

Technologie obrábění

Pavel Zeman

Abstrakt:

V třískovém obrábění jsou současnými nejvýraznějšími trendy především suché, resp. málo mazané obrábění, obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů a obrábění vysokými rychlostmi (řeznými i posuvovými). Tyto technologie mají společný směr dalšího vývoje ve vztahu k maximalizaci odebíraného objemu za jednotkový čas, minimalizaci výrobních nákladů nebo snižování ekologických zátěží životního prostředí. Neustálý pokrok a aplikace nových přístupů a metod při řešení konkrétních technologických zadání jsou dány především vývojem v oblastech řezných nástrojů, obráběcích strojů a softwarů pro tvorbu NC programů. Tyto oblasti pak také tvoří hlavní omezující podmínky technologií třískového obrábění.

1 Úvod

S ohledem na ostatní příspěvky v rámci tohoto sborníku bude tento příspěvek zaměřen především na představení řezných nástrojů, řezných podmínek pro jejich nasazení či konkrétních aplikací. Přes omezené množství vystavovatelů na výstavě EMO 2009 v Miláně, především z řad předních výrobců řezných nástrojů, můžeme spatřovat silný trend v dalším zdokonalování výše zmíněných způsobů obrábění. Jak totiž trefně charakterizoval jeden přední výrobce řezných nástrojů, právě při zhoršených podmínkách obrábění jako je obrábění vysokými rychlostmi, obrábění bez chlazení nebo obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů se pozná opravdová kvalita toho konkrétního výrobce.

Vývoj a zdokonalování řezných nástrojů jde neustále kupředu a proto na stále širší spektrum obráběných materiálů a řezných parametrů můžeme aplikovat suché nebo málo mazané (kvazisuché) obrábění, tvrdé obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu nebo obrábění při vysokých řezných a posuvových rychlostech. Uvedené technologie se ovšem velmi často vzájemně prolínají. Suché obrábění bývá spojeno s vysokými rychlostmi, stejně jako s tvrdým obráběním.

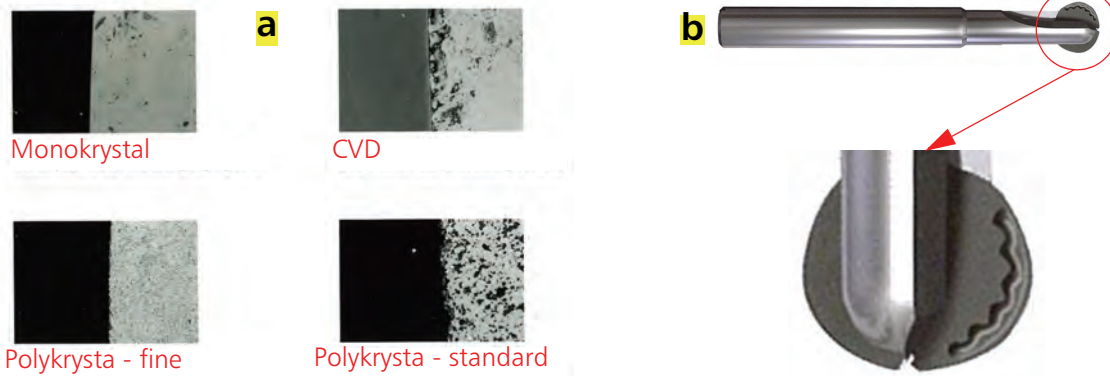
2 Moderní technologie obrábění

2.1 Obrábění slitin lehkých kovů, grafitu a kompozitů

Vývoj v oblasti obrábění této skupiny materiálů má jednoznačně za cíl zvyšování produktivity obrábění. Volba řezných materiálů na bázi diamantu (či diamantových povlaků) zde totiž umožňuje vysokorychlostní obrábění často v kombinaci s využitím obrábění za sucha při relativně malém opotřebením břitu a velké životnosti nástroje. Diamantové nástroje s definovanou geometrií břitu, které řadíme k supertvrdým řezným materiálům, přitom nalézají uplatnění tam, kde již karbidy pracují na hraně svých možností. Výhoda nasazení diamantových nástrojů se přitom násobí především v hromadných a velkosériových výrobcích, konkrétněji v automobilovém a leteckém průmyslu.

Vystavovatel firma BECKER představil sice ne úplnou novinku, ale v oblasti supertvrdých řezných nástrojů poměrně unikátní věc - tvorbu utvařečů na CVD diamantových nástrojích (obr. 1). Utvařeče je možné vytvořit jak na soustružnických, tak i frézovacích nástrojích. Nespornou výhodou nástrojů je pak dosažení vhodných tvarů třísek a snižování řezných sil, což dovoluje další zvyšování řezných podmínek. Vyměnitelné břitové destičky s těmito utvařeči mohou být čtvercové, kosočtvercové, trojúhelníkové, ale i kruhové. CVD diamant je přitom označení pro silnou diamantovou vrstvu o tloušťce 0,8 až 1,2 mm, která je připravena speciální laserovou technologií. V tomto případě nelze hovořit o diamantovém povlaku vzhledem k metodě přípravy vrstvy a její tloušťce. Tato vrstva je tvořena jen čistým diamantem (bez pojiva či jiné vazby). V porovnání s ostatními diamantovými materiály vzrostla jak tvrdost CVD materiálu (o 60% oproti klasickému polykrystalickému diamantu), tak i houževnatost tohoto materiálu. Při vysokorychlostním frézování

