



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PRINCIPY PŘÍVODU PROCESNÍ KAPALINY DO MÍSTA ŘEZU

PRINCIPLES FOR LEADING COOLANT IN TO THE CUT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub SKLÁDANÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Skládáný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Principy přívodu procesní kapaliny do místa řezu

v anglickém jazyce:

Principles for leading coolant in to the cut

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce zahrnuje rešerši z problematiky chlazení a mazání při třískovém obrábění. Hlavní pozornost je kladena na nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny. Součástí práce je i rozčlenění nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny a doporučení autora.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky procesních kapalin
- rešerše principů přívodu chladicí kapaliny do místa řezu
- rešerše nástrojů s vnitřním chlazením
- zhodnocení a doporučení autora

Seznam odborné literatury:


1. Springer handbook of mechanical engineering. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0491-316.
2. KAFKA, J. a M. VRABEC. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 2006, 120 s. ISBN 80-01-01355-3.
3. ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: CERM, 2003, 192 s. ISBN 80-214-2336-6.
4. MANG, Theo a Wilfried DRESEL. Lubricants and Lubrication. 2. vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2007, 848 s. ISBN 978-3-527-31497-3.
5. PABLA, B.S. a M. ADITHAN. CNC Machines. 2. vyd. New Delhi: New Age International, 2008, 140 s. ISBN 9788122420197.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 18.11.2013





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce pojednává o problematice procesních kapalin a jejich přívodu do místa řezu. V práci je uveden stručný popis nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny pro základní obráběcí technologie. V závěru práce jsou zhodnoceny jednotlivé způsoby přívodu procesní kapaliny do místa řezu.

Klíčová slova

procesní kapalina, přívod kapaliny, chlazení, mazání, nástroje s vnitřním přívodem

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with issues of coolants and their supply to the cut. The thesis gives a brief description of the tools with internal coolant supply for basic machining technologies. In conclusion is evaluation of different methods for coolant supply in to the cut.

Key words

coolant, leading coolant, cooling, lubrication, tools with internal coolant supply

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKLÁDANÝ, Jakub. *Principy přívodu procesní kapaliny do místa řezu*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 40 s. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Principy přívodu procesní kapaliny do místa řezu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28.5.2014

Datum

Jakub Skládáný

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

| | |
|--------------------------------------------------------|----|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD..... | 8 |
| 1 PROCESNÍ KAPALINY | 9 |
| 1.1 Základní vlastnosti kapalin | 9 |
| 1.2 Proudění kapalin | 9 |
| 1.2.1 Rozdělení proudění | 10 |
| 1.2.2 Zákon o zachování hmoty | 11 |
| 1.3 Vlastnosti procesních kapalin | 12 |
| 1.4 Druhy procesních kapalin | 13 |
| 1.5 Jiné druhy rezného prostředí | 16 |
| 2 ZPŮSOB PŘÍVODU PROCESNÍ KAPALINY DO MÍSTA ŘEZU | 17 |
| 2.1 Konvenční přívod procesní kapaliny | 17 |
| 2.2 Vnitřní přívod procesní kapaliny | 17 |
| 2.3 Periferní přívod procesní kapaliny | 19 |
| 3 FORMA PŘIVÁDĚNÉ PROCESNÍ KAPALINY | 20 |
| 3.1 Vysokotlaké chlazení | 20 |
| 3.2 Podchlazování procesní kapaliny | 21 |
| 3.3 Kryogenní chlazení | 21 |
| 3.4 Přívod aerosolu | 22 |
| 4 NÁSTROJE S VNITŘNÍM PŘÍVODEM PROCESNÍ KAPALINY..... | 24 |
| 4.1 Upínání rotačních nástrojů..... | 24 |
| 4.2 Vrtací nástroje, závitníky a výstružníky | 25 |
| 4.3 Soustružnické nástroje | 28 |
| 4.4 Frézovací nástroje | 31 |
| 4.5 Porovnání cen nástrojů..... | 33 |
| ZÁVĚR | 35 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 37 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 40 |

ÚVOD

Strojní chlazení, respektive mazání místa řezu je nedílnou součástí technologie obrábění. Při třískovém obrábění vniká značné množství tepla, které má negativní vliv na životnost nástroje, přesnost obrábění atd. Za účelem redukování tohoto vlivu, je vhodné do místa řezu přivádět procesní kapalinu. Vzniklé teplo se odvádí kapalinou, která má vysoký chladicí účinek, nebo se vznikání tepla předchází přívodem maziva.

Procesní kapaliny a jejich přívod do místa řezu je poměrně rozsáhlá problematika, kterou se v poslední době zabývá řada firem. Procesní kapaliny jsou stále zdokonalovány, aby poskytovali co nejlepší požadované vlastnosti, nebo jsou nahrazovány úplně jiným druhem kapalin, jako jsou např. kapalný dusík nebo CO₂. Způsob přívodu procesních kapalin do místa řezu významně ovlivňuje využití jejich vlastností, proto je na jeho volbu kladen velký důraz.

Nedílnou součástí této problematiky jsou nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny, které jsou stále vyvíjeny a zdokonalovány.

1 PROCESNÍ KAPALINY

Při třískovém obrábění se využívá mnoho druhů řezných kapalin s různými vlastnostmi. Správnou aplikací procesní kapaliny je možné výrazně zvýšit hodnotu řezné rychlosti, posuvu i hloubky řezu. Účinnost aplikace se projevuje především v lepší drsnosti obrobeneho povrchu, rozměrové přesnosti, poklesu celkově spotřebované elektrické energie, snížení hlučnosti obrábění, spotřebě řezných nástrojů a fyzickém opotřebením obráběcích strojů [1, 2].

1.1 Základní vlastnosti kapalin

Kapaliny jako takové mají schopnost téci, při jejich umístění do nádoby se přizpůsobí jejich tvaru a jsou obtížně stlačitelné. Fyzikální veličiny pro základní popis kapalin jsou (v závorce za každou veličinou je uveden přibližný rozsah používán u procesního média):

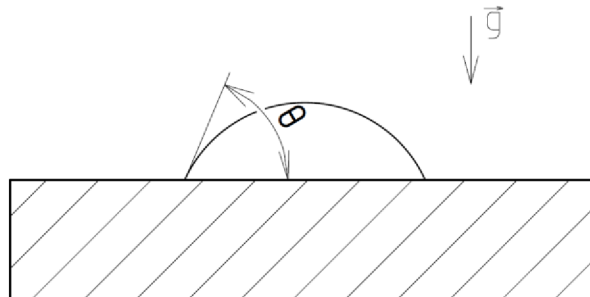
Hustota: Vyjadřuje hmotnost látky na metr krychlový ($0,8 \div 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Tlak: Je to síla působící na jednotku plochy v rovině vedené tekutinou. Tlak bývá vyjádřen v barech, psi, nebo pascálech (až 100 Mpa) [3, 4].

Teplota: Teplota popisuje teplotní charakter kapaliny. Teplota se udává v různých jednotkách jako jsou - kelviny, stupně Celsia nebo Fahrenheita ($-196 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$) [3].

Dalšími vlastnostmi, které značně ovlivňují proces chlazení místa řezu při obrábění, jsou:

Úhel smáčení: Kapka kapaliny na povrchu tuhé fáze zůstane ve formě kapky (nerozetře se), je-li splněna podmínka rovnováhy, kdy je vektorový součet všech tří mezifázových napětí roven nule. Tupý úhel smáčení znamená tzv. špatné smáčení, při dobrém smáčení je úhel smáčení naopak ostrý. Úhel smáčení θ je znázorněn na obr. 1 [5].



Obr. 1 Znárodnění úhlu smáčení.

Viskozita: Viskozita je definována jako míra toho, jak se tekutina brání tečení. Na těleso pohybující se neviskózní tekutinou nepůsobí žádná smyková viskózní síla, tj. brzdicí síla viskózního charakteru [3].

1.2 Proudění kapalin

Pohyb reálných tekutin je velmi komplikovaný. Řada problémů týkající se proudění tekutin je jen obtížně numericky řešitelných a některé dosud vyřešeny nejsou. *Reálné kapaliny* jsou obecně stlačitelné a vyskytuje se u nich vnitřní tření. Ve většině praktických aplikací lze stlačitelnost kapaliny zanedbat a brát ji jako nestlačitelnou. Pro zjednodušení je zaveden pojem *ideální kapalina*, která je dokonale nestlačitelná a neviskózní (nulové vnitřní tření). Kapaliny (částice kapaliny) se pohybují na trajektorii, která se nazývá *proudnice* [3, 6].

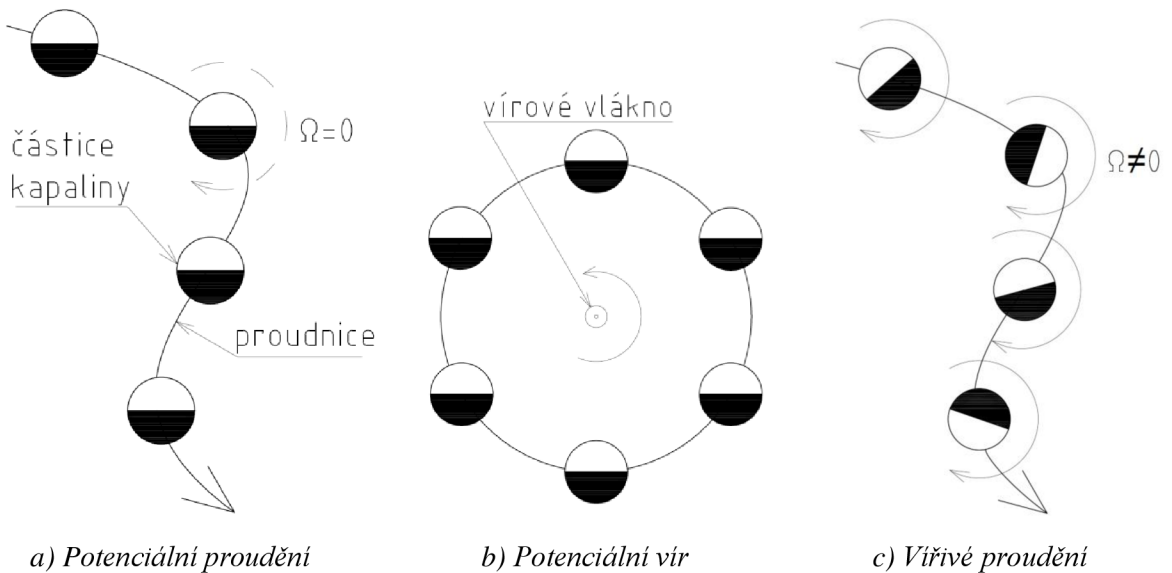
1.2.1 Rozdělení proudění

V následující podkapitole je uvedeno rozdělení proudění podle fyzikálních vlastností kapalin.

Proudění ideální kapaliny

Potenciální (nevířivé) proudění - je proudění, kdy se částice kapaliny pohybují přímo nebo křivočáře po proudnicích tak, že se vůči pozorovateli neotáčejí kolem své osy (obr. 2a). Proudění, kdy částice proudí po kruhové dráze kolem vírového vlákna, nazýváme potenciální vír (obr. 2b) [6].

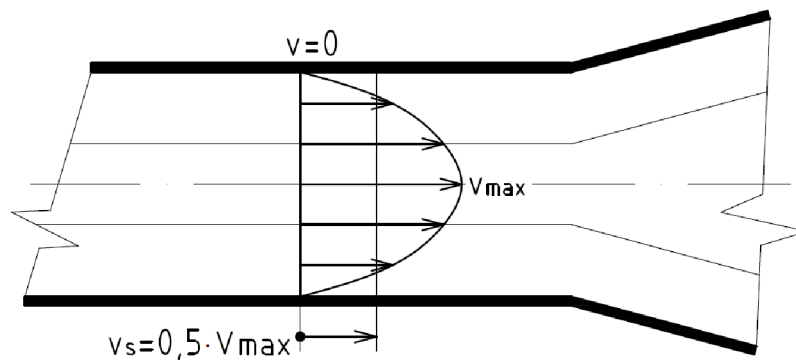
Vířivé proudění - je proudění, kdy se částice pohybují po proudnici a zároveň otáčejí kolem vlastních os (obr. 2c). Ideální kapalina se pohybuje potenciálně s výjimkou míst s vysokým gradientem rychlostí, kde vzniká vířivé proudění (např. při obtékání rohů) [6].



