

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní



Bakalářská práce

Nástroje pro mikrovrtání

Microdrilling tools

Vypracoval:

Václav Hořký

Studijní program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Zadávací katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí práce:

Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hořký** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **466701**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nástroje pro mikrovrtání

Název bakalářské práce anglicky:

Microdrilling tools

Pokyny pro vypracování:

1. Porovnávací analýza vrtání a mikrovrtání.
2. Nástroje pro mikrovrtání (fezná geometrie, konstrukční provedení, fezné materiály, možnosti upínání).
3. Měření nástrojů a kontrola.
4. Řezné podmínky pro mikrovrtání vybraných materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

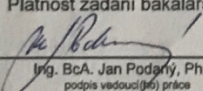
Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

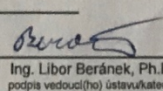
Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

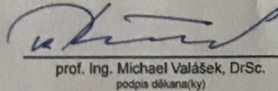
Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

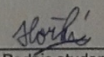

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

17. 4 2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta



PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem: „Nástroje pro mikrovrtání“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. BcA. Jana Podaného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu mé bakalářské práce Ing. BcA. Janu Podanému, Ph.D. za odborné vedení, rady a čas, který mi věnoval, a které mi značně pomohly k vypracování této bakalářské práce.



ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Václav Hořký
Název BP:	Nástroje pro mikrovrtání
Anglický název:	Microdrilling tools
Rok:	2018/2019
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	bez oboru
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 39
	Počet obrázku: 24
	Počet tabulek: 3
	Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Mikrovrtání, nástroje pro mikrovrtání
Keywords:	Microdrilling, microdrilling tools
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá technologií mikrovrtání, která

se v dnešní době stává velkým trendem. Práce se zaměřuje především na popis základních parametrů nástrojů pro mikrovrtání.

Annotation: This bachelor's thesis deals with microdrilling technology that is increasing in importance. The focus lies on a description of basic specification of microdrilling tools.



Obsah

1	Úvod.....	8
2	Porovnávací analýza vrtání a mikrovrtání	9
2.1	Dělení.....	10
2.1.1	Dělení konvenčních metod	10
2.1.2	Dělení nekonvenčních metod.....	10
2.2	Vrtání	11
2.2.1	Metoda vrtání.....	11
2.3	Druhy vrtáků	12
2.3.1	Šroubovité vrtáky.....	12
2.3.2	Kopinaté vrtáky	13
2.3.3	Dělové a hlavňové vrtáky	13
2.3.4	Středicí vrtáky.....	13
2.3.5	Korunkový vrták.....	13
2.3.6	Vrtáky s vyměnitelnou špičkou	13
2.3.7	Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami	14
2.3.8	Ejektorové vrtáky.....	14
2.3.9	BTA nebo STS vrtáky	14
2.4	Upínání nástrojů.....	14
2.4.1	Upínání do sklíčidel.....	14
2.4.2	Upínání pomocí redukčních Morse pouzder.....	15
2.4.3	Upínače typu WELDON.....	15
2.4.4	Kleštinové upínače.....	15
2.4.5	Hydraulické upínače	16
2.4.6	Tepelné upínače	16
2.5	Nástrojové materiály.....	16
2.5.1	Rychlořezné oceli	16
2.5.2	Slinuté karbidy.....	17
2.5.3	Povlakové slinuté karbidy.....	17
2.5.4	Super tvrdé materiály.....	18
2.6	Řezné podmínky	18
2.7	Přesnost a drsnost povrchu	19
2.8	Stroje - vrtačky	19
2.8.1	Stolní vrtačky.....	19
2.8.2	Sloupové vrtačky	20



2.8.3	Otočné vrtačky (radiální).....	21
2.8.4	Speciální vrtačky.....	21
2.9	Řezné kapaliny.....	21
3	Nástroje pro mikrovrtání	21
3.1	Řezná geometrie	22
3.2	Konstrukční provedení.....	24
3.2.1	Šroubovité mikrovrták.....	24
3.2.2	Kopinatý mikrovrták.....	25
3.2.3	Mikrovrták ve tvaru D	26
3.2.4	Mikrovrták s jednou drážkou.....	26
3.2.5	Složené mikrovrtáky	27
3.2.6	Povlakové mikrovrtáky.....	28
3.3	Řezné materiály	28
3.3.1	Slinuté karbidy.....	29
3.3.2	Rychlořezná ocel.....	29
3.4	Možnosti upínání	30
4	Meření nástrojů a kontrola	31
4.1	pomBasicMicro.....	31
5	Řezné podmínky pro mikrovrtání vybraných materiálu	33
5.1	Šroubovité mikrovrták.....	33
5.2	Kopinatý mikrovrták.....	34
5.3	Mikrovrták ve tvaru D	34
5.4	Mikrovrták s jednou drážkou.....	34
5.5	Složené mikrovrtáky	35
5.6	Povlakové mikrovrtáky.....	35
6	Závěr.....	36



1 Úvod

Vrtání mikrootvorů se stává v dnešní době velkým trendem v mnoha odvětvích. Velmi vysoké poptávky jsou například v elektronickém odvětví, kde se také v následujících letech předpokládá růst. Mikrovrtání se provádí různými způsoby. V této bakalářské práci se zabývám konvenční metodou.

Hlavní náplní této práce je základní popis nástrojů pro mikrovrtání, neboli mikrovrtáků. Nejdříve je dopodrobna popsáno klasické vrtání, abychom mohli pozorovat, jak moc se liší mikrovrtání. A následně jsou popsány hlavní parametry mikrovrtáků.

Tato práce se skládá z porovnávací analýzy vrtání a mikrovrtání, kde je hlavní důraz kladen na popis klasického vrtání. V následující kapitole se zabývám nástroji pro mikrovrtání od řezných geometrií až po možnosti upínání. A v poslední řadě měření a kontrolou nástrojů a řeznými podmínkami pro dané mikrovrtáky.



2 Porovnávací analýza vrtání a mikrovrtání

Vrtání je jedna ze základních a nejčastěji používaných technologií obrábění. Používá se už od starověkých egyptských časů a studie ukazují, že 25 % celkového výrobního času obrábění je vrtání.

První potřeby mikrovrtání byly ve čtyřicátých letech, kdy také proběhly pokusy o výrobu mikrovrtáků. Termín „mikrovrtání“ byl zaveden v důsledku velikosti otvoru v řádech několika mikrometrů. Přesná definice mikrovrtání závisí na průměru díry. Každý výrobce a výzkumník definuje průměr díry odlišně a neexistuje žádný specifický standard. Například firma Small hole drilling uvádí, že jejich možnosti mikrovrtání začínají od průměru 0,03 mm a končí na 2,99 mm s přesností polohy a hloubky vrtané díry $\pm 0,01$ mm. Firma Rotana uvádí průměry 0,1 mm až 3 mm. Zheng a kolektiv uvádí, že průměr mikrovrtáků se pohybuje v rozmezí 0,03 mm až 1 mm. V těchto případech můžeme vidět, že definice se u každého výrobce a výzkumníka liší. Proto je dobré dodržovat obecnou definici, aby nedošlo k nejednoznačnosti mezi různými názory. Na základě mnoha studií lze říci, že mikrovrtání je vrtání, kdy je průměr otvoru menší nebo roven 1 mm. Na tomto rozhraní se mění vzhled, geometrie a také se zvyšuje možnost zlomení mikrovrtáku. Proto je důležité věnovat pozornost řezným podmínkám.

V dnešní době se trend výroby mikrootvorů stal hlavním trendem v odvětvích jako je elektronika, lékařství, kosmonautika a automobily. Konkrétní případy jsou například palivové filtry a zapalovací systémy, zubní implantáty, mikrotrysky, digitální fotoaparáty, video kamery, chytré telefony, tablety a notebooky. Největší poptávky jsou v elektronickém odvětví, kde se také předpokládá v následujících letech růst. Výzkumní pracovníci se snaží zlepšit mikrovrtání v širokém spektru od různých výrobních metod, použitých výrobních materiálů, přesností a kvalit otvorů, tvarů a mechanických vlastností mikrovrtáků, řezných podmínkách, tvorby a odvodu třísek.

Používá se různých tradičních i netradičních metod, a to v závislosti na přesnosti rozměrů, kvality povrchu a rychlosti výroby. Každá metoda má svoje výhody a nevýhody. Obecně se mikrovrtání provádí dvěma způsoby, a to konvenčním a nekonvenčním způsobem.

[10] [11] [15]

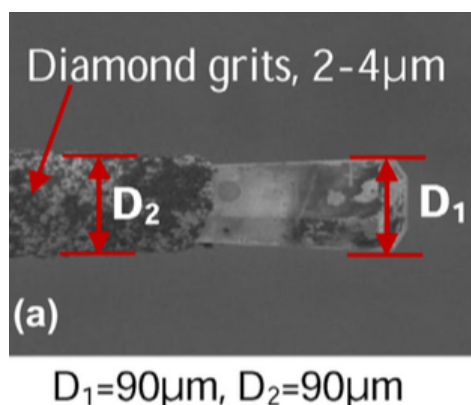
2.1 Dělení

2.1.1 Dělení konvenčních metod

Konvenční technika se provádí mikrovrtákem, který je upnutý na vřetenu, otáčí se vysokou rychlostí, prochází obrobkem a vytváří mikrootvor.

- Šroubovitý mikrovrták
- Kopinatý mikrovrták
- Mikrovrták ve tvaru D
- Mikrovrták s jednou drážkou
- Složené mikrovrtáky
- Povlakové mikrovrtáky

[11]



Obrázek 1 - Složený mikrovrták s diamantovým povlakem [11]

2.1.2 Dělení nekonvenčních metod

Nekonvenční technika zahrnuje různé metody elektrického, chemického, mechanického, tepelného, anebo kombinaci těchto metod. Je poměrně nové a používá se v mnoha moderních aplikacích. Nevýhodou je odstraňování materiálu roztavením taveniny, což má za důsledek špatné rozměrové přesnosti a vznik mikrotrhlin po stěnách otvoru.