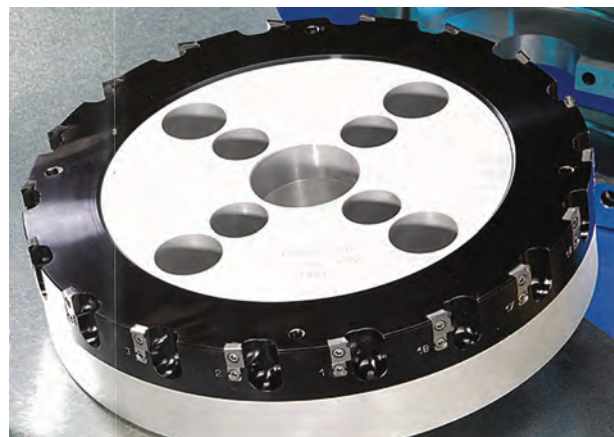
zmiňovanými nástroji můžeme využít řezné rychlosti u hliníku až 5000 m/min, mědi až 6000 m/min, grafitu až 2500 m/min a kompozitních materiálů až 4000 m/min. Posuvy se pak pohybují od 0,03-0,15 mm/zub, u kompozitů nebo kulových nástrojů až do 0,8 mm/zub. Na příkladu porovnání výkonu nástroje z CVD a polykrystalického diamantu s karbidovou výtuhou (PCD-S) při frézování slitiny hliníku A380 (9% Si) narostla při identických podmínkách trvanlivost břitu o 540%.



Obr. 1: (a) Porovnání možných diamantových struktur řezných nástrojů; (b) diamantová fréza s utvařečem třísek na břitu.

CVD diamantové nástroje jsou jako novinka představeny také u firmy MAPAL, která však tyto materiály nenabízí v kombinaci s utvařeči třísek.

Konkrétní aplikaci pro ekonomické použití diamantových nástrojů představil CERATIZIT. Nástrojem na obr. 2 bylo realizováno HSC frézování skříní převodovek z hliníkové slitiny AS7. Podmínkou bylo dosažení drsnosti $Ra=6 \mu\text{m}$ při nízkých nákladech na výrobu. Byla použita duplexní frézovací hlava (ocel - vnější kroužek, hliník - střed nástroje) s 12 břitů osazenými diamantem. Uvedený nástroj o průměru 100 mm umožnil frézovat řeznou rychlostí 4712 m/min při pracovním posuvu 25,2 m/min. Oproti stávající technologii byla dosažena úspora nákladů 30% při drsnosti povrchu $Ra=4,42 \mu\text{m}$. Těchto výsledků bylo dosaženo také díky přesnému axiálnímu nastavení jednotlivých VBD nebo nižším řezným silám oproti konvenčním nástrojům a řezným podmínkám.



Obr. 2: Frézovací hlava pro vysokorychlostní obrábění hliníku

Podobný nástroj jako Ceratizit na vysokorychlostní obrábění hliníku představila i firma LMT. Frézovací hlava s břitů z PCD umožňuje opět přesné nastavitelné axiální vyložení jednotlivých břitů (pro průměr 100 mm a 12 břitů). Otáčky, které lze u tohoto nástroje nasadit jsou až 20 000 1/min. Tělo nástroje je z oceli. Diamantové nástroje nebo alespoň diamantové povlaky na EMO představily samozřejmě i další firmy jako např. GUHRING, KORLOY, LMT nebo PLATIT.

Nasazení supertvrdých řezných materiálů na bázi diamantu je stále více rozšířené a co uživatele zajímá nejvíce, v řadě případů i ekonomicky výhodnější v porovnání s ostatními materiály (např. karbidy se standardními povlaky). Neustále jsou navíc vylepšovány vlastnosti nástrojů a způsob přípravy těchto řezných materiálů.

2.2 Obrábění litin a kalených materiálů

Trendy v oblasti obrábění těchto materiálů jsou zastoupeny jak dalším vývojem slinutých karbidů a povlaků, tak i dalších supertvrdých materiálů, jako jsou kubický nitrid boru (PCBN) a řezná keramika. Opět se s cílem větších minutových úběrů a zefektivnění výroby dostáváme do oblasti obrábění vysokými řeznými a posuvovými rychlostmi a suchého nebo kvazisuchého obrábění. U kalených materiálů (tvrdé obrábění) je takto využíváno efektu měknutí obráběného materiálu před břitěním nástroje, a tedy výrazného snížení silového zatížení stroje a nástroje. Podmínkou takového obrábění je však řezný materiál nebo povlak, který

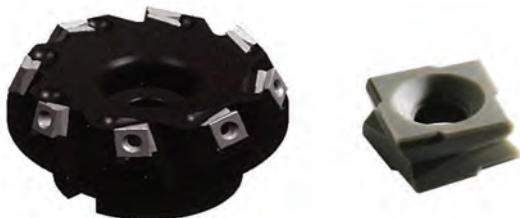
vzniklé vysoké teploty v řezu vydrží. S obráběním těchto materiálů se setkáváme především v automobilovém průmyslu nebo při výrobě forem a zápustek.

Jednu z novinek pro tvrdé obrábění představila i firma KORLOY, kdy zařadila do sortimentu PCBN rotační mikronástroje nástroje v rozsahu průměrů 0,3 až 4 mm pro ekonomické dokončování kalených materiálů. Firma MAPAL představila kruhovou soustružnickou destičku z PCBN, která je opatřena tvarovými prvky pro pohodlné indexování. To umožňuje maximální využití břitu těchto destiček (obr. 3). Součástí tohoto zajímavého řešení je také vyměnitelná podložka pod VBD se dvěma kolíky, která je vyrobena ze slinutého karbidu.