Obr. 2 Schéma proudění ideální kapaliny [6].

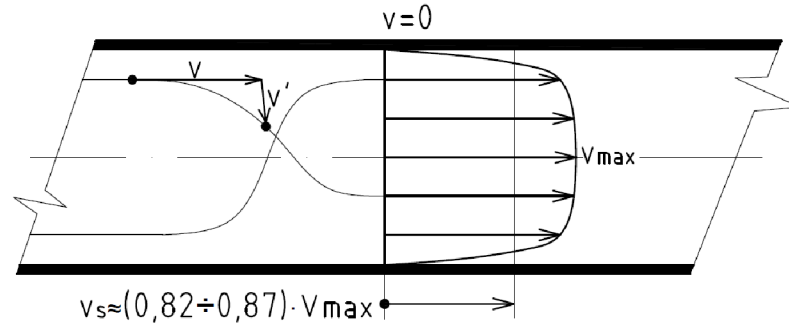
Proudění reálné kapaliny

Laminární proudění - je proudění, kdy se částice kapaliny pohybují ve vrstvách (laminy). Pro laminární proudění je charakteristické to, že nedochází k přemísťování částic napříč průřezem (obr. 3). Při jednorozměrném proudění v potrubí má rychlostní profil tvar rotačního paraboloidu [6].



Obr. 3 Laminární proudění [6].

Turbulentní proudění - je proudění, při kterém částice vykonávají kromě postupné rychlosti v i tzv. flukтуаční (turbulentní) složku rychlosti v' , kterou se částice pohybují napříč průřezu (obr. 4). Turbulentní rychlost mění s časem svoji velikost a směr. Rychlostní profil se svým tvarem podobá profilu ideální kapaliny, díky přítomnosti turbulence. Rychlost u stěny potrubí je nulová [6].



Obr. 4 Turbulentní proudění [6].

1.2.2 Zákon o zachování hmoty

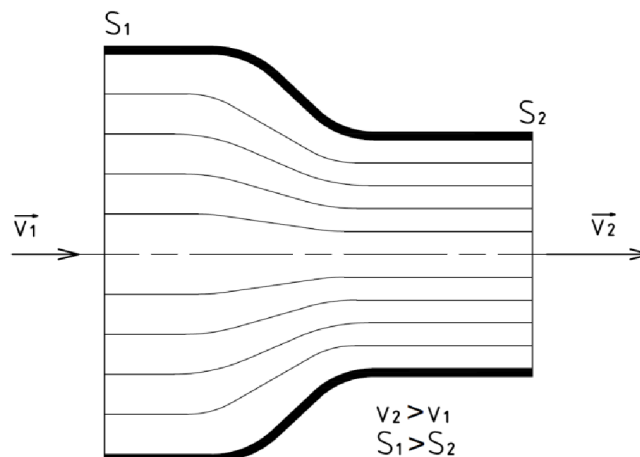
Za předpokladu, že je kapalina nestlačitelná a nemůže být vytvořena ani zničena, lze předpokládat, že kapalina procházející proudovou trubicí o průřezu S_1 rychlostí v_1 , urazí za krátký časový interval Δt vzdálenost $v_1 \cdot \Delta t$ a průřezem projde objem tekutiny ΔV . Při zúžení proudové trubice na průřez S_2 projde za časový interval Δt , při rychlosti v_2 , stejný objem tekutiny ΔV (v místě zúžení trubice se proudnice dostanou blíže k sobě a proud se zrychlí, viz obr. 5). Tento jev se dá vyjádřit rovnicí kontinuity proudění, která udává objemový tok [3]. Rovnice kontinuity má tvar:

$$R = S \cdot v = konst. \quad (1)$$

kde je: R - objemový tok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

S - plocha průřezu trubice [m^2],

v - průtoková rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [3].



Obr. 5 Zúžení proudové trubice.

Praktický vztah pro výpočet objemového toku při použití trysek má tvar:

$$R_T = C_D \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \quad (2)$$

kde je R_T - objemový tok trysky [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

C_D - účinnost trysky [-],

n - počet trysek [ks],

d - průměr trysky [m],

p - tlak tekutiny [Pa],

ρ - hustota tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] [3].

1.3 Vlastnosti procesních kapalin

Při výběru procesní kapaliny se užívá všeobecného pravidla, které říká: „*při třískovém obrábění s vysokým zatížením břitu nástroje a při nízkých řezných rychlostech se vyžaduje zvláště dobré mazání a řezný proces s vysokými řeznými rychlostmi vyžaduje intenzivní chlazení*“. Obráběcí operace s aplikací procesních kapalin se dělí do tří skupin podle energetické náročnosti (tab. 1) [1].

Tab. 1 Rozdělení procesních kapalin s ohledem na energetickou náročnost obrábění [1].

| Skupina | Technologie obrábění | Doporučená procesní kapalina |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. | broušení bezhroté, rovinné, mezi hroty řezání strojními pilami jemné vyvrtávání | kapaliny převážně s chladicím účinkem (mísitelné s vodou) |
| II. | honování, lapování, superfinišování frézování vrtání, vyhrubování soustružení obrážení frézování ozubení | kapaliny s chladicím i mazacím účinkem (emulze, ropné oleje s přísadou polárních látek, chemicky aktivními přísadami) |
| III. | broušení otvorů, tvarové broušení vystružování řezání závitů hluboké vrtání protahování | převážně ropné oleje s vyšším obsahem chemicky aktivních přísad |

Při obrábění jsou požadované různé vlastnosti na procesní kapaliny, jako jsou např.:

Chladicí účinek

Chladicí účinek může být definován jako schopnost procesní kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Použitím procesní kapaliny s větším chladicím účinkem se snižuje teplota obrobku, což může mít příznivý vliv na dodržení požadované přesnosti při dokončovacích operacích. Mezi parametry kapalin ovlivňující účinek chlazení patří: *měrné a výparné teplo, součinitel tepelné a teplotní vodivosti, součinitel přestupu tepla, úhel smáčení, rychlost hmotnostního toku proudění kapaliny* (5 – 100 l/min). [2, 7].

Mazací účinek

Mazací účinek může být definován jako schopnost prostředí (kapaliny) vytvořit na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která zabraňuje přímému styku kovových povrchů. Použitím procesní kapaliny s vysokým mazacím účinkem se dosahuje zmenšení tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Mazací účinek olejové fáze je ovlivněn především její viskozitou, která má přímý vliv na proudění. Příliš viskózní kapaliny hůře pronikají mezi třecí plochy. Proto se do mazacích kapalin přidávají povrchově a chemicky aktivní přísady, které zvyšují pevnost mazacího filmu [2, 7].

Čistící účinek

Čistícím účinkem je především myšleno odstraňování třísek z místa řezu (např. odvod třísek při řezání závitů nebo vrtání hlubokých děr) nebo přímo z nástroje (např. vyplavování zanesených pórů v brusném kotouči) [2, 7].

Provozní stálost

Provozní stálost je doba, po kterou je procesní kapalina schopna pracovat. Při stárnutí řezné kapaliny vznikají tzv. produkty stárnutí, které mají negativní vliv na vlastnosti kapaliny [1].

Ochranný účinek

Procesní kapalina nesmí být agresivní vůči stroji, nástroji i obrobku. Naopak musí vytvářet konzervační vrstvu, která zabraňuje korozi již při procesu obrábění, tak i po nich [1].

Zdravotní nezávadnost

Obsluha obráběcího stroje se běžně dostává do styku s procesní kapalinou. V ojedinělých případech může být inhalována nebo i požitá. Proto nesmí být zdraví škodlivá, obsahovat látky dráždivé sliznici a pokožku nebo být dokonce jedovatá [1, 2].

1.4 Druhy procesních kapalin

Procesní kapaliny lze rozdělit na kapaliny, které jsou s vodou mísitelné a s vodou nemísitelné (např. těžké oleje). Kapaliny s vodou mísitelné se pak dělí na rozpustné ve vodě a emulgační ve vodě. Dále je možné rozdělení na kapaliny s převažujícím účinkem chladícím nebo mazacím [1, 2].

Vodné roztoky

Vodné roztoky jsou nejjednodušší a nejlevnější procesní kapaliny, které poskytují velmi dobrý odvod tepla a čistící účinek. Jejich hlavní složkou je voda, která musí být upravována za účelem jejího změkčení. Zároveň je nutné přidávat látky, které zabraňují korozi, pěnivosti a látky zlepšující úhel smáčení kapaliny. Vodný roztok musí být vždy alkalický. Nevýhodou vodných roztoků je především: téměř nulový mazací účinek, velká náklonnost ke vzniku anaerobních bakterií [1, 2].

Procesní kapaliny pro obrábění s vodou mísitelné - emulze

Jedná se o kapaliny skládající se ze dvou hlavních složek (vody a oleje). V podstatě se jedná o sloučení dvou využitelných vlastností těchto kapalin. Vody pro chladicí účinek a oleje pro mazací účinek. Obě tyto složky jsou vzájemně nerozpustné, ale jsou schopny vytvořit disperzní soustavu, kdy jedna fáze tvoří mikroskopické kapky rozptýlené v té druhé. Vytvoření takovéto kapaliny je možné díky přidání třetí složky do soustavy, tzv. emulgátoru, který stabilizuje emulzi a zabraňuje koagulaci jemně rozptýlených částic oleje

ve vodě. V řezných emulzích (obr. 6) se dnes vyskytují tyto druhy chemických přísad: řezné oleje, emulgátory, vysokotlaké (EP) přísady, biocidy, antikoroziční přísady a antipěnicí přísady [2].

Mezi základní problémy emulzí patří jejich stárnutí a ztráta fyzikálně chemických vlastností. V dnešní době je snaha vytvářet emulze bez obsahu chlóru, nitridů, chlorovaných uhlovodíků, fenolových přísad a dalších látek, které mohou ohrožovat životní prostředí [2].

Procesní kapaliny pro obrábění ve vodě rozpustné – syntetické a polosyntetické

Syntetické procesní kapaliny neobsahují minerální oleje a jsou v dnešní době zastoupeny řadou plně syntetických rozpouštědel (polyglykolů nebo esterů), které jsou dobře rozpustné ve vodě nebo ve vodě dobře emulgující. Nejsou závislé na kvalitě vody a vytváří velmi stabilní roztok. Často se využívají při brousicích operacích, protože dobře odvádí teplo, nezanášejí brousicí kotouč a umožňují sledovat průběh obrábění (obr. 7). Oproti kapalinám na bázi oleje mají syntetické kapaliny ekonomické výhody a navíc zajišťují rychlé odvádění tepla z místa řezu, dobrý čistící účinek a jednoduchou přípravu [2].

Rozptýlením oleje v syntetické řezné kapalině vzniká polosyntetická kapalina, která má příznivější mazací schopnosti [1].



Obr. 6 Aplikace emulze při frézování [8].



Obr. 7 Aplikace syntetické kapaliny při broušení rotační součásti [9].

Řezné oleje

Řezné oleje (obr. 8) jsou kapaliny na bázi minerálních olejů. Tyto kapaliny mají velice příznivý úhel smáčení, dobrou vzlínavost, malý chladicí účinek, ale velmi dobrý mazací účinek. Rozsah řezných rychlostí používaných při obrábění za použití procesních olejů je limitován. Příliš vysoké řezné rychlosti mohou u olejů způsobit vzplanutí. Pro zvýšení tlakové únosnosti a mazací schopnosti se používají přísady ve formě mastných látek, organických sloučenin a pevných maziv [2].

Jako mastné látky se používají mastné kapaliny nebo syntetické estery. Jsou to zmýdelnitelné mastné oleje, které zvětšují přilnavost oleje ke kovu a zlepšují mazací schopnost. Těchto přísad nelze využít při obrábění, kde vznikají extrémní tlaky [1].

Organické sloučeniny se využívají jako vysokotlaké přísady. Na povrchu vytvářejí vrstvu kovových mýdel, které zabraňují kovovým svarům a snižují tření mezi nástrojem a obrobkem. Jako nejúčinnější sloučeniny se projevíly kombinace sloučenin síry, chlóru a fosforu [1].

Přísady ve formě pevného maziva působí při řezání mechanickým účinkem. Díky své afinitě ke kovu vytvářejí na povrchu mezní vrstvu, která je odolná proti vysokým tlakům a zlepšují mazací schopnosti oleje. Jako pevná maziva se používá grafit a sirník molybdenu. Mezi jejich nevýhodu patří jejich nerozpustnost v kapalině, proto se musí udržovat v rozptýleném stavu [1].

