrna je zárukou vynikající kvality povrchu.
 - CBN 60 (M,E) – Pro vysoké zatížení, a to i u honování, kde je potřeba mít pevné částice s negativní geometrií bříty. Jedná se o velmi pevný monokrystalický materiál.

- CBN 80 (M,V) – Barva zrna je černo-hnědá. Jde o monokrystalický materiál s vysokou pevností a stabilitou, i když výrazně menší v porovnání s CBN 50. Čtyřboká morfologie zrna je ideální pro náročné aplikace.



ILJIN DIAMOND

Počátky této firmy se datují do roku 1987, kdy vyvinula technologii výroby syntetického diamantu, který se používá pro řezání a broušení abrazivních materiálů. Iljin Diamond je nyní připraven se stát nejlepším poskytovatelem syntetického diamantu, splňující různé potřeby celosvětových zákazníků.

Sortiment:

- **Série IPD** (-EX,-SU,-HI) – Materiál je navržen tak, aby měl vysokou pevnost, tepelnou stabilitu a dobře definovatelný břit, což vede k vyšší výkonnosti.

Tabulka 23 - Porovnání série IPD a ISD [3]

	IPD-EX	IPD-SU	IPD-HI
Dostupné velikosti	30/40, 40/50		
Ekvivalent (ISD)		ISD-1750	ISD-1700

- **Série ISD** (-1750,-1700,-1600,-1500,-1300)

Tabulka 24 - Vlastnosti a použití ISD [3]

Třída	ISD-1750	ISD-1700	ISD-1600	ISD-1500	ISD-1300
Obrázek					
Dostupné velikosti	25/30 až 60/80				
Vlastnosti	Velmi vysoká pevnost, tepelná stabilita a přísně kontrolovaný tvar.	Vysokopevnostní, tepelně stabilní materiál s optimálním tvarem zrna pro velmi náročné pracovní podmínky.	Vysoká pevnost, nízká integrace a jednotný tvar zrna.	Materiál vhodný pro střední zatížení a všeobecné použití.	Relativně drobný materiál s širším rozložením síly a tvarem pro střední aplikace.

- **Série IBN** (-20, -30, -40, -300, -500, -700, -900, -5000, -6000)

Tabulka 25 - Vlastnosti a použití IBN [3]

Třída	IBN-20	IBN-30	IBN-40	IBN-300	IBN-500	IBN-700
Dostupné velikosti	60/70 až 400/500	45/50 až 400/500		60/70 až 400/500		
Vlastnosti	Drobivý a nepravidelný tvar. Vhodné pro jemné broušení	Hranatý tvar.	Pro standardní a konvenční operace o střední houževnatosti a dlouhé životnosti nástroje.	Drobivý a nepravidelný tvar. Pro jemné broušení. Vysoká účinnost výroby.	Vysoce samo ostřící, jemné broušení, ostrá řezná hrana.	

Tabulka 26 - Vlastnosti a použití IBN [3]

Třída	IBN- 900	IBN - 5000	IBN - 6000
Dostupné velikosti	50/60 až 400/500		20/30 až 400/500
Vlastnosti	Vysoce samo ostřící, jemné broušení, ostrá řezná hrana.	Vhodné pro kalené nástroje.	Vhodné pro kalené nástroje.

- **Série IMD** (-F, -D, -B, -A, IGD-II)
 - **IMD-F** – Díky dokonalému pravidelnému tvaru dosahuje nejvyšší rázové houževnatosti a tepelné stability. Tyto vlastnosti zaručují nejlepší účinnost a kvalitu zpracování v oblastech, kde se dosahuje velkého zatížení diamantu.
 - **IMD-D** – Tento typ má dobrou rázovou houževnatost a pravidelný tvar, který zaručuje optimální životnost nástroje a kvalitu. Je vhodný pro vysoký výkon a k obrábění keramiky.
 - **IGD-II** – Během fragmentace se nepřetržitě vytváří ostrý břit.
- **Série IRD** (-III, -II)
 - **IRD-II** – Má dobré kontinuální břity, dobré roztržnění a vynikající řezivost s nízkou spotřebou energie.
 - **IRD-III** – Porovnání s IRD-II má schopnost vyrovnat se s větším zatížením. Je vhodný pro práci v tvrdém stavu, například při broušení drážek a dokončovacím broušení.

- **Série IMP** (-M, -R, -CA, -CB)

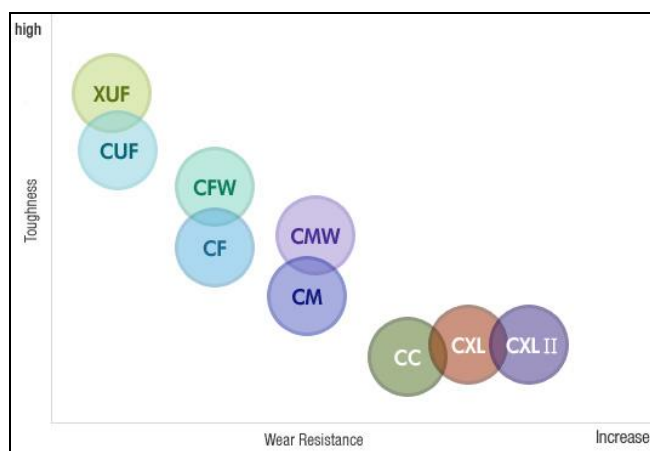
Tabulka 27 - Vlastnosti a použití IMP [3]

Typ	Diamant		CBN	
	IMPM	IMPR	IMPCA	IMPCB
Pro materiály	Kovy	Plasty	Aplikace barevných kovů	
Vlastnosti	Vynikající pevnost a houževnatost. Vysoká odolnost proti opotřebení a dobrá kvalita povrchu.	Nejnižší houževnatost a nárazová práce. Kontinuální ostří, výborná kvalita povrchu a kratší procesní časy.	Pravidelný tvar, nejlepší kvalita povrchu a kratší procesní časy.	

- **Série IPOL** (CF, CM, CC, XUF, CUF, CXL, CXL-II, CFW, CMW, CCW)

Tabulka 28 - Vlastnosti a použití IPOL [3]

Typ	Standard			Premium				Special
Třída	CF	CM	CC	XUF	CUF	CXL	CXL-II	W-Grade
Velikost zrna [μm]	4	10	25	1	2	40	40	CFM/C MW/CC W
% diamantu	90	92	94	85	90	95	95	90
Vlastnosti	Dobry povrch při dokončování.	Obecné účely	Dobrá odolnost proti opotřebení.	Vynikající odolnost a snadnější výroba.	Velmi dobrá povrchová úprava.	Extrémní odolnost proti opotřebení.		Dobrá odolnost proti nárazu.