Firma BECKER, výrobce již zmíněných diamantových břitů představuje i jednoho z vedoucích výrobců nástrojů z PCBN. V oblasti soustružení rozšířil v poslední době portfolio svých výrobků i o tzv. sendvičové materiály, kdy jsou funkční plochy právě z PCBN. Sendvičové destičky pro soustružení jsou připravovány v různých tvarech, které se již velmi blíží karbidovým destičkám. PCBN nástroje jsou již standardně také v nabídce dalších firem jako například GUHRING nebo SUMITOMO, která se mimo jiné vydává i cestou povlakování PCBN řezného materiálu.



Obr. 3: Indexování destičky z PCBN.



Obr. 4: Nástroj s tangenciálně upnutými destičkami z řezné keramiky.

Pokrok v oblasti obrábění nástroji z řezné keramiky, které se uplatňují zejména při obrábění šedé nebo tvárné litiny, je především v dalším rozšiřování sortimentu keramických nástrojů, a to nejen soustružnických, ale i frézovacích. Můžeme proto již využít keramické břitové destičky, které jsou na nástroji upnuty tangenciálně (obr. 4). Toto upnutí již samo o sobě předurčuje potřebu výroby složitějšího tvaru těchto VBD. Jak ukázala firma SSANGYONG je neoxidická keramika v těchto tvarech využitelná v kombinaci s pozitivní geometrií, což

umožňuje suché vysokorychlostní frézování litin rychlostmi až 1400 m/min.

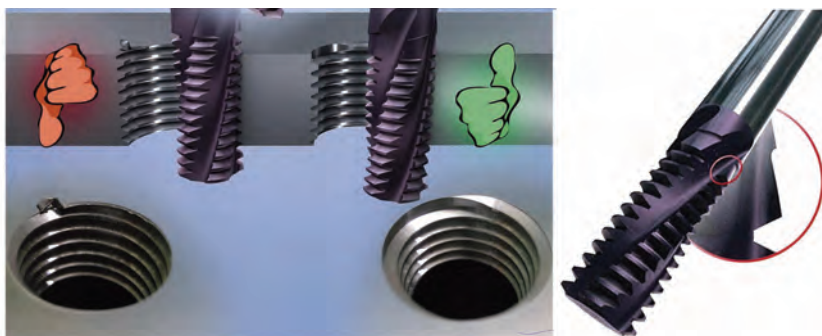
Stejná firma pak představila ještě rozšíření řady keramických řezných materiálů o materiál s označením SN 600 (na bázi Si_3N_4) - svými vlastnostmi ležící mezi SN 400 (hrubování litiny, přerušovaný řez) a SN 800 (vysokorychlostní hrubování inconelu a žárovečných slitin). Pro produktivní soustružení litiny lze nasadit také další zajímavý nástroj, a to "C-Clamp" od CERATIZITU. Přestože již nejde o "horkou" novinku, je řešení nekonvenční. Upínací prvek pro upnutí VBD na soustružnickém noži je totiž vyroben ze slinutého karbidu (obr. 5). Jelikož se u této části nástroje zvýší odolnost proti otěru od odcházejících třísek, lze dosáhnout 20 až 50 násobné zvýšení jeho životnosti. Nezanedbatelný je také přínos pro tlumení vibrací. Nejvýhodnější je nasazení tohoto nástroje při obrábění řeznou keramikou (především neoxidickou), případně PCBN.



Obr. 5: Nástroj s upínacím prvkem ze slinutého karbidu.

Současným stropem nasazení karbidových nástrojů z hlediska tvrdosti obráběných materiálů je tvrdost 70 HRC (tvrdost samotného karbidu je cca 75 HRC). Případy při obrábění kalených materiálů nad 60 HRC jsou proto velmi citlivé především na správnou geometrii nástroje, povlak nástroje a stanovení řezných podmínek. Výrobci řezných nástrojů nebo povlaků standardně garantují obrábění do tvrdosti 60 až 63 HRC. KORLOY u jedné řady svých monolitních fréz ze slinutého karbidu s označením H-MAX garantuje možnost frézování kalených ocelí až do 70 HRC, a to díky inovované geometrii břitu vedoucí ke zpevnění břitu a nově vyvinutému povlaku odolnému vůči oxidaci za vyšších teplot a difúzi. Ovšem případný ekonomický přínos frézování takto tvrdých materiálů v porovnání s jejich možným broušením bude silně závislý na typu konkrétních aplikací. Inovované nástroje ze slinutého karbidu pro tvrdé obrábění (do 60 HRC) představila firma GUHRING. Jde o nástroje s proměnným úhlem stoupání šroubovice. Toto řešení zvyšuje plynulost chodu nástroje, snižují se rázy (špičky řezných sil) při obrábění se všemi svými důsledky (vibrace, vyštipování břitu atd.) a snižuje se možnost výskytu samobuzeného kmitání při obrábění.

Firma SMICUT představila operaci tvrdého závitování do plechů z otěruvzdorných materiálů Hardox 500 a Hardox 600 s tvrdostí 500, resp. 600 HB (obr. 6). Unikátní na této operaci je především speciální tvar karbidových nástrojů pro frézování závitů, který je vytvarován pro výrobu závitů a odhrotování závitů v jedné operaci. Běžné rychlosti pro závitování těžkoobrobitelných materiálů si přitom nezadají s rychlostmi jejich obrábění vrtáním nebo frézováním (titan a jeho slitiny 30-80 m/min, nikl a jeho slitiny 50-120 m/min). U tvrdých materiálů je však rychlost závitování výrazně nižší (oceli do 65 HRC 20-40 m/min a Hardox 50 m/min). Aplikace tvrdého vrtání a závitování až do tvrdostí 70 HRC umožňuje prostřednictvím svých nástrojů také firma WEXO.



Obr. 6: Operace frézování a odhrotování závitů v jedné operaci.

