

Pokročilé vrtání kompozitů diamantovými nástroji

Rozhoduje optimální konstrukce nástroje



Zákaznický vrták s modulární špičkou s pájenými PKD destičkami

Polymery vyztužené uhlíkovými vlákny (CFRP) – samostatné nebo vrstvené s titanovými či hliníkovými deskami – jsou často používány v celosvětovém leteckém průmyslu pro svůj vysoký poměr pevnosti a hmotnosti a pro stabilní materiálové vlastnosti v náročných prostředích. Boeing Dreamliner 787 například v objemu své konstrukce využívá 80 % kompozitů, což je 50 % jeho hmotnosti a eliminuje tím 1 500 hliníkových plechů a až 50 000 spojovacích prvků. Tím dosahuje o 20 % lepší využití paliva ve srovnání s Boeingem 767. V současnosti jsou spojovací technologie jako lepení nebo svařování ještě stále problematické, takže upevňování nýty je stále převládající praxí. Kvůli značně rozdílným vlastnostem uhlíkových vláken a kovů je vrtání upevňovacích otvorů velkou výzvou pro rezné nástroje, kdy je požadována vysoká odolnost proti opotřebení, stejně jako optimální geometrie nástroje.

Polykrystalický diamant (PKD) vykazuje velký potenciál pro zlepšení efektivity obrábění ve srovnání s tradičními wolframkarbidovými reznými nástroji při obrábění pokročilých materiálů v leteckém průmyslu. Přední výrobci rezných materiálů pro obrábění kovů vyvinuli a nabízejí pájené PKD vrtáky, které kombinují PKD na rezných hranách s celokarbidovým tělesem vrtáku. Karbidové těleso vrtáku poskytuje tuhost a rozměrovou přesnost pro udržení kvality děr a přitom umožňuje vnitřní přívod chladiva šroubovitými otvory pro zlepšení chlazení a odvodu třísek šroubovitými drážkami. Funkční rezné hrany jsou z PKD, který poskytuje větší odolnost proti opotřebení a tím zvýšení efektivity obrábění.

Optimální tvar nástroje je rozhodující pro vytváření dobré kvality díry při obrábění pokročilých leteckých kompozitů. Významnou roli v ovlivňování vlastností otvorů hraje mnoho podstatných faktorů v rozměrech nástroje, jako jsou ostřejší rohový rádius nebo větší úhel čela pro generování nižších rezných sil. Další faktory zahrnují menší úhel špičky pro snížení osové síly a vyštípávání břitu s optimalizovanou konstrukcí břitu pro zmenšení velikosti otřepů. Tuhost

obráběcího stroje, včetně a celkového uspořádání, nástrojový adaptér, vnitřní nebo vnější chlazení, materiály obrobku, do nichž vrták vstupuje a vystupuje, to jsou rovněž důležité faktory na to, aby byly vzaty v potaz při konstrukci nástroje. V mnoha případech jsou požadovány speciální nástroje, aby vyhověly různým potřebám zákazníků.

Vývoj nástrojů

Pro vývoj vysoce kvalitních PKD vrtáků je zapotřebí mít hluboké znalosti a vhodný komplexní přístup. Takovýto technologický vývoj nejenže rozhoduje o výkonu nástroje, ale také ovlivňuje efektivitu nástroje při výrobě i náklady na jeho výrobu.

Pro výrobu vrtáků na bázi syntetického diamantu pro kompozitní materiály se využívají čtyři hlavní technologie:

- Vrták s CVD (chemical vapor deposition) diamantovým povlakem

Hotový celokarbidový vrták je opatřen CVD diamantovým povlakem. Je to ekonomické řešení, avšak ostrost řezné hrany je limitována tloušťkou povlaku. Rovněž kvůli velkému rozdílu mezi tvrdostí karbidového substrátu a diamantového povlaku má toto řešení malou kapacitu pro absorpci energie nárazu. Odolnost proti vylamování je rovněž omezena.

- „Capped“ PKD vrták

PKD je slinován s malým množstvím karbidového substrátu do určité geometrie špičky. Vytvořená součást je pak pájena na celokarbidové těleso vrtáku. Toto PKD řešení je limitováno v optimalizaci PKD jakosti kvůli nutnosti zvládnutí vysokých pnutí v rozhraní karbid/PKD. Následné zpracování po slinování může být také drahé s ohledem na náročnost odstranění diamantu z nefunkčních oblastí a doplnění otvorů pro vnitřní chlazení.