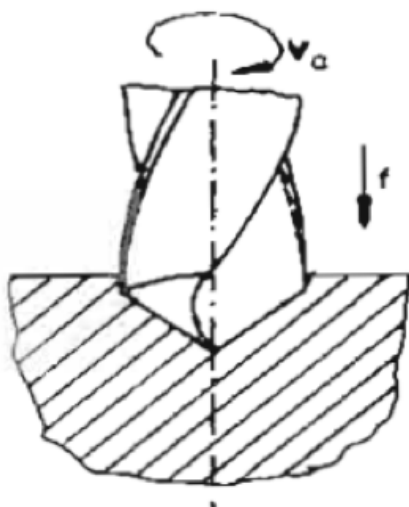
- Laser
- EDM (elektroerozivní obrábění)
- ECM (elektrochemické obrábění)
- SACE (spark assisted chemical engraving)

- Elektronový paprsek
- Ultrazvukové vibrace

[11]

2.2 Vrtání

Vrtání je třískové obrábění, kterým se zhotovují otvory válcovitého tvaru. Nástrojem je jedno nebo vícebřítý nástroj. Ten vykonává, až na výjimky hlavní pohyb rotační a zároveň vedlejší pohyb posuvný ve směru osy otáčení. [1][2]



Obrázek 2 - Hlavní a vedlejší pohyb při vrtání [2]

2.2.1 Metoda vrtání

- Vrtání – zhotovení otvoru do plného materiálu.
- Vyvrtávání – zvětšují se a zpřesňují se předpracované otvory (předlité, předlisované atd.)
- Vyhrubování – otvory mají sníženou kvalitu drsnosti povrchu (přibližně Ra 3,2 ÷ Ra 1,6) a ve většině případů nepřesnou kruhovitost a válcovitost. Třibřítý a čtyřbřítý nástroj s břity do šroubovice se nazývá výhrubník.
- Vystružování – dokončovací operace, která zajišťuje předepsané geometrické parametry otvoru a drsnost povrchu. Vystružník má zpravidla 4 až 18 zubů.
- Zahlubování – obrábění otvorů pro zapuštění hlav šroubů a zahloubení. Rozlišujeme záhlubníky kuželové, válcové a ploché.

[3] [4]

2.3 Druhy vrtáků

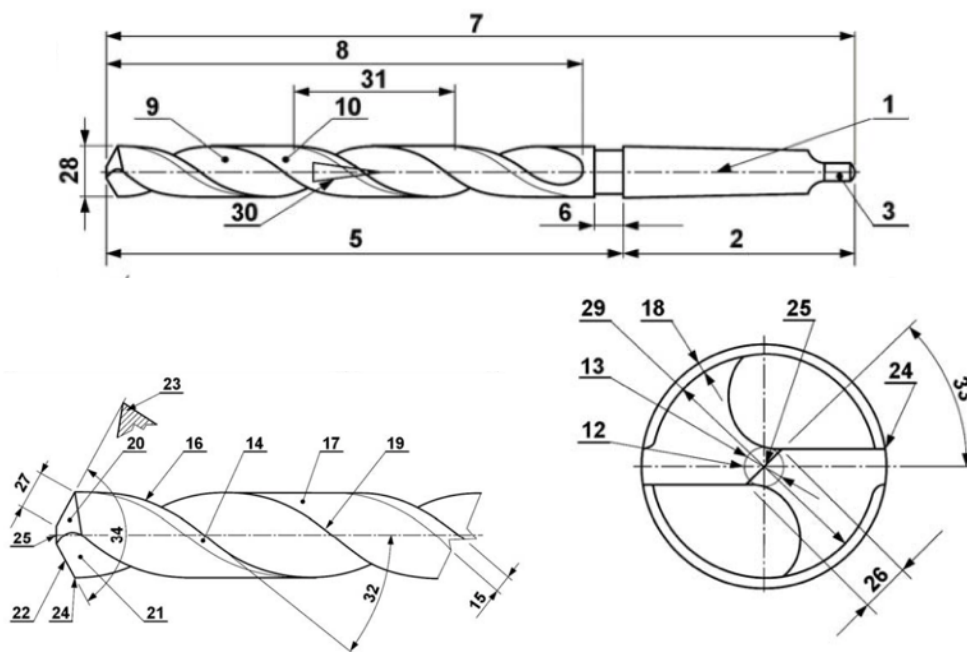
Nástroje rozdělujeme podle technologie, druhu vrtání, geometrie a konstrukce vrtání do následujících skupin.

2.3.1 Šroubovitě vrtáky

Šroubovitě vrtáky jsou nejčastěji používané nástroje. U šroubovitěho vrtáku vnikají do materiálu oba dva břity a dochází k tvorbě třísek. Na těle jsou dvě šroubovitě drážky, které účinně odvádí třísky a umožňují přívod chladicí kapaliny do místa řezu. K vedení vrtáku v otvoru slouží fazeta, která je na předních hranách šroubovitých drážek.

Dle norem rozdělujeme šroubovitě vrtáky podle:

- tvaru stopky – s válcovou stopkou nebo kuželovou stopkou (Morse)
- směru otáčení – pravotočivé nebo levotočivé
- délky – normální nebo prodloužené
- úhlu stoupání šroubovice – s velkým, středním a malým úhlem (pro oceli a litiny běžných pevnosti $27^{\circ} \pm 5^{\circ}$)



Obrázek 3 - Základní parametry šroubovitěho vrtáku [3]

1 - osa, 2 - stopka, 3 - vyrážec, 5 - tělo, 6 - krček, 7 - celková délka, 8 - délka šroubovitě drážky, 9 - šroubovitě drážka, 10 - druhý vedlejší hřbet, 12 - jádro, 13 - tloušťka jádra, 14 - fazeta, 15 - šířka fazety, 16 - vedlejší ostří, 17 - odlehčení vedlejšího hřbetu, 18 - hloubka odlehčení, 19 - pata, 20 - hlavní hřbet, 21 - čelo, 22 - hlavní ostří, 23 - břit, 24 -



vedlejší špička, 25 - příčné ostří, 26 - délka příčného ostří, 27 - délka hlavního ostří, 28 - jmenovitý průměr vrtáku, 29 - průměr odlehčení, 30 - zpětná kuželovitost, 31 - stoupání šroubovice, 32 - úhel šroubovité drážky, 33 - úhel sklonu příčného ostří, 34 - úhel špičky
[3] [4] [6]

2.3.2 Kopinaté vrtáky

Jeden z nejstarších a nejjednodušších vrtáků, který se používal k vrtání malých otvorů do průměru 0,5 mm. V dnešní době se díky zavedení vyměnitelných břitových destiček používá při vrtání krátkých děr o průměru 10 ÷ 128 mm. Má vysokou tuhost a většina vrtáků se vyrábí s vnitřním přívodem kapaliny.

2.3.3 Dělové a hlavňové vrtáky

Tyto vrtáky se používají pro vrtání velmi dlouhých děr, délky až několik metrů. Jsou velmi přesné a při práci konají většinou jen pohyb posuvný, otáčivý pohyb vykonává obrobek.

2.3.4 Středicí vrtáky

Středicí vrtáky neboli vrtáky na středící důlky se vyznačují velkou tuhostí. Používají se k navrtání středících otvorů sloužících k následnému uchycení materiálu do koníka soustruhu. Velmi často také pro určení přesné polohy díry při vrtání šroubovitým vrtákem.

2.3.5 Korunkový vrták

Vrtání „na jádro“. Jedná se o odřezávání obráběného materiálu ve tvaru mezikruží jednobřítým nebo vícebřítým korunkovým (trepanačním) vrtákem.“ (Brychta Josef, 2008, s. 40)

2.3.6 Vrtáky s vyměnitelnou špičkou

Vrtáky s vyměnitelnou špičkou mají různou geometrii podle druhu obráběného materiálu a dalších požadavků. Vyrábějí se jako hlavice nebo destičky.



2.3.7 Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami

Destičky jsou upnuty k tělu vrtáku pomocí šroubů a u větších vrtáků pomocí kazet. Břitové destičky jsou velmi často opatřeny utvařeči třísek, které slouží k dělení a odvodu třísky.

2.3.8 Ejektorové vrtáky

Ejektorové vrtáky se používají pro otvory, u kterých délka otvoru převyšuje pětinasobek průměru vrtáku. Kapalina je přiváděna do místa řezu mezikružím mezi vnitřní a vnější trubkou. Dochází k nasávání kapaliny a strhávání třísek do šterbiny vnitřní trubky.

2.3.9 BTA nebo STS vrtáky

Oproti ejektorovým vrtákům je kapalina přiváděna mezerou mezi obráběným materiálem a trubkou vrtáku. Odvod kapaliny a vzniklých třísek je středem trubky. Můžeme vrtat větší rozsah průměrů než u ejektorových vrtáků. Hlavní výhodou je vrtání do plného, předvrtaného materiálu nebo vrtání „na jádro“.

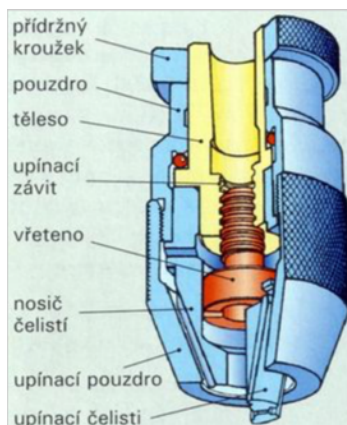
[3] [4] [6]

2.4 Upínání nástrojů

Vrtáky se vyrábějí s kuželovou nebo válcovou stopkou. Při upínání vrtáků je důležitá přesnost upnutí, minimální obvodové házení a dostatečná tuhost upnutí. Vrtáky s válcovou stopkou se upínají do sklíčidel, upínačů typu weldon, kleštinových upínačů, hydraulických upínačů, systémů tribos a tepelných upínačů. Vrtáky s kuželovou stopkou se upínají přímo do kuželové dutiny vrtacího vřetene.

