

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITŮ

MACHINING FIBRE REINFORCED COMPOSITES

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ

V OBORU

STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE



BRNO 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

kompozitní materiály, obrábění, vrtání, vrtáky, nástrojové materiály, opotřebení nástroje, řezné síly, obrobený povrch

KEY WORDS

composite materials, machining, drilling, drills, tool materials, tool wear, cutting forces, machined surface

OBSAH

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1 Úvod | 4 |
| 2 Kompozitní materiály | 5 |
| 3 Obrábění vláknově vyztužených kompozitů | 9 |
| 3.1 Základní rozbor problematiky | 9 |
| 3.2 Vrtání | 11 |
| 3.2.1 Použité nástroje | 11 |
| 3.2.2 Vliv opotřebení vrtáků na složky řezné síly | 13 |
| 3.2.3 Řezné síly | 16 |
| 3.2.4 Kvalita povrchu obrobené plochy | 19 |
| 4 Závěr | 23 |
| 5 Literatura | 24 |
| 6 Summary | 25 |
| 7 Představení autora | 26 |

1 ÚVOD

Slovo „kompozitní“ znamená „vytvořený, či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál, který má dvě nebo více odlišných materiálových složek, neboli fází, je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají tyto složky rozdílné fyzikální vlastnosti a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek, je takovýto materiál označován jako kompozit. Kompozity jsou tvořeny jednou nebo více nespojitými fázemi ponořenými ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se **vyztužení** nebo vyztužující materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá **matrice** (pojivo).

Vlastnosti kompozitů jsou ovlivňovány především vlastnostmi jejich materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Vlastnosti systému může určovat součet vlastností složek podle jejich objemového podílu nebo složky mohou na sebe vzájemně působit synergickým způsobem, takže zajišťují kompozitu vlastnosti, které nemohou být přičítány prostému součtu vlastností složek na základě jejich objemových podílů. Proto při popisu kompozitu jako materiálového systému je potřeba vedle specifikace materiálů složek a jejich vlastností specifikovat i geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužení může být popsána tvarem, velikostí a distribucí velikosti. Systémy s vyztužením se však mohou lišit při shodné geometrii jeden od druhého v mnoha směrech; např. se může vyztužení lišit v koncentraci, koncentrační distribuci a orientaci. Všechny tyto faktory mohou být tedy důležité v určování vlastností kompozitů, ale zřídka bývají všechny brány v úvahu při odvozování teoretických vztahů pro kompozity.

K základním přednostem vláknových kompozitů patří nízká měrná hmotnost, vynikající mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti), flexibilita tvarů, povrchů a barev, vysoká rozměrová stálost, nekoroziivnost, elektrická nevodivost, nízká tepelná vodivost, nulový útlum elektromagnetických vln, snadná montáž a minimální dlouhodobá údržba. Mezi relativní nevýhody těchto materiálů lze zařadit nižší teploty použití, vyšší kilogramovou cenu a menší objem a dostupnost konkrétních dat pro ekonomicky úspěšné konstrukční aplikace.

Spotřeba kompozitních materiálů v průmyslově vyspělých krajinách celého světa je velmi vysoká. První místo patří jednoznačně USA, kde např. v roce 1996 dosáhla celková odhadovaná spotřeba výše 1, 471 mil. tun (v ceně 116 miliard dolarů), z toho nejvíce v oblasti výroby dopravních zařízení (432 tisíce tun/22 miliard USD), při stavbě budov (287 tisíc tun/17 miliard USD), v antikoroziivních aplikacích (182 tisíce tun/15 miliard USD), při stavbě lodí (169 tisíc tun/14 miliard USD), při výrobě spotřebního zboží (121 tisíc tun/11 miliard USD) atd. Největší jednorázovou stavební aplikací tažených vláknově vyztužených kompozitních profilů v Evropě bylo jejich použití při stavbě tunelu pod kanálem La Manche (3 500 tun).

V ČR je odhadována spotřeba nejrůznějších typů dlouhovláknových kompozitů pouze na 5 000 tun ročně. V přepočtu na jednoho obyvatele je to tedy zhruba 10× méně než v USA a 5–8× méně než v Japonsku a zemích EU. Většina vláknových kompozitů produkovaných v ČR má formu ručně kladených laminátů na bázi skelných výztuží s polyesterovými pojivy, i když se i zde začínají objevovat modernější technologie. Je tedy nasnadě, že i u nás je třeba pro příští léta očekávat výrazný nárůst objemu výroby těchto materiálů, včetně nárůstu požadavků na zavádění nových technologií jejich výroby, zpracování i obrábění.

Zkušenosti ze světa ukazují, že pro úspěšnou aplikaci kompozitních materiálů je vždy třeba se spojit s výrobcem, který je schopen kromě vlastních tažených profilů a desek dodat i databázi konstrukčních údajů, případně základních údajů pro obrábění, které na rozdíl od dlouho používaných klasických materiálů nejsou běžně k dispozici.

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál má dvě nebo více odlišných složek s rozdílnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, které jsou výrazně odlišné od vlastností výsledného kompozitu. Jednu složku takovýchto kompozitních materiálů tvoří matrice (pojivo), druhou různým prostorovým způsobem uspořádaná vyztužující vlákna:

♦ **matrice:**

- pryskyřice, polymery:
 - * reaktoplasty (PET – polyestery, EP – epoxidy, PIM – polyimidy, bismaleimidy),
 - * termoplasty (PP – polypropylény, PA – polyamidy, např. nylon, PEEK – polyéter, éterketony, PC – polykarbonáty),
 - * kaučuky (kordy),
- silikáty (sklo, cement, keramika),
- kovy (zejména hliník a jeho slitiny),

♦ **vyztužující vlákna** (jejich objem může v některých případech dosáhnout podílu až 80 %):

- přírodní (bavlna, sisal, juta, celulóza),
- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, bórová, SiC),
- organická (aramidy – Kevlar, polyimidy, UHMWPE – polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotností).

Hlavní přednost vyztužených kompozitů spočívá v tom, že se v nich synergicky kombinují vlastnosti matrice a vyztužujících vláken tak, že výsledný materiál má zcela unikátní vlastnosti, které jsou u samotných složek nedosažitelné. Úkolem pojiva je chránit výztuž před mechanickým poškozením, udržovat ji v daném tvaru a umožnit přenos vnějších napětí do výztuže. Nositelem pevnosti a tuhosti jsou u těchto materiálů vyztužující vlákna a pojivo k uvedeným vlastnostem nijak výrazněji nepřispívá. Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, která mají o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem, se při vnějším namáhání deformují méně než pojivo. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/pojivo umožňujících přenos napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna, překročí-li jejich délka jistou kritickou hodnotu, nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže pojivo je prakticky bez napětí.