- „Vein“ PKD vrták

Karbidová tyčka s předem obrobenou drážkou je naplněna PKD práškem a následně vystavena extrémně vysokému tlaku a teplotě (HPHT) pro vytvoření PKD struktury. Po HPHT procesu se tyčka ořízne, připájí na těleso vrtáku a nakonec brousí podle navržené geometrie nástroje. Touto „vein“ PKD technologií může být vytvořena komplexní geometrie s vysoce pozitivními úhly čela a vyžaduje méně broušení než „capped“ PKD. Je omezena co do velikosti kvůli aplikaci vysokého tlaku a teploty na komplexní 3D geometrii. Navíc je k tomu potřebný vysoký obsah kobaltu, což snižuje tvrdost PKD a jeho odolnost proti opotřebení.

- Pájený PKD vrták

2D je nejrozšířenější technologií pro PKD vrtáky (např. ploché PKD vrtáky). Pro menší velikosti je používán speciální karbid s vrstvou PKD, zatímco pro větší velikosti mohou být použity individuální PKD špičky. Toto řešení má značná geometrická omezení, a tak je obtížné přidat pozitivní úhly čela potřebné pro obrábění kompozitů. 3D pájení vyžaduje objemný PKD blok z požadované jakosti a mikrostruktury, aby mohl být rozřezán do navrženého tvaru šroubovice. Odpovídající slot pro PKD břit ve tvaru šroubovice je vybroušen v karbidovém vrtáku. Ve srovnání s „capped“ PKD řešením toto 3D pájení aplikuje PKD pouze ve funkčních oblastech, což podstatně zvyšuje obrobitelnost tohoto nástroje. Tato technologie 3D pájení byla vybrána

pro vývoj zkušebních PKD vrtáků v tomto výzkumu.

Dalším důležitým faktorem pro volbu vhodné PKD jakosti je obrobiteľnosť diamantového materiálu. Obrobiteľnosť bola vyhodnocovaná mērením výrobních časů pro identické nástroje zhotovené z různých polotovarů PKD materiálu. Pozornost byla zaměřena na všechny výrobní kroky zahrnující erozi PKD kotouče a broušení PKD. Výsledky tohoto testu obrobiteľnosti jsou uvedeny v ratingu v tabulce 1. Lepší obrobiteľnosť, vyšší rating a kratší výrobní časy odpovídají nižším výrobním nákladům, které jsou při vývoji konkurenceschopného řešení pro obrábění stejně důležité jako výkon nástroje.

Pájení PKD

Zde představený nástroj vyžaduje pájení spoje šroubovitého plátku vyřezaného z PKD polotovaru s tělesem z karbidu wolframu, přičemž vybraná technologie pájení musí zabránit grafitizaci metastabilního polykrystalického diamantu, ale také spojit PKD s karbidem wolframu. To vyžaduje aktivní technologii pájení. Aktivní materiál pro pájení obvykle obsahuje složky s vyšší teplotou tavení jako je titan. Teploty pájení jsou proto vyšší, což negativně ovlivňuje stabilitu diamantové fáze. Aby bylo zabráněno grafitizaci, musí být během pájení vyloučena oxidační atmosféra. Nejmodernější technologie zahrnují použití argonové atmosféry a vakuové pájení.

Optimální geometrie nástroje

Vybrat optimální geometrii nástroje pro vrtání vrstveného kompozitního a titanového materiálu je obtížné, jelikož tyto dva obráběné materiály vyžadují různé vlastnosti vrtáku. Vrtání CFRP obvykle používá vysoké úhly stoupání šroubovice a dlouhé řezné hrany, aby uhlíková vlákna mohla být ustřížena podél řezné hrany. Dlouhé řezné hrany jsou realizované malými úhly špice. K tomu by vrtáky pro CFRP měly vyvíjet nízké osové síly pro zamezení vyštípávání na výstupu. Toto vše předpokládá spíše ostré řezné geometrie s malými úhly břitu. Úhly hřbetu dosahují 20 stupňů při úhlech stoupání šroubovice kolem 30 stupňů. Řezání titanu může v principu také využít ostrou řeznou hranu, avšak ve srovnání s vrtáním CFRP je třeba stabilnější úhel břitu. Typické úhly hřbetu pro aplikace v titanu jsou v rozsahu od 8 do 14 stupňů. Ve srovnání s obráběním oceli jsou obvykle tyto úhly vyšší (v daném případě kolem 12 stupňů), aby bylo generování tepla na čele hřbetu minimalizováno za účelem snížení opotřebení hřbetu. Jelikož vysoké úhly hřbetu v kombinaci s typickými úhly stoupání šroubovice kolem 30 stupňů by příliš oslabil řeznou hranu, byl úhel stoupání šroubovice snížen na 15 až 20 stupňů pro vyvážení použití vysokých úhlů hřbetu. Představená výrobní technologie počítá s proměnnými úhly stoupání šroubovic v závislosti na potřebné geometrii nástroje. Toto je jednou z hlavních výhod představené technologie, jelikož typické nástroje s PKD břittem počítají s úhly šroubovice do 8 stupňů.