2.4.1 Upínání do sklíčidel

Vrtáky s válcovou stopkou se upínají do dvoučelistových nebo tříčelistových sklíčidel. Převážně se používají sklíčidla tříčelistová, protože zaručují přesnější vystředění vrtáku než sklíčidla dvoučelistová. Zubová sklíčidla jsou ovládané klíčem s kuželovým ozubeným kolečkem. Rychloupínací sklíčidla jsou samosvorná a utahování se provádí pouze rukou.



Obrázek 4 - Rychloupínací sklíčidlo [7]



Obrázek 5 - Zubové tříčelistové sklíčidlo [5]

2.4.2 Upínání pomocí redukčních Morse pouzder

Kuželové stopky zaručují přesnější upnutí. Morse kužele se vyrábějí v sedmi rozměrech, od nejmenší 0 až po největší 6. Vrtáky se nasazují přímo do kuželové dutiny vřetena. V případě, kdy je velikost stopky vrtáku menší, než dutina vřetene musíme použít redukční pouzdro příslušných rozměrů. Vyjmutí vrtáku se provádí pomocí vyrážecího pouzdra.

2.4.3 Upínače typu WELDON

Upínání pomocí šroubu, který dosedá na vyfrézovanou plochu ve stopce držáku. Nevýhodou je poměrně vysoké házení nástroje a to, že pro každý průměr vrtáku musíme mít jiný upínač.

2.4.4 Kleštinové upínače

Kleštinové upínače se skládají z kleštiny a upínací hlavice. Hlavní výhodou je upínání různě velkých průměrů, kdy stačí pouze vyměnit kleštinu a nemusí se měnit celý

upínač. Mezi další výhody patří přesné osové nastavení nástroje a vnitřní přívod rezné kapaliny.

2.4.5 Hydraulické upínače

Upínání je založeno na deformaci vnitřního pouzdra, ke kterému dochází zvýšeným tlakem hydraulické kapaliny pomocí upínacího šroubu. Výhodou je malé házení, nenáročnost na údržbu, snadná a rychlá přestavitelnost na jiný průměr stopky.



Obrázek 6 - Schéma hydraulického upínače [5]

2.4.6 Tepelné upínače

Ohřevem dřívku upínače se zvětší jeho průměr a můžeme do něj vsunout stopku nástroje. Po vychladnutí dojde k zmenšení průměru a stopka je pevně upnuta. Vhodné pro stroje s vysokými otáčkami. Výhodou je minimální házení a velké upínací síly.

[5] [7]

2.5 Nástrojové materiály

Pro ideální řezivost se vyžaduje materiál s vysokou tvrdostí a pevností, odolností proti opotřebením, vysokou houževnatostí, chemickou stálostí a odolností proti teplotním rázům.

2.5.1 Rychlořezné oceli

RO rozdělujeme podle chemického složení do těchto tří skupin:

- oceli s převažujícím obsahem wolframu
- oceli s převažujícím množstvím molybdenu
- oceli kompletně legované prvky W+Mo a V



RO má velmi dobrou houževnatost a odolnost proti adheznímu opotřebení. Nevýhodou je nízká pracovní rychlost pod $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a ztráta pevnostních charakteristik při teplotě asi $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 1 - Nejpoužívanější rychlořezné oceli a jejich chemické složení [8]

Sk	ČSN PN	Směrné chemické složení [%]					DIN	Symbol
		C	W	Mo	V	Co		
1	19 830	0,9	6,0	5,0	1,8	-	S 6-5-1	DMo5 (HSS)
	19 852	0,9	6,0	5,0	1,8	5,0	S 6-5-2-5	EMo5Co5 (HSS-E)
	~19 851	1,1	1,5	9,5	1,2	8,0	S 2-10-1-8	M42 ¹⁾
	-	1,3	6,4	5,0	3,1	8,5	-	ASP 30 ²⁾
2	~19 810	1,3	12,0	1,0	4,0	-	S 12-1-4	EV4
	~19 829	1,2	6,0	5,0	3,0	-	S 6-5-3	EMo5V3 (HSS-E)
	19 858	1,4	12,0	1,0	4,0	5,0	S 12-1-4-5	EV4 Co
	19 861	1,3	9,5	3,5	3,0	10,0	S 10-4-3-10	EW9 Co 10 (HSS-E)

2.5.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy se vyrábějí technologií práškové metalurgie a jsou tvořeny velmi tvrdými karbidovými částicemi v kovové vazbě. Oproti rychlořezné oceli jsou tvrdší, otěruvzdornější, mají větší pevnost v tlaku, ale jsou méně houževnaté.

Základními karbidy jsou karbid wolframu WC a kubické karbidy TiC, TaC a NbC v kobaltovém pojivu.

Rozdělujeme je do tří základních skupin:

- **Skupina K** – WC + Co: Jsou nejvíce houževnaté z těchto tří skupin, ale mají nižší odolnosti proti difúznímu otěru. Použít je můžeme například pro obrábění šedé litiny a tvrdého bronzu.
- **Skupina P** – WC + TiC + Co: Přidáním TiC se zvyšuje tvrdost a odolnost proti otěru. Nevýhodou je náchylnost na křehký lom. Vhodné pro obrábění ocelí, litých ocelí, lehkých kovů tvárných litin.
- **Skupina M** – WC + TiC + TaC/NbC + Co: Jsou modifikací skupiny P. Vhodnost použití pro těžkoobrobitelné ocele a těžkoobrobitelné slitiny.

2.5.3 Povlakové slinuté karbidy

Tyto povlaky mají vysoký přínos díky výborné kombinaci řezných charakteristik. Můžeme zvýšit řeznou rychlost o 200 % až 300 %, oproti nepovlakovaným druhům.

Povlaky se nejčastěji tvoří z těchto materiálů: TiC (šedá barva), TiN (zlatá barva), Al_2O_3 (transparentní), TiCN.



2.5.4 Super tvrdé materiály

2.5.4.1 Kubický nitrid boritý

Synteticky vyrobený materiál, který je velmi tvrdý, chemicky stabilní, odolný proti opotřebení a udržuje si vysokou pevnost za tepla. Neexistuje v přírodní formě.

2.5.4.2 Diamant

Nejtvrdší přírodní materiál. Vysoká tvrdost, nízký koeficient tření, dobrá tepelná vodivost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nevýhodou je nízká pracovní teplota asi 700 °C a křehkost.

[2]

2.6 Řezné podmínky

Závisí na obráběném materiálu a druhu nástroje.

Tabulka 2 - Řezné podmínky vrtání [9]

Obráběný materiál	Třída Obrob- itelnosti	Materiál nástroje	Šroubovitě vrtáky		Dělové vrtáky		Vrtací hlavy		Vrtáky s VBD ¹⁾	
			v (m/min)	f _o (mm/ot)	v (m/min)	f _o (mm/ot)	v (m/min)	f _o (mm/ot)	v (m/min)	f _o (mm/ot)
Ocel 500 800MPa	13-14b	RO	25 - 30	0,1-0,5	20 - 30	0,05-0,5				
		SK	50 - 70	0,05-0,2	80-100	0,07-0,5	80-140	0,07-0,3	200-300	0,04-0,1
Ocel 800 1000MPa	11 - 12b	RO	10 - 20	0,1-0,3	15 - 25	0,05-0,3				
		SK	40 - 60	0,05-0,1	60 - 100	0,07-0,5	60-120	0,05-0,2	170-250	0,06-0,2
Šedá lit. 200HB	11a	RO	10 - 25	0,1- 0,8						
		SK	40-100	0,1-0,5			80-180	0,1-0,4	210-280	0,1-0,2
Slitiny Cu 90 HB		RO	40-70	0,12-0,4						
		SK	80-100	0,08-0,3					250-350	0,05-0,2
Slitiny Al 100 HB		RO	120-200	0,15-0,5						
		SK	200-300	0,15-0,4					250-400	0,05-0,2

VBD – vyměnitelné břitové destičky.

Řezná rychlost je měřítkem hlavního řezného pohybu. Na jeho obvodě je nejvyšší a směrem k ose nástroje klesá až k nule. Řezná rychlost je dána vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

Na posuvu závisí tloušťka třísky a jakost povrchu. Pro posuvovou rychlost platí vztah:

$$v_f = f \cdot n$$



- v_c - řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
 v_f - posuvová rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
 π - Ludolfovo číslo
 D - průměr obráběné díry [mm]
 n - otáčky vrtáku (popřípadě obrobku) [min^{-1}]
 f - posuv nástroje na jednu otáčku [mm]

[1] [3] [4]

2.7 Přesnost a drsnost povrchu

Závisí na použitém typu nástroje.

Tabulka 3 - Dosahované přesnosti a drsnosti povrchu [9]

Nástroj	Přesnost rozměrů IT	Drsnost obrobeného povrchu Ra (μm)
Šroubovitý vrták	11 až 13	6,3 - 25
Šroub.vrták s vodícím pouzdrém	10	6,3 - 25
Kopinatý vrták	10	6,3 - 25
Dělový vrták	8	1,6 - 6,3
Vrták s VBD	8 - 10	3,2 - 12,5

[9]

2.8 Stroje - vrtačky

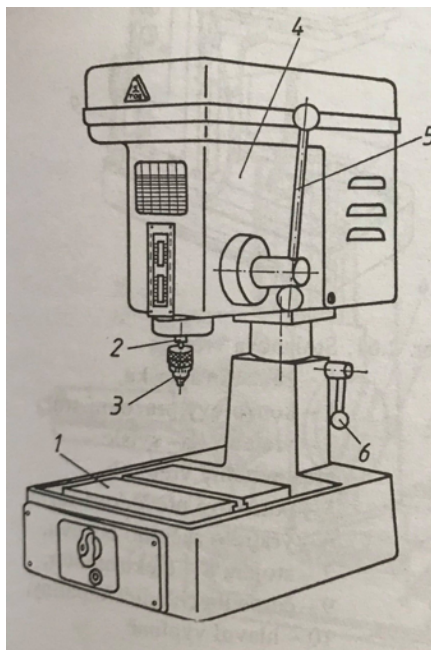
K vrtání se používají vrtačky, ale otvory lze také vyrábět na soustruzích a obráběcích centrech.