Podle tvaru a prostorového uspořádání vyztužujících vláken lze kompozity klasifikovat následujícím způsobem:

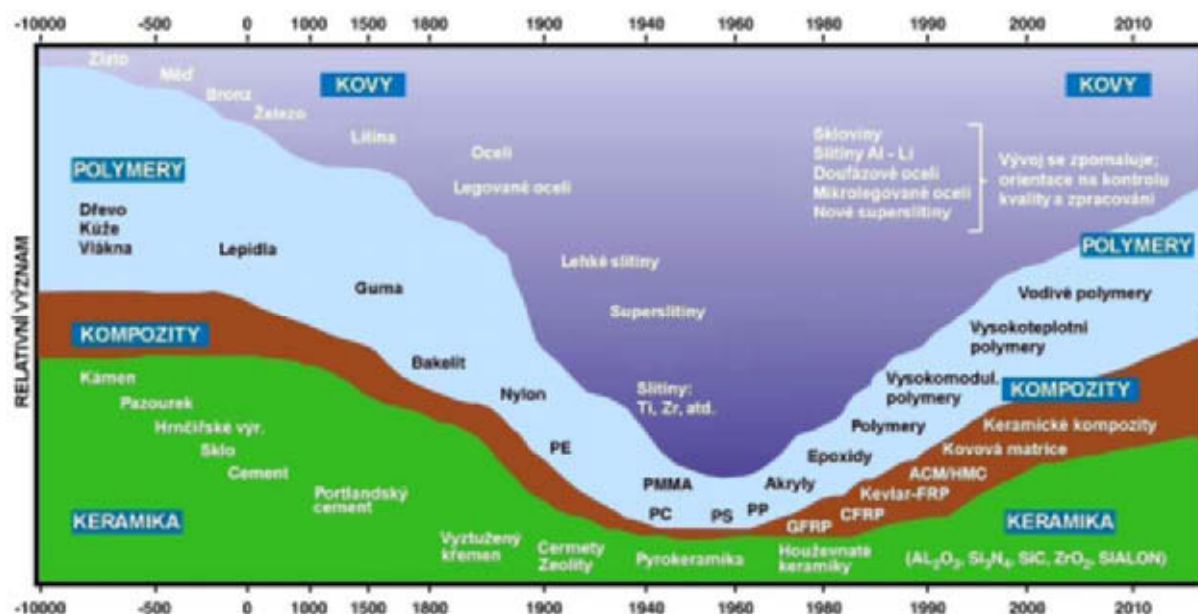
♦ **jednosměrné** (vlákna jsou orientována v jednom směru):

- krátkovláknové (poměr délky vlákna k jeho průměru je menší než 100),
- dlouhovláknové (poměr délky vlákna k jeho průměru je větší než 100 nebo je délka vlákna totožná s délkou dílce):
 - * prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí proimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šířky),
 - * tažené profily (tyčovina),

♦ **mnohosměrné** (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry):

- krátkovláknové,
- dlouhovláknové:
 - * lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů se stejnými nebo různými vzájemnými orientacemi výztuže),
 - * lamináty s tkanou výztuží (vlákna jsou před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi),
 - * lamináty s netkanou výztuží (vlákna jsou zpracována do roun, aniž by byla tkána),
- tažené profily (komplikovanější tvary s kombinací vyztužujících vláken).

Přestože jsou vláknové kompozity mnohdy považovány za výdobytek vědy konce 20. století, byly používány již našimi předky ještě před počátkem našeho letopočtu (obr. 1). Hlavní aplikační oblastí bylo stavebnictví, kde lidé pomocí rostlinných vláken vyztužovali jílovitá pojiva. Ještě dlouho předtím, než se člověk mohl nazývat homo sapiens, využila předností vláknových kompozitů v „konstrukčních“ aplikacích živá příroda. Lehkost, pevnost, odolnost a maximální účelnost jsou konstrukčními principy, které příroda zabudovala do struktury dřeva a nosných prvků živých organismů, jako jsou kosti, rostlinné stvoly, různé živočišné schránky atd. Dlouhým vývojem a přizpůsobováním „designu“ svých výtvorů podmínkám namáhání dosáhla příroda nejefektivnějšího uložení vláken a optimálních vlastností pojiva.



Obr. 1 Relativní význam materiálů v průběhu staletí

Obrovská vnitřní dynamika rozvoje vláknově vyztužených kompozitů a vědecky podložené pochopení základních principů těchto materiálů se v současné době projevuje prudkým nárůstem jejich komerčního využití v tradičních i netradičních aplikacích. Pokud byly výzkum i užití kompozitů až do poloviny osmdesátých let stimulovány hlavně vojenskými potřebami, začínají se dnes postupně přesouvat do civilních oblastí. Většímu celosvětovému rozšiřování aplikačních oblastí těchto materiálů brání především nedostatek levných masových produkčních technologií, nutnost vytvoření nových algoritmů pro navrhování konstrukcí a vyšší kilogramová cena.

Vlastnosti kompozitů jsou ovlivňovány především vlastnostmi jejich materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Vlastnosti systému může určovat součet vlastností složek podle jejich objemového podílu nebo složky mohou na sebe vzájemně působit synergickým způsobem, takže zajišťují kompozitu vlastnosti, které nemohou být přičítány prostému součtu vlastností složek na základě jejich objemových podílů. Proto při popisu kompozitu jako materiálového systému je potřeba vedle specifikace materiálů složek a jejich vlastností specifikovat i geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužení může být popsána tvarem, velikostí a distribucí velikosti. Systémy s vyztužením se však mohou lišit při shodné geometrii jeden od druhého v mnoha směrech; např. se může vyztužení lišit v koncentraci, koncentrační distribuci a orientaci. Všechny tyto faktory mohou být tedy důležité v určování vlastností kompozitů, ale zřídka bývají všechny brány v úvahu při odvozování teoretických vztahů pro kompozity.

Obecně lze základní fyzikálně mechanické vlastnosti vláknových kompozitů shrnout následovně (hvězdičkou jsou označeny příznivé vlastnosti, tečkou nevýhody):

- * nízká měrná hmotnost,
- * vynikající mechanické vlastnosti,
- * flexibilita tvarů, povrchů, barev,
- * vysoká rozměrová stálost,
- * nekorozivnost,
- * elektrická nevodivost,
- * nízká tepelná vodivost,
- * nulový útlum elektromagnetických vln,
- * snadná montáž,
- * minimální dlouhodobá údržba,
- nižší teploty použití,
- vyšší kilogramová cena,
- menší objem a dostupnost konkrétních konstrukčních dat.