Obr. 49 - Závislost tvrdosti na odolnosti proti opotřebení [3]

- **Série IBON** (SB100, SB95N, SB90, SB80, SB70, SB60, SB50)

Tabulka 29 - Vlastnosti série IBON [3]

Třída	SB100	SB95N	SB90	SB80	SB70	SB60	SB50
Velikost zrna [μm]	10	3	3	3	2	2	2
% CBN	93	95	90	80	70	60	50
Hlavní pojivo	Nitrid hliníku	Titanové slitiny	Nitrid titanu	Nitrid titanu	Karbonitrid titanu	Nitrid titanu	Karbid titanu
Tvrдость	3700-3900	3700-3900	3500-3700	2700-2900	2600-2800	2500-2700	2500-2700

3 Analýza se zaměřením na technologii velmi přesného vystružování obráběných materiálů

Volba řezného materiálu, ze které je vyroben nástroj nebo řezná hrana značně závisí kromě geometrie a deponované tenké vrstvy na obráběném materiálu ve kterém bude nástroj pracovat. Protože však při dnešním vývoji v materiálovém inženýrství není možné určit univerzální řezný materiál pro všechny obráběné materiály, byli zvoleni představitelé hlavních průmyslových odvětví a v návaznosti na průmyslové obory a aplikace vysoce efektivního a přesného obrábění otvorů byli vyspecifikovány nejčastěji obráběné materiály z každého oboru (viz příloha č. 1). Každý materiál má jiné vlastnosti a také tedy jiné spektrum použití.

První kategorií jsou litiny. Jako zástupci byli zvoleni šedá litina GG25 a tvárná litina GGG60. Dále pak zde jsou oceli. Z uhlíkových ocelí byla zvolena ocel 11 373.1 ve stavu normalizačně žíhaném. Z ušlechtilých ocelí byla zvolena slitinová chrom-molybden-vanadová ocel 15 246 a austenitická korozivzdorná ocel 17 240. Poslední kategorií z ocelí jsou nástrojové oceli. Zde byla jako zástupce vybrána nízkolegovaná nástrojová ocel 19 312. Z neželezných kovů je často obráběným materiálem hliník a slitiny titanu. Jako představitel z této kategorie byl vybrán Silumin což je slitina Al-Si s 12% křemíku.

4 Hodnocení a doporučené sorty řezných materiálů

Parametr řezného materiálu je při vývoji nového prototypového nástroje značně důležitý. Protože kritérií, které mohou výběr ovlivňovat je spousta od materiálu obrobku, jeho technologické a mechanické vlastnosti přes upnutí a geometrii řezné hrany až po samotných vlastnostech řezného materiálu je potřeba zvolit ty které jsou pro danou aplikaci vypovídající. Díky velkému spektru parametrů by byl výběr kritérií pro řezný materiál velice složitý. Z toho důvodu byla volba provedena vždy pro jednotlivé obráběné materiály. Tím bylo sice nutné udělat větší počet porovnání, ale jednotlivé porovnání byla jednodušší a také z technologického hlediska je tomu tak správně neboť je vhodnější používat pro každý obráběný materiál řezný materiál s největší vhodností.

V kapitole 2.2 byl popsán sortiment výrobců řezných materiálů, kteří se zabývají výrobou materiálů vhodných pro naši aplikaci. Neboť však výrobci mají ve svém sortimentu velké spektrum řezných materiálů ale pro aplikace v přesném a velmi produktivním vystružování otvorů jsou vhodné jen některé materiály, byly vybrány jen materiály, které jsou pro tyto účely vhodné. Tyto materiály jsou zaznamenány v tabulce 11.

Tabulka 30 - Materiály vhodné pro vystružování otvorů

Typ řezného materiálu	Výrobce	Označení výrobce
SK	Ceratizit	MG12, MG18, TSF44, CTS18D, MGG, (H10,
	Konrád Fridrich	K6UF, K4OUF, K20F
	Extramet	EMT100, EMT210
	Kyocera	PW30
Cermet	Ceratizit	TCN54, (CTF 28T)
	Kyocera	TN30, TN60
	NTK	C7X (dříve N40), T15, T3N
	Sumitomo	T1200A
PKD	Element six	CTX002,CTM302
	Ceratonía	v jednání
CBN	Diamond Innovations	BZN6000, HTM
	Element six	DBS900, DCC500,
	Iljin	SB50+

Pro vyhodnocení nejvhodnějších řezných materiálů, bylo využito párové analýzy a multikriteriálního hodnocení. Tyto metody jsou často používané při zjišťování nejvýhodnější varianty z široké nabídky vstupních hodnot (v našem případě řezných materiálů).

4.1 Párová analýza

Párová analýza je nástroj na seřazení kritérií (tvrdost, houževnatost, velikost zrna a pevnost v ohybu), která se používají pro hodnocení řezných materiálů. Provádí se zde vzájemné posouzení významu kritérií. Všechny kritéria se vzájemně porovnají a u každé dvojice se rozhodne, která je vzhledem k řezným vlastnostem důležitější.

Po vyplnění celé tabulky se v každé řádce sečtou hodnoty v políčkách. Tímto nám vznikne seřazená skupina kritérií od nejdůležitějšího až po kritérium, které je pro nás nejméně důležité.

Tabulka 31 - Párová analýza - porovnání vybraných kritérií

	<i>Tvrđost</i>	<i>Houževnatost</i>	<i>Velikost zrna</i>	<i>Pevnost v ohybu</i>	<i>Pořadí</i>	<i>Váha</i>
<i>Tvrđost</i>	X	1	1	1	1	4
<i>Houževnatost</i>	0	X	1	1	2	3
<i>Velikost zrna</i>	0	0	X	1	3	2
<i>Pevnost v ohybu</i>	0	0	0	X	4	1

4.2 Multikriteriální hodnocení variant

Pomocí multikriteriálního hodnocení se podle námi vybraných kritérií a jim přiřazených hodnot vybere nejvhodnější varianta.