Podle konstrukce je dělíme do těchto skupin:

- ruční
- stolní
- sloupcové, stojanové a otočné
- vodorovné
- speciální

2.8.1 Stolní vrtačky

Jsou konstrukcí nejjednodušší, ale nemají strojní posuv. Posuv se provádí ručně a maximální vrtaný otvor je do průměru 20 mm.

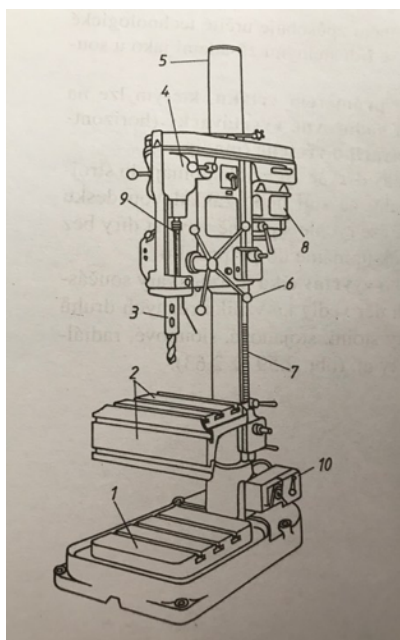


Obrázek 7 - Stolní vrtačka [3]

1 – stůl, 2 – vřeteno, 3 – sklíčidlo, 4 – vřeteník, 5 – vratidlo, 6 – zajišťovací páka

2.8.2 Sloupové vrtačky

Základním konstrukčním prvkem těchto vrtaček je vřeteník vertikálně posuvný po pracovním stole i po sloupu. Můžeme regulovat otáčky pomocí převodovky.



Obrázek 8 - Sloupová vrtačka [3]

1 – základová deska, 2 – svisle přestavitelný konzolový stůl, 3 – vřeteno, 4 – vřeteník, 5 – sloup, 6 – vratidlo, 7 – ozubená tyč, 8 – elektromotor, 9 – stupnice, 10 – hlavní vypínač



2.8.3 Otočné vrtačky (radiální)

Otočné vrtačky se používají pro obrobky větších rozměrů. Mají rameno, po němž se pohybuje ve vodorovném směru vřeteník.

2.8.4 Speciální vrtačky

- více vřetenové vrtačky
- stavebnicové vrtačky
- souřadnicové vrtačky – vysoká přesnost (IT2 – IT5) a přesné rozteče (až 0,002 mm)

[3] [9]

2.9 Řezné kapaliny

Účinky řezných kapalin na proces vrtání jsou komplexní a patří do nich například snížení teploty nástroje, redukce tření mezi nástrojem a obrobkem, snížení intenzity utopování a zlepšení odvodu třísky z místa řezu.

Z výše uvedených řezných účinků lze rozdělit řezné kapaliny do těchto skupin:

- s výrazným mazacím účinkem (řezné oleje rostlinné, minerální)
- s dobrým mazacím a chladicím účinkem (olejové emulze)
- s převažujícím chladicím účinkem (vodní roztoky chemických látek)
- jiné

Chladicí účinek je schopnost odvádět teplo z místa řezu.

Mazací účinek je schopnost snižovat tření na činných plochách nástroje. Zlepšuje také kvalitu obrobené plochy.

[2] [4]

3 Nástroje pro mikrovrtání

Mikrovrtáky se velmi často zlomí předtím, než dojde k jejich opotřebení. Proto je životnost těchto mikrovrtáků poměrně nepředvídatelná. To je způsobeno poměrně velkým zatížením vrtáku oproti jeho síle. Proto je důležitý výběr vhodného materiálu vrtáku, řezné geometrie, konstrukčního provedení, chladicí kapaliny, upnutí a řezných podmínek. Tyto parametry mají vliv na dosažení ideálních podmínek pro mikrovrtání. I nepatrná změna parametrů může způsobit zničení těchto křehkých nástrojů.

3.1 Řezná geometrie

Geometrie mikrovrtáku značně ovlivňuje způsob, jakým se mikrovrták chová.

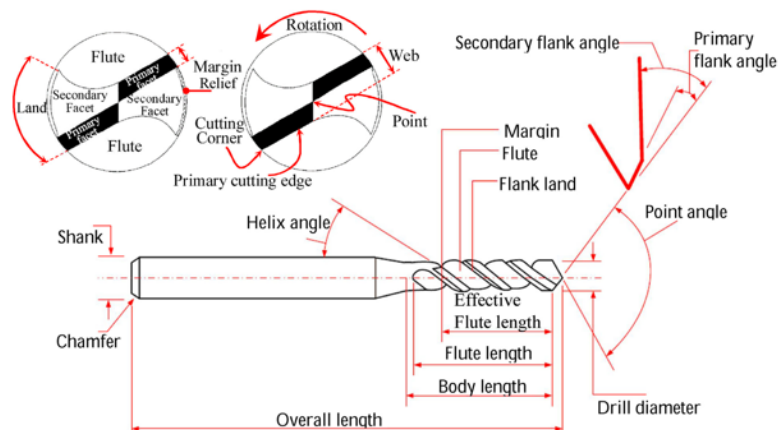
Vzhledem k rozdílům v průřezových profilech se rozdělují do tří skupin. První skupina se pohybuje od $0,5 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm}$, kde mají mikrovrtáky podobný tvar jako běžné. Druhá skupina je od $0,2 \text{ mm} < d < 0,5 \text{ mm}$, zde mají mikrovrtáky na celém povrchu stejný průměr. Do třetí skupiny patří mikrovrtáky o průměru $d < 0,2 \text{ mm}$ se zesílenou stopkou.

Podle výrobců je úhel ostří u tvrdších materiálů nejlepší v rozmezí 120° až 130° . Zatímco u měkkých materiálů se často používá úhel 90° .

Další důležitý faktor je úhel šroubovice, který je nejčastěji 30° .

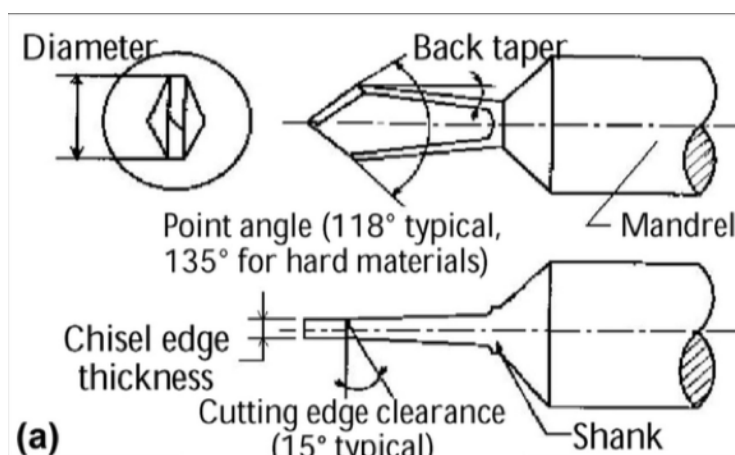
Mezi další patří tření, které musí být co nejmenší, aby nedocházelo ke zvyšování teploty. Drážka pro odvod třísek je velmi malá, a proto způsobuje špatný odvod třísek a větší pravděpodobnost zvýšené teploty.

Velmi důležitá je také délka šroubovice, neboť se zvyšující se délkou klesá tuhost.



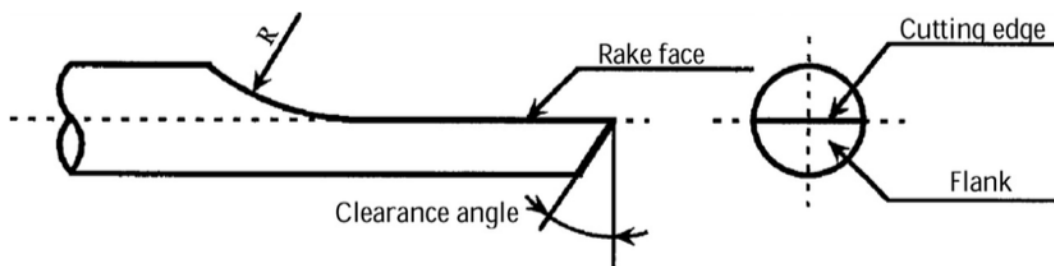
Obrázek 9 - Geometrie šroubovitého mikrovrtáku [11]

Overall length = celková délka, body length = délka těla, effective flute length = efektivní délka šroubovice, drill diameter = průměr vrtáku, chamfer = zkosení, shank = stopka, helix angle = úhel šroubovice, point angle = úhel špičky, flank land = vodící fazeta, flute = šroubovice, margin =okraj, primary flank angle = primární úhel hřbetu, secondary flank angle = sekundární úhel hřbetu, point = špička, web = příčné ostří , rotation = rotace, primary cutting edge = primární ostří, cutting corner = řezací roh, margin relief = pomocný kraj, land = vedlejší hřbet, primary facet = primární fazeta, secondary facet = sekundární fazeta



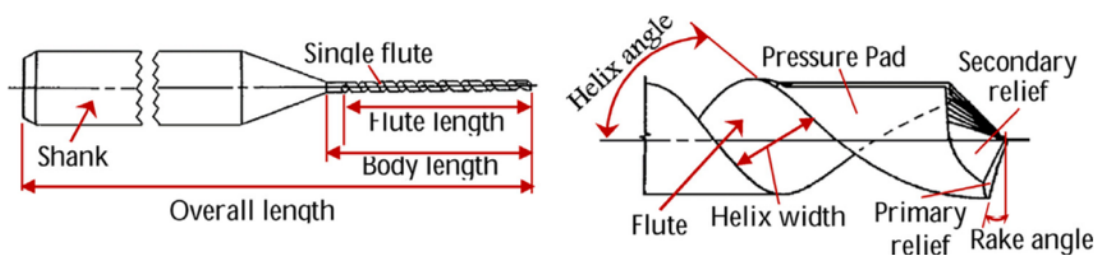
Obrázek 10 - Geometrie kopinatého mikrovrtáku [11]