Nízká měrná hmotnost kompozitů předurčuje jejich užití nejenom při výrobě letecké a kosmické techniky, ale i v konstrukcích pozemních dopravních prostředků všech typů (osobní a nákladní automobily, autobusy, trolejbusy, kolejová vozidla, říční i námořní plavidla). Nižší hmotnost vozidel i lodí, v jejichž konstrukci jsou ve velké míře použity lehké kompozitní materiály, se nutně projeví ve výrazném snížení spotřeby pohonných hmot.

Odolnost kompozitů proti korozi má velký význam ve stavebnictví, kde znamená prodloužení životnosti konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích a snížení nákladů na jejich údržbu na minimum. Navíc se velmi zefektivňuje montážní proces a otevírají se nové možnosti pro zajímavá a netradiční architektonická i technologická řešení, protože jednotlivé konstrukční prvky lze vyrobit v libovolné barvě a v mnoha povrchových úpravách. Možnost sestavit celou konstrukci z předem připravených a na místo stavby vcelku dopravených modulů výrazně zrychluje montáž konstrukce. Jednotlivé prvky konstrukce mohou být spojovány pomocí šroubů nebo lepením, což vylučuje potřebu použití svařovacích aparatur a montáž může být prováděna bez přerušení výroby i v takových provozech, kde je zakázáno pracovat s otevřeným ohněm. Prakticky nulový útlum elektromagnetických vln znamená, že anténní nástavby na výškových budovách jsou pro tyto vlny zcela propustné a přitom poskytují anténním systémům dokonalou ochranu proti vnějšímu prostředí.

Pochůzně rošty z kompozitních materiálů používané v chemických provozech, čistíčkách odpadních vod, úpravnách vod, potravinářských provozech, zařízeních pro rozvod elektrické energie, pro údržbu na elektrických drahách a v mnoha dalších provozech mohou být vyrobeny i v nehořlavém provedení. Ve speciální nehořlavé úpravě jsou schopny zachovat si svoji integritu při teplotách 700 °C po dobu až třiceti minut. Nízká tepelná vodivost výrazně usnadňuje zásah hasičů v případě požáru, protože na rozdíl od ocelových konstrukcí nedochází v důsledku žáru ke kolapsu konstrukce a teplota se vzdáleností od ohniska požáru velmi rychle klesá.

Elektrická nevodivost dělá z kompozitních profilů ideální konstrukční prvky pro výrobu zařízení používaných v blízkosti vedení elektrické energie (transformátory, rozvaděče, nosiče kabelů a jiné konstrukce v rozvodných zařízeních, montážní žebříky, manipulační tyče, kryty).

Oblasti použití vláknově vyztužených kompozitů jsou určeny především vlastnostmi těchto materiálů. K největším uživatelům kompozitních materiálů patří:

- stavebnictví (železniční a lehké konstrukce, ekologické a chemické stavby, papírenské provozy, stavby pro rozvod energie, telekomunikační stavby, nástavby na výškové budovy, pláště budov, okenní rámy, shrnovací vrata, pracovní a obslužné plošiny, lávky a přechody v provozech s agresivnějším prostředím, rošty pro chemické provozy, čističky a úpravný vod, potravinářské provozy, rozvodná zařízení atd.),
- nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy, ramena hydraulických zvedáků, výsuvné plošiny, přívěsy za nákladní i osobní automobily),
- výroba prostředků pozemní hromadné dopravy (interiéry kolejových vozidel součásti karosérií kolejových vozidel, trolejbusy, autobusy),
- výroba osobních automobilů,
- letecký a kosmický průmysl,
- výroba vojenské techniky,
- rozvod elektrické energie (rozvaděče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, kabelové tratě, manipulační tyče, nevodivé obslužné žebříky atd.),
- výroba sportovních potřeb (golfové hole, luky, hokejky),
- oblast reklamy (bilboardy).

Tab. 1 Odhadovaná spotřeba kompozitních materiálů v USA (rok 1996, tisíce tun)¹⁵

| Průmyslová oblast | LK | DO | SB | SZ | KOR | E | L | DZ | O | Σ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| Vstřikované výlisky TP 14 | 1,36 | 44,45 | 6,62 | 1,59 | 1,36 | 48,53 | 0,91 | 140,61 | 4,54 | 249,93 |
| TP vyztužené skelnými rohožemi (GMT) 2 | 0 | 0,91 | 5,44 | 0,91 | 0 | 0 | 0,45 | 24,04 | 0,91 | 32,66 |
| Vstřikované výlisky TS 6 | 0 | 4,08 | 0 | 9,53 | 0 | 10,43 | 0 | 32,66 | 0,45 | 57,15 |
| Objemově lisované výrobky (BMC) 7 | 0 | 13,61 | 3,18 | 4,54 | 0 | 13,15 | 0,45 | 21,77 | 0,91 | 57,61 |
| Kontinuálně lisované výrobky (SMC) 20 | 0,23 | 11,79 | 12,25 | 8,16 | 1,36 | 10,89 | 1,36 | 111,13 | 19,05 | 176,22 |
| Lisování přenosem pryskyřice (RTM) 8 | 1,95 | 1,36 | 6,35 | 1,81 | 0,91 | 1,81 | 11,11 | 21,18 | 0,45 | 46,95 |
| Ruční laminování 9 | 0,68 | 0,91 | 25,40 | 10,43 | 13,15 | 9,53 | 53,98 | 24,04 | 16,78 | 154,90 |
| Nástřík pryskyřice 18 | 0 | 0 | 117,93 | 17,69 | 31,75 | 4,08 | 86,18 | 29,03 | 13,61 | 300,28 |
| Prepregy 7 | 9,53 | 0,91 | 0,68 | 1,81 | 0 | 0 | 2,95 | 0 | 1,36 | 17,24 |
| Kontinuální laminování 7 | 6,35 | 0 | 88,00 | 52,16 | 2,27 | 0,45 | 0 | 8,62 | 0 | 157,85 |
| Pultruze 8 | 0,91 | 0,45 | 11,79 | 5,44 | 31,75 | 40,82 | 0 | 0,91 | 1,36 | 93,44 |
| Navíjení 10 | 1,36 | 0 | 3,63 | 3,63 | 95,25 | 5,44 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 112,04 |
| Ostatní | 0 | 0 | 0,91 | 3,18 | 4,08 | 0 | 3,18 | 0 | 3,18 | 14,51 |
| Celkem 116 | 20,87 | 78,47 | 286,67 | 120,88 | 181,89 | 143,34 | 168,51 | 432,27 | 65,77 | 1471,00 |
| Ceny v miliardách USD | 20 | 5 | 17 | 11 | 15 | 12 | 14 | 22 | | 116 |
| <i>TP – termoplasty, TS – reaktoplasty, GMT – glass mat thermoplastics, BMC – bulk moulding compound, SMC – sheet moulding compound, RTM – resin transfer moulding</i> | <i>LK – letectví a kosmonautika, DO – přístroje a zařízení pro domácnost a obchod, SB – stavba budov, SZ – spotřební zboží, KOR – výrobky a zařízení pro antikorozní aplikace, E – elektrotechnika a elektronika, L – výroba lodí a námořní průmysl, DZ – dopravní zařízení, O – ostatní, Σ – celkem</i> | | | | | | | | | |