Pro dosažení úzkých tolerancí průměru díry je naprosto nezbytné, aby hrot vrtáku měl vynikající samostředící schopnost. Z jiné perspektivy má úhel špice velký vliv také na tvorbu otřepů. Je známo, že úhly špice pod 90 nebo nad 150 stupňů pomáhají minimalizovat výšku otřepů na výstupu z díry. Vrták s úhlem špice 155 stupňů se proto hodí pro výstup z titanu, ale nemá dobrou samostředící schopnost. Proto je navržen design s dvojitým úhlem špice s vnitřním úhlem špice 130 stupňů a vnějším úhlem špice 155 stupňů. Celková výška špice takového vrtáku je spíše menší ve srovnání s obvykle používanými vrtáky s dlouhými řeznými hranami. To přivádí 3. a 4. fazetu velmi rychle do kontaktu s materiálem, což napomáhá udržení úzkých tolerancí díry.

Další výhodou navržené konstrukce vrtáku je možnost vnitřního přívodu chladiva. Pro vrtání samotných CFRP desek pomáhá vnitřní přívod chladiva rychlému odvodu CFRP prachu ven z drážek vrtáku prostřednictvím stlačeného vzduchu. Pro řezání vrstvených materiálů z CFRP a titanu může být aplikováno minimální mazání (MQL, resp. MMS), které využívá tyto vnitřní kanálky pro přívod chladiva pro zajištění mazání a redukci obrovského množství tepla generovaného při obrábění titanu z důvodu jeho nízké tepelné vodivosti. To činí MQL absolutně nezbytným pro vrtání s PKD nástroji, jelikož jinak by značné teplo na řezné hraně vedlo ke grafitezaci nebo k následnému vytváření TiC. Takováto reakce vede k chemickému opotřebení v oblasti břítů a nakonec k vylamování PKD na břitech.

Experimentální studie

Vyvíjené PKD nástroje jsou experimentálně testovány za účelem vyhodnocení nejvhodnější PKD jakosti a nástrojových geometrií pro konkrétní aplikace. Uspořádání testu a řezné parametry jsou následující.

- Testované nástroje

Pájené PKD vrtáky, průměr 11,113 mm (7/16") s různými PKD jakostmi (G4, KD1415, a KD1425) a nepovlakované celokarbidové vrtáky s toutéž geometrií.

- Zkušební dílec

Zkušební dílec sestává z 8,7 mm (0,342") silné komerčně dodávané CFRP (Isocarbon 3K)

desky bezpečně spojené s 10,8 mm (0,425") silnou Ti-6Al-4V deskou. Testované nástroje vrtají průběžné díry vstupující z CFRP strany a vystupující ze strany titanu.

- Obráběcí stroj a chladivo

CNC obráběcí centrum (Heckert CWK 400) s horizontálním vřetenem a s vnitřním přívodem MQL chladiva (Vascomill MMS FA2) skrz vřeteno.

- Řezné parametry

Řezné parametry: řezná rychlost 20 m/min (65 SFM) a posuv 0,05 mm/ot (0,002"ipr) pro CFRP i pro titan. Nebyly použity cykly s vyjížděním nástroje z díry během vrtání.

- Kontrola nástroje

Pro sledování průběhu opotřebením nástroje byly testované vrtáky vyšetřovány pod mikroskopem vždy po vyvrtání 4 otvorů. Vyšetřování mechanismu opotřebením bylo prováděno pod mikroskopem po vyvrtání 24 děr.

- Rozměry otvorů

Po provedení všech testů obrábění byly zkušební dílce vyčištěny a označeny. Všechny vyvrtané

otvory byly zkontrolovány. Průměr každé díry byl změřen ve čtyřech hloubkách (dvou ve vrstvě CFRP poblíž vstupního a výstupního povrchu a dvou v titanové vrstvě stejným způsobem). Rovněž byla měřena velikost otřepů na spodní titanové ploše.