Diameter = průměr, back taper = zpětné zúžení, mandrel = trn, point angle (118° typical, 135° for hard materials) = úhel špičky (118° typický, 135° pro tvrdé materiály), chisel edge thickness = tloušťka ostří, cutting edge clearance (15° typical) = úhel hřbetu, shank = stopka



Obrázek 11 - Geometrie mikrovrtáku ve tvaru D [11]

Rake face = úhel čela, clearance edge = úhel hřbetu, cutting edge = řezný úhel, flank = fazeta



Obrázek 12 - Geometrie mikrovrtáku s jednou drážkou [11]



Shank = stopka, single flute = jedna drážka, overall length = celková délka, body length = délka těla, flute length = délka šroubovice, helix angle = úhel šroubovice, pressure pad = přitlačná část, secondary relief = sekundární kraj, rake angle = úhel čela, primary relief = primární kraj, helix width = šířka šroubovice, flute = drážka

3.2 Konstrukční provedení

Na trhu máme spoustu druhů mikrovrtáků, ale nejvíce používané jsou šroubovité, kopinaté a ve tvaru písmene D. Nejsložitější, avšak nejvýhodnější tvar řezné části má šroubovitý mikrovrták, který je nejvíce poptávaný na trhu. Oproti tomu kopinatý mikrovrták a mikrovrták ve tvaru D jsou jednodušší, a proto se velmi snadno vyrábí. Vzhledem k tomu mají omezené řezné vlastnosti a používají se jen ojediněle.

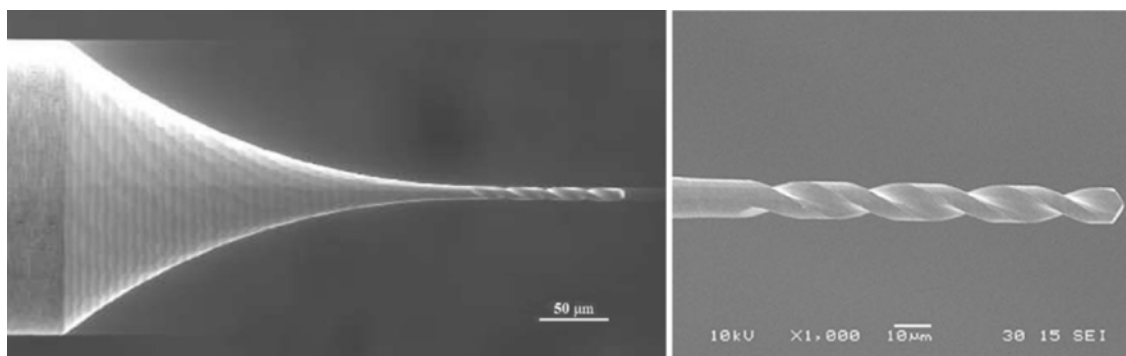
3.2.1 Šroubovitý mikrovrták

Nejčastěji používaný mikrovrták.

Vytvořené otvory jsou kvalitnější ve srovnání s laserem. Mezi další výhody patří lepší rozměrová přesnost, vysoká rychlost výroby a dostupnost na trhu.

Nevýhodou je ovšem krátká životnost nástroje, nízká mechanická pevnost, předčasné zlomení nástroje. Proto je nutné dbát pozornosti geometrii a tvaru nástroje, úhlu břitu, úhlu šroubovice, použité chladicí kapaliny a odstraňování třísek, řezným podmínkám apod.

Posledním úspěchem firmy NS Tools byla výroba vrtáku o průměru $d = 10 \mu\text{m}$, při délce šroubovice kolem $10d$. Jako materiál se použil rafinovaný nano prášek karbidu wolframu.



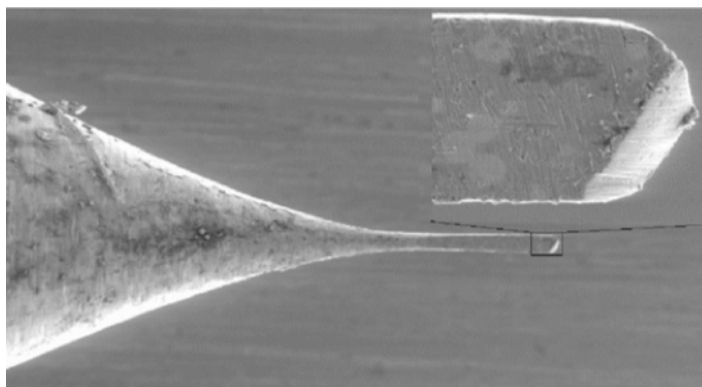
Obrázek 13 - Šroubovitý mikrovrták firmy NC Tools o průměru $d = 10 \mu\text{m}$ a délce $10d$ [11]



Mezi další patří například firma ATOM, která vyrobila mikrovrták o průměru $d = 20 \mu\text{m}$. Ten je vhodný pro spoustu druhů materiálů jako je uhlíková ocel, titan, legovaná ocel a hliník.

3.2.2 Kopinatý mikrovrták

Jedná se o nejmenší druh mikrovrtáku. Pokud je potřeba vyvrtat otvor menší než $10 \mu\text{m}$, pak už šroubovité mikrovrták nestačí (v důsledku obtížné výroby takhle malého mikrovrtáku). I přes omezenější řezné vlastnosti je výhodnější použít kopinatý mikrovrták. Kopinatý mikrovrták nemá šroubovici, a proto se obtížně odstraňují třísky.



Obrázek 14 - Kopinatý mikrovrták o průměru $d = 12,5 \mu\text{m}$ [11]

Firma National Jet přišla s novinkou, kterou je kopinatý mikrovrták o průměru $d = 2,5 \mu\text{m}$. Tato firma je také schopna vytvořit otvor o průměru $d = 30 \mu\text{m}$ do lidských vlasů, které mají průměru $d = 70 \mu\text{m}$.

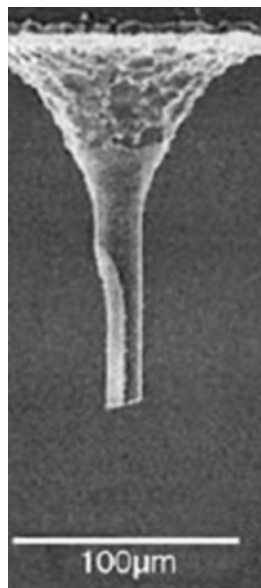


Obrázek 15 - Mikrovrtání do lidského vlasu firmy National Jet [11]

3.2.3 Mikrovrták ve tvaru D

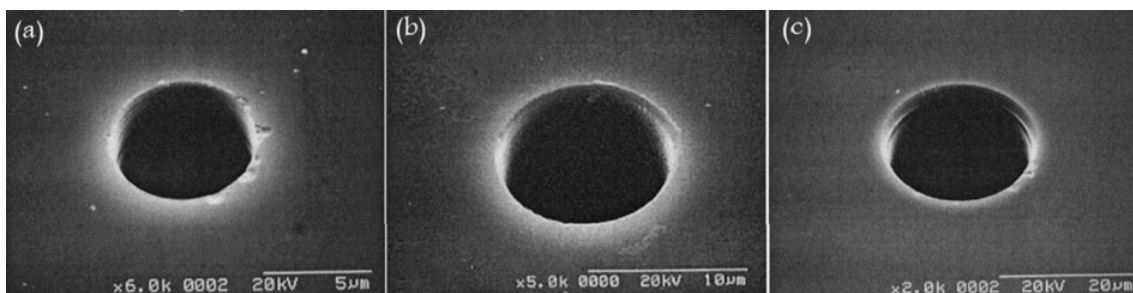
Mikrovrtáky ve tvaru D se používají pro mikrodírkování menší než průměr $d = 50 \mu\text{m}$. Obrys mikrovrtáku je půlválcový s jednou přímou drážkou.

Výhodou je snadná výroba malých průměrů, avšak nevýhodou je špatné odstraňování třísek.



Obrázek 16 - Mikrovrták tvaru D o průměru $d = 17 \mu\text{m}$ [11]

Na obrázku 16 můžeme vidět otvory vytvořené mikrovrtákem ve tvaru písmene D. První (a) o průměru $d = 6,7 \mu\text{m}$, hloubce $10 \mu\text{m}$ (posuv $0,03 \mu\text{m/s}$), druhý (b) o průměru $d = 10 \mu\text{m}$, hloubce $20 \mu\text{m}$ (posuv $0,05 \mu\text{m/s}$) a třetí (c) o průměru $d = 22 \mu\text{m}$, hloubce $90 \mu\text{m}$ (posuv $0,1 \mu\text{m/s}$).



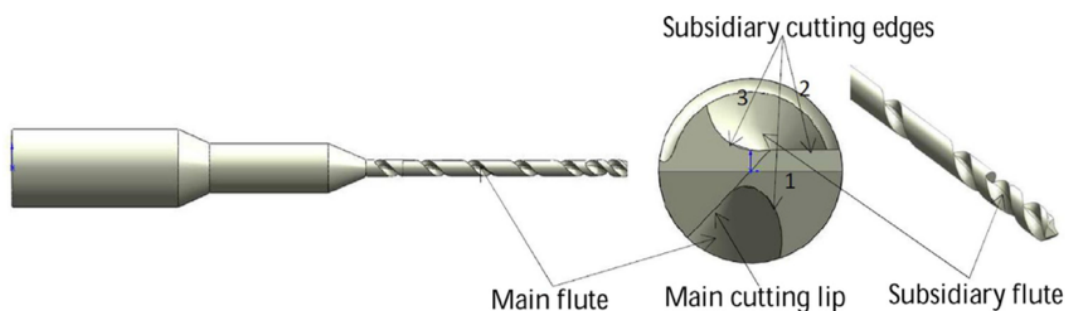
Obrázek 17 - Otvory vrtané různými průměry mikrovrtáku ve tvaru D [11]

3.2.4 Mikrovrták s jednou drážkou

Mikrovrták s jednou drážkou má vyšší tuhost oproti šroubovitému mikrovrtáku, u kterého ji dvě drážky výrazně snižují. Další výhodou je snížená tvorba tepla v důsledku malé kontaktní plochy, snadné odstranění třísky, menší pravděpodobnost destrukce a

vysoká přesnost polohy. Nevýhodou je nižší řezná rychlost, záporný úhel čela (se kterým se setkáváme jako u jediného mikrovrtáku). Ten způsobuje, že hrot mikrovrtáku je tupý a dochází proto ke zvýšení řezné síly, třecí síly a teploty.