Velmi zajímavé údaje poskytuje tabulka č. 1, která dokumentuje známou skutečnost, že spotřeba kompozitních materiálů v severoamerických průmyslových podnicích je patrně v celosvětovém měřítku absolutně nejvyšší. Objemem spotřeby vede jednoznačně průmysl výroby dopravních zařízení (automobily všech typů a velikostí, autobusy, trolejbusy, tramvaje, vagóny) následovaný stavebním průmyslem a korozními aplikacemi. Pokud by ale tyto aplikace byly považovány rovněž za stavební, po součtu se stavebním průmyslem je stavební spotřeba vyšší než spotřeba při výrobě dopravních zařízení. K poměrně velkým spotřebitelům

kompozitů patří i výroba lodí, výroba elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení a výroba spotřebního zboží. Nejmenší spotřebu při hodnocení pomocí hmotnosti dílců má kosmický a letecký průmysl, při cenovém srovnání (20 miliard USD) se ale řadí hned za dopravní zařízení (22 miliard USD). Z porovnání podílu cena/hmotnost, který má u letecké a kosmické techniky hodnotu 0,96 a u dopravních zařízení pouze 0,05, je zřejmé, že kompozitní dílce pro letadla a kosmické prostředky jsou vyráběny z mnohem dražších materiálů.

Z hlediska způsobu výroby mají primát stříkací technologie, následuje vstřikování termoplastů, kontinuální lisování tenkostěnných kompozitů (metoda SMC), s téměř stejnými hodnotami kontinuální laminování a ruční laminování, dále navíjení, pultruze (zejména pro korozní aplikace a elektrotechniku) atd. Nejmenší podíl na spotřebě vykazují prepregy, při hodnocení podle jednotlivých výrobních odvětví je více jak polovina jejich celkového množství (přes 55 %) použita v letecké a kosmické technice. Zajímavý je velmi vysoký podíl navíjených kompozitních dílců pro korozní aplikace (85 % celkového objemu výroby).

3 OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITŮ

3.1 Základní rozbor problematiky

Většina kompozitních dílců, které přicházejí v úvahu pro obrábění, jsou vyztužené skelnými vlákny v různé formě, orientaci i obsahu. Zejména maximální obsah skla (v některých kompozitech i přes 80 %) je velmi důležitým faktorem, který limituje obráběcí proces. Protože sklo v Mohsově stupnici tvrdosti sousedí se slinutými karbidy (SK), karbidem křemíku a boru, je zřejmé, že všechny ostatní materiály (samozřejmě mimo diamantu), pokud budou použity jako nástrojové materiály pro obrábění kompozitů vyztužených skelnými vlákny, budou podléhat velmi intenzivnímu opotřebení. Další nepříjemnou skutečností z hlediska obrábění je to, že plnivo je různě orientováno, takže obráběný materiál je silně anizotropní. Velmi významně proces obrábění ovlivňuje i pojivo, protože špatně odvádí vzniklé teplo a „zalepuje“ funkční plochy řezného nástroje (zejména čelo) nebo zrna brousicího kotouče. Proto je pro obrábění pojiva potřebná zcela jiná optimální geometrie nástroje, než je geometrie pro obrábění samotné vláknové výztuže.

Vyztužené kompozity lze obrábět na běžných kovoobráběcích nebo i dřevoobráběcích strojích. Na rozdíl od obvykle obráběných kovů a kovových slitin je však třeba při navrhování řezných podmínek více přihlížet ke zvláštěm těchto materiálů:

- Vzhledem k různé směrové orientaci vyztužujících vláken vykazují mechanické vlastnosti kompozitů silnou anizotropii (výrazně se liší ve směru podél vláken a napříč vláken). Vysoké hodnoty tahové pevnosti zvyšují intenzitu opotřebení řezného nástroje.
- Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a jsou hlavní příčinou velmi intenzivního opotřebení nástroje. Proto je pro dosažení vyšší trvanlivosti je nutné volit nástrojové materiály s vysokou odolností vůči otěru (např. povlakované SK, diamant).
- Velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu způsobuje, že vzniklé teplo přechází do obráběného materiálu a třísky pouze v zanedbatelném rozsahu a musí tedy být v maximální míře odvedeno nástrojem, případně řeznou kapalinou (pokud vůbec může být použita). Nadměrné tepelné zatížení nástroje tak velmi výrazně zvyšuje intenzitu jeho opotřebení. Odhadovaný podíl jednotlivých zdrojů odvodu tepla je uveden v tabulce č. 26.
- Kompozity mají nízkou tepelnou odolnost, při vyšších teplotách (100–300 °C) nejsou stálé. Proto je třeba volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota, kdy dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obrobeném povrchu se začnou objevovat spálené oblasti.

- Několicí násobná tepelná roztažnost proti kovovým materiálům (hodnota tepelné roztažnosti kompozitů klesá s rostoucím obsahem skelných vláken) způsobuje poměrně velkou změnu rozměrů vyráběné součásti během vlastního procesu obrábění nebo i po jeho skončení. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu při výrobě i měření přesněji lícovaných součástí.
- Proces tvoření třísky v daleko větší míře ovlivňuje integritu obrobené plochy (při nevhodných řezných podmínkách může dojít k popraskání obrobené plochy nebo z povrchu obrobku vystupují chuchvalce vláken a pryskyřice; při soustružení a vrtání se na nástroj namotávají pramence nedělené třísky). V důsledku mechanického a tepelného namáhání může v oblasti řezu docházet ke vzniku trhlin a delaminaci obráběného materiálu.
- Při obrábění vyztužených kompozitů se tvoří drobné částičky třísky (zejména z vyztužujících vláken), které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolí. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí.
- Vzhledem k nasákavosti kompozitů nelze při jejich obrábění většinou aplikovat obvyklé řezné kapaliny (někdy lze použít čistou vodu s inhibátorem koroze, olejové emulze jsou doporučovány pouze výjimečně). Nevhodná řezná kapalina může do značné míry snížit pevnost obráběného materiálu (tento vliv je ale dočasný).
- Hodnoty koeficientu tření mezi obráběným kompozitním materiálem a hřbetem nástroje nebo třískou a čelem nástroje (0,15–0,30) jsou pro všechny nejužívanější nástrojové materiály (rychlořezné oceli, SK, řeznou keramiku, diamant) nižší než při obrábění kovových materiálů.
- Hodnoty měrných řezných sil jsou mnohem nižší, než při obrábění kovů – tím se snižují řezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje.