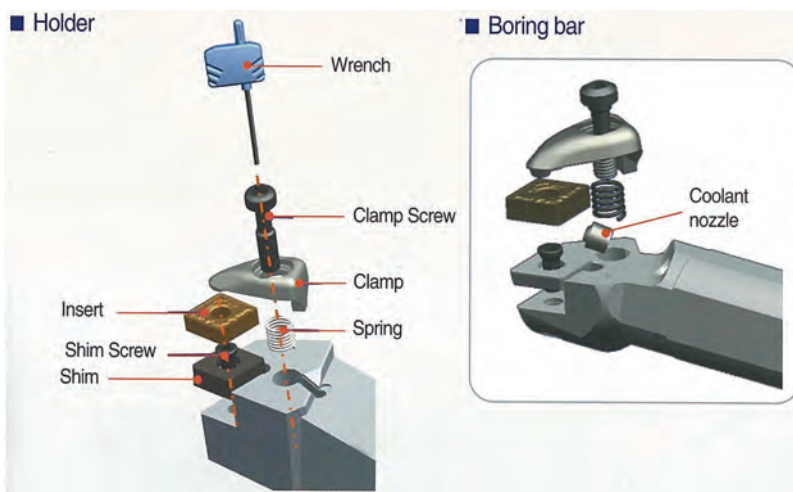
2.3 Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Mezi těžkoobrobitelné materiály řadí výrobci nástrojů a dodavatelé technologií především korozivzdorné oceli, titan, nikl, kobalt a jejich slitiny. Tyto materiály se sice vyznačují unikátními mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které jsou využívány v leteckém, potravinářském nebo v poslední době prudce se rozvíjícím medicínském průmyslu, ovšem na druhé straně se při obrábění uvedených materiálů výrazně zvyšuje mechanické a tepelné zatížení břitů. Podle nastíněných oblastí použití se také velmi liší požadavky na konkrétní technologie, obráběcí stroje, řezné podmínky, nástroje a povlaky. Vývoj z hlediska nástrojů směřuje především k dalším úpravám geometrií břitů (utvařeče a modifikace upnutí u soustružnických a vrtacích nástrojů, proměnná šroubovice u monolitních frézovacích nástrojů, nerovnoměrná rozteč zubů), k novým modifikacím karbidových řezných materiálů a speciálním povlakům.

Alternativu nového řezného materiálu představil KORLOY - karbid NC9025. Je vhodný pro korozivzdorné a měkké oceli, ale s využitím i pro těžkoobrobitelné materiály. Inovace materiálu spočívá ve zvýšení houževnatosti (větší odolnosti proti křehkému porušení) materiálu a v kombinaci s hladším povlakem poskytuje větší ochranu před tvorbou nárůstku a usnadňuje odchod třísky. Pro soustružení a frézování bylo vytvořeno několik dalších nových modifikací materiálů a povlaků. K dalším novinkám patří inovované

utvařeče a tvary VBD na nástrojích, jak soustružnických, frézovacích, tak i vrtacích. Zajímavostí také je, že KORLOY při vývoji nástrojů používá simulační program pro predikci teplot, silového zatížení břitů a tvar utvářené třísky. Podobně jako Sandvik Coromant přichází KORLOY s tryskou pro vedení chladicího média k místu řezu vnitřkem nástroje, zde konkrétně pro vyvrtávání. Nové dvojitě upnuté podložky v VBD (obr. 7) pro soustružení poskytují zase tuhé upnutí pro těžké podmínky obrábění i v kombinaci s přerušovaným řezem.

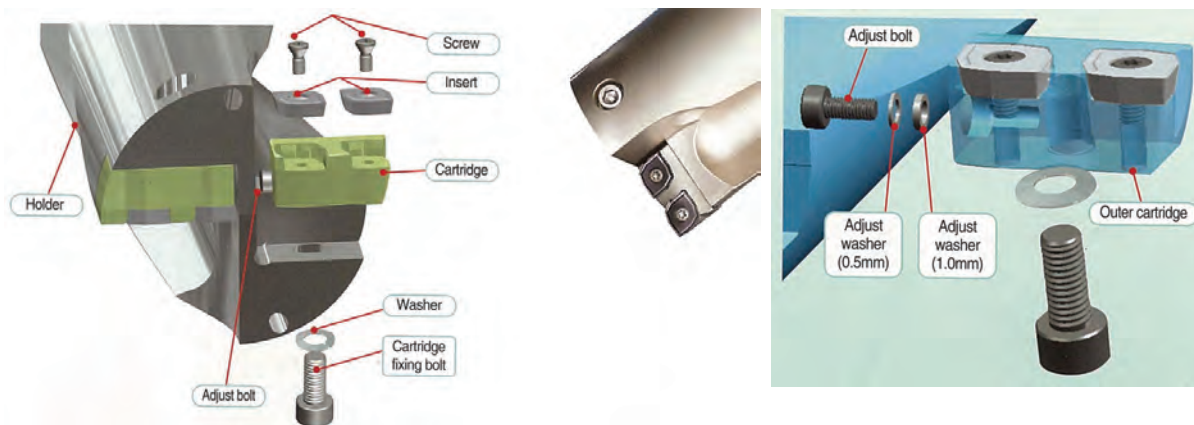
Již zmíněné závitníky firmy WEXO jsou v jedné své řadě vyráběny také z práškové rychlořezné oceli. Takto připravené řezné materiály poskytují oproti klasickým rychlořezným ocelím jak nárůst houževnatosti, tak i tvrdosti. Jak je ukázáno, lze tuto ocel použít nejen pro frézovací nástroje (ekonomická varianta například při obrábění titanových slitin v leteckém průmyslu), ale také pro závitovací nástroje. Novinky představené firmou LMT se i v oblasti obrábění těžkoobrobitelných materiálů soustředí na vývoj nových utvařečů, které optimalizují utváření třísky, rozšiřují diagramy vhodného utváření třísek a vedou ke snížení sil a teplot při obrábění. Mezi unikátní karbidové nástroje patří jistě i mikronástroje (cca do průměru 2 mm). Typickou