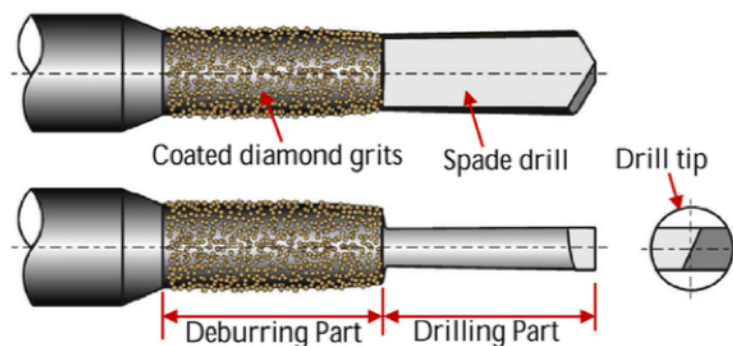
Mikrovrták byl poprvé vynalezen firmou Houser v roce 1996. V dnešní době je jen několik málo výrobců.



Obrázek 18 - 3D model mikrovrtáku s jednou drážkou [11]

3.2.5 Složené mikrovrtáky

Složený mikrovrták provádí po vrtání ještě odstraňování otřepů. Běžné mikrovrtáky obíhají díru s mikrootřepy kolem otvoru. Ty způsobují problémy ve formě otřepů, které se musí následně odstranit. To je velmi obtížné, neboť nástroj musí být přesně uvnitř mikrootvoru, čímž se spotřebovávají náklady a čas. Proto je kombinace těchto dvou operací velmi výhodná.



Obrázek 19 - Složení mikrovrták [11]

Nevýhodou je, že tato technika je využitelná pouze pro průchozí otvory. V případě neprůchozího mikrootvoru mikrovrták nemůže provést operaci odstranění otřepů. Ve srovnání se šroubovitými mikrovrtáky dosahují složené mikrovrtáky lepší kvality povrchu (hladší povrch stěny) a minimální tvorbou otřepů.



3.2.6 Povlakové mikrovrtáky

Kvůli zlepšení výkonosti mikrovrtáků výzkumníci pracovali na vývoji povlaků. Obecně se na povrch řezné části nanese tenká vrstva 0,002 až 0,0015 mm tvrdšího materiálu. Tato vrstva může výrazně zlepšit tvrdost, ořeruvzdornost, odolnost proti opotřebení a teple. Běžně se používá například diamantový uhlík (DLC), mikrokrystalický diamant (MCD), diamant dopovaný borem (BDD), zirkonium (Zr-Ti-N, Zr-CH), chrom (Cr₂N), titan (Ti, TiN), apod. Tyto materiály se nanáší pomocí několika metod. Až na některé výjimečné případy, kdy se nevyplatí povlakové vrstvy z důvodu ne tak výhodného poměru nákladů a výnosů se v ostatních případech vyplatí. Například Ueng a kolektiv vyrobili povlaky Ti, TiN, TiCN, DLC a diamantové karbonové povlaky na vrtáku o průměru $d = 0,4$ mm a zvýšila se tím životnost o 2,5krát než u nepovlakovaných mikrovrtáků.

Vývoj technologie povrchových vrstev je stále více populární, neboť technika povlakování výrazně prodlužuje životnost nástrojů.

3.3 Řezné materiály

Nejnovější vývoj v oblasti výrobních technologií a materiálových věd značně posílil možnosti navrhování řezných nástrojů. Díky tomu mohou být navrženy materiály s mimořádnými vlastnostmi. Podobným způsobem lze práškovou metalurgií vyrobit slitiny s vynikajícími vlastnostmi jako je například odolnost proti opotřebení při zvýšených teplotách, vysoká tvrdost a tuhost.

V dnešní době jsou na trhu požadavky na přesný tvar bez dodatečného vrtání, integritu povrchu a tolerance.

Při mikrovrtání se mikrovrtáky otáčejí velmi vysokou rychlostí a v důsledku tření vznikají vysoké teploty. Kromě vysokých teplot dochází při mikrovrtání k tvorbě třísek, které namáhají břit mikrovrtáku a způsobují tak únavu a následnou destrukci mikrovrtáku. Proto je důležitý výběr vhodného materiálu mikrovrtáku. Mezi základní vlastnosti těchto materiálů patří například přiměřená tvrdost, odolnost proti opotřebení (kvůli životnosti nástroje) a tuhost a houževnatost (aby nedocházelo ke zlomení mikrovrtáku). Pro vrtání je na výběr za široké škály materiálů a slitin, ovšem pro mikrovrtání je volba omezená. V dnešní době se nejvíce používají slinuté karbidy SK (a to především karbidy wolframu WC), rychlořezná ocel HSS, cermet a polykrystalický diamant PCD. Z těchto čtyř skupin



se nejvíce používají slinuté karbidy a rychlořezná ocel, kvůli příznivému poměru ceny a kvality.

3.3.1 Slinuté karbidy

Jsou vyráběny směsí karbidu wolframu a kobaltu při vysoké teplotě a tlaku. Jsou obvykle nejlepší volbou pro mikrovrtání. Kobalt (Co) se přidává jako vazební prvek. Karbid wolframu je široce používán a patří mezi hlavní volbu pro výrobu mikrovrtáků. Důvodem jsou výborné materiálové vlastnosti.

Výhody: přibližně dvakrát tvrdší než ocel, vysoká teplota tání (~2 870 °C) a bod varu, extrémně tvrdý materiál (kolem 9 na Mohsově stupnici tvrdosti), vynikající odolnost proti opotřebení, dvakrát až třikrát vyšší tuhost než ocel a nízký koeficient roztažnosti.

Tyto výborné mechanické a tepelné vlastnosti nám dovolují použít vyšší řeznou sílu (dvakrát až třikrát vyšší než u rychlořezné oceli), zvýšenou rychlost výroby, zvýšenou přesnost rozměrů a polohování.

Nevýhody: přesné obráběcí podmínky, snížená pevnost a lomová houževnatost, krátká životnost způsobená křehkostí (dochází k destrukci předtím, než dojde k opotřebení), drahé (oproti rychlořezné oceli jsou třikrát až pětkrát dražší).

U těchto slinutých karbidů je nutné najít způsob, jak zvýšit životnost nástroje a zároveň snížit výrobní náklady. Při nadměrné přítlačné síle, nepřesném seřízení stroje a nástroje, nevhodných řezných podmínkách, nevhodné geometrii mikrovrtáku a neodstranění třísek může dojít k vybočení, deformaci a v nejhorsím případě destrukci mikrovrtáku. To je velmi nežádoucí, neboť dochází ke ztrátě nástroje, obrobku a času.

3.3.2 Rychlořezná ocel

Rychlořezná ocel je díky sníženým nákladům na výrobu a lepší životnosti oproti karbidu wolframu velmi častou volbou. Kromě vysokého obsahu uhlíku obsahuje také vysoký podíl legujících prvků jako je wolfram (W), molybden (Mo), chrom (Cr) a kobalt (Co). Množství jednotlivých legujících prvků je stanoveno podle požadovaných mechanických vlastností. Můžeme tím například zvýšit tvrdost mikrovrtáku, díky které vydrží déle při vysoké teplotě.

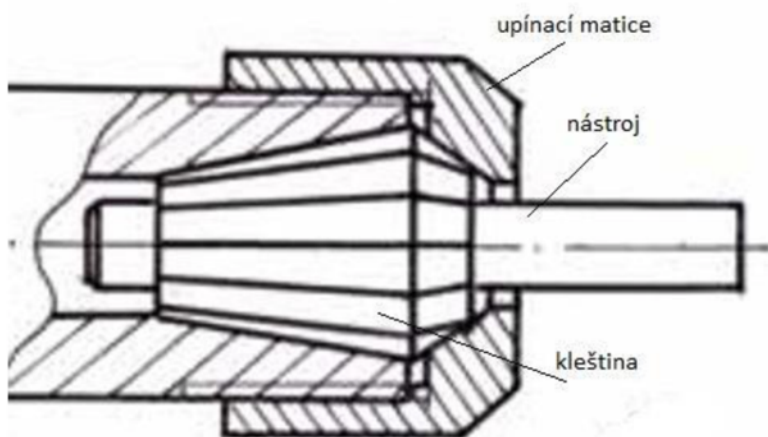
Nevýhody: nízká pracovní teplota (500 °C), špatná odolnost proti opotřebení, nízká tvrdost.

Na trhu je široká škála druhů rychlořezné oceli, ale málo z nich se používá pro mikrovrtáky. Dle Amerického institutu pro železo a ocel se používají rychlořezné oceli M1, M2 a M7 na uhlíkové oceli, mosaz a hliník. Rychlořezné oceli M35 a M42 obsahují větší množství kobaltu, který zlepšuje tepelné vlastnosti, a proto se hodí na tvrdší materiály. Rychlořezná ocel HSS-PM, která se vyrábí práškovou metalurgií nabízí vysokou odolnost proti opotřebení, vysokou tvrdost a houževnatost. Nedávný trend je v super rychlořezné oceli HSS-E-PM, která obsahuje slitinu kobaltu a poskytuje homogenní strukturu (vyšší rozměrová stálost a trvanlivost ostří nástroje).