K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílců z vláknově vyztužených kompozitů patří soustružení, frézování, vrtání, řezání (dělení) a broušení (dokončování ploch různého tvaru a výroba závitů).

Soustružnické operace slouží pro výrobu válcových a kuželových spojovacích částí, závitových drážek, zápichů a osazení, a pro upichování. Přesnost obrobené plochy se pohybuje v rozmezí IT9 až IT11, drsnost povrchu v rozmezí $Ra=20\ \mu\text{m}$ až $Ra=80\ \mu\text{m}$.

Frézováním jsou vyráběny rovinné plochy, drážky a výřezy různých tvarů, jako nástroje jsou používány čelní, válcové, rohové a speciální frézy. Přesnost obrobené plochy dosahuje hodnot IT11 až IT13, drsnost povrchu $Ra=20\ \mu\text{m}$.

Při sestavování konstrukcí z kompozitních dílců je třeba velmi často upravovat jejich délku. K tomuto účelu jsou používány kotoučové nebo pásové pily a diamantové rozbrušovací kotouče. Základním požadavkem každé dělicí operace je úzký řez, drsnost povrchu je srovnatelná s frézováním.

Broušení jako dokončovací operace zaručuje nejvyšší přesnost a nejnižší drsnost povrchu obrobené plochy kompozitního dílce ($Ra=2,5\ \mu\text{m}$).

Vůbec nejužívanější obráběcí operací kompozitů je vrtání sloužící k výrobě děr pro různé spojovací součásti (šrouby, nýty, kolíky, atd.) s přesností IT10 až IT13 a drsností povrchu $Ra=10\text{--}42\ \mu\text{m}$. V případech, kdy je požadována větší přesnost a nižší drsnost povrchu, lze vrtanou díru zpřesnit následným vystružováním.

3.2 Vrtání

Pro vrtání děr v součástech vyrobených z vláknových kompozitů lze použít klasické šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí bez povlaků nebo s povrchovými otěruvzdornými povlaky. V obou případech je ale nutné očekávat nízkou trvanlivost a s ní spojenou častou výměnu a přestřování nástroje, samozřejmě ve větší míře u nepovlakovaných vrtáků.

Vzhledem k vyšší odolnosti proti opotřebení se pro vrtání vláknově vyztužených kompozitů hodí vrtáky ze slinutých karbidů. U dražších celokarbidových, monolitních nástrojů, které mohou být vzhledem k velikosti pracovní části mnohokrát přestřovány, lze očekávat velmi dlouhou životnost. Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Levnější nástroje s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů vykazují menší životnost, protože počet ostření je omezen velikostí samotné destičky.

Nejvyšší trvanlivost a tedy i životnost dosahují při vrtání kompozitních materiálů vrtáky s pájenými břitovými destičkami z polykrystalického diamantu.

Velký vliv na proces tvorby třísky, trvanlivost nástroje, přesnost rozměrů a tvaru a drsnost povrchu vyrobené díry mají též geometrické parametry šroubovitěho vrtáku. Proto je vhodné před vlastním vrtáním provést kontrolu přesnosti nástroje zaměřenou na průměr, kuželovitost, tloušťku jádra, rozdíly v délkách hlavních ostří a velikost příčného ostří. Důležitou roli hrají i úhly nastavení obou hlavních ostří a jejich rozdíly a úhly hřbetu obou břitů a jejich rozdíly.

Pokud je u vrtáku naměřen velký rozdíl v délkách hlavních ostří, budou jednotlivé břity vykazovat při funkci rozdílné hodnoty opotřebení (větší opotřebení bude na břitu s delším ostřím), uvedená výrobní nepřesnost ovlivní i velikost složek řezné síly. U vrtáku s dlouhým příčným ostřím budou naměřeny vysoké hodnoty axiální složky řezné síly (tlačí vrták do řezu) a navíc se bude velmi rychle opotřebovávat v oblasti špičky, kde jsou velmi nepříznivé pracovní podmínky. Je to způsobeno speciálním režimem práce každého vrtáku, kdy nastavená hodnota řezné rychlosti je dosažena pouze na největším průměru nástroje a směrem k ose se postupně snižuje až na nulovou hodnotu v místě osy vrtáku. Šroubovitě vrták má navíc tu zvláštnost, že hodnoty úhlu hřbetu i čela rovněž nejsou konstantní a mění se nejen podle místa měření (vzdálenost od osy nástroje), ale i s hodnotou vedlejšího pohybu, tj. posuvu na otáčku (úhel hřbetu) nebo s hodnotou úhlu stoupání šroubovice (úhel čela).

3.2.1 Použité nástroje

Pro vrtání vláknově vyztužených kompozitů byly použity šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí (bez i s otěruvzdornými PVD povlaky), povlakovaných monolitních slinutých karbidů a polykrystalického diamantu od domácích i zahraničních výrobců – přehled je uveden v tabulce č. 2.

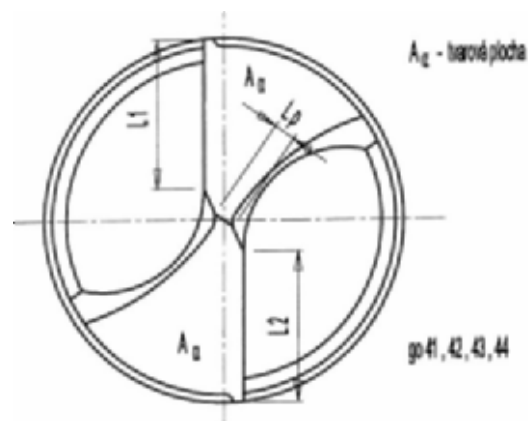
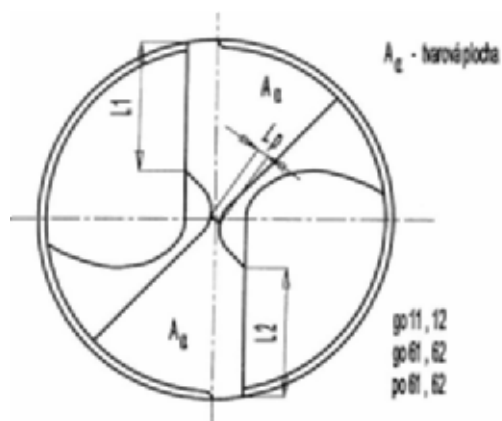
Před použitím byly u všech vrtáků změřeny základní geometrické parametry (jmenovitý průměr, tloušťka jádra, délky hlavních ostří, délka příčného ostří, doplňkové nástrojové úhly nastavení hlavních ostří ψ_r , nástrojový úhel špičky ε_r , nástrojové boční úhly hřbetu α_f , úhel stoupání šroubovice).