Alokace je bodová stupnice, kterou se hodnotí varianty z pohledu každého kritéria. Pro dané kritérium se každé variantě se přiřadí hodnota od 10 do 100 bodů. Tyto hodnoty se poté vynásobí váhou kritéria. Výsledná hodnota užítosti je dána součtem bodového hodnocení vynásobené váhou každého kritéria.

Pro lepší přehlednost výsledků se uvádí hodnota relativní užítosti. Tedy užítost vydělená hodnotou ideální varianty, která má maximální hodnotu. Toto číslo vynásobíme 100 a máme procentuální hodnotu relativní užítosti.

Nyní jsme z široké nabídky sortimentů vybrali čtyři zástupce, kteří by podle vlastností uváděny výrobcem měli dosáhnout při obrábění konkrétních materiálů požadovaného výsledku. Tyto zástupce jsme mezi sebou porovnali pomocí multikriteriálního hodnocení a vzešly nám vždy dvě varianty, které budeme označovat jako volba++ (vyjadřuje vhodný řezný materiál) a volba+ (alternativní řešení).

Tabulka 32 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál GG25

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	MG12 + TiAlN		DBS900		K40UF		PW30	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrdotost	1	4	80	320	90	360	60	240	60	240
Houževnatost	2	3	90	270	40	120	90	270	90	270
Velikost zrna	3	2	50	100	90	180	50	100	60	120
Pevnost v ohybu	4	1	80	80	35	35	70	70	65	65
Celkem: max = 10 x 100 = 1000			770		695		680		675	
Relativní užítost variant			77 %		69,5%		68 %		67,5 %	

Dvě nejvhodnější varianty řezných materiálů jsou ty, které dosahují nejvíce procent. V případě viz výše, se tedy jedná o řezný materiál MG12 + TiAlN (77%), který se jeví jako nejvhodnější a DBS900 (69,5%) bude jako alternativní řešení.

Tabulka 33 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál GGG60

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	TCN54		MG18 + TiAlN		MG12		C7X	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдость	1	4	85	340	80	320	90	360	60	240
Houževnatost	2	3	90	270	95	285	70	210	80	240
Velikost zrna	3	2	50	100	50	100	50	100	30	60
Pevnost v ohybu	4	1	80	80	85	85	65	65	70	70
Celkem: = 10 x 100 = 1000		max	790		790		735		610	
Relativní užítlost variant			79%		79%		73,5%		61%	

Tabulka 34 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 11 373.1

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	TCN54		TN60		EMT100		K40UF	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдость	1	4	85	340	95	380	90	360	60	240
Houževnatost	2	3	90	270	70	210	60	180	90	270
Velikost zrna	3	2	50	100	60	120	40	80	50	100
Pevnost v ohybu	4	1	80	80	70	70	65	65	70	70
Celkem: = 10 x 100 = 1000		max	790		780		685		680	
Relativní užítlost variant			79%		78%		68,5%		68%	

Tabulka 35 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 15 246.X

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	TCN54		TN60		T1200A		CTS18D	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдость	1	4	85	340	95	380	65	260	55	220
Houževnatost	2	3	90	270	70	210	85	255	90	270
Velikost zrna	3	2	50	100	60	120	60	120	50	100
Pevnost v ohybu	4	1	80	80	70	70	80	80	90	90
Celkem: = 10 x 100 = 1000	<i>max</i>		790		780		715		680	
Relativní užítlost variant			79%		78%		71,5%		68%	

Tabulka 36 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 17 240.X

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	MG18 + TiN (TCN54)		H10 + TiN		EMT210		K6UF	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдость	1	4	80	320	85	340	60	240	90	360
Houževnatost	2	3	95	285	85	255	95	285	65	195
Velikost zrna	3	2	50	100	45	90	40	80	60	120
Pevnost v ohybu	4	1	85	85	70	70	90	90	70	70
Celkem: = 10 x 100 = 1000	<i>max</i>		790		755		695		745	
Relativní užítlost variant			79%		75,5%		69,5%		74,5%	

Tabulka 37 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 19 312.X

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	DBC50		BZN6000		DBS900		HTM	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдост	1	4	100	400	95	380	90	360	95	380
Houževnatost	2	3	70	210	75	225	80	240	75	225
Velikost zrna	3	2	55	110	50	100	30	60	40	80
Pevnost v ohybu	4	1	60	60	55	55	30	30	35	35
Celkem:		max	780		760		690		720	
			= 10 x 100 = 1000							
Relativní užítlost variant			78%		76%		69%		72%	

Tabulka 38 - Volba vhodného řezného materiálu pro obráběný materiál 42 4230

Kritéria	Pořadí kritérií	Váha	CTB002		CTM302		SB50+		DCC500	
			prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
Tvrдост	1	4	100	400	100	400	95	380	95	380
Houževnatost	2	3	70	210	70	210	75	225	75	225
Velikost zrna	3	2	50	100	40	80	35	70	40	80
Pevnost v ohybu	4	1	60	60	50	50	40	40	50	50
Celkem:		max	770		740		715		735	
			= 10 x 100 = 1000							
Relativní užítlost variant			77%		74%		71,5%		73,5%	

5 Závěr

Výsledky rešerše prezentuje Tabulka 20, kde jsou uvedeny nevhodnější varianty pro jednotlivé obráběné materiály vycházející z tabulek 13 – 19. Hlavní cíl rešerše, byl výběr dvou doporučených sort pro daný obráběný materiál. Volba++ vyjadřuje vhodný řezný materiál, volba+ pak alternativní řešení. Při experimentálním testování volby++ bude v případě neuspokojivých výsledků nasazena volba+.