Minerální oleje, jakožto základ řezných olejů, obsahují řadu balastních složek, které negativně ovlivňují některé jejich vlastnosti. Při vývoji nových typů základových olejů je snahou se těchto nežádoucích složek zbavit. Dále je snaha zužitkovat některé další složky získané destilací ropy, pro které dosud nebylo nalezeno vhodné použití [10].

Kapalné plyny

Poměrně novou technologií je kryogenní chlazení, kde se využívá kapalného dusíku (obr. 9) s teplotou až -196°C , nebo levnějšího kapalného CO_2 o teplotě od -78°C . Použití této kapaliny je vhodné při obrábění slitin titanu, niklu nebo duplexních ocelí, kde vysoké termické zatížení vede k rychlému opotřebení břitu nástroje [11].



Obr. 8 Aplikace řezného oleje [10].



Obr. 9 Aplikace kapalného dusíku [11].

Řezná mlha

Jedná se o procesní kapalinu rozptýlenou pomocí stlačeného plynu vycházejícího z trysky. Chladicí nebo mazací účinek je zajištěn především kapalinou rozptýlenou v expandujícím plynu. Při obrábění s řeznou mlhou je možné zvýšit výkon obrábění a snížit spotřebu procesní kapaliny. Při používání aerosolů je nutné zabezpečit odsávání a krytování stroje [1, 2].

1.5 Jiné druhy řezného prostředí

Při obrábění se využívá i jiných řezných prostředí než kapalin, jako jsou např. různé plyny nebo pevné látky.

Plynné prostředí

Plynné látky se jako řezné prostředí využívají jen zřídka. Podchlazování vzduchu je neefektivní, vzhledem k relativně malému chladicímu účinku plynů. Také mají nulový mazací účinek a problematický čisticí účinek. Přesto se u některých materiálů plynného prostředí využívá [1, 2].

Jedním z účinných variant chlazení plynem je chlazení stlačeným CO_2 , N_2 , argonem nebo freonem, který je přiváděn pod tlakem do místa řezu (0,5 až 7 MPa), kde se expanzí hluboce podchladí. Argon a freon zabraňují tvorbě oxidačních filmů na obráběném materiálu, které se vyznačují vysokou pevností a tvrdostí. Tato metoda je využívána při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Chlazením pomocí stlačeného plynu má řadu nevýhod, jako jsou vysoké náklady na plyn, nebezpečí při jeho používání, vysoká hluchost chlazení, nutnost zajistit odsávání z pracovního prostoru a větrání pracoviště [1, 2].

Další variantou řezného prostředí je tzv. suché obrábění, které jako řezného prostředí využívá atmosférický vzduch. Tento způsob obrábění se stává velice používaným, v kombinaci s novými řeznými materiály [1, 2].

Pevné látky

Pevných látek se jako mazacího prostředku používá ve zvláště těžkých pracovních podmínkách, nejčastěji ve formě řezných past. Používá se např. sírník molybdeničitý, který je ve formě malých částic v řezném oleji (kterého je možné použít až do teploty 400 °C), nebo grafit rozptýlený v oleji nebo tuku. Obě tyto látky podporují vnik usazenin v nádržích a tak je jejich použití omezené. V současnosti se využívá řezných past, které jsou vodou rozpustné a vytváří účinný mazací film na čelní ploše nástroje i při velmi obtížných podmínkách obrábění [1, 2].

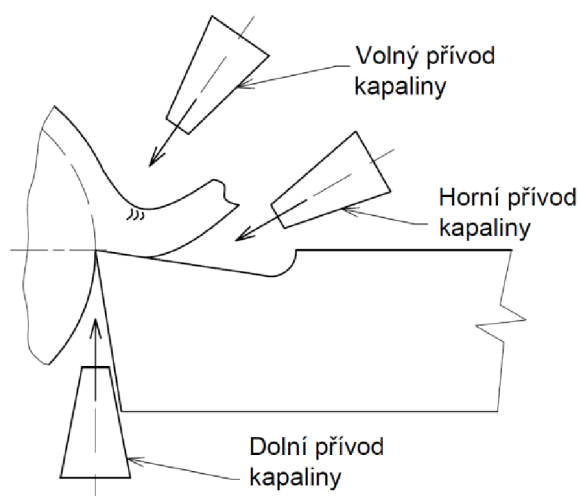
2 ZPŮSOB PŘÍVODU PROCESNÍ KAPALINY DO MÍSTA ŘEZU

Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu významně ovlivňuje parametry procesu řezání, zejména trvanlivost břitu nástroje a jakost obrobené plochy [1]. Pro plné využití chladicího účinku procesní kapaliny je zapotřebí vhodně zvolit způsob přívodu, aby se kapalina dostala k břitu nástroje. Nejlepšího mazacího účinku pro snížení tření se dosahuje při přívodu procesní kapaliny přímo za místo obrábění [11].

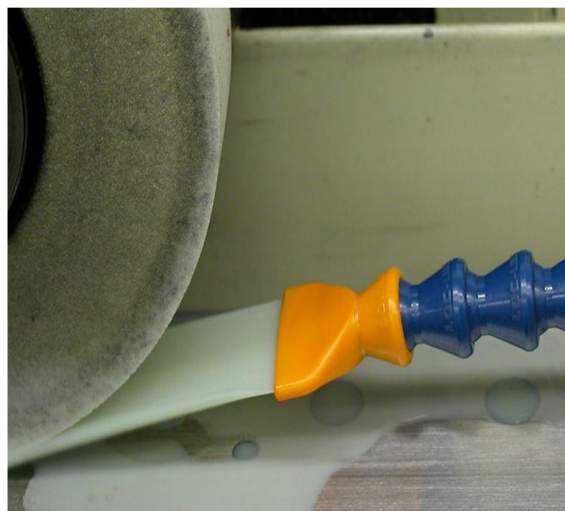
2.1 Konvenční přívod procesní kapaliny

Jedná se o nejběžnější princip přívodu kapaliny. Přívod procesní kapaliny nevyžaduje žádnou úpravu přívodního potrubí a vystačí se standardním zařízením, dodávaném výrobcem obráběcího stroje. Toto zařízení se skládá z nádrže na procesní kapalinu, čerpadla a rozvodového potrubí. Množství dodávané kapaliny se reguluje pomocí škrticího kohoutku, ventilem, nebo je dán typem čerpadla. Na obr. 10 jsou znázorněny varianty uspořádání výstupní trysky v ortogonální rovině [1, 2].

Pro přívod procesní kapaliny se využívá mnoho druhů hadic. Mohou být ocelové či plastové. Pro konvenční způsob přívodu kapaliny se nejčastěji používají plastové stavebnicové hadice, které umožňují přizpůsobit její délku a tvar. Zároveň je možné použití různých druhů trysek či rozvodů, které jsou využitelné v odlišných obráběcích operacích. Jedna z možností sestavení chladicí hadice je na obr. 11, kde je použita plochá tryska, která rozměrově odpovídá broušicímu kotouči [12].



Obr. 10 Varianty konvenčního přívodu procesní kapaliny při soustružení [1].

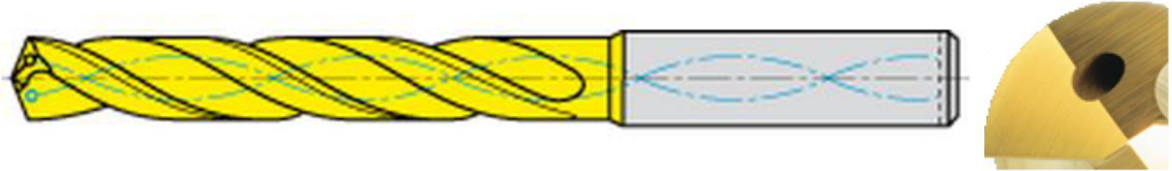


Obr. 11 Modulární hadice s plochou tryskou [13].

2.2 Vnitřní přívod procesní kapaliny

Použitím nástrojů, které umožňují vnitřní přívod procesní kapaliny, je možné zvýšení výkonu obrábění. Při soustružení je tato metoda vhodná pro nástroje s VBD ze slinutých karbidů. Tím je možné zvýšit řeznou rychlost o 5 až 25%. U vrtání jsou v těle nástroje vytvořeny otvory pro přívod kapaliny přímo do místa řezu. Mimo vrtáků s VBD je vnitřní přívod kapaliny používán i u běžných šroubovitých vrtáků vyrobených ze slinutých karbidů (obr. 12) nebo rychlořezné oceli. Ke zvýšení výkonu a lepšímu odvodu třísek je možné využít zvýšeného tlaku procesní kapaliny přiváděné do místa řezu

(běžně 6 - 8 MPa). Tohoto způsobu chlazení se s výhodou využívá při obrábění těžkoobrobitelných materiálů a při vrtání hlubokých děr [2, 14].

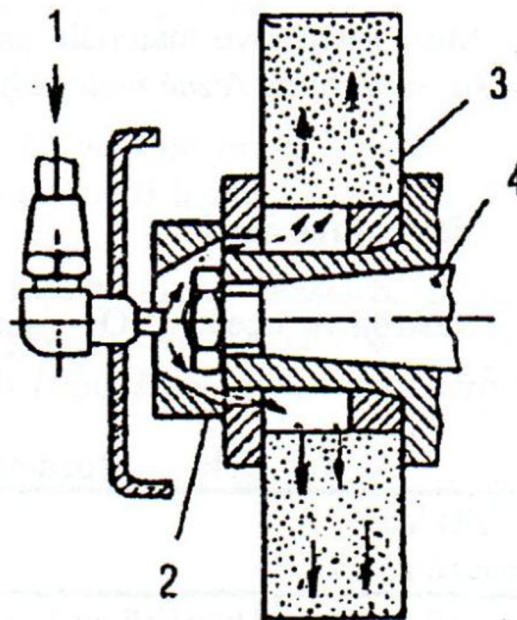


Obr. 12 Vrták s vnitřním přívodem procesní kapaliny od firmy Klenk [15].

Vnitřního chlazení se využívá i u brousicích kotoučů. Znárodnění vnitřního chlazení brousicího kotouče je na obr. 13. Procesní kapalina je přiváděna do příruby nástroje. Z příruby je kapalina odstředivou silou hnána přes póry brousicího kotouče až do místa řezu. Při tomto způsobu chlazení musí být zajištěno dokonalé čištění řezné kapaliny, aby nedocházelo k zanášení kotouče. Doporučuje se trojí filtrace: usazování, čištění běžným filtrem a čištění filtrem k odstranění mikročástic [14].

Při chlazení dvěma kapalinami je vnějškem přiváděna nejčastěji emulze a vnitřkem nástroje řezný olej [14].

Typy nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny jsou dopodrobna rozebrány v kapitole 4. Nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny.

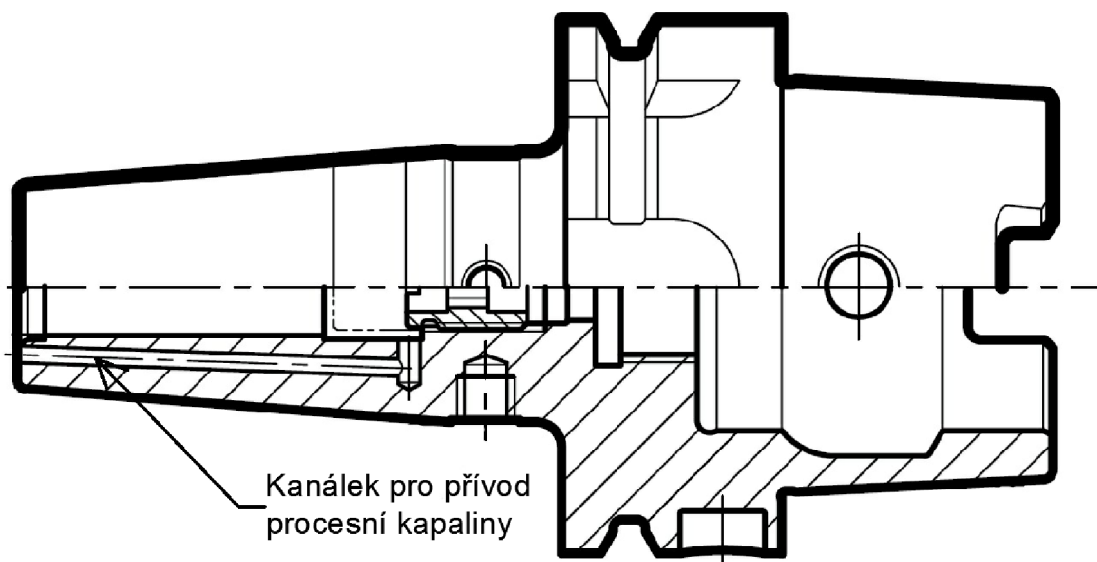


1 - přívod procesní kapaliny, 2 - příruba, 3 - brousicí kotouč, 4 - vřeten

Obr. 13 Vnitřní chlazení brousicího kotouče [1].