Hodnocené nástroje nevykazovaly žádné významné úchytky či rozdíly v naměřených geometrických parametrech, které by mohly výraznějším způsobem ovlivnit funkční zkoušky trvanlivosti nebo zkoušky měření řezných sil. Lze však předpokládat, že zejména zkoušky měření řezných sil mohou být ovlivněny konstrukcí vrtáků a způsobem jejich ostření (tvar hřbetu a čela, délka příčného ostří), proto byla u jednotlivých skupin vrtáků pečlivě prohlédnuta a zdokumentována jejich špička – viz obrázky č. 2 až 7.

Tab. 2 Použité vrtáky a jejich značení

| Výrobce | Typ | Průměr [mm] | Materiál ¹⁾ | Povlak | Značení |
|------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|------------|
| Gühring | 659 | 6 | HSS | TiN | go61, go62 |
| | 2463 | | SK – K10/K20 | TiN + TiAlN | gk61, gk62 |
| | 659 | 10 | HSS | TiN | go11, go12 |
| | 2463 | | SK – K10/K20 | TiN + TiAlN | gk11, gk12 |
| | 1264 | 10,5 | PKD | bez | gd11 |
| | 663 | 14 | HSCO | TiN | go41–go44 |
| | 2463 | | SK – K10/K20 | TiN + TiAlN | gk41–gk44 |
| | 663 | | HSCO | TiN | go51–go53 |
| Mitsubishi | MZE0600SA | 6 | SK – GP 20M | TiN | mk61, mk62 |
| | MZE1000SA | 10 | | | mk11 |
| | MZE1450MA | 14,5 | | | mk51–mk53 |
| Platit | DIN 1897 | 6 | HSS | TiN | po61 |
| | | | | UniversAl | po62 |
| Stim-Zet | ČSN 22 1121 | 6 | HSS | | so61, so62 |
| | | 9,6 | HSCO | | so11, so12 |
| | ČSN 22 1140 | 14,5 | HSS | | so51–so54 |
| Zbrojovka | ČSN 22 1121 | 5,30 | HSS | bez | zoa1–zoa6 |
| | | 5,75 | | | zob1–zob6 |
| | | 7,10 | | | zoc1–zoc6 |
| | | 8,60 | | | zod1–zod6 |
| | | 9,00 | | | zoe1–zoe6 |
| | | 11,20 | | | zof1–zof6 |
| | ČSN 22 1140 | 13,50 | | | zog1–zog6 |
| | | 14,25 | | | zoh1–zoh6 |
| | | 17,75 | | | zoi1–zoi6 |

1) HSS – rychlořezná ocel, HSCO – kobaltová rychlořezná ocel, SK – slinutý karbid

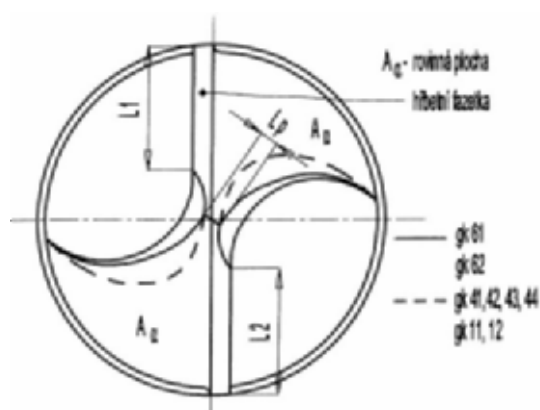


Obr. 2 Špička vrtáků Gühring (6 a 10) a Platit Obr. 3 Špička HSS vrtáků Gühring (14,5)

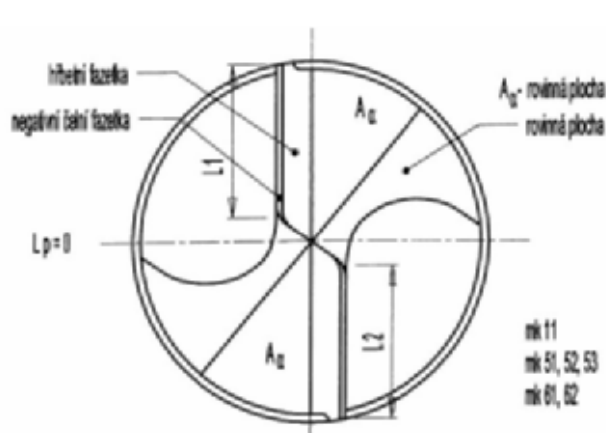
Vrtáky Gühring z rychlořezné oceli, s průměrem 6 a 10 mm, a vrtáky Platit (obr. 2) mají hřbety broušeny do tvarové, zakřivené plochy a výrazným podbrusem zkrácená příčná ostří, podobně jako vrtáky Gühring z rychlořezné oceli, s průměrem 14 mm (obr. 3). Monolitní karbidové vrtáky od stejného výrobce (obr. 4) mají naproti tomu rovinné hřbetní plochy a širokou rovinnou hřbetní fazetku u hlavních ostří, příčná ostří jsou rovněž zkrácena rovinným podbrusem hřbetních ploch.

Všechny vrtáky Mitsubishi mají rovinné hřbetní plochy s širokou rovinnou fazetkou u hlavních ostří (obr. 5). Výrazný rovinný podbrus odlehčuje hřbetní plochu a zcela odstraňuje příčné ostří nástroje.

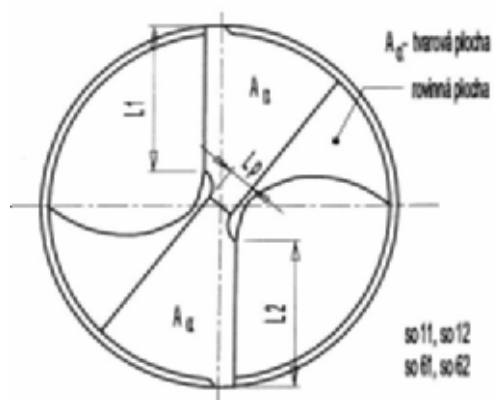
Vrtáky Stim-Zet mají tvarové, zakřivené hřbetní plochy. U nástrojů menších průměrů (6 a 10 mm, obr. 6) jsou příčná ostří zkrácena pomocí rovinného podbrusu hřbetních ploch, nástroje průměru 14,5 mm mají nezkrácená příčná ostří (obr. 7 – platí i pro vrtáky Zbrojovka).