Tabulka 39 - Doporučené řezné materiály pro testování nových vystružovacích nástrojů

Obráběný materiál	Doporučený řezný materiál	
	Volba++	Volba+
GG25	MG12 + TiAlN	DBS900
GGG60	TCN54	MG18 + TiAlN
11 373.1	TCN54	TN60
15 246. X	TCN54	TN60
17 240. X	MG18 + TiN (TCN54)	H10 + TiN
19 312. X	DBC50	BNZ6000
Al-slitina (12%Si)	CTB002	CTM302

6 Použitá literatura

- [1] <http://www.diamondinnovations.com/>
- [2] <http://www.ceratoniam.de/>
- [3] <http://www.iljinco21.en.ec21.com/>
- [4] <http://www.ntkcuttingtools.com/>
- [5] <http://www.ceratizit.com/>
- [6] <http://www.german-carbide.com/>
- [7] <http://www.sumicarbide.com/>
- [8] <http://www.americas.kyocera.com/>
- [9] <http://www.extramet.ch/>
- [10] <http://www.e6.com/>

PŘÍLOHA č. 3

Charakteristika obráběcího stroje DMU 65 monoBLOCK

Základní technické parametry stroje:

Druh	vertikální obráběcí centrum
Typ	DMU 65 monoBLOCK
Počet CNC řízených os	5
Jmenovitý výkon vřetena	13 kW
Maximální otáčky	18 000 min ⁻¹
Změna otáček	plynulá
Zdvih v ose X, Y, Z	735/650/560
Rozměry pracovního stolu	1000 x 650 mm
Řídicí systém	Heidenhein ITNC 530
Počet nástrojů v zásobníku	30 ks



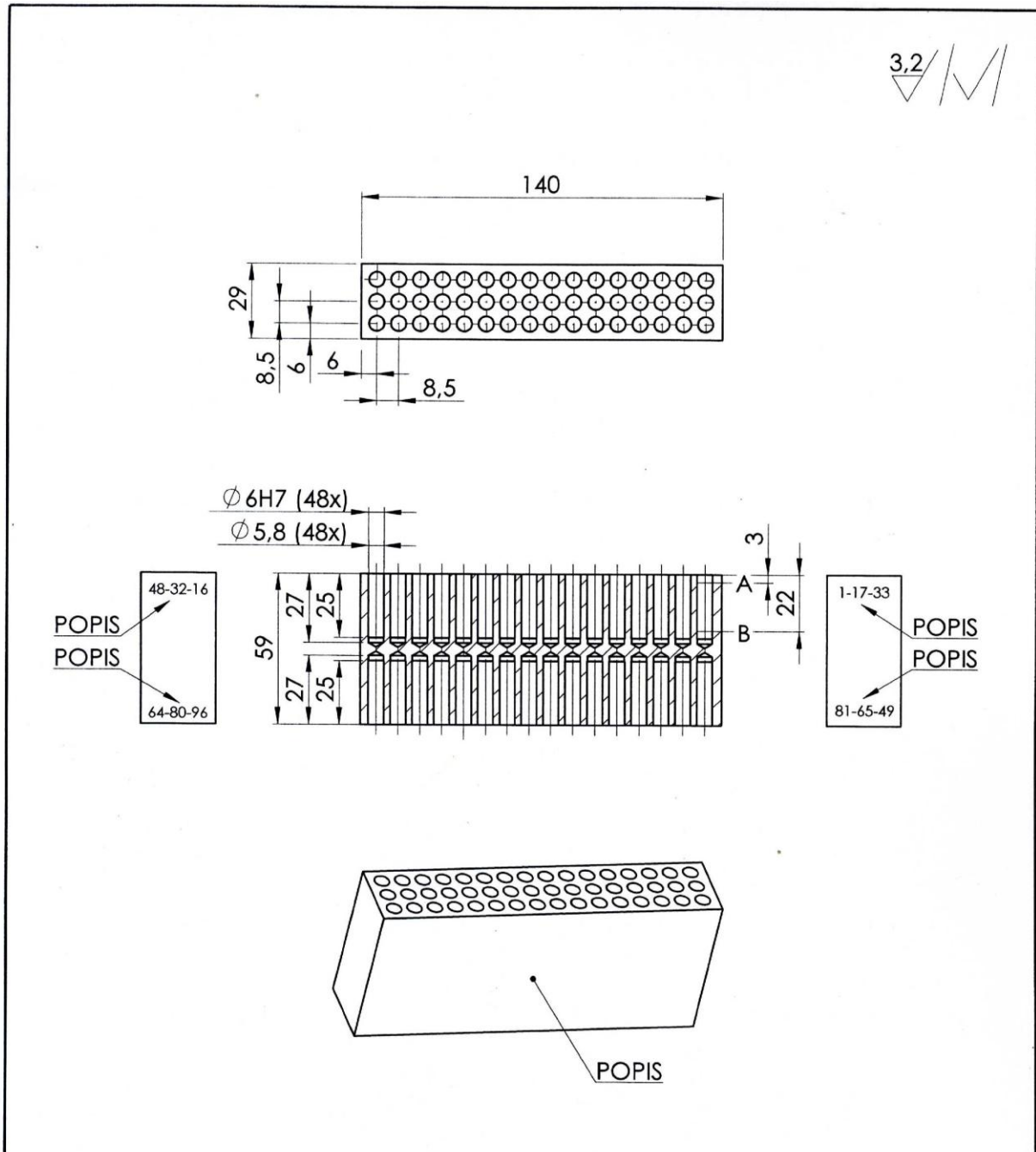
Obrázek je pořízen z webové stránky uvedené níže

<http://reports.gildemeister.com/en/2010-3/business-development/research-and-development>

PŘÍLOHA č. 4

Technická dokumentace zkušebních vzorků

Technická dokumentace ke zkušebnímu vzorku



POPIS: ČÍSLO TESTU+OČÍSLOVAT KOSTKY 1-x + OZNAČIT DÍRY:

				11 373				
Pozice:	Počet kusů:	Název:	Materiál:		Rozměr:	Hmotnost číslo mat.	Číslo výkresu - norma:	
Měřítko:	Kreslí:	Ing. Pišsek	Obráběný materiál:		ZMĚNA:	DATUM, PODPIS:	a	
1:2	Kontrolovat:						b	
A4	Schválil:		Datum: 10.1.2013				c	
HAM-FINAL BRNO		Typ:			Starý výkres:		Nový výkres:	
		Název:			Číslo výkresu:			
		TEST MAT. 11 373			Test č.1 - Mat. 11 373			

PŘÍLOHA č. 5

Charakteristika vzduchového kalibru

Technické parametry vzduchového měřidla S 1840

Technická data			
Analogový ukazatel	101 LED kontrolky, 3 barvy	Mezní chyby	
Zobrazení měřené hodnoty	7-mi místný LCD	Desítkový stupnicový ukazatel	1% (101 LED)
Rozsahy zobrazení [μm]	± 10 ; 30; 100; 300; 1000; 3 000; 10 000	Číslicový ukazatel	
Zobrazení tolerance	Změnou barvy naalogového ukazatele	Teplotní koeficient	$\pm 0,005\%$ / $^{\circ}\text{C}$
Doba odezvy		Rozsah provozní teploty	0 $^{\circ}\text{C}$ až 45 $^{\circ}\text{C}$
Měřená hodnota	0,008 s	Parametry měřidla	
Analogový ukazatel	0,02 s	Rozměry (V x Š x H)	cca 487 x 47 x 144 mm
Výstupy	0,02 s	Hmotnost	cca 1,4 kg