2.3 Periferní přívod procesní kapaliny

Dále se využívají nástrojové upínače, ve kterých jsou otvory pro periferní přívod procesní kapaliny. Jedním z takových upínačů je tepelný upínač od firmy Gühring (obr. 14, 15).



Obr. 14 Gührojety tepelný upínač HSK-A s periferním chlazením [16].



Obr. 15 Aplikace periferního chlazení při frézování [16].

3 FORMA PŘIVÁDĚNÉ PROCESNÍ KAPALINY

Kapalina může být do místa řezu přiváděna v různé formě. Kromě běžných teplot a tlaků je možné použití vysokých tlaků a nízkých teplot. Dále lze kapalinu rozprašit a přivádět ji do řezu ve formě aerosolu.

3.1 Vysokotlaké chlazení

Procesní kapalina je do řezu přiváděna pod vysokým tlakem (obr 16). Průměr výstupní trysky se pohybuje okolo 0,3 - 1,0 mm, tlak 3 - 20 MPa, výjimečně 100 MPa. Množství přiváděné kapaliny bývá 0,5 - 2,0 litru za minutu [2].

Každá běžná procesní kapalina se začne v důsledku vysokých teplot vznikajícím při obrábění, měnit v páru, která zabraňuje přísunu nové kapaliny. Ve většině případů obrábění s konvenčním chlazením není možné ideální nasměrování trysky. Tyto problémy mohou mít za následek poškození nástroje či obrobku. Jedním z řešení je správně aplikované vysokotlaké chlazení za použití vhodných nástrojů [17].

Při tomto způsobu chlazení je možné zvýšit produktivitu obrábění až o 59% a životnost nástroje 4 - 5 krát. [18]

Jednou z nevýhod tohoto způsobu je tvorba mlhy, která se tvoří při rozstříku kapaliny. To způsobuje znečišťování pracovního prostředí, proto musí být pracovní prostor uzavřený. Používá se i odsávacího zařízení, které vytváří v pracovním prostoru stroje podtlak a tím zabraňuje úniku par ze stroje [2, 17].

U vysokotlakého chlazení může být využito jak nástrojů s vnitřním přívodem, tak i standardních nástrojů s externím přívodem procesní kapaliny.



Obr. 16 Vysokotlaké chlazení soustružnického nástroje [19].



Obr. 17 Chipblaster JV40 [19].

Průtok procesní kapaliny

Vysokotlaké chlazení může být se stálým nebo proměnlivým průtokem. Množství přiváděné kapaliny je dán především velikostí nástroje. U zařízení, které poskytují stálý

průtok, musí být nastaven na největší nástroj používaný na obráběcím centru. Malý nebo velký průtok procesní kapaliny vede k přehřívání a degradaci kapaliny, jakož i ke zkrácení životnosti filtrů. Nevhodná je taktéž zapnutá procesní kapalina při přejezdech a výměně nástroje [19].

Systémy vybavené automatickou regulací průtoku kapaliny (obr. 17), dodávají pouze takové množství kapaliny, které je nutné pro udržení tlaku. Tato zařízení mají čidlo zpětného tlaku a frekvenční měnič, která automaticky stanoví objem kapaliny přiváděné do místa řezu [19].

3.2 Podchlazování procesní kapaliny

Pro zvýšení trvanlivosti nástroje je možné použití procesní kapaliny, která je podchlazena na teplotu nižší, než je teplota okolí. Běžné druhy procesních kapalin se při zachování mazacích vlastností podchlazují na teploty 5 až 7 °C, řezné oleje potom na 15 až 20 °C. Teplota podchlazení je omezena stálostí procesní kapaliny u emulzí a houstnutím u řezných olejů. Pro zvýšení výkonu obrábění je možné snížit teplotu kapaliny až pod bod mrazu, ale je nutné použít upravenou procesní kapalinu [2].

3.3 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení (obr. 18) se používá pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou slitiny titanu, niklu nebo duplexních ocelí. Způsobů, jak dosáhnout nízkých teplot řezného média je více. Nejčastěji se však používá kapalného dusíku (označován jako LN₂) nebo, jako levnější alternativa, CO₂. Kapalný dusík může být přiváděn např. tak, že jedna tryska směřuje na čelo nástroje před utvařecí třísky a druhá přímo na ostří. Nejeфекtivnějšího chlazení se dosahuje při současném chlazení nástroje i obrobku [11, 20, 21].



Obr. 18 Frézovací nástroj od firmy MAG [23].



Obr. 19 Nástroj s kanálky pro kryogenní chlazení od firmy Walter [24].

Při kryogenním chlazení se zvyšuje tvrdost nástroje, což má vliv na jeho životnost, která se zvýší až pětinasobně. Díky tvrdosti nástroje se snižuje opotřebení břitu a díky tomu se zlepšuje i drsnost obrobeného povrchu. [21]. Zkoušky broušení oceli diamantovým nástrojem, které byly provedeny při chlazení kapalným dusíkem, prokázaly, že se trvanlivost zvýšila asi desetkrát [22].

Výsledky ze zkoumání vlivu řezné síly na chlazení tekutým dusíkem se rozcházejí. U některých pokusů byl zjištěn nárůst řezné síly, což bylo odůvodňováno vyššími hodnotami pevnosti a tvrdosti obrobku za nižších teplot. U jiných experimentů došlo ke snížení řezné síly. Rozdíl ve výsledcích je pravděpodobně způsoben použitím různých materiálů a podmínek během experimentu [20].

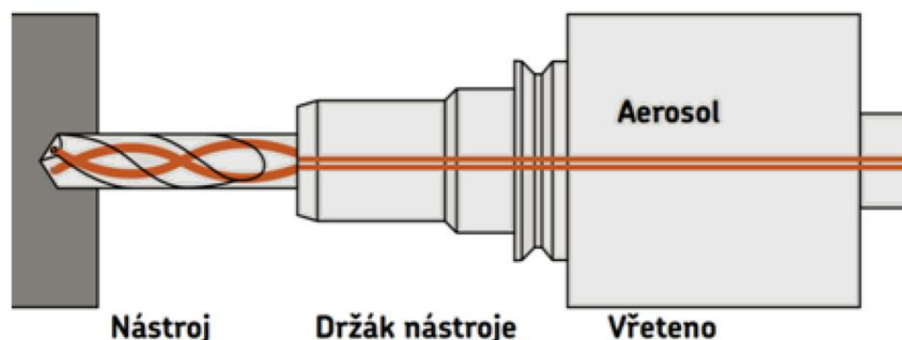
Při použití kapalného dusíku je nutné zajistit vhodný systém přívodů, izolované nádoby pro skladování a vakuem izolované hadice. Je nutné uzpůsobit jak rozvody uvnitř stroje i tak nástrojový systém [11].

Jedna z variant kombinovaného přívodu procesní kapaliny byla tento rok představena firmou Walter. Jedná se o nástroj s dvěma otvory (obr. 19) pro přívod řezného média. Jeden otvor je určen pro přívod CO_2 , druhý pro plyn, aerosol nebo emulzi. Firma Walter v současné době pracuje na tříkanálovém řešení, které umožní použít současně chlazení oxidem uhličitým, aerosolem a emulzí [24].

3.4 Přívod aerosolu

Částičky procesní kapaliny, které jsou rozptýleny v rozpínajícím se plynu, umožňují velmi dobrý odvod tepla z místa řezu. Touto metodou se dosahuje podstatného zvýšení výkonu a úspory procesní kapaliny [2].

Pro přívod aerosolu je možné využít nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny nebo externí trysky. Při mazání metodou MQL (minimálním množstvím maziva) odpadá potřeba filtrace použité procesní kapaliny, a zároveň není potřeba nákladné odstraňování kapaliny z třísek - výsledkem obrábění jsou téměř suché třísky. Dále odpadá čištění pracovního místa či obrobku. Pomocí této metody je možné zvýšit životnost nástroje až o 300%. [25, 26].

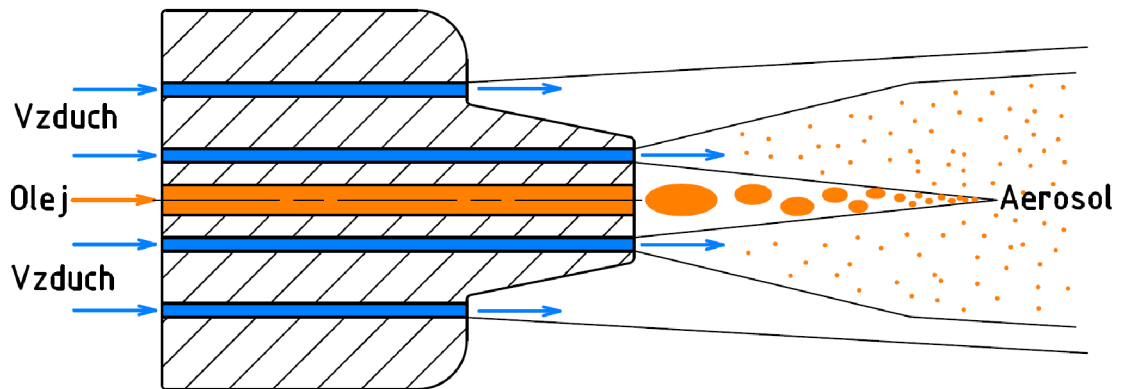


Obr. 20 Vnitřní přívod aerosolu [25].

Při aplikaci MQL s vnitřním přívodem procesní kapaliny je aerosol vytvářen v nádrži agregátu a dopravován skrz rotující vřeteno k nástroji (obr. 20) nebo je aerosol vytvářen přímo v upínači. Druhou možností přívodu aerosolu je pomocí externí trysky, která rozpráší odměřené množství maziva proudem stlačeného vzduchu, který vychází rychlostí až $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 21). Vznikají tak relativně velké kapky maziva, které jsou unášeny do místa řezu a nevytvářejí olejovou mlhu [2, 25].

Pro přístroje řady VM od firmy Semaco potřebují k provozu pouze přívod stlačeného vzduchu o tlaku 0,35 až 0,7 MPa [26].

Systemy MQL lze aplikovat téměř na každou technologii obrábění, jako soustružení, frézování, vrtání klasickými (spirálovými) vrtáky, vrtání dělovými vrtáky, řezání závitů, hoblování, řezání materiálu na kotoučových či pásových pilách [26].



Obr. 21 Schéma koaxiální trysky [25].

Přístroje pro MQL se skládají ze zásobníku oleje, regulačních prvků a rozvodu se směšovací prvkem. Na obr. 22 je znázorněna aplikace MQL zařízení při frézování od firmy Semaco tools and software. S ohledem na zvyšující se nároky na ochranu životního prostředí a rostoucí tlak na snižování výrobních nákladů, lze očekávat časté nasazení těchto zařízení v praxi [26].



Obr. 22 VM3 [26].