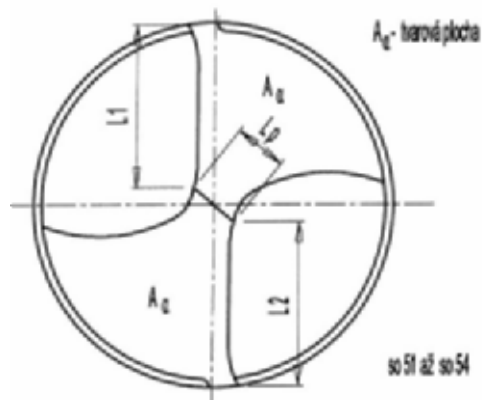
Obr. 4 Špička SK vrtáků Gühring



Obr. 5 Špička vrtáků Mitsubishi



Obr. 6 Špička vrtáků Stim-Zet (6 a 10)



Obr. 7 Špička vrtáků Stim-Zet (14,5) a Zbrojovka

3.2.2 Vliv opotřebení vrtáků na složky řezné síly

Pro zkoušky zaměřené na sledování vlivu opotřebení nástroje na složky řezné síly byly použity tyto vrtáky: Gühring (označení **gk12**: $D = 10,0$ mm, monolitní slinutý karbid K10/K20 s povlakem TiN+TiAlN; označení **go12**: $D = 10,0$ mm, rychlořezná ocel s povlakem TiN), STIM-ZET (označení **so12**, $D = 9,6$ mm, rychlořezná ocel bez povlaku) a Zbrojovka Vsetín (označení **zoe1**, $D = 9,0$ mm, rychlořezná ocel bez povlaku).

Tab. 3 Řezné podmínky pro zkoušky opotřebení

| Vrták | Průměr D [mm] | Otáčky n [min^{-1}] | Řezná rychlost v_c [m min^{-1}] | Posuv na otáčku f [mm] |
|-------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|
| gk12 | 10 | 1800 | 56,5 | 0,20 |
| go12 | 10 | 1120 | 35,2 | |
| so12 | 9,6 | | 33,8 | |
| zoe1 | 9 | | 31,7 | |

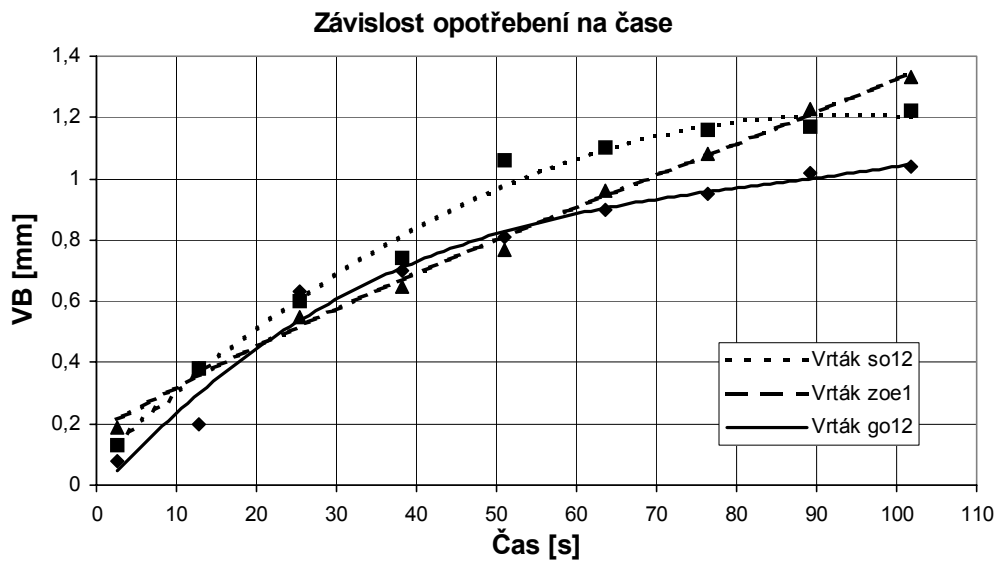
Tab. 4 Mechanické vlastnosti obráběného materiálu

| Pevnost v podélném směru [MPa] | | | Pevnost v příčném směru [MPa] | | | Střih [MPa] |
|--------------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|-------------|
| Tah | Tlak | Ohyb | Tah | Tlak | Ohyb | |
| 280–690 | 340–450 | 420–690 | 59–95 | 150–170 | 190–220 | 21 |

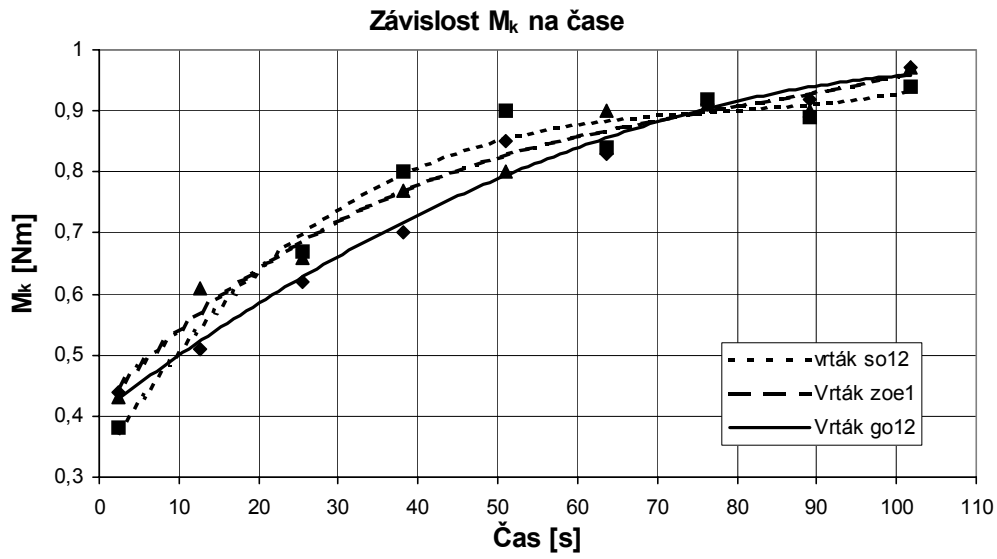
Řezné podmínky pro dané zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 3, obráběným materiálem byly vzorky z pultruzně vyrobených kompozitních profilů vyztužených skelnými vlákny (výrobce PREFA, a. s., Brno, polyesterová matrice, vlákna E-sklo, obsah 70 %, rozměry 75×100 mm, tloušťka 9,5 mm, mechanické vlastnosti sou uvedeny v tabulce č. 4). Zkoušky byly provedeny na stolní vrtačce VS 20 s motorem o příkonu 1,5 kW, otáčková řada 71–112–180–280–450–710–1120–1800–2800 min⁻¹, posuvová řada 0,08–0,12–0,20–0,32 mm.