Obrázek je pořízen z webové stránky uvedené níže

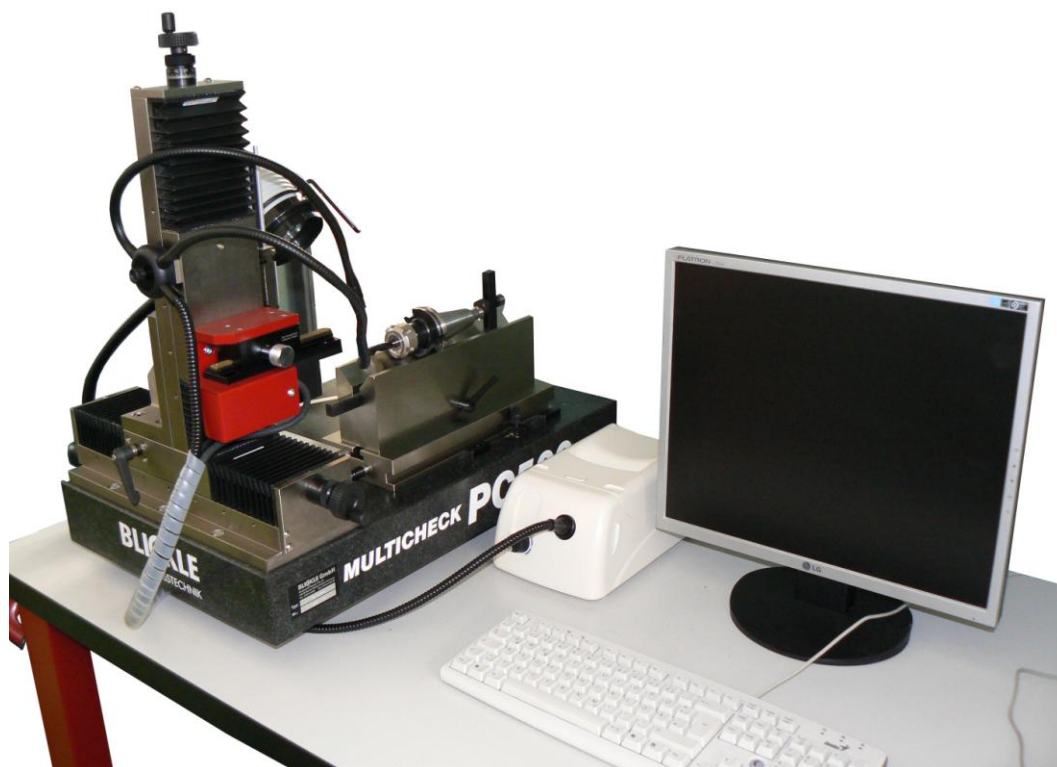
<http://www.gagesite.com/millimar-p-614003-l-en.html>

PŘÍLOHA č. 6

Charakteristika mikroskopu

Technické parametry Mikroskopu

Technická data			
Rozměry přesné pracovní desky	400 x 600 mm	Rozsah měření	
Zvětšení	30x , 75x, 150x	Osa X	150 mm
Software		Osa Y	150 mm
Automatický snímač		Přesnost měření	± 0,003 mm
Volně definovatelné masky			
<p>Popis: Skládá se s přesných montážních lišt na válečkových ložiskách. Je možné velmi jemné nastavení os X a Y. Dále obsahuje elektronický měřicí systém se skleněným měřidlem na obou osách, vyrobené v 0,001 mm a přesností měřidla ± 0,003 mm. Mikroskop umožňuje nahrávat a tisknout v aplikaci Word / Excel. Je možné nahrávat a tisknout obrázky, videa ve výborné kvalitě.</p>			



PŘÍLOHA č. 7

Naměřené hodnoty experimentu

Naměřené hodnoty na vzorku č. 1

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
1	6,0038	6,0038	6,0042	6,0045
2	6,0028	6,0032	6,0044	6,0056
3	6,0025	6,0035	6,0067	6,0041
4	6,0025	6,0030	6,0044	6,0047
5	6,0026	6,0030	6,0053	6,0054
6	6,0026	6,0030	6,0032	6,0039
7	6,0026	6,0032	6,0039	6,0046
8	6,0026	6,0031	6,0033	6,0038
9	6,0028	6,0029	6,0038	6,0040
10	6,0043	6,0043	6,0035	6,0037
11	6,0023	6,0027	6,0034	6,0034
12	6,0023	6,0029	6,0040	6,0043
13	6,0024	6,0029	6,0033	6,0037
14	6,0025	6,0028	6,0030	6,0036
15	6,0026	6,0027	6,0035	6,0036
16	6,0059	6,0060	6,0041	6,0042
17	6,0027	6,0030	6,0033	6,0040
18	6,0026	6,0032	6,0035	6,0043
19	6,0023	6,0033	6,0041	6,0055
20	6,0027	6,0034	6,0033	6,0040
21	6,0025	6,0032	6,0046	6,0050
22	6,0026	6,0035	6,0035	6,0042
23	6,0023	6,0031	6,0038	6,0047
24	6,0023	6,0030	6,0042	6,0047
25	6,0024	6,0026	6,0044	6,0045
26	6,0027	6,0029	6,0044	6,0046
27	6,0024	6,0028	6,0039	6,0043
28	6,0025	6,0030	6,0055	6,0060
29	6,0024	6,0029	6,0042	6,0048
30	6,0025	6,0028	6,0028	6,0030
31	6,0028	6,0031	6,0064	6,0066
32	6,0026	6,0029	6,0060	6,0065
33	6,0027	6,0028	6,0040	6,0043
34	6,0025	6,0035	6,0038	6,0051
35	6,0027	6,0033	6,0041	6,0050
36	6,0028	6,0033	6,0037	6,0038
37	6,0026	6,0032	6,0042	6,0043
38	6,0027	6,0033	6,0049	6,0053
39	6,0026	6,0031	6,0049	6,0053
40	6,0054	6,0057	6,0065	6,0070
41	6,0063	6,0065	6,0040	6,0044
42	6,0031	6,0032	6,0060	6,0068
43	6,003	6,0033	6,0026	6,0035
44	6,0025	6,0029	6,0035	6,0042
45	6,0025	6,0029	6,0034	6,0038
46	6,0024	6,0027	6,0038	6,0041
47	6,0027	6,0028	6,0038	6,0041
48	6,0015	6,0028	6,0039	6,0042