Obr. 7: Dvojitě upnutí vyměnitelných segmentů.

aplikaci použití monolitních fréz předvedla firma FRANKEN, kdy jsou tyto frézy (povlakované i nepovlakované) nasazovány při výrobě zubních náhrad a implantátů, ať již ze ZrO_2 nebo z těžkoobrobitelné slitiny kobaltu. Zajímavostí také je informace vystavovatele, že z cenového hlediska bývá pro zákazníka nevýhodné takto malé nástroje přebroušovat a přepovlakovávat, ale na konci trvanlivosti se vyplatí koupit nástroj nový. Mikronástroje jsou v sortimentu řady nástrojařských firem s nejmenšími průměry od 0,2 mm. Výjimečně lze nalézt i nástroje o menším průměru (jen 0,02 mm), které jsou používány například pro opravy tištěných spojů nebo pro tvorbu speciálních povrchů a textur ve formách. Nasazení takových nástrojů však vyžaduje zároveň použití adekvátních strojů.

Několik zajímavých inovací prodělaly také vrtáky. Prvním je NPD cartridge od firmy KORLOY, kdy lze jedním nástrojem s vnější kartridží měnit průměr vrtané díry až o 5 mm (obr. 8). Toto řešení je používáno pro větší nástroje o průměru 61 až 100 mm. Nástroj je mimo jiné použitelný i pro korozivzdorné oceli. Druhou zajímavostí je precizní a tuhé upínání vyměnitelných hlavice u vrtáků TPD prostřednictvím dvou šroubů ve směru osy vrtáku.

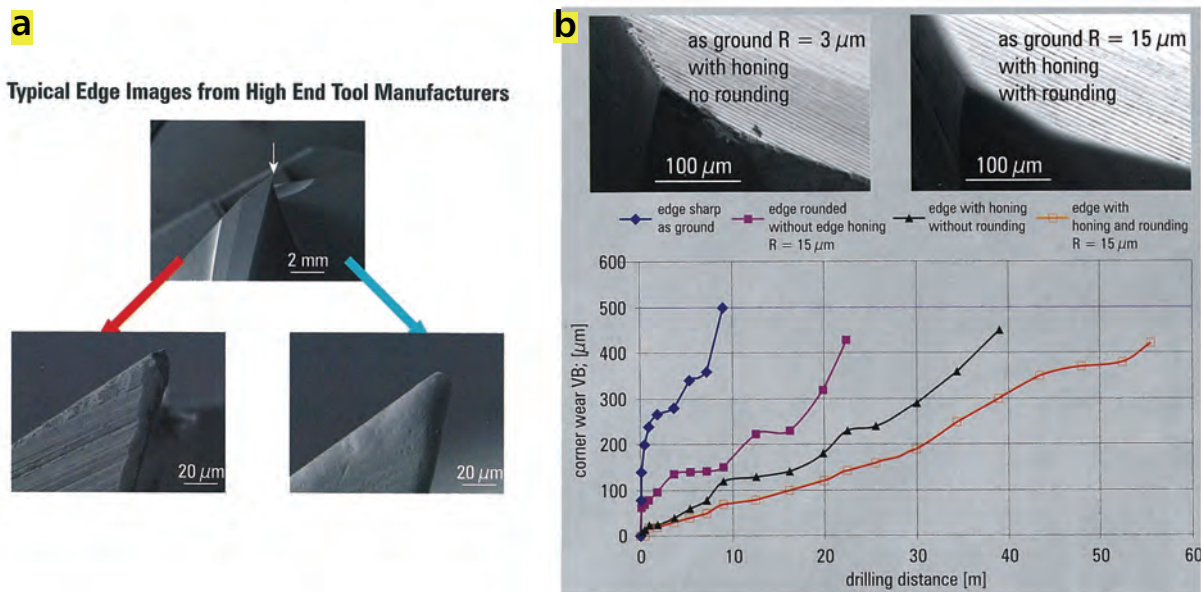


Obr. 8: Vrták s možností nastavení průměru.

2.4 Povlaky pro řezné nástroje

Trendy v technologiích povlakování řezných nástrojů jsou zejména ve vytváření nových a odolnějších vrstev se zlepšenými vlastnostmi. Je tedy stále rozšiřováno spektrum nabízených povlaků o zcela nové nebo modifikované povlaky. Kombinace různých vrstev nebo dokonce i různých metod povlakování (PVD a CVD) v rámci jednoho povlaku umožňuje další silnou specializaci povlaků na konkrétní technologie, čímž je dosahováno zvyšování užitečných vlastností povlaků.