[11] [12]

3.4 Možnosti upínání

Mikrovrtáky se vyrábějí s válcovou stopkou. Jsou zde velmi vysoké požadavky na přesnost polohy díry, a proto musí být upnutí velmi přesné a tuhé. Nejčastěji se provádí pomocí mikrokleštiny, hydraulického upínače a tepelného upínače. [14]



Obrázek 20 - Schéma upínání pomocí mikrokleštiny [5]



Obrázek 21 – Mikrokleštiny [14]



Obrázek 22 - Upnutí mikrovrtáku pomocí hydraulického upínače [14]

4 Meření nástrojů a kontrola

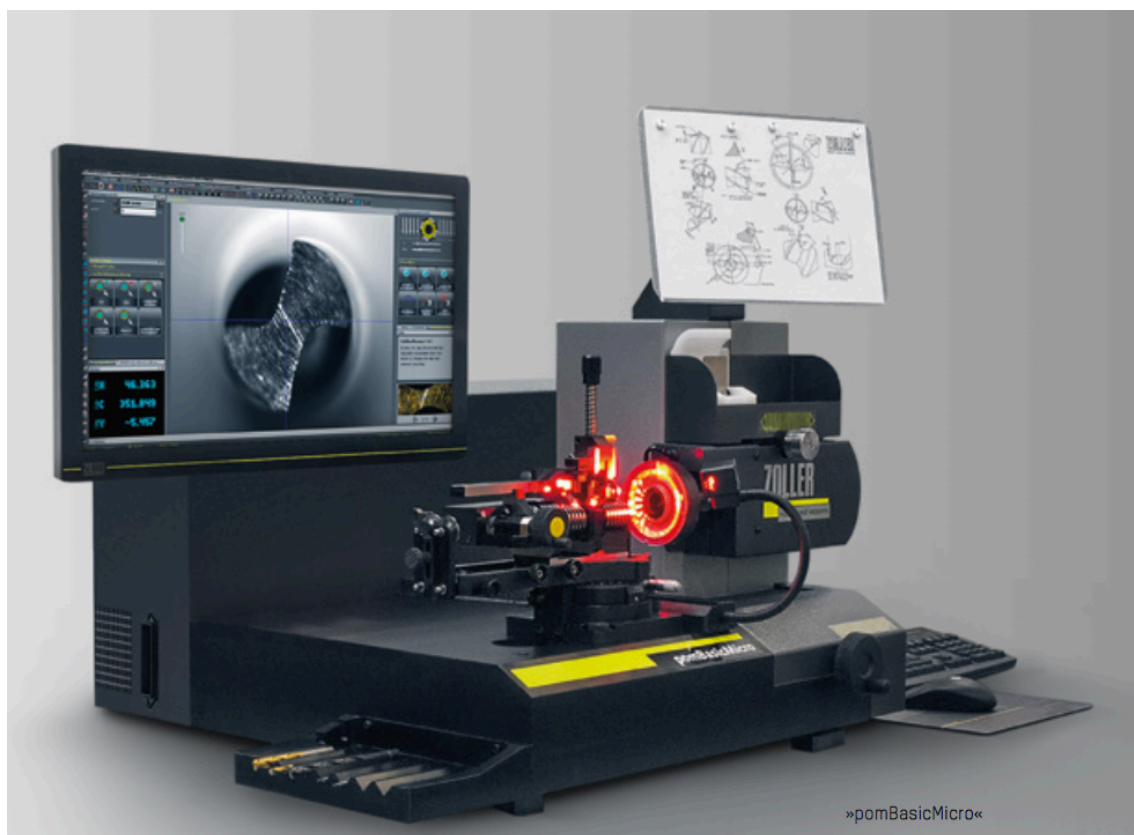
Měření a kontrola nástrojů se provádí pomocí optických 3D přístrojů z důvodu velikosti v řádech mikrometrů. Měření průměru mikrovrtáků lze provést digitálními mikrometry a digitálními posuvnými měřidly, ovšem kontrola jimi provést nelze.

4.1 pomBasicMicro

Jedná se o kompaktní řešení pro kontroly mikronástrojů. Vysoce kvalitní kamerové systémy, monochromatická kamera pro kontrolu mikronástrojů. Tento měřicí stroj má automatickou optickou detekci hran a ovládání světla. Práce na tomto stroji je velmi rychlá, stačí vložit nástroj, spustit, zkontrolovat a poté můžeme převést data přímo na



brusku. Jsou prostorově úsporné, a proto je můžeme používat jak v měřicích laboratořích, tak přímo na dílně vedle CNC stroje.



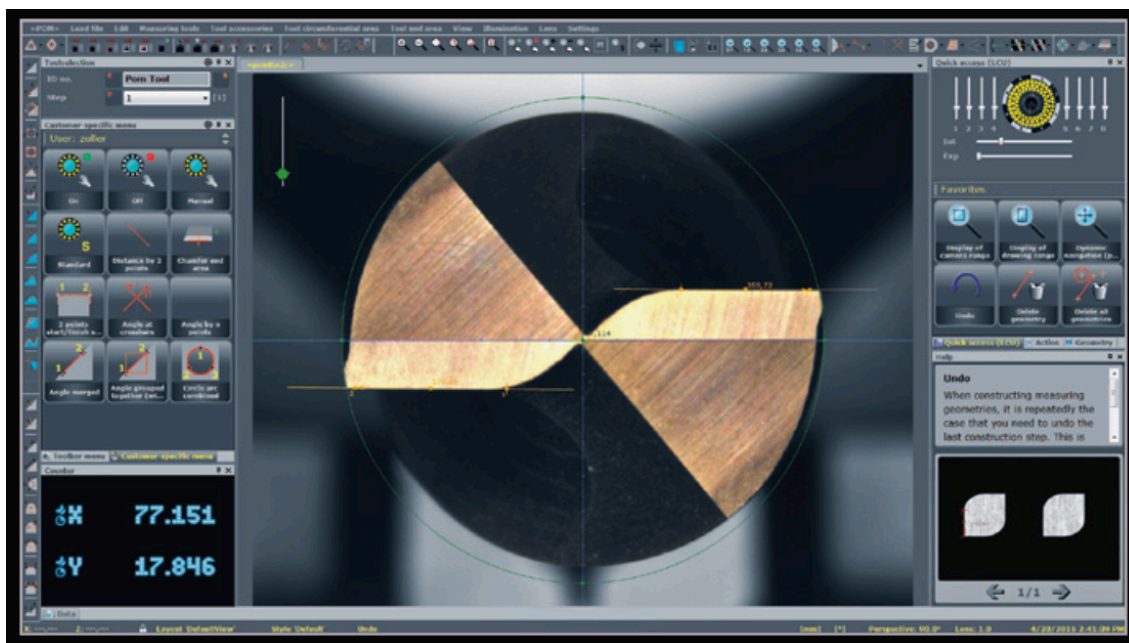
Obrázek 23 - Měřicí přístroj pomBasicMicro od firmy Zoller [13]

Software pro zpracování obrazu je intuitivně ovladatelný a individuálně nastavitelný. Nabízí řadu analytických a měřicích algoritmů pro měření úhlů, rozměrů a opotřebení. Mezi další funkce softwaru patří přímé porovnávání jmenovitého a skutečného obrysu. To se provádí překrytím hlavních uložených obrazů s aktuálním naměřeným obrazem nástroje.

Technická data:

- posuv osy x: 180 mm
- posuv osy y: 55 mm
- posuv osy z: ± 50 mm
- upínací průměr: $0,5 \div 50$ mm
- přiblížení: 12násobné optické zvětšení
- pracovní vzdálenost: 50 mm
- měřicí okno: $0,6 \times 0,5$ mm $\div 7 \times 5,8$ mm

[13]



Obrázek 24 - Pracovní prostředí pomSoft od firmy Zoller [13]

5 Řezné podmínky pro mikrovrtání vybraných materiálu

Řezné podmínky u mikrovrtání nejvíce závisí na otáčkách a rychlosti posuvu. Tyto dva faktory nejvíce ovlivňují produktivitu obrábění. Mezi další důležitý faktor patří rychlost odstraňování materiálu (ROM).

$$ROM = n \cdot f \cdot A = n \cdot f \cdot \pi \cdot r^2$$

n – otáčky [ot/min]

f – posuv [$\mu\text{m/s}$]

A – plocha průřezu vrtáku [μm^2]

r – poloměr vrtáku [μm]

Obecně při určování řezných podmínek záleží na materiálu vrtáku, obrobku a řezném prostředí.

5.1 Šroubovitý mikrovrták

Nástroje se vyrábí z rychlořezné oceli (HSS), karbidu wolframu (WC), cermetu a polykrystalického diamantu (PCD). Nízká životnost nástroje, rychlé odstranění třísek, velmi dobrá dostupnost na trhu.



Parametry:

- průměr vrtáku: $> 50 \mu\text{m} \div 10 \mu\text{m}$
- hloubka otvoru: $< 10 d \div 24 d$
- otáčky: $30\,000 \div 200\,000 \text{ ot/min}$, max = $350\,000 \text{ ot/min}$
- úhel špičky: typický $90^\circ \div 140^\circ$, nejlepší $120^\circ \div 130^\circ$
- úhel šroubovice: typický $20^\circ \div 50^\circ$, nejlepší $35^\circ \div 45^\circ$
- rychlost posuvu: $50 \mu\text{m/s} \div 200 \text{ mm/s}$

5.2 Kopinatý mikrovrták

Nástroje se vyrábí z rychlořezné oceli (HSS-E) a karbidu wolframu (WC). Dochází k obtížnému odstraňování třísek, životnost nástroje a dostupnost na trhu je průměrná.

Parametry:

- průměr vrtáku: $10 \mu\text{m} \div 50 \mu\text{m}$
- hloubka otvoru: $50 d \div 10 d$, max. $17 d$
- otáčky: max. $80\,000 \text{ ot/min}$
- úhel špičky: typický $118^\circ \div 135^\circ$, nejlepší 120°
- rychlost posuvu: $0,16 \mu\text{m/s} \div 13 \text{ mm/s}$

5.3 Mikrovrták ve tvaru D

Nástroje se vyrábí z rychlořezné oceli (HSS-E) a karbidu wolframu (WC). Obdobné vlastnosti jako u kopinatého mikrovrtáku.