Naměřené hodnoty na vzorku č. 1

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
49	6,0059	6,0060	6,0030	6,0031
50	6,0028	6,0028	6,0041	6,0042
51	6,0026	6,0029	6,0063	6,0070
52	6,0055	6,0099	6,0116	6,0118
53	6,0026	6,0030	6,0038	6,0040
54	6,0026	6,0030	6,0036	6,0040
55	6,0029	6,0032	6,0040	6,0045
56	6,0028	6,0031	6,0039	6,0043
57	6,0026	6,0039	6,0043	6,0046
58	6,0026	6,0030	6,0037	6,0038
59	6,0062	6,0064	6,0035	6,0036
60	6,0029	6,0030	6,0036	6,0037
61	6,0028	6,0028	6,0042	6,0045
62	6,003	6,0030	6,0041	6,0044
63	6,0027	6,0029	6,0039	6,0043
64	6,0029	6,0030	6,0042	6,0043
65	6,0026	6,0029	6,0029	6,0036
66	6,0027	6,0030	6,0043	6,0047
67	6,0028	6,0032	6,0039	6,0047
68	6,0026	6,0033	6,0035	6,0043
69	6,0026	6,0034	6,0034	6,0042
70	6,0025	6,0032	6,0033	6,0035
71	6,0026	6,0033	6,0034	6,0037
72	6,0026	6,0032	6,0035	6,0040
73	6,0026	6,0033	6,0038	6,0046
74	6,0027	6,0032	6,0039	6,0043
75	6,0027	6,0031	6,0036	6,0039
76	6,0028	6,0030	6,0038	6,0039
77	6,0028	6,0030	6,0043	6,0046
78	6,0029	6,0030	6,0037	6,0039
79	6,003	6,0032	6,0037	6,0039
80	6,0025	6,0032	6,0042	6,0043
81	6,0028	6,0029	6,0040	6,0041
82	6,0026	6,0029	6,0036	6,0040
83	6,0026	6,0029	6,0045	6,0048
84	6,0061	6,0067	6,0068	6,0070
85	6,0025	6,0030	6,0056	6,0059
86	6,0058	6,0059	6,0065	6,0066
87	6,0056	6,0061	6,0052	6,0053
88	6,0027	6,0030	6,0043	6,0045
89	6,0026	6,0030	6,0035	6,0038
90	6,0027	6,0032	6,0043	6,0046
91	6,0025	6,0028	6,0030	6,0034
92	6,0027	6,0030	6,0033	6,0037
93	6,0027	6,0029	6,0035	6,0039
94	6,0029	6,0030	6,0038	6,0042
95	6,0028	6,0030	6,0038	6,0041
96	6,0025	6,0027	6,0037	6,0038

Naměřené hodnoty na vzorku č. 2

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
1	6,003	6,0033	6,0039	6,0042
2	6,0028	6,0031	6,0038	6,0047
3	6,005	6,0055	6,0037	6,0048
4	6,0028	6,0029	6,0039	6,0044
5	6,003	6,0034	6,0036	6,0039
6	6,0028	6,0033	6,0040	6,0047
7	6,0027	6,0031	6,0044	6,0050
8	6,0026	6,0032	6,0039	6,0048
9	6,0028	6,0031	6,0043	6,0045
10	6,0027	6,0029	6,0036	6,0037
11	6,0027	6,0029	6,0044	6,0046
12	6,0027	6,0030	6,0041	6,0044
13	6,0028	6,0030	6,0055	6,0060
14	6,0027	6,0030	6,0042	6,0046
15	6,0028	6,0031	6,0040	6,0042
16	6,003	6,0033	6,0041	6,0042
17	6,0027	6,0033	6,0046	6,0047
18	6,0026	6,0032	6,0048	6,0050
19	6,0028	6,0034	6,0045	6,0052
20	6,0028	6,0032	6,0047	6,0052
21	6,0027	6,0033	6,0046	6,0050
22	6,0026	6,0034	6,0046	6,0053
23	6,0025	6,0033	6,0029	6,0036
24	6,0026	6,0033	6,0042	6,0049
25	6,0026	6,0031	6,0031	6,0035
26	6,0056	6,0061	6,0030	6,0031
27	6,0028	6,0030	6,0043	6,0046
28	6,0027	6,0030	6,0040	6,0044
29	6,0027	6,0030	6,0048	6,0052
30	6,0028	6,0030	6,0043	6,0047
31	6,0028	6,0030	6,0046	6,0048
32	6,0028	6,0029	6,0040	6,0043
33	6,0026	6,0029	6,0040	6,0044
34	6,0025	6,0030	6,0041	6,0049
35	6,0027	6,0029	6,0042	6,0045
36	6,0026	6,0031	6,0042	6,0045
37	6,0025	6,0030	6,0043	6,0044
38	6,0052	6,0064	6,0067	6,0073
39	6,0024	6,0031	6,0049	6,0054
40	6,0025	6,0030	6,0049	6,0052
41	6,0025	6,0029	6,0046	6,0049
42	6,0026	6,0028	6,0032	6,0034
43	6,0027	6,0028	6,0048	6,0052
44	6,0037	6,0040	6,0046	6,0050
45	6,0024	6,0028	6,0043	6,0048
46	6,0025	6,0027	6,0048	6,0050
47	6,0025	6,0028	6,0033	6,0033
48	6,0025	6,0028	6,0050	6,0051