Přední výrobce povlaků a povlakovacích zařízení PLATIT potvrdil, že vývoj v této oblasti uhání vpřed mílovými kroky. Vedle klasických povlaků na bázi TiN, TiCN, AlTiN nebo CrAlSiN lze komerčními povlakovacími zařízeními připravit až 34 různých modifikací povlaků, kdy je patrná již zmiňovaná stále výraznější specializace jednotlivých modifikací povlaků na konkrétní technologie výroby. K nejnovějším modifikacím potom patří možnost tvorby oxidických $(Al,Cr)_2O_3$ nebo oxidicko-nitridových $(Al,Cr)(O,N)$ vrstev, které vykazují výbornou odolnost proti oxidaci (zabraňuje difuzi kyslíku) a jsou proto vhodné jako jedna z vrstev na nástrojích pracujících za vysokých teplot (do 1000 °C) při suchém obrábění. Novým povlakem je také druhá generace DLC (diamond like carbon) povlaku. Tento povlak je při obrábění primárně využíván pro aplikace vyžadující obrábění superslitin, niklových slitin a jeho jiné modifikace pak pro obrábění hliníkových a titanových slitin. Zajímavostí je také příprava ostří před a po povlakování. Příprava nepovlakovaných nástrojů spočívá ve vyhlazení a zaoblení ostří (obr. 9). Výsledkem je zpevnění břitu, lepší přilnavost povlaku, zlepšení jakosti obrobeného povrchu, čímž se až několikanásobně prodlužuje trvanlivost břitu. Ovšem úpravu břitu je třeba citlivě přizpůsobit obráběnému materiálu. Úpravou břitu po povlakování se vytváří zaoblení ostří (se všemi výše uvedenými výhodami), stejně jako lze předcházet vylamování břitu ve větším objemu v důsledku velkých napětí na ostří břitu. Zařízení pro úpravu břitu nástrojů (před a po povlakování) podobným způsobem jako v předchozím případě nabízí také PD2i. Takto upravovat je možné soustružnické, frézovací a vrtací nástroje, stejně jako např. závitníky nebo odvalovací frézy. Úprava břitu po povlakování je přitom nejvýznamnější především u vrtáků. Jednu z novinek představila také firma CERATIZIT. Jde o novou řadu povlaku Hypercoat pro obrábění "exotických" materiálů, ke kterým řadí korozivzdorné oceli, titan a jeho slitiny a niklové slitiny. Jiné informace o povlaku než jeho obchodní název se však nepodařilo získat. Dle jeho stříbrné barvy však lze předpokládat, že půjde o povlak na bázi chromu.

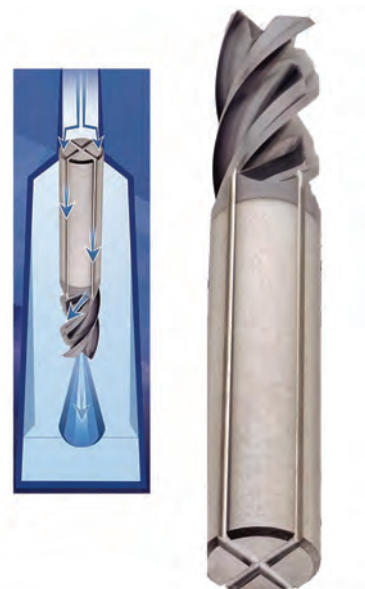


Obr. 9: (a) Detail ostří bříty připraveného různými způsoby - vlevo broušený; vpravo broušený a leštěný. (b) Rozdíl v opotřebení nástrojů v závislosti na úpravě bříty.

2.5 Nekonenční způsoby chlazení řezného procesu

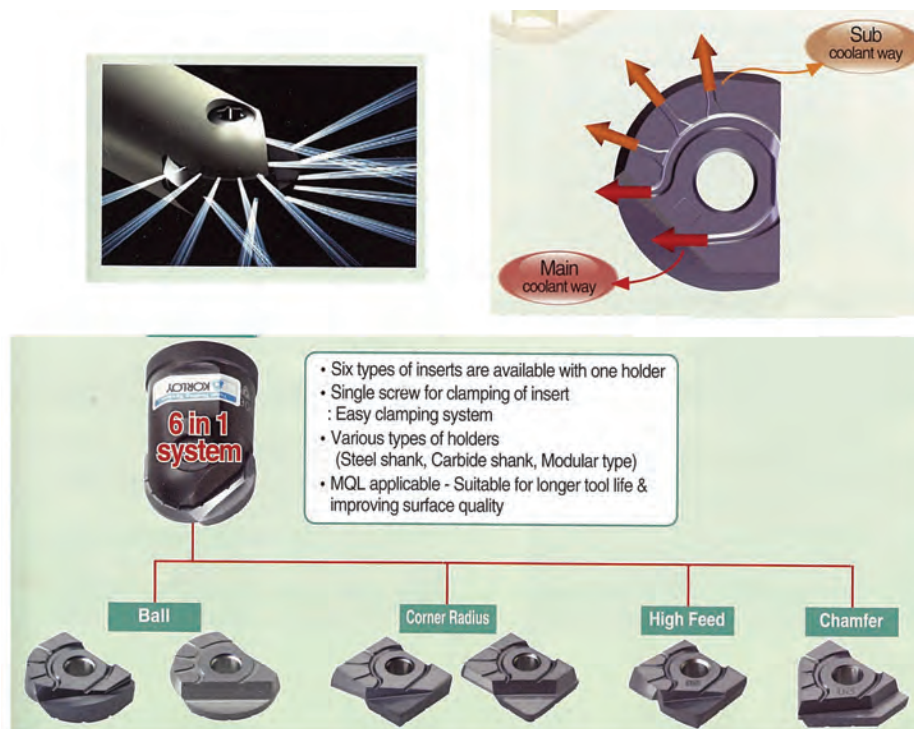
Suché (neupravený nebo upravený vzduch - tlakový, chlazený), nebo tzv. kvazisuché obrábění (mazání místa řezu minimálním množstvím maziva) jsou technologie, které kromě vývoje vhodných nástrojů a povlaků iniciují také neustálý vývoj jednotek pro přípravu těchto řezných prostředí. Z postřehů na EMO 2009 se jeví, že vývoj v této oblasti není tak dynamický jako v ostatních zmiňovaných oblastech, nicméně některé zajímavé novinky se vyskytují i zde.