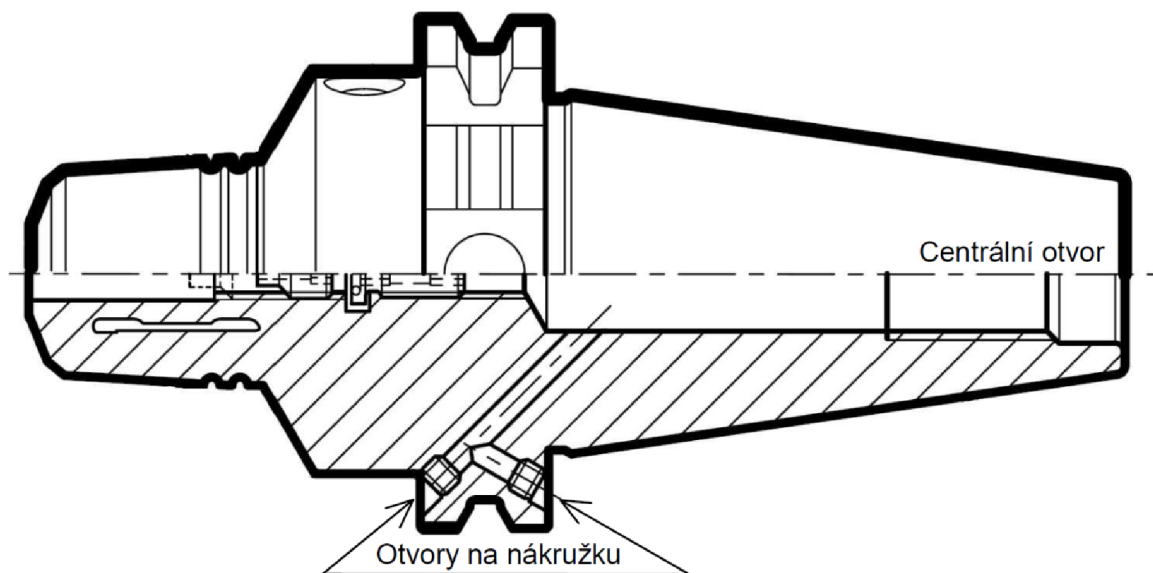
4 NÁSTROJE S VNITŘNÍM PŘÍVODEM PROCESNÍ KAPALINY

Moderní nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny jsou používány za účelem zefektivnění chlazení bříty nástroje a bezpečného odvodu třísek [11].

Rozčlenění nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny lze provést podle druhu výrobní operace. V této kapitole jsou zahrnuty nástroje pro vrtání (včetně závitníků a výstružníků), soustružení a frézování.

4.1 Upínání rotačních nástrojů

Kapalina je přiváděna skrze vřeteno přes upínač až do nástroje. Druhou variantou je přívod kapaliny přes nákrůžek upínače nástroje. Použitelný tlak procesní kapaliny je limitován výrobcem upínače. Konstrukční provedení upínačů je velice rozmanité.



Obr. 23 Hydraulický upínač HMC 3000 od firmy Gühring [16].

Upínače lze rozdělit podle provedení přívodu procesního média:

- typ A, typ E - u kuželu s dutou stopkou, umožňují centrální (axiální) přívod kapaliny pomocí trubičky,
 - u strmého kuželu není možný přívod procesní kapaliny (upínač není provrtaný),
- typ B - u strmého kuželu je možný přívod procesní kapaliny přes nákrůžek,
- typ AD - u strmého kužele je přívod kapaliny možný pouze centrálně upínačem,
- typ ADB - u strmého kužele je přívod procesní kapaliny středem upínače respektive stranově přes nákrůžek (obr. 23) [27].

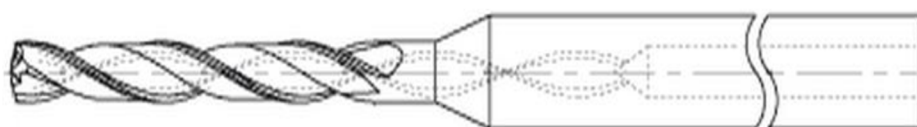
Upínače se strmým kuželem jsou např.: DIN 69871, DIN 2080, MAS BT JIS B 6339. Otvory na nákrůžku jsou vybaveny závity, na které je možno našroubovat zaslepovací šrouby.

4.2 Vrtací nástroje, závitníky a výstružníky

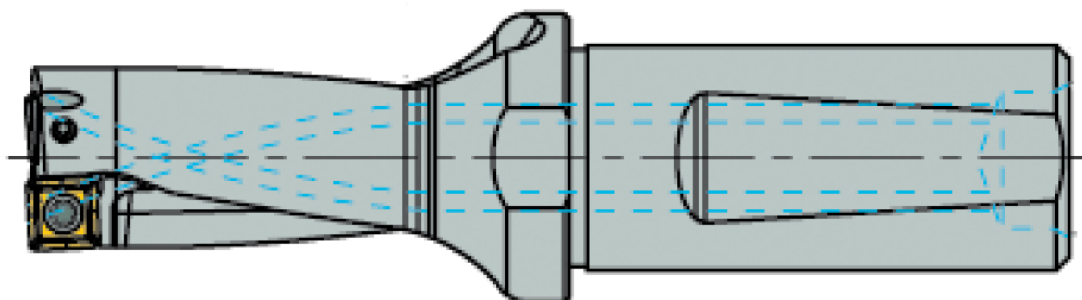
U vrtacích nástrojů se procesní kapaliny využívá pro jejich chladicí a především čistící účinek (lepší odvod třísek z místa řezu). Pomocí vrtáků s vnitřním přívodem procesní kapaliny je možná efektivní výroba děr různých parametrů [17].

Vstup kapaliny do nástroje

Vtok do nástroje je u vrtáků situován zpravidla na čele stopky nástroje. U monolitních vrtáků běžných rozměrů je vstup kapaliny řešen dvěma kanálky kruhového průřezu, které jsou vedeny přes celou délku nástroje (obr. 12). Jinak je tomu u speciálních mikrovrtáků, kde je vtok do nástroje situován jako jeden velký otvor na čele zesílené stopky nástroje (obr. 24). U klasických vrtáků s vyměnitelnými břitovými destičkami je vstupní otvor nejčastěji jeden (obr. 25), podobně jako je tomu u mikrovrtáků.



Obr. 24 Mikrovrták od firmy ZECHA [28].



Obr. 25 Vrták s VBD od firmy ISCAR [29].

Výstup kapaliny z nástroje

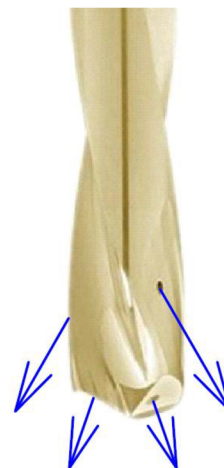
Rozměry kanálků v nástroji jsou dány především velikostí nástroje. Geometrie průřezu vnitřního kanálku pro přívod kapaliny bývá nejčastěji kruhová. Vyskytují se ale i nástroje s neobvyklou geometrií kanálku, jako jsou např. vrtáky s *TRI cooling technology* od firmy Mitsubishi. Tyto nástroje mají kanálky ve formě triangulárních otvorů (obr. 26), které mají příznivý vliv na proudění kapaliny.

U monolitních vrtáků jsou otvory pro vývod procesní kapaliny vytvořeny na hřbetě nástroje. U klasických vrtáků s vyměnitelnými břitovými destičkami jsou výstupní otvory nejčastěji vytvořeny na hřbetu těla nástroje. V případě, že má vrták vyměnitelnou celou hlavici, jsou výstupní otvory vyrobeny na vyměnitelné části nástroje. Vyskytují se i nástroje, které mají výstupní otvory situovány na jiné ploše než hřbetní. Jedním z takových nástrojů je vrták s vyměnitelnou vrtací hlavici CoroDrill 870 od firmy Sandvik, který má výtok umístěn na hranici hřbetu a obvodu nástroje. Výstupní otvory jsou obvykle dva (na

každý břit jeden), což neplatí pro některé moderní nástroje, jako je např. vrták od firmy Garant k vrtání hliníku (obr. 27), který má čtyři otvory (dva na hřbetě, dva na obvodě).



Obr. 26 Vrták s triangulárním kanálkem [30].



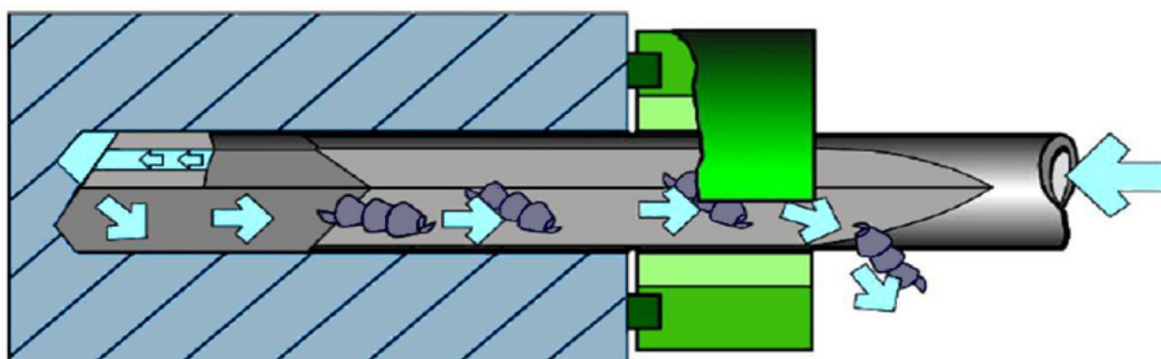
Obr. 27 Vrták se čtyřmi otvory [27].

Speciální vrtací nástroje

Jedná se o nástroje pro vrtání hlubokých děr a děr velkých průměrů. Pro vrtání těmito nástroji je zapotřebí speciálního přídavného zařízení [26].

Hlavňové vrtáky

Tyto nástroje se používají pro vrtání hlubokých děr menších průměrů [4]. Nástroj je připájen na trubku nebo tyč požadované délky. Řzná část může být tvořena připájenými břitovými destičkami. Středění vrtáku je zajištěno vodítky, která jsou taktéž připájeny k tělesu vrtáku. Čistící účinek (vyplavování vznikajících třísek) je zajištěn řznou kapalinou, která je přiváděna do místa řezu otvory v tělese vrtáku (obr. 28) [31].

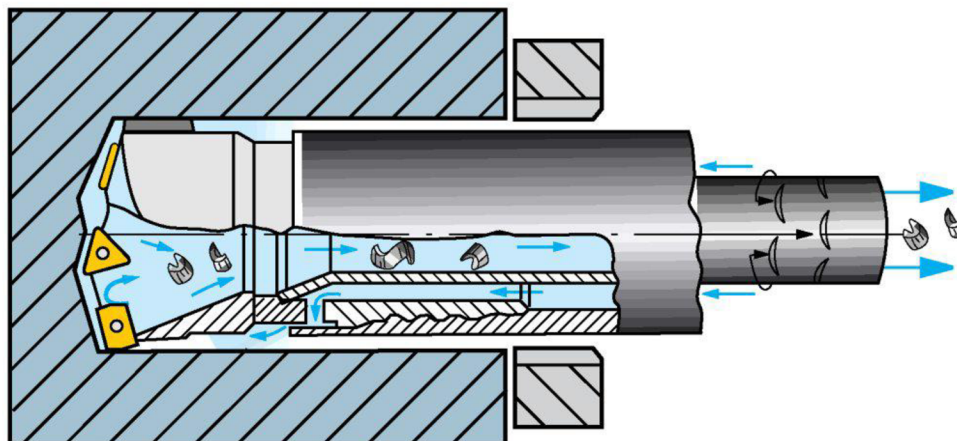


Obr. 28 Vyplavování třísek při vrtání hlavňovým vrtákem [31].

Ejektorové vrtáky

Ejektorové vrtáky se používají pro vrtání děr vyráběných v meších sériích [4]. Skládají se z vrtací hlavice, která je našroubovaná do vrtací trubky. Pomocí těchto vrtáku lze vrtat díry o průměru 20 až 60 mm. Při horizontálním vrtání lze dosáhnout hloubky až $100 \times D$, při vertikálním vrtání potom $50 \times D$. Procesní kapalina je do místa řezu přiváděna mezikružím

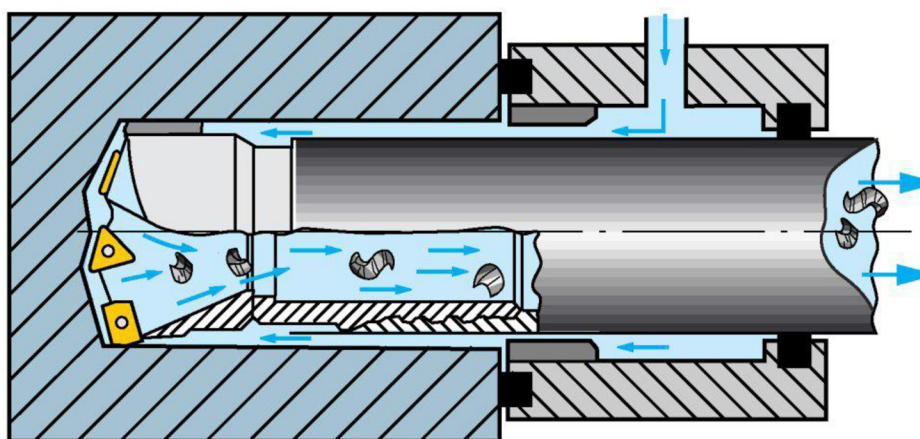
mezi vnější a vnitřní trubicí, kde její malé množství, odcházející štěrbinami v zadní části vnitřní trubky, způsobuje ejektorový efekt (nasávání kapaliny směrem od břitů vrtáku a strhávání vznikajících třísek) Princip proudění kapaliny je znázorněn na obr. 29 [31].