Naměřené hodnoty na vzorku č. 2

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
49	6,0021	6,0026	6,0044	6,0047
50	6,002	6,0026	6,0049	6,0054
51	6,002	6,0023	6,0046	6,0058
52	6,0056	6,0060	6,0044	6,0053
53	6,0021	6,0024	6,0046	6,0048
54	6,0053	6,0061	6,0045	6,0050
55	6,0018	6,0024	6,0030	6,0038
56	6,002	6,0023	6,0037	6,0042
57	6,0053	6,0060	6,0043	6,0045
58	6,0054	6,0054	6,0046	6,0047
59	6,0055	6,0058	6,0041	6,0045
60	6,0056	6,0058	6,0045	6,0047
61	6,0057	6,0059	6,0049	6,0052
62	6,0021	6,0023	6,0044	6,0051
63	6,0022	6,0025	6,0046	6,0050
64	6,0022	6,0024	6,0026	6,0027
65	6,006	6,0061	6,0047	6,0048
66	6,0054	6,0063	6,0042	6,0046
67	6,0021	6,0028	6,0050	6,0058
68	6,0021	6,0026	6,0027	6,0037
69	6,0056	6,0062	6,0047	6,0050
70	6,002	6,0025	6,0038	6,0043
71	6,0058	6,0061	6,0045	6,0050
72	6,0019	6,0027	6,0027	6,0032
73	6,0025	6,0027	6,0042	6,0048
74	6,0023	6,0025	6,0049	6,0050
75	6,0057	6,0062	6,0046	6,0049
76	6,0058	6,0060	6,0048	6,0051
77	6,0021	6,0023	6,0047	6,0051
78	6,0054	6,0062	6,0045	6,0052
79	6,0023	6,0024	6,0042	6,0045
80	6,0022	6,0024	6,0039	6,0041
81	6,0061	6,0063	6,0020	6,0027
82	6,0057	6,0064	6,0062	6,0071
83	6,0047	6,0051	6,0044	6,0050
84	6,0024	6,0025	6,0056	6,0059
85	6,0054	6,0064	6,0050	6,0053
86	6,0055	6,0061	6,0070	6,0073
87	6,0025	6,0029	6,0028	6,0030
88	6,0041	6,0047	6,0028	6,0034
89	6,0043	6,0048	6,0039	6,0040
90	6,0055	6,0057	6,0054	6,0055
91	6,0024	6,0025	6,0024	6,0028
92	6,0048	6,0050	6,0043	6,0051
93	6,0059	6,0062	6,0044	6,0050
94	6,0054	6,0063	6,0047	6,0053
95	6,0058	6,0061	6,0045	6,0049
96	6,0021	6,0024	6,0022	6,0026

Naměřené hodnoty na vzorku č. 3

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
1	6,0023	6,0024	6,0044	6,0050
2	6,0062	6,0065	6,0052	6,0055
3	6,0022	6,0028	6,0040	6,0053
4	6,006	6,0066	6,0047	6,0053
5	6,0037	6,0040	6,0065	6,0068
6	6,0057	6,0066	6,0048	6,0051
7	6,0058	6,0066	6,0047	6,0048
8	6,0048	6,0050	6,0044	6,0045
9	6,006	6,0062	6,0048	6,0049
10	6,0053	6,0055	6,0049	6,0050
11	6,006	6,0062	6,0033	6,0034
12	6,006	6,0062	6,0052	6,0054
13	6,0061	6,0063	6,0049	6,0055
14	6,0022	6,0022	6,0065	6,0072
15	6,0059	6,0064	6,0053	6,0054
16	6,0019	6,0021	6,0046	6,0051
17	6,0018	6,0026	6,0025	6,0030
18	6,0019	6,0027	6,0033	6,0040
19	6,0022	6,0031	6,0029	6,0045
20	6,002	6,0029	6,0030	6,0041
21	6,002	6,0028	6,0028	6,0033
22	6,002	6,0026	6,0052	6,0055
23	6,0018	6,0024	6,0027	6,0033
24	6,0021	6,0026	6,0029	6,0035
25	6,0021	6,0025	6,0031	6,0035
26	6,0023	6,0025	6,0034	6,0036
27	6,0027	6,0028	6,0033	6,0036
28	6,028	6,0029	6,0037	6,0039
29	6,0028	6,0031	6,0038	6,0042
30	6,003	6,0032	6,0043	6,0045
31	6,0035	6,0035	6,0045	6,0046
32	6,0038	6,0040	6,0052	6,0055
33	6,0041	6,0044	6,0053	6,0055
34	6,004	6,0046	6,0048	6,0062
35	6,004	6,0045	6,0051	6,0056
36	6,0039	6,0044	6,0050	6,0054
37	6,0039	6,0044	6,0047	6,0048
38	6,0038	6,0041	6,0044	6,0045
39	6,0035	6,0039	6,0043	6,0048
40	6,0034	6,0038	6,0041	6,0045
41	6,0035	6,0038	6,0043	6,0045
42	6,0036	6,0037	6,0041	6,0044
43	6,0034	6,0036	6,0041	6,0044
44	6,0034	6,0035	6,0038	6,0042
45	6,0031	6,0034	6,0038	6,0041
46	6,0031	6,0033	6,0031	6,0036
47	6,0026	6,0028	6,0034	6,0038
48	6,0026	6,0026	6,0035	6,0080

Naměřené hodnoty na vzorku č. 3

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
49	6,002	6,0024	6,0032	6,0035
50	6,0024	6,0026	6,0041	6,0047
51	6,0025	6,0027	6,0038	6,0042
52	6,0027	6,0028	6,0029	6,0033
53	6,0022	6,0027	6,0038	6,0045
54	6,0043	6,0044	6,0047	6,0050
55	6,0052	6,0059	6,0042	6,0048
56	6,0055	6,0055	6,0034	6,0039
57	6,0058	6,0062	6,0048	6,0048
58	6,0031	6,0036	6,0043	6,0044
59	6,0053	6,0060	6,0048	6,0052
60	6,0038	6,0039	6,0049	6,0054
61	6,0056	6,0058	6,0062	6,0063
62	6,0051	6,0055	6,0043	6,0046
63	6,0044	6,0046	6,0063	6,0063
64	6,0041	6,0054	6,0033	6,0035
65	6,0055	6,0061	6,0027	6,0033
66	6,002	6,0024	6,0034	6,0041
67	6,0039	6,0045	6,0045	6,0052
68	6,0018	6,0024	6,0039	6,0046
69	6,0018	6,0026	6,0046	6,0051
70	6,0016	6,0026	6,0053	6,0059
71	6,0016	6,0025	6,0056	6,0062
72	6,005	6,0062	6,0054	6,0061
73	6,0016	6,0024	6,0057	6,0059
74	6,0058	6,0061	6,0074	6,0077
75	6,0058	6,0060	6,0055	6,0060
76	6,0062	6,0066	6,0061	6,0062
77	6,0058	6,0061	6,0043	6,0052
78	6,0043	6,0046	6,0065	6,0077
79	6,006	6,0061	6,0062	6,0072
80	6,0017	6,0018	6,0038	6,0044
81	6,0058	6,0064	6,0040	6,0051
82	6,0015	6,0017	6,0063	6,0071
83	6,0057	6,0064	6,0061	6,0067
84	6,0058	6,0065	6,0062	6,0072
85	6,0059	6,0063	6,0063	6,0067
86	6,0057	6,0066	6,0042	6,0048
87	6,0055	6,0066	6,0031	6,0036
88	6,0056	6,0065	6,0045	6,0048
89	6,006	6,0065	6,0074	6,0075
90	6,006	6,0066	6,0065	6,0071
91	6,0062	6,0064	6,0062	6,0076
92	6,0059	6,0062	6,0043	6,0046
93	6,006	6,0062	6,0070	6,0077
94	6,0061	6,0062	6,0044	6,0052
95	6,0057	6,0062	6,0053	6,0057
96	6,0061	6,0061	6,0038	6,0043