Zejména pro dokončování forem je předurčen nástroj LaserMill od firmy KORLOY. Nejedná se sice o úplnou novinku, nicméně byla dále rozšířena nabídka tvarů a geometrií těchto rotačních nástrojů s předlisovanými kanálky pro vedení chladicího média nejlépe aerosolu vzduchu a oleje (obr. 11). V jednom nástroji tak lze použít 6 různých typů frézovacích VBD, včetně srážecí hran. Druhou zajímavostí týkající se způsobu dodávání procesních kapalin do místa řezu ukázala firma SGS. Snaha o optimalizaci způsobu dodávání chladiva do místa řezu, zde však spíše klasické procesní kapaliny, dospěla k návrhu monolitní frézy na obr. 10. Standardní způsob dodávání média středem nástrojů prostřednictvím kanálků je zde nahrazen lineárně orientovanými drážkami pro vedení kapaliny, umístěnými po obvodu nástroje. Nakolik jde o smysluplnou inovaci či jen o marketingový tah v něčem se odlišit od ostatních výrobců však není možné určit bez nezávislého a důkladného posouzení účinků kapaliny obou zmiňovaných způsobů chlazení.



Obr. 10: Nástroj s lineárními axiálními kanálky pro vedení procesní kapaliny.

Standardní rozvody pro mazání místa řezu u řezných nástrojů vnějšími tryskami (soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání) a interními kanálky (soustružení, frézování, vyvrtávání, vrtání a závitování) zařazuje do svých programů stále více výrobců řezných nástrojů. Výrobci a dodavatelé strojů pak začínají ve větší míře nabízet jednotky pro MQL mazání spolu se svými stroji. Jak dokazuje firma HAAS, vývoj se nezastavil ani v této oblasti. HAAS nabízí speciální trysku pro vedení proudu vzduchu nasměrovanou přímo do místa řezu pro možnost suchého obrábění s efektem odstraňování třísek. Druhá paralelní tryska se směšovací komorou vzduchu a oleje na svém konci umožňuje mazání místa řezu aerosolem vzduchu a oleje. Výhodou této konfigurace jsou především minimální ztráty mazacích schopností média v důsledku krátkého vedení aerosolu a ovládání těchto způsobů chlazení M funkcí v řídicím systému. Tedy podobně jako je tomu u konvenčního chlazení.



Obr. 11: Nástroj s předlisovanými kanálky pro vedení procesní kapaliny.

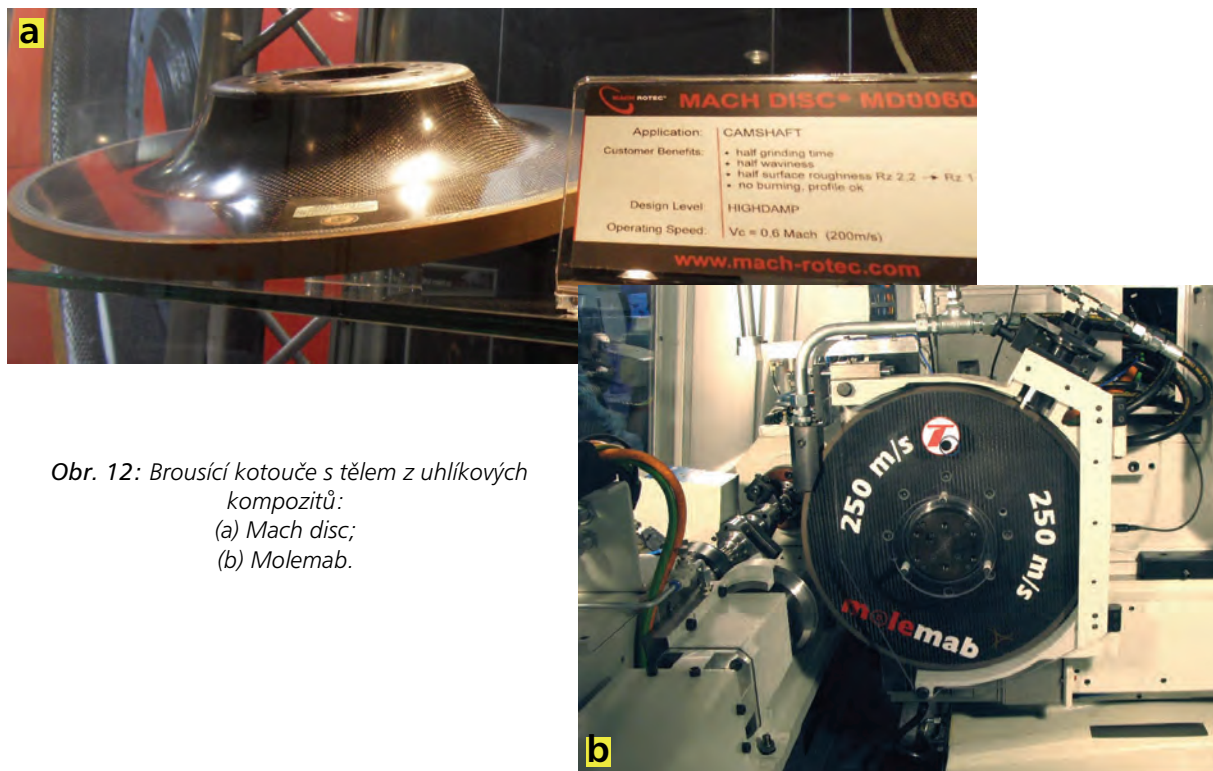
Samostatnou kapitolou jsou prostředky pro přípravu a dodávání chlazeného nebo mraženého vzduchu do místa řezu, jak při frézování, tak i při broušení nebo soustružení. Jde o tzv. vírové trubice. Princip funkce trubic byl sice objeven již dávno, ale možnosti průmyslového využití těchto zařízení se stále rozšiřují, a to nejen v oblasti třískového obrábění. Protože má vzduch obecně menší tepelnou kapacitu než kapalina, jsou operace s chlazeným nebo mraženým vzduchem nasazovány tam, kde chlazení kapalinou způsobuje teplotní šoky a tím i nežádoucí opotřebení nástroje. Nasazovány jsou také v případech, kdy může nastat nežádoucí reakce řezné kapaliny s obráběným materiálem (obrábění mědi). V neposlední řadě může být také aplikací chlazení řezného procesu při obrábění dřeva, které poměrně špatně odvádí teplo z místa řezu. Také z těchto důvodů má ve svém programu vírovou trubici FRANKEN. Poměrně subtilní zařízení spíše ve formě jednoduché trysky dokáže ochladit vzduch standardního tlaku 6,9 bar až na $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V neposlední řadě je zde třeba zmínit také princip tzv. vysokotlakého nebo velkoobjemového chlazení, kdy je v současné době procesní kapalina do místa řezu dodávána při tlacích nejčastěji 60–80 bar. Cílem těchto tlaků je lepší proniknutí kapaliny mezi styková místa nástroje a obrobku a účinnější odstraňování třísek z obrobku.