Parametry:

- průměr vrtáku: $10 \mu\text{m} \div 50 \mu\text{m}$, min. $6,7 \mu\text{m}$
- hloubka otvoru: $2 d \div 5 d$, max. $8 d$
- rychlost posuvu: $0,03 \mu\text{m/s} \div 12 \text{ mm/s}$

5.4 Mikrovrták s jednou drážkou

Nástroje se vyrábí z rychlořezné oceli (HSS) a karbidu wolframu (WC). Dochází k rychlému odstranění třísek, nástroje mají vysokou životnost a je zde nízká dostupnost na trhu.

Parametry:

- průměr vrtáku: $> 50 \mu\text{m} \div 40 \mu\text{m}$



- hloubka otvoru: $5 d \div 10 d$, max. $12,5 d$
- otáčky: $50\,000 \div 100\,000$ ot/min, max. $350\,000$ ot/min
- úhel špičky: typický $70^\circ \div 130^\circ$
- úhel šroubovice: typický $30^\circ \div 70^\circ$
- rychlost posuvu: min. $50\ \mu\text{m/s}$

5.5 Složené mikrovrtáky

Nástroje se vyrábí z karbidu wolframu (WC). Dochází k obtížnému odstranění třísek, nástroje mají průměrnou životnost a jsou teprve ve výzkumu.

Parametry:

- průměr vrtáku: $> 90\ \mu\text{m} \div 80\ \mu\text{m}$
- hloubka otvoru: $5 d \div 10 d$
- otáčky: $20\,000 \div 40\,000$ ot/min
- úhel špičky: typický $90^\circ \div 130^\circ$, nejlepší 118°
- rychlost posuvu: min. $16\ \mu\text{m/s} \div 0,5\ \text{mm/s}$

5.6 Povlakové mikrovrtáky

Nástroje s povlaky diamantu, Zr, Cr, C, Ti a Al slitiny. Velmi dobrá dostupnost na trhu, zvýšená životnost nástroje $2 \div 5$ krát.

Parametry:

- průměr vrtáku: $2\ \mu\text{m} \div 15\ \mu\text{m}$
- otáčky: závislé na typu povlaku

[11]



6 Závěr

Tato bakalářská práce je věnována studii nástrojů pro mikrovrtání. Nejdříve jsem definoval, že mikrovrtání je vrtání, kde je průměr otvoru menší nebo roven 1 mm. Na tomto rozhraní se mění vzhled, geometrie a také je zde větší pravděpodobnost zlomení mikrovrtáku.

Mikrovrtáky se velmi často zlomí předtím, než dojde k jejich opotřebením. Proto je důležitý výběr vhodného materiálu, geometrie, konstrukčního provedení, upnutí a řezných podmínek.

U vrtání máme na výběr ze široké škály materiálů. Ovšem u mikrovrtání se nástroje vyrábějí nejčastěji z karbidu wolframu WC a rychlořezné oceli HSS. To platí i co se týče druhů vrtáků. U klasického vrtání se vyrábí spousta druhů vrtáků. U mikrovrtání se vyrábějí mikrovrtáky šroubovitě, které jsou na obr. 9 a obr. 13, mikrovrtáky ve tvaru písmene D, které jsou na obr. 11 a obr. 16, mikrovrtáky kopinaté, které jsou na obr. 10 a obr. 14, mikrovrtáky s jednou drážkou, které jsou na obr. 12 a na obr. 18, mikrovrtáky složené, které jsou na obr. 1 a na obr. 19 a mikrovrtáky povlakové. Mezi nejčastěji používané patří šroubovitý, který je složitý na výrobu, ale má nejvýhodnější tvar řezné části a je nejvíce poptávaný na trhu. Dále mikrovrták ve tvaru písmene D a kopinatý mikrovrták, které jsou jednodušší a snazší na výrobu, ale mají omezené řezné vlastnosti.

Mikrovrtáky se vyrábějí pouze s válcovou stopkou. Oproti klasickému vrtání, kde se vyrábějí vrtáky s válcovou nebo kuželovou stopkou. Konkrétně se mikrovrtáky upínají nejčastěji pomocí mikrokleštín, které jsou na obr. 20 a obr. 21, hydraulického upínače, který je na obr. 6 a obr. 22, a nebo pomocí tepleného upínače. Měření a kontrola se provádí pomocí optických 3D měřicích přístrojů z důvodu velikosti v řádech mikrometrů. Měřicí přístroj pomBasicMicro je na obr. 23. Práce na těchto přístrojích je velmi rychlá a přesná.

Na závěr jsou uvedeny řezné podmínky jednotlivých mikrovrtáků. Ty se pohybují u každého mikrovrtáku v jiných rozmezích v závislosti na materiálu mikrovrtáku a na materiálu obrobku.



Seznam zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[m/min]	posuvová rychlost
D	[mm]	průměr obráběné díry
d	[mm]	průměr vrtáku
r	[mm]	poloměr vrtáku
A	[mm ²]	plocha průřezu vrtáku
n	[min ⁻¹]	otáčky
f	[mm]	posuv na otáčku
π		Ludolfovo číslo
3D		trojrozměrný
CNC		počítačem řízený obráběcí stroj
ROM		rychlost odstraňování materiálu
VBD		vyměnitelné břitové destičky
Ra		střední aritmetická úchylka profilu



Seznam použité literatury

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie*. Praha: Scientia, 1996. ISBN 80-7183-017-8.
- [2] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [3] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [4] ŠULC, Jan a Jiří DOLEŽEL. *Vrtání*. COPTTEL – Mechatronika [online]. 7. 4. 2011[cit. 2019-06-30]. Dostupné z:
<https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=19751&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>
- [5] HRIVNÁK, Roman, Jiří HORSÁK a Josef DIVIŠ. *Obrábění a zpracování kovů: Vrtání*. ELUC [online]. 28. 5. 2015 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1211>
- [6] HRUBEC, Miroslav. *Nástroje pro výrobu děr*. OSU [online]. 2009 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z:
<https://www.osu.cz/dokument/proportal/pdf/kpv/vrtani/nastroje.html>
- [7] HRUBEC, Miroslav. *Upínání vrtáků*. OSU [online]. 2009 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokument/proportal/pdf/kpv/vrtani/upinaniiv.html>
- [9] *Vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování*. In: ZILADOC [online]. 2017 [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: https://ziladoc.com/queue/vrtani-vyhrubovani-vystruzovani-a-zahlubovani_pdf?quuwu_id=-1
- [10] *Produkty: Mikronástroje*, Rotana [online]. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.rotana.cz/16-mikronastroje.html>
- [11] KAPOOR, S. *Journal od manufacturing processes* [online]. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 1999- [cit. 2019-06-30]. ISBN 1526-6125
- [12] *HSSE PM*. Falti [online]. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.falti.cz/hsse-pm>
- [13] *PomBasicMicro*, ZOLLER [online]. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.zoller.info/in/products/inspection-measuring/process-oriented-measurement/pombasicmicro.html>
- [14] *Tooling*. Najet [online]. [cit. 2019-06-30]. Dostupné z: <https://www.najet.com/tooling/>



[15] Úvod. *Small hole drilling* [online]. [cit. 2019-07-01]. Dostupné z:
<https://smallholedrilling.eu/uvod/>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Složený mikrovrták s diamantovým povlakem [11]</i>	10
<i>Obrázek 2 - Hlavní a vedlejší pohyb při vrtání [2]</i>	11
<i>Obrázek 3 - Základní parametry šroubovitého vrtáku [3]</i>	12
<i>Obrázek 4 - Rychloupínací sklíčidlo [7]</i>	15
<i>Obrázek 5 - Zubové tříčelistové sklíčidlo [5]</i>	15
<i>Obrázek 6 - Schéma hydraulického upínače [5]</i>	16
<i>Obrázek 7 - Stolní vrtačka [3]</i>	20
<i>Obrázek 8 - Sloupová vrtačka [3]</i>	20
<i>Obrázek 9 - Geometrie šroubovitého mikrovrtáku [11]</i>	22
<i>Obrázek 10 - Geometrie kopinatého mikrovrtáku [11]</i>	23
<i>Obrázek 11 - Geometrie mikrovrtáku ve tvaru D [11]</i>	23
<i>Obrázek 12 - Geometrie mikrovrtáku s jednou drážkou [11]</i>	23
<i>Obrázek 13 - Šroubovitý mikrovrták firmy NC Tools o průměru $d = 10 \mu\text{m}$ a délce $10d$ [11]</i>	24
<i>Obrázek 14 - Kopinatý mikrovrták o průměru $d = 12,5 \mu\text{m}$ [11]</i>	25
<i>Obrázek 15 - Mikrovrtání do lidského vlasu firmy National Jet [11]</i>	25
<i>Obrázek 16 - Mikrovrták tvaru D o průměru $d = 17 \mu\text{m}$ [11]</i>	26
<i>Obrázek 17 - Otvory vrtané různými průměry mikrovrtáku ve tvaru D [11]</i>	26
<i>Obrázek 18 - 3D model mikrovrtáku s jednou drážkou [11]</i>	27
<i>Obrázek 19 - Složení mikrovrták [11]</i>	27
<i>Obrázek 20 - Schéma upínání pomocí mikrokleštiny [5]</i>	30
<i>Obrázek 21 - Mikrokleštiny [14]</i>	31
<i>Obrázek 22 - Upnutí mikrovrtáku pomocí hydraulického upínače [14]</i>	31
<i>Obrázek 23 - Měřicí přístroj pomBasicMicro od firmy Zoller [13]</i>	32
<i>Obrázek 24 - Pracovní prostředí pomSoft od firmy Zoller [13]</i>	33

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Nejpoužívanější rychlořezné oceli a jejich chemické složení [8]</i>	17
<i>Tabulka 2 - Řezné podmínky vrtání [9]</i>	18
<i>Tabulka 3 - Dosahované přesnosti a drsnosti povrchu [9]</i>	19