Obr. 29 Princip proudění řezné kapaliny při ejektorovém vrtání [31].

BTA a STS vrtáky

S těmito vrtáky je možné vrtat do plného materiálu, předvrtané díry i metodou „na jádro“. V porovnání s ejektorovými vrtáky je lze použít pro větší rozsahy vrtaných průměrů. Vrtací hlavice pro vrtání do plného materiálu jsou vyráběny až do průměru 180 mm, a hlavice pro vrtání „na jádro“ v rozsahu 120 až 300 mm. Procesní kapalina je přiváděna mezerou mezi stěnou vrtané díry a trubicí vrtáku (obr 30). Jedná se tedy o nástroje s vnějším přívodem a vnitřním odvodem procesní kapaliny [31].



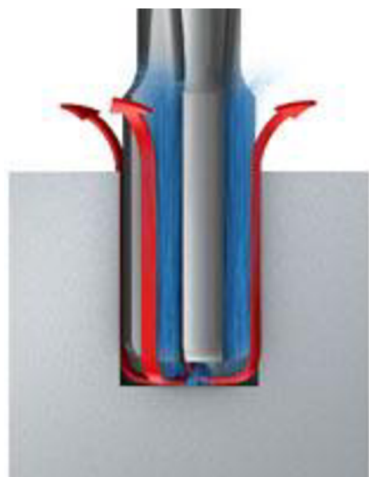
Obr. 30 Princip proudění řezné kapaliny při BTA a STS vrtání [31].

Nástroje pro vystružování a výrobu závitů

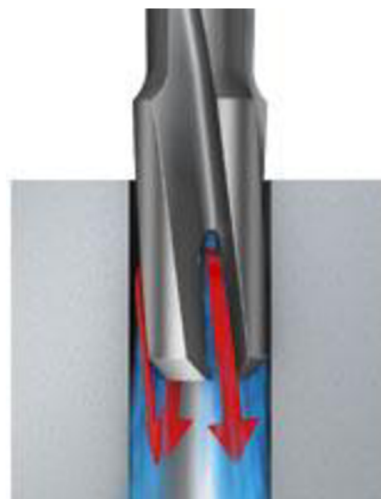
Do vyvrtaného otvoru vrtacím nástrojem je možné následně vyrobít závit závitníkem nebo otvor vystružit výstružníkem. Pro tyto operace je možné použití nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny. Vnitřní přívod kapaliny u výstružníků zlepšuje odvod třísek a

snižuje velikost opotřebení nástroje. Závitníky i výstružníky s vnitřním přívodem jsou vybaveny centrálním kanálkem s výstupem na čele nástroje nebo s výstupy radiálními [32].

U výstružníku nebo závitníku jsou kanálky pro přívod kapaliny situované podle typu vystružované díry. Nástroje pro slepé díry mají výstupní kanálek na čele nástroje (obr. 31). Nástroje pro průchozí díry mají díry v drážce (obr. 32) [32].



Obr. 31 Výstružník – slepá díra [32].



Obr. 32 Výstružník – průchozí díra [32].

Názorná ukázka závitníku s vnitřním přívodem kapaliny je na obr. 33. Jedná se o nástroj pro výrobu metrických závitů pro slepé i průchozí díry od firmy Gühring. Rozsah vyráběných rozměrů je M4 až M10 [33].



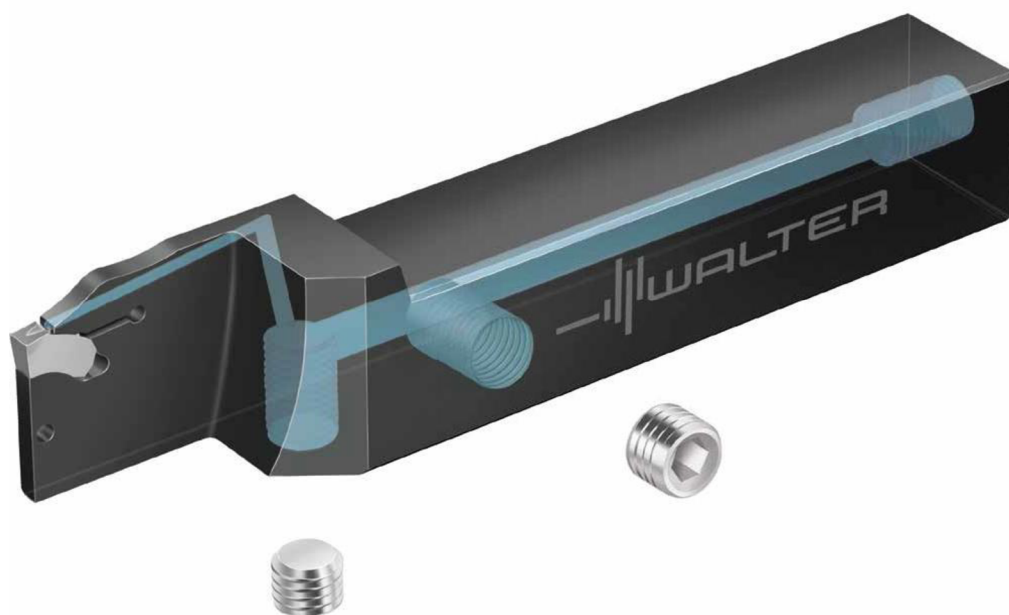
Obr. 33 Závitník s vnitřním přívodem procesní kapaliny [33].

4.3 Soustružnické nástroje

Soustružnické nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny jsou s výhodou využívány při náročných výrobních operacích, jako je např. zapichování a upichování, kde je špatný přístup do místa řezu (ze stran je přístup blokován obrobkem, shora odvíjející se třískou, ze spodu pak břitovou destičkou) [11]. V některých případech má procesní kapalina přiváděná vnitřkem nástroje pod vysokým tlakem (nad 8 MPa) kromě chladičího (mazacího) a čistícího účinku i schopnost drobit třísku na menší části [4, 34].

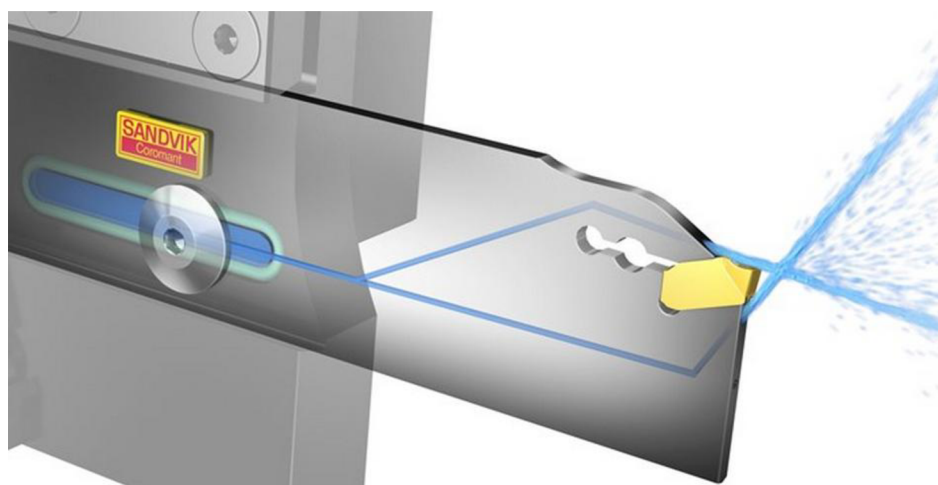
Vstup procesní kapaliny do nástroje

Vtokový otvor pro přívod kapaliny je nejčastěji umístěn na upínací části (z boku, na zadní ploše nebo zespodu). Na obr. 34 je znázorněn zapichovací nůž od firmy Walter, u kterého je možná volba otvoru pro přívod procesní kapaliny. Na každém vstupním otvoru je vytvořen závit, který slouží pro našroubování hadice pro přívod kapaliny respektive našroubování zaslepovacích šroubů na nepoužívané otvory.



Obr. 34 Walter Cut SX G2012 [35].

Umístění vtokových otvorů se může lišit podle konstrukce nástroje. Jako příklad takového nástroje je uveden upichovací nůž od firmy Sandvik Coromant - CoroCut QD (obr. 35), který se skládá ze dvou částí (nástrojový blok ve kterém je upnuta planžeta).



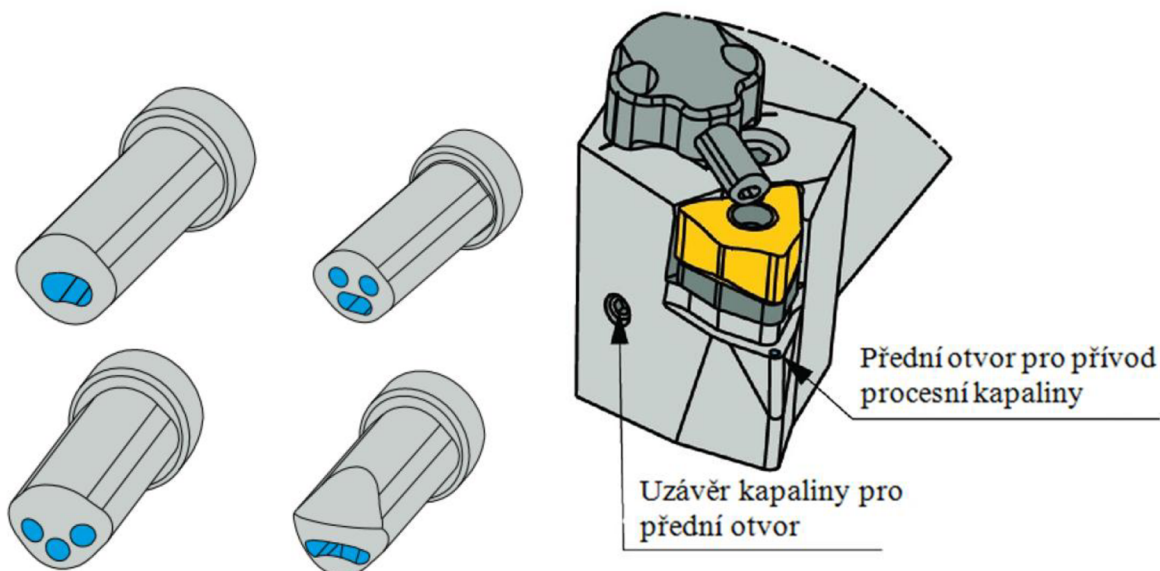
Obr. 35 CoroCut QD [32].

V nástrojovém bloku je vytvořena drážka pro vložení O - kroužku. Při smontování planžety a nástrojového bloku vznikne kapsa pro procesní kapalinu. Na boku planžety je vytvořen otvor pro vstup procesní kapaliny do nástroje.

Výstup procesní kapaliny z nástroje

Výstupní otvory pro přívod kapaliny do místa řezu jsou na nástroji ve formě *trysek* (pevné, stavitelné) nebo *otvorů* (na těle nástroje, ve VBD). Výtokové otvory jsou zpravidla vytvořeny tak aby paprsek procesní kapaliny směřoval do blízkosti řezné hrany nástroje podél čelní nebo hřbetní plochy.

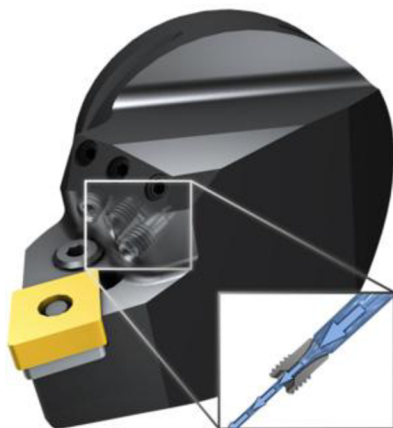
Na obr. 36 jsou znázorněny některé ze *stavitelných trysek* nabízené firmou ISCAR, které jsou použitelné do tlaků 30 MPa. Stavitelná tryska se volí s ohledem na použitou VBD a požadovaný průtok procesní kapaliny. Aplikace trysky je potom na obr. 37, kde je současně znázorněn jednoduchý otvor na těle nástroje a jeho uzávěr [23].