2.6 Technologie broušení

Na základě postřehů z výstavy EMO 2009 si v oblasti brousících technologií nelze nevšimnout dvou hlavních trendů. Prvním je masivní nástup dodávek brousících kotoučů (korundových, diamantových, CBN) z Číny. Druhým výrazným trendem je pak orientace na další zvyšování řezných rychlostí kotoučů a s tím spojených minutových úběrů materiálu. S možností zvyšování řezných rychlostí při broušení však musí jít ruku v ruce i vývoj strojů a brousících kotoučů. Mimo jiné je třeba řešit i nebezpečí havárie kotouče vlivem nárůstu odstředivých sil.

Ve smyslu zvyšování řezných rychlostí připravila firma MACH ROTEC kotouč s tělem z uhlíkového kompozitu (obr. 12) s brusivem z CBN, který umožňuje tzv. "Mach grinding". Je to broušení rychlostmi až za hranicí 200 m/s (testováno až při 350 m/s). Oproti CBN kotoučům s ocelovým tělem umožňují tyto kotouče další výrazné zvýšení řezné rychlosti. Cílem zvyšování rychlosti je jednak deklarované zvýšení jakosti povrchu obrobku a na druhé straně také zvýšení produktivity broušení. Tyto kotouče mohou být použity například pro broušení rotačních součástí z inconelu, kdy mohla být rychlost kotouče zvýšena z 80 na 180 m/s. Kotouč s podobnými parametry, tedy s tělem z uhlíkových vláken, pracující až do řezné rychlosti 250 m/s vyvinula také firma MOLEMAB. Zdůrazňují přitom, že takový kotouč je velmi lehký a vysoce odolný proti rázům.



Obr. 12: Brousící kotouče s tělem z uhlíkových kompozitů:
 (a) Mach disc;
 (b) Molemab.

Druhým výrazným směrem ve vývoji technologií broušení je zdokonalování broušení slitin na bázi titanu nebo niklu. Tyto slitiny totiž svojí nízkou tepelnou vodivostí vyžadují velmi citlivé nastavení řezných podmínek, často s velmi intenzivním chlazením místa řezu. V opačném případě totiž dochází k takovému nárůstu teploty povrchu, kdy je materiál tohoto typu na kotouč silně nalepován a broušení je obtížné. Nicméně i technologie broušení uvedených materiálů je již zvládnutá na dobré úrovni a lze se setkat s doporučením jak keramických, tak i CBN kotoučů - viz. BLOHM. Stejnou problematikou se zabývala také firma TYROLIT a vyvinula kotouč Strato ultra. Ten má v porovnání se starším typem kotouče větší pórovitost, ovšem při současně větší pevnosti pojiva (o 100%). Větší pórovitost umožňuje lepší absorpci chladicího média a odbroušených špon do kotouče. To resultuje ve zvýšeném účinku chlazení a kvalitě broušeného povrchu z pohledu větší přesnosti a také menšího tepelného ovlivnění. Proto se tímto kotoučem dají lépe brousit niklové a titanové slitiny (aplikace na dílech pro letecký průmysl). Tento kotouč může rovněž nahradit "klasický" korundový kotouč (aluminium oxid), který je "agresivní" vůči orovnávači především ve vztahu k narůstajícímu opotřebení diamantu.

3 Shrnutí a závěr

Přestože na výstavě EMO 2009 nebyly v oblasti technologie obrábění zaznamenány žádné převratné novinky, lze vysledovat určité trendy. Firmy zabývající se výrobou a dodáváním řezných nástrojů se soustředí zejména na rozšiřování portfolia výrobků pro jednotlivé aplikace (utvařeče, specializace nástrojů pro jednotlivé skupiny materiálů) a doplňování velikostních řad jednotlivých nástrojů. Výrobci nástrojů se soustředí také na zvyšování užitečných vlastností nástrojů a povlaků (možnost dalšího zvyšování řezných podmínek, minutových úběrů a obrábění za zhoršených podmínek). V neposlední řadě lze pozorovat další miniaturizaci výroby a tedy i řezných nástrojů. Tyto směry posléze silně ovlivňují také trendy v celé oblasti třískového obrábění. Je proto patrná orientace technologií obrábění na zvyšování aplikačních možností suchého, tvrdého a rychlostního obrábění a obrábění těžkoobrobitelných materiálů a na využívání alternativních způsobů chlazení.