Výsledky a analýzy

Dlouhá, předvídatelná a stále stejná životnost nástroje je klíčovým faktorem rozhodujícím o úspěchu nástroje. Pro akceptování kvalitního vrtání CFRP/Titanové kompozitové matrice musí být splněno několik požadavků současně. Rozměr díry musí být uvnitř požadované úzké tolerance, a otřepy na výstupu musí být takové, aby bylo možno je snadno odjehlit. Pro vyloučení potencionálního poškození díry vlivem havárie nástroje a udržení možnosti renovace nástroje musí být minimalizováno a sledováno vylamování břitu. Pro rozhodnutí, kdy testovaný nástroj dosahuje konce životnosti, byla stanovena následující kritéria:

a) tolerance rozměru díry $11,113 + 70 \mu\text{m}$ (H10);

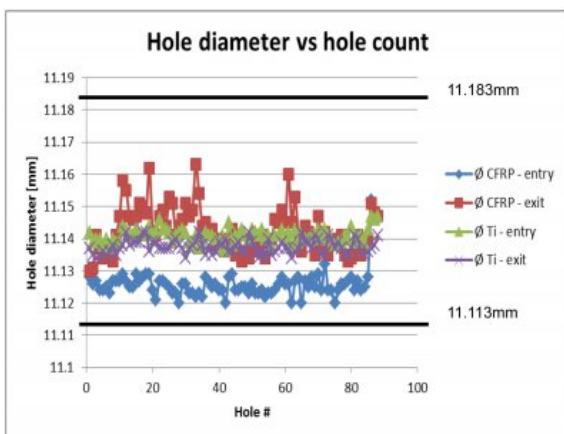
b) velikost otřepů do 0,02 mm;

c) výskyt vylamování břitu.

Výsledky testu ukazují, že hlavní příčinou poškození PKD vrtáků je vylamování břitu na konci jejich životnosti, zatímco karbidové vrtáky selhávaly překročením specifikované velikosti otřepu. Požadavkům na kvalitu díry vyhověly všechny vrtané díry v tomto testu.

Rozměry otvorů

Obrázek 1 ukazuje příklad průměrů děr pro jeden testovaný PKD nástroj. Pro každou kontrolovanou díru byl její průměr měřen ve čtyřech různých místech; dvou v oblasti CFRP a dvou v oblasti titanu, vždy v blízkosti vstupní plochy a spodní výstupní plochy.



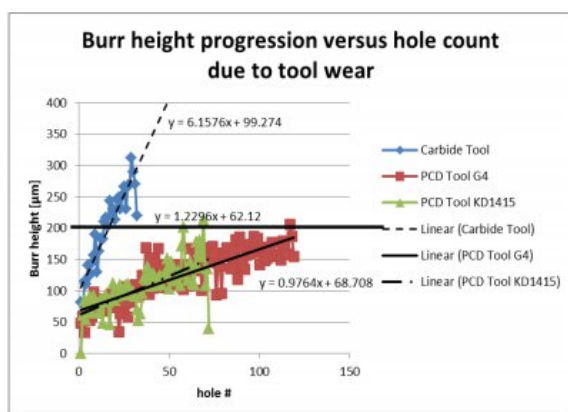
Obr. 1: Průměr otvorů v závislosti na počtu děr pro PKD nástroj

Je patrné, že průměr díry v titanové vrstvě se nachází velmi přesně ve středu specifikované tolerance a kolísá v malém rozsahu 10 µm. Rozměr díry na vstupu do titanové vrstvy je velmi blízký rozměru díry na výstupu. V CFRP vrstvě je relativně velký rozdíl v rozměrech díry mezi vstupem a výstupem. Tento rozdíl je výsledkem poškrábání stěny otvoru třískami během jejich odvádění z místa řezu. Pro snížení poškrábání třískami a zvýšení shodnosti rozměrů díry je nutné zlepšit utváření třísek. Je obtížné řešit záležitosti tvorby třísek samotným tvarem nástroje. V praxi je ověřeno, že přidání vyjížděcích cyklů nebo vrtání s podporou vibrací napomáhá kontrolovat délku třísky a snižovat efekt poškrábání.

Výsledky ukazují, že navržené nové provedení hrotu vrtáku je schopno vytvářet díry v toleranci H10. Při použití optimalizovaných podmínek obrábění je dokonce s dobrou procesní spolehlivostí dosažitelný toleranční stupeň H8. Závislost kvality díry na materiálu řezné hrany nebyla patrná. PKD i karbidové nástroje se stejnou geometrií špičky vrtáku dávaly podobné výsledky v kvalitě díry.

Velikost otřepu

Prokazatelně je zřejmá závislost materiálu ostří řezné hrany vrtáku na velikosti otřepů a mechanismu opotřebení. Obrázek 2 ukazuje růst výšky otřepů v závislosti na počtu děr v případě karbidu a dvou PKD jakostí (KD1415 a G4).