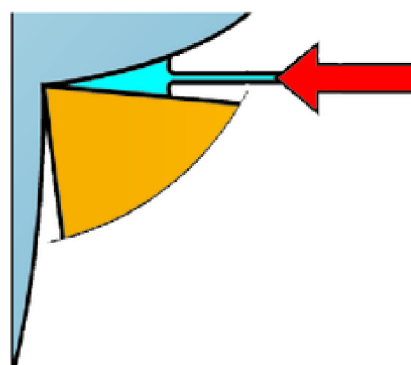
Obr. 36 Stavitelné trysky - ISCAR [36].

Obr. 37 Soustružnický nůž - ISCAR [36].

Pro přesný přívod procesní kapaliny do místa řezu se využívá *fixních (pevných) trysek*. Jedním z takových typů nástrojů je CoroTurn HP (obr. 38) od firmy Sandvik Coromant.



Obr. 38 CoroTurn HP [32].



Obr. 39 Hydraulický klín [32].

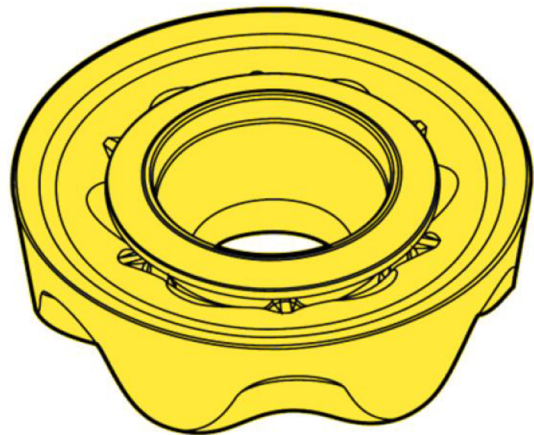
Tento nástroj využívá procesní kapaliny o vysokém tlaku, díky kterému vzniká mezi povrchem čela VBD a spodní stranou třísky hydraulický klín, který vytlačuje třísku z povrchu čela (obr. 39). Zároveň se dosahuje přidavného ohybového namáhání, které pomáhá utvářet třísku. Princip soustružení s vysokotlakým přívodem procesní kapaliny spočívá v přesné fokusaci proudu řezné kapaliny pomocí trysek (o průměru 1 mm) a vytvoření dokonale paralelního laminární proudění procesní kapaliny [32, 34].

Jednoduché výstupní *otvory* jsou použity např. u nástroje CoroCut QD (obr. 40), který má přívod procesní kapaliny na čelo i na hřbet VBD. Jak u CoroCut QD tak u CoroTurn HP je nutné použití speciálních VBD s upraveným čelem pro přívod procesní kapaliny.

Dále se používají nástroje, u kterých je procesní kapalina přiváděna přímo skrze VBD. Touto problematikou se zabývá např. firma Kennametal, která nabízí nástroje s technologií přesného chlazení skrze břitovou destičku (obr. 41). Chladicí kapalina je dopravována přímo mezi řeznou hranu a obrobek, čímž chrání obě strany [37].



Obr. 40 CoroCut QD - detail na VBD [32].



Obr. 41 Vyměnitelná břitová destička od firmy Kennametal [37].

4.4 Frézovací nástroje

Při frézování s chlazením procesní kapalinou dochází k teplotním šokům, které mají negativní vliv na trvanlivost nástroje [17].

Ve většině případů frézování se nedoporučuje používání procesní kapaliny. Výjimku tvoří např.:

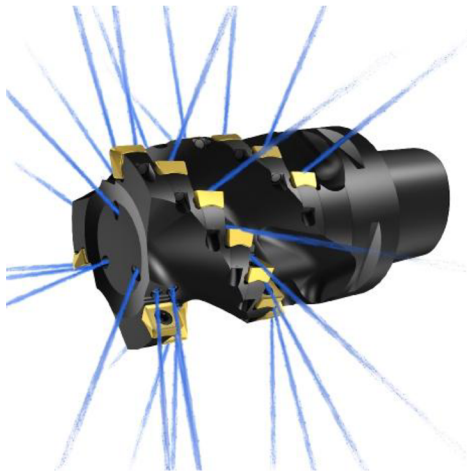
- dokončovací operace při obrábění oceli a hliníku
- frézování žáruvzdorných slitin při nízkých řezných rychlostech
- frézování litin
- frézování tenkostěnných součástí [4].

Kanálky pro přívod procesní kapaliny mohou být využity i pro přívod olejové mlhy, která zlepšuje odvod třísek z hlubokých dutin [4].

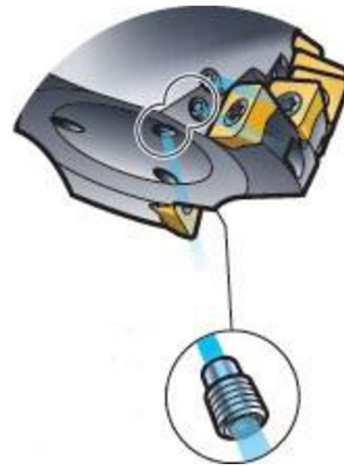
Upínání frézy je řešeno stejně jako u vrtacích nástrojů. Stejně tak vstupní otvor pro přívod procesní kapaliny do nástroje. Výstupní otvory jsou umístěny tak, aby paprsek kapaliny směřoval na čelo břitu nástroje respektive VBD. Další pak mohou být na čele frézy. Pro přívod kapaliny do místa řezu se využívá otvorů (v těle nástroje, ve VBD) nebo pevných trysek.

Jedním z frézovacích nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny je CoroMill 690 (obr. 42) od firmy Sandvik Coromant, který je určen pro vysoce produktivní frézování slitin titanu. V otvorech pro přívod kapaliny jsou vytvořeny závity, které slouží pro našroubování pevných trysek (obr. 43). Vzhledem k celkově širokému záběru ostří a

velkému počtu výstupních otvorů je zapotřebí použít čerpadlo, které dokáže vyvinout potřebný tlak [32].

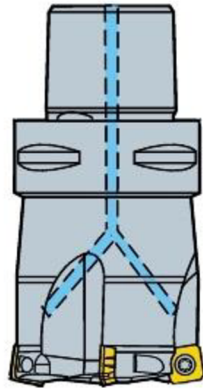


Obr. 42 CoroMill 690 [32].

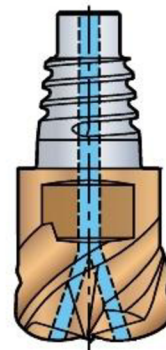


Obr. 43 CoroMill 690 - detail [32].

Další frézovací nástroje od firmy Sandvik Coromant jsou na obr. 44 a 45. První z nich je CoroMill 210, který je určen pro hrubování s velkým vyložení nástroje. Na druhém obrázku je jedna z mnoha vyměnitelných frézovacích hlavic pro čelní frézování ze systému CoroMill 316, která umožňuje vnitřní přívod procesní kapaliny.

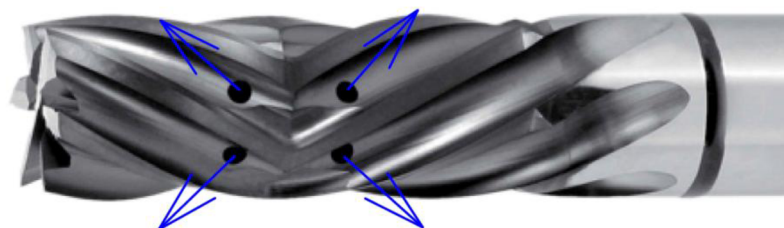


Obr. 44 CoroMill 210 [32].



Obr. 45 Vyměnitelná frézovací hlavice [32].

Kromě nástrojů s VBD a vyměnitelnými hlavicemi jsou k dispozici i monolitní nástroje ze slinutých karbidů. Jedním z nich je fréza s protiběžnými břity od firmy Garant (obr. 46). Chladicí kanálky jsou umístěny tak aby rovnoměrně rozdělovali procesní kapalinu [27].



Obr. 46 Fréza s protiběžnými břity [27].



Mezi novinky patří např. již zmíněný frézovací nástroj od firmy Walter (obr. 19, strana 21) který umožňuje kombinovaný přívod procesního média. Firma Kennametal nabízí kromě soustružnických nožů i frézovací nástroje, u kterých je možné použít VBD s otvorem pro přívodem procesní kapaliny.

4.5 Porovnání cen nástrojů



Pro porovnání cen nástrojů s a bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny, jsou zvoleny od každé skupiny (vrtání, soustružení, frézování) dva nástroje ze stejného materiálu a se stejnou geometrií. Ceny nástrojů jsou převzaty z katalogu společnosti Hoffman pro rok 2012/2013.

V tab. 2 a 3 je uvedeno porovnání cen monolitních vrtáků ze slinutých karbidů od firmy Horex a Garant. V tab. 4 je uvedeno porovnání cen těl soustružnických nožů od firmy Garant a v tab. 5 potom porovnání cen fréz.



Tab. 2 Vrtáky od firmy Horex [27].

| Vrták bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak TiN | | Vrták s kanálky pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak TiN | |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|  | |  | |
| Průměr (h7): | ø15 mm | Průměr (h7): | ø15 mm |
| Cena: | 1736 Kč | Cena: | 2828 Kč |



Tab. 3 Vrtáky od firmy Garant [27].

| Vrták bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak TiAlN | | Vrták s kanálky pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak TiAlN | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|  | |  | |
| Průměr (h7): | ø15 mm | Průměr (h7): | ø15 mm |
| Cena: | 2856 Kč | Cena: | 4900 Kč |

Tab. 4 Soustružnické nože od firmy Garant [27].

| Tělo soustružnického nože bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny | | Tělo soustružnického nože s kanálky pro vnitřní přívod procesní kapaliny | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|  | |  | |
| Označení: | PCLNR/L 2020X12 | Velikost stopky/VBD: | PCLNR/L2020K12 |
| Cena: | 1702 Kč | Cena: | 4060 Kč |

Tab. 5 Frézy od firmy Garant pro frézování neželezných kovů [27].

| Hrubovací stopková fréza bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak ZrN | | Hrubovací stopková fréza s kanálky pro vnitřní přívod procesní kapaliny - povlak ZrN | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|  | |  | |
| Průměr (f8): | ø16 mm | Průměr (f8): | ø16 mm |
| Cena: | 5628 Kč | Cena: | 6188 Kč |

Cenový rozdíl nástrojů s a bez kanálků pro vnitřní přívod procesní kapaliny, je v řádech tisíců nebo stovek Kč. Nástroje s vnitřním přívodem jsou nákladnější.

ZÁVĚR

Požadavky na procesní kapaliny se liší podle druhu obráběcí technologie. Procesní kapaliny se dají zjednodušeně rozdělit na kapaliny s převažujícím chladicím nebo mazacím účinkem. Převažující chladicí účinek se vyskytuje např. u vodných roztoků a emulzí, mazací účinek potom u řezných olejů. Správnou volbou řezné kapaliny lze dosáhnout lepší drsnosti obrobeného povrchu, rozměrové přesnosti, poklesu celkově spotřebované elektrické energie, snížení hlučnosti obrábění, snížení opotřebení nástrojů a obráběcích strojů.

Značný vliv na využití vlastností procesních kapalin má způsob jejich přívodu do místa řezu. V dnešní době jsou tři způsoby přívodu kapaliny. Prvním z nich je konvenční způsob přívodu, který je běžně používán na starších strojích, kdy je kapalina přiváděna prostřednictvím hadice a trysky do místa řezu. Druhým a mnohem účinnějším způsobem je vnitřní přívod kapaliny skrze nástroj. Pro tuto metodu je zapotřebí nástrojů s vnitřním přívodem kapaliny, novějšího stroje, který umožňuje vnitřní přívod kapaliny nebo upínače nástroje, který je k tomu uzpůsobený. Tohoto způsobu se s výhodou využívá při obrábění těžkoobrobitelných materiálů a při vrtání hlubokých děr. Posledním způsobem je periferní přívod procesní kapaliny, kdy je kapalina přiváděna skrze nástrojový upínač, který má na čelní ploše výstupní otvory pro přívod kapaliny do místa řezu.