Naměřené hodnoty na vzorku č. 4

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
1	6,006	6,0067	6,0045	6,0048
2	6,0052	6,0062	6,0053	6,0054
3	6,0050	6,0067	6,0050	6,0058
4	6,006	6,0065	6,0065	6,0069
5	6,0062	6,0067	6,0046	6,0057
6	6,0066	6,0066	6,0058	6,0062
7	6,0061	6,0067	6,0052	6,0055
8	6,0061	6,0063	6,0056	6,0058
9	6,0063	6,0065	6,0053	6,0055
10	6,0059	6,0064	6,0044	6,0053
11	6,0062	6,0064	6,0070	6,0072
12	6,0065	6,0071	6,0054	6,0055
13	6,0061	6,0070	6,0052	6,0053
14	6,0062	6,0067	6,0052	6,0055
15	6,0063	6,0067	6,0053	6,0056
16	6,0062	6,0065	6,0052	6,0053
17	6,0061	6,0066	6,0041	6,0045
18	6,006	6,0064	6,0052	6,0058
19	6,0061	6,0062	6,0040	6,0048
20	6,0043	6,0058	6,0028	6,0036
21	6,0046	6,0054	6,0042	6,0049
22	6,0016	6,0024	6,0050	6,0056
23	6,002	6,0024	6,0051	6,0056
24	6,0016	6,0026	6,0030	6,0036
25	6,0019	6,0025	6,0045	6,0055
26	6,0017	6,0025	6,0031	6,0037
27	6,0019	6,0024	6,0047	6,0056
28	6,0047	6,0045	6,0044	6,0051
29	6,0023	6,0024	6,0035	6,0038
30	6,002	6,0021	6,0050	6,0052
31	6,0019	6,0023	6,0041	6,0044
32	6,002	6,0023	6,0045	6,0050
33	6,0063	6,0067	6,0056	6,0060
34	6,0061	6,0068	6,0055	6,0058
35	6,0061	6,0070	6,0055	6,0058
36	6,0062	6,0068	6,0050	6,0053
37	6,0063	6,0071	6,0055	6,0058
38	6,0064	6,0074	6,0041	6,0054
39	6,0063	6,0071	6,0059	6,0063
40	6,0047	6,0052	6,0048	6,0051
41	6,0064	6,0071	6,0050	6,0056
42	6,0063	6,0069	6,0056	6,0058
43	6,0069	6,0070	6,0073	6,0074
44	6,0069	6,0070	6,0053	6,0055
45	6,0068	6,0071	6,0070	6,0072
46	6,0069	6,0070	6,0038	6,0045
47	6,005	6,0053	6,0041	6,0046
48	6,0018	6,0020	6,0036	6,0036

Naměřené hodnoty na vzorku č. 4

Číslo díry	$\text{Ø}A_{(3)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}A_{(3)\text{max}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{min}}$ [mm]	$\text{Ø}B_{(22)\text{max}}$ [mm]
49	6,0053	6,0057	6,0052	6,0058
50	6,006	6,0069	6,0064	6,0074
51	6,0059	6,0073	6,0035	6,0054
52	6,0065	6,0067	6,0064	6,0064
53	6,0068	6,0070	6,0052	6,0055
54	6,0057	6,0059	6,0046	6,0052
55	6,0064	6,0070	6,0036	6,0038
56	6,0065	6,0068	6,0039	6,0042
57	6,006	6,0066	6,0053	6,0053
58	6,0056	6,0058	6,0059	6,0068
59	6,0063	6,0065	6,0068	6,0070
60	6,0061	6,0062	6,0039	6,0045
61	6,0063	6,0064	6,0054	6,0059
62	6,0061	6,0062	6,0044	6,0053
63	6,0015	6,0017	6,0051	6,0052
64	6,0063	6,0070	6,0053	6,0059
65	6,0067	6,0068	6,0056	6,0060
66	6,006	6,0067	6,0061	6,0065
67	6,0059	6,0070	6,0058	6,0071
68	6,0062	6,0066	6,0058	6,0065
69	6,0017	6,0021	6,0031	6,0046
70	6,0061	6,0067	6,0043	6,0047
71	6,0063	6,0066	6,0057	6,0063
72	6,0016	6,0020	6,0049	6,0058
73	6,006	6,0066	6,0058	6,0060
74	6,0063	6,0065	6,0058	6,0059
75	6,0017	6,0018	6,0038	6,0040
76	6,0064	6,0065	6,0057	6,0060
77	6,0064	6,0065	6,0059	6,0062
78	6,0019	6,0020	6,0058	6,0060
79	6,0019	6,0021	6,0032	6,0031
80	6,0021	6,0023	6,0032	6,0033
81	6,002	6,0021	6,0034	6,0043
82	6,0018	6,0022	6,0036	6,0053
83	6,006	6,0069	6,0058	6,0063
84	6,003	6,0068	6,0059	6,0060
85	6,0063	6,0070	6,0058	6,0060
86	6,0063	6,0068	6,0069	6,0073
87	6,0065	6,0067	6,0060	6,0062
88	6,0062	6,0066	6,0040	6,0043
89	6,0062	6,0070	6,0058	6,0060
90	6,0064	6,0065	6,0043	6,0048
91	6,0051	6,0055	6,0070	6,0076
92	6,0062	6,0065	6,0049	6,0053
93	6,0017	6,0018	6,0070	6,0074
94	6,0066	6,0069	6,0042	6,0043
95	6,0061	6,0062	6,0063	6,0066
96	6,0065	6,0066	6,0042	6,0049