Obr. 2: Nárůst velikosti otřepů v závislosti na počtu děr z důvodu opotřebení nástroje

Je patrné, že karbidový vrták vytváří nadměrné otřepy na výstupu z titanu již po 14 dírách, zatímco první otvor mimo specifikaci pro dva uvedené PKD vrtáky je při 57. a 117. díře.

Teoreticky je nárůst velikosti otřepu důsledkem opotřebení břitu řezného nástroje. To může být patrné ze srovnání karbidu a PKD, důvodem je velký rozdíl v tvrdosti materiálu, a proto je postup opotřebení břitu u PKD nástrojů pomalejší. PKD vrták má mnohem menší opotřebení břitu než karbidový. Rozdíl v postupu opotřebení mezi třemi PKD sortami se zdá být menší. Dominantním způsobem opotřebení PKD jakostí je vylamování řezné hrany/břitu.

	G4	KD1415	KD1425
Drill 1	28	68	56
Drill 2	123	71	62
Drill 3	81	88	16
Average	77	76	45
Deviation (+/-)	(46 / 49)	(12 / 8)	(17 / 29)

Tabulka 1 dává přehled výsledků životnosti nástrojů testovaných sort PKD. Ačkoliv G4 a KD1415 mohou být spatřovány jako velmi podobné, pokud jde o průměrnou životnost nástroje, KD1415 vykazuje mnohem větší shodu v životnosti nástrojů, stejně jako lepší obrobitelnost pro snížení výrobních nákladů. Proto byla vybrána jako nejvhodnější sorta pro tuto aplikaci.

Závěry

Byly vyvinuty a testovány pájené PKD karbidové vrtáky s třemi různými sortami PKD a optimální geometrií nástrojů. Závěry této práce jsou následující:

1) Technologie 3D pájení umožňuje výrobu PKD nástrojů s libovolnou šroubovicí, a tudíž s velkými úhly čela. Ve srovnání s „capped“ PKD řešením 3D pájení zlepšuje schopnost obrábění odstraněním menšího množství PKD z funkčních povrchů.

2) Díky optimální geometrii nástroje (dvojitý úhel špice, šroubovitě drážky, šroubovitě kanály pro vnitřní přívod chladiwa, velké úhly čela) byly vyvinuté PKD vrtáky schopny dosáhnout požadovaných vlastností děr (průměry děr a kontrola výšky otřepů).

3) Ve srovnání s nepovlakovanými karbidovými vrtáky vykazují PKD vrtáky významné zvýšení životnosti nástroje.

4) Všechny testované PKD vrtáky mají shodný charakter opotřebení, který začíná mikrotrhlinami na čele a končí havárií vyštípnutím břitu.

5) sorta KD1415 překonala G4 a KD1425 v délce životnosti nástrojů a lepší obrobitelnosti. Proto byla KD1415 nejvhodnější sortou pro tuto aplikaci.

Kennametal Inc., technologický leader ve strojírenství, již více než 75. let, přináší produktivitu zákazníkům hledajícím špičkový výkon v náročném prostředí. Společnost poskytuje inovativní produkty odolné proti opotřebení, aplikační inženýring a služby s podporou pokročilých materiálových věd, které slouží zákazníkům v 60 zemích napříč různorodými odvětvími od leteckého průmyslu, zemních prací, energetiky, průmyslové výroby, dopravy a infrastruktury. S přibližně 14.000 zaměstnanci a prodejem za téměř 3 miliardy dolarů společnost realizuje polovinu ze svého příjmu mimo severní Ameriku a celkově 40 % z inovací představila v

uplynulých pěti letech. Uznávaný jako jedna z „World's Most Ethical Companies“ (Ethisphere), „Outstanding Corporate Innovator“ (Product Development Management Association) a „America's Safest Companies“ (EHS Today) se zaměřením na 100% bezpečnost, Kennametal a jeho nadace investuje do technického vzdělávání, průmyslových technologií a materiálových věd pro naplnění slibu pokroku a ekonomické prosperity pro všechny lid. Pro více informací navštivte firemní webové stránky www.kennametal.com.

Říčany - Jažlovice

Zděbradská 56
251 01 Říčany - Jažlovice
Czech Republic
Jan FENZ
Telefon: 0 800 900 840
Fax: 0 800 900 225
jan.fenz@kennametal.com

Kennametal Shared Services GmbH

Wehlauer Strasse 73
D-90766 Fuerth
Carsten GROMOLL
Telefon: +49 911 9735 557
Fax: +49 911 9735 551
carsten.gromoll@kennametal.com