Kapalina může být do místa řezu přiváděna v různé formě. Kromě běžných teplot a tlaků se používá zvýšeného tlaku a nízkých teplot. Dále lze kapalinu rozprašit a přivádět ji do řezu ve formě aerosolu.

Při vysokotlakém chlazení je procesní kapalina přiváděna pod tlakem 3 – 20 MPa (výjimečně až 100 MPa) tryskou o průměru 0,3 – 1,0 mm. Touto metodou se dosahuje vysoce produktivního obrábění, a zároveň se zvyšuje trvanlivost nástroje (4 - 5 krát). Pro provoz vysokotlakého chlazení je zapotřebí vysokotlaké čerpadlo, nejlépe s automatickou regulací průtoku. V případě vnitřního přívodu kapaliny je nutné použít nástroje a upínače k tomu určené. Jednou z nevýhod je tvorba mlhy, která se tvoří při rozstříku kapaliny a způsobuje znečištění pracovního prostředí. Proto musí být pracovní prostor uzavřený a zajištěné odsávání.

Kapaliny s teplotou nižší než je teplota okolí (5 - 20 °C) jsou používány pro zvýšení výkonu obrábění. Hodnota teploty se liší podle druhu kapaliny.

Kryogenní chlazení je poměrně nová metoda chlazení, kde se jako procesního média nejčastěji využívá kapalného dusíku (-196 °C) nebo CO₂ (-78 °C). Kryogenní chlazení se používá především pro obrábění slitin titanu, niklu nebo duplexních ocelí, kde vysoké termické zatížení vede k rychlému opotřebení břitu nástroje. Trvanlivost nástroje se zvýší až pětinašobně a díky tvrdosti nástroje se zlepší i drsnost obrobeného povrchu. Při broušení diamantovým nástrojem je možné trvanlivost zvýšit až desetkrát. K provozu kryogenního chlazení je zapotřebí speciálního vybavení, proto je tato metoda poměrně nákladná.

Přívodem aerosolu se oproti ostatním formám kapalin dosahuje značné úspory procesní kapaliny. Zvláště pak při mazání metodou MQL (minimální množství mazání). Díky velice malému množství kapaliny přiváděné do místa řezu odpadá nutnost hospodaření s řeznou kapalinou v odpadu (sušení třísek). Pomocí této metody je možné zvýšit životnost nástroje až trojnásobně.

Nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny jsou používány jak pro přívod kapalin, tak pro přívod aerosolu. Přívod procesní kapaliny do soustružnického nástroje je řešen hadicí,

která je připojena do těla nástroje respektive do adaptéru, ve kterém je upnut nástroj, nebo je kapalina přiváděna přímo do upínače nástroje. U rotačních nástrojů je procesní kapalina přiváděna skrze vřeteno, přes centrální otvor v upínači nástroje až k nástroji. Druhou možností je, vést kapalinu skrze otvory na nákrůžku upínače.

Vrtáky s vnitřním přívodem jsou využívány především pro vrtání hlubokých děr a děr velkých průměrů. Procesní kapaliny se při vrtání využívá pro jejich chladicí a především čistící účinek (lepší odvod třísek z místa řezu). Výstupní otvory jsou nejčastěji dva na hřbetě nástroje.

Soustružnické nástroje s vnitřním přívodem kapaliny jsou s výhodou využívány při náročných výrobních operacích, jako je např. zapichování a upichování, kde je špatný přístup do místa řezu (ze stran je přístup blokován obrobkem, shora odvíjející se třískou, ze spodu pak břitovou destičkou). V některých případech má kapalina přiváděná vnitřkem nástroje pod vysokým tlakem (nad 8 MPa) kromě chladicího (mazacího) a čistícího účinku i schopnost drobit třísku na menší části. Výstupní otvory na soustružnických nástrojích jsou ve formě jednoduchých otvorů (na těle nástroje, ve VBD) nebo trysek (pevných, stavitelných).

Při frézování se ve většině případů nedoporučuje používání procesní kapaliny. Výjimku tvoří např. dokončovací operace nebo frézování žáruvzdorných litin. V takových případech je vhodné použití nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny. Při frézování hlubokých dutin se využívá čistícího účinku procesního média.

Nástroje s kanálky jsou nákladnější než ty bez kanálků. Cenový rozdíl je v řádech tisíců Kč. V některých případech není cenový rozdíl tak markantní a jedná se jen o stovky Kč. Při využití nástrojů s vnitřním přívodem jsou kromě nákladů na nástroje i náklady na vybavení stroje. Zvláště pak v případě vysokotlakého nebo kryogenního chlazení.

Při budoucím vývoji nástrojů s vnitřním přívodem procesní kapaliny se lze zaměřit na nástroje s kombinovaným přívodem procesního média, které jsou využitelné při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. U těchto nástrojů je možné přivádět současně např. kapalný dusík a aerosol.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
4. SANDVIK COROMANT. *Znalosti a zkušenosti* [online]. 2014 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/pages/default.aspx>
5. BARTOVSKÁ, Lída a Marie ŠIŠKOVÁ. VŠCHT V PRAZE. *Co je co v povrchové a koloidní chemii: výkladový slovník* [online]. 2005 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/
6. ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2037-5.
7. PŘIKRYL, Zdeněk. *Teorie obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 227 s. Učební texty vysokých škol (ČVUT v Praze).
8. Industrial & Marine Lubricants. *Konkan Technikal Supplies Co.* [online]. 2013 [vid. 2014-04-09]. Dostupné z: www.indiamart.com/konkan/industrial-marine-lubricants.html#organic-coolants.
9. Cutting Coolants And Oils. *Ashok Industry* [online]. 2013 [vid. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.metaltreatmentchemical.com/cutting-coolants-oils.html#synthetic-cutting-coolant>.
10. BŘEZOVJÁK, Josef. Moderní řezné oleje na bázi hydrokrakových molekul. CASTROL LUBRICANTS. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [vid. 2014-04-16]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-rezne-oleje-na-bazi-hydrokrakovych-molekul.html>
11. DVOŘÁK, Luděk. Rozhodující je použití efektivního chlazení. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [vid. 2014-04-11]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: www.mmspektrum.com/clanek/rozhodujici-je-pouziti-efektivniho-chlazení.html
12. LOC - LINE FLEXI: Hadice pro chladicí kapaliny. *CHARVÁT Group s.r.o* [online]. 2012 [vid. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.charvat-chs.cz/sortiment/>
13. Applications. LOCKWOOD PRODUCTS. *LOC-LINE: The original modular hose system* [online]. 2012 [vid. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.loc-line.com/applications.html>
14. KOČMAN, Karel. *Aktuální příručka pro technický úsek: Svazek 7. Obrábění*. Praha: Dashöfer, 2001, Přer.str. ISBN 80-902-2472-5.
15. Products. *Klenk GmbH & Co. KG* [online]. 2000 [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: www.klenk-tools.de/produkte-katalog-uebersicht.php?gruppe=wegatin&lang=en

16. GÜHRING. *GM 300: Toolholders, clamping systems and accessories*. 2012. [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: www.guhring.com/Documents/Catalog/Toolholders/GM300.pdf
17. Jak zvolit správné chlazení pro obráběcí stroj. *Technology - support* [online]. 2008 [vid. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.t-support.cz/t-support/index.php?rubrika=1150>
18. 8308 Manifold case study. *ChipBlaster* [online]. [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: www.chipblaster.com/8308-manifold-study
19. Přínosy vysokotlakého chlazení při třískovém obrábění. ANTOUN, Gregory S. a Milan HNÍDEK. TECHNOLOGY-SUPPORT. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [vid. 2014-04-18]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: www.mmspektrum.com/clanek/prinosy-vysokotlakeho-chlazení-pri-triskovem-obrabení.html
20. Kryogenní chlazení při obrábění. VODIČKA, Jan. *INInet: Kolaborativní platforma pro inovační inženýrství* [online]. 2011 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: http://vyuka.pslib.cz/ininet/index.php?option=com_content&view=article&id=44:kryogenni-chlazení-pri-obrabení&catid=7:clanky&Itemid=14
21. MM Průmyslové spektrum. *EMO Hannover 2011 - Part 2. MM Award - ocenění pro nejlepší exponáty* [online]. 2011, č. 11 [vid. 2014-05-12]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/walter-predstavil-na-emo-kryogenni-chlazení/>
22. Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata. BUMBÁLEK, Bohumil. *Fakulta strojního inženýrství: VUT v Brně* [online]. 2004 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/vys.presne.met.obr.pdf>
23. MAG: Cryogenic machining. *MAG* [online]. 2012 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.mag-ias.com/fileadmin/user_upload/Mag_One/technologies/cryogenics/ID1431/120820_Cryogenics_Brochure_US_Low.pdf
24. Walter představil na veletrhu EMO kryogenní chlazení. PAGÁČ, Marek. *Průmysl.cz* [online]. 2013 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/walter-predstavil-na-emo-kryogenni-chlazení/>
25. Přehled výrobků pro průmyslové aplikace: Centrální mazací systémy pro stroje a strojní zařízení. *TPB: Ložiska těsnění, řetězy* [online]. [vid. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.tpb.cz/editor/filestore/File/SKF%20-%20Vogel.pdf>
26. Kdo maže, ten jede!. JANOŠEK, Vladimír. *SK TECHNIK. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [vid. 2014-04-19]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kdo-maze-ten-jede.html>
27. *Hoffman Group: The Quality Company* [Katalog]. 2012, 1520 s.
28. 635 Solid carbide micro drill with inner coolant supply. *ZECHA* [online]. 2012 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://zecha.de/en/zerspanungswerkzeuge/bohrer/179-635-solid-carbide-micro-drill-8xd-with-inner-coolant-supply>
29. DR-TWIST: Indexable drill line. *ISCAR cutting tools* [online]. 2014 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=1898&mapp=DR&app=77&GFSTYP=M>

30. MMS Drill Unique through coolant drill for stainless steel. MITSUBISHI. *Mitsubishi Materials* [online]. 2010 [vid. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/EU/West/whatsnew/2010/mms_drill.html
31. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie Obrábění*. 2004, 95 s. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
32. SANDVIK COROMANT. *Products* [online]. 2014 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/default.aspx>
33. GÜHRING. *Superline* [online]. 2010 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: www.guhring.co.uk/downloads/SuperLine%207th%20Edition%20Catalogue.pdf
34. MM Průmyslové spektrum. *Kvalita a bezpečnost na prvním místě* [online]. 2014, č. 3 [vid. 2014-05-12]. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kvalita-a-bezpecnost-na-prvnim-miste.html>
35. *Walter: Product inovations* [Katalog]. 2014 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/product-innovations-en.pdf>
36. ISCAR. *New products: Catalog*. 2013 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: http://www.iscar.com/Catalogs/zip/IQ_Catalog/IQ_NEW_Products.pdf
37. KENNAMETAL. *Beyond BLAST: První břitové destičky s vnitřním rozvodem chlazení od Kennametalu*. 2011 [vid. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.trigon.sk/wp-content/uploads/Sustruzenie-Inovacie-2012.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|------------|----------|----------------------------------------------------------|
| EP | [-] | extreme pressure additives (vysokotlaké přísady) |
| MLQ | [-] | minimum quantity lubrication (minimální množství mazání) |
| VBD | [-] | vyměnitelná břitová destička |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| C_D | [-] | účinnost trysky |
| d | [m] | průměr trysky |
| g | [m · s ⁻²] | tíhové zrychlení |
| n | [ks] | počet trysek |
| p | [Pa] | tlak tekutiny |
| S₁ | [m ²] | plocha průřezu vstupní trubky |
| S₂ | [m ²] | plocha průřezu výstupní trubky |
| v | [m · s ⁻¹] | rychlost proudění |
| v₁ | [m · s ⁻¹] | vstupní rychlost proudění |
| v₂ | [m · s ⁻¹] | výstupní rychlost proudění |
| v_{max} | [m · s ⁻¹] | maximální rychlost proudění |
| v_s | [m · s ⁻¹] | střední rychlost proudění |
| Δt | [s] | časový interval |
| ΔV | [m ³] | objem tekutiny |
| θ | [°] | smáčecí úhel |
| ρ | [kg · m ⁻³] | hustota |
| Ω | [rad · s ⁻¹] | úhlová rychlost |
| v' | [m · s ⁻¹] | flukтуаční rychlost |
| R_T | [m ³ · s ⁻¹] | objemový tok trysky |