Snímačem složek řezné síly byl piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, který byl propojen přes přepínač kanálů a nábojové zesilovače KISTLER 5011 s osobním počítačem vybaveným univerzální měřicí kartou. Před vlastním měřením byl dynamometr ocejchován pomocí sady závaží. Cejchována byla jak hodnota axiální složky F_x , tak hodnota krouticího momentu M_k . Vlastní měření probíhalo s frekvencí načítání dat minimálně 500 Hz v každém kanálu, s dlouhou časovou konstantou a dolnoproputným filtrem 100 Hz. Doba měření byla závislá na nastavených řezných podmínkách a tloušťce vrtaných vzorků a pohybovala se v rozsahu 1–6 sekund. Z vybrané oblasti časového průběhu axiální složky řezné síly a krouticího momentu byly pomocí speciálního řídicího software vypočteny pro každý záznam průměrné hodnoty F_x a M_k a z nich pak střední hodnoty pro jednotlivé nástroje.

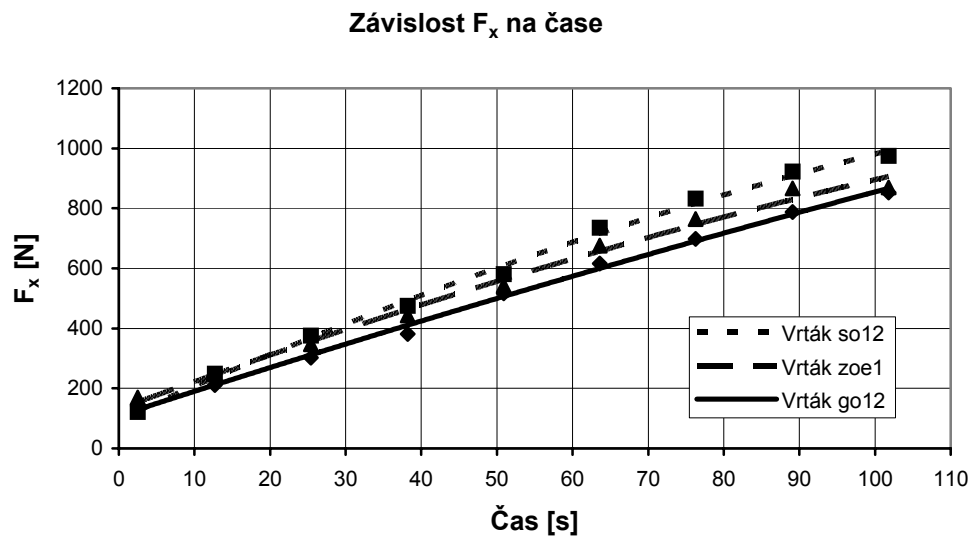
Intenzita opotřebení vrtáků z rychlořezných ocelí při vrtání kompozitu vyztuženého skelnými vlákny byla podle očekávání velmi vysoká, jak to dokumentuje obrázek č. 8. Po necelých dvou minutách celkové čisté doby funkce dosáhla šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu nástroje hodnoty $VB > 1,2$ mm u nepovlakovaných vrtáků (so12, zoe1) a $VB > 1,0$ mm u povlakovaného vrtáku (go12). Z uvedených hodnot vyplývá, že povlak sice snižuje intenzitu opotřebení nástroje, jeho vliv ale není příliš významný. Opotřebení nástroje výrazně ovlivňuje sledované složky řezné síly (v menší míře M_k , velmi intenzivně F_x). Hodnoty krouticího momentu M_k narostly v souladu s rostoucím opotřebením vrtáků zhruba 2,5× (obr. 9), hodnoty axiální složky řezné síly F_x dokonce téměř 7× (obr. 10).



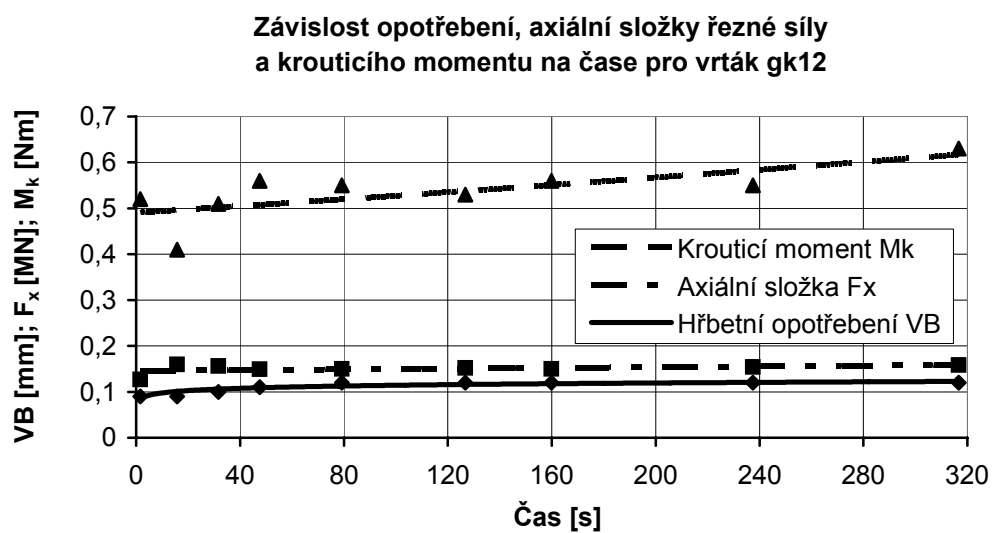
Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11

Opotřebení vrtáku ze slinutého karbidu (gk12) se po počátečním nárůstu ustálilo na hodnotě $VB=0,12$ mm, která zůstala beze změny i po více než pěti minutách čistého času vr­tání (obr. 11), přestože nástroj pracoval s vyšší řeznou rychlostí (viz tabulka č. 3). Lze očeká­vat, že tato hodnota se nebude s narůstající dobou funkce příliš zvyšovat a proto bude trvanli­vost nástroje velmi vysoká. Hodnoty krouticího momentu M_k (obr. 11) a zejména axiální složky řezné síly F_x (obr. 11) se s narůstajícím opotřebením nástroje zvyšují jen velmi mírně.

3.2.3 Řezné síly

Zkoušky zaměřené na sledování a vyhodnocování složek řezné síly byly provedeny na vzorcích z pultruzně vyrobených kompozitních profilů vyztužených skelnými vlákny (vý­robce Prefa, a. s., Brno, obsah vláken 70 %, rozměry 75×100 mm, tloušťka 9,5 mm) a na vzor­cích z uhlíkového prepregu (výrobce Letecký ústav FSI VUT, rozměry 40×140 mm, tloušťka 9,5 mm).

Tab. 4 Střední hodnoty axiální složky řezné síly F_x

| Obráb. mat. | Vrták | | | | F_x [N] | | | | | | | | |
|--------------|------------|-------------------------|----------------------------|----------|---------------------------|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|---|--|
| | D mm | Výrobce | Materiál | Označení | v_c m min ⁻¹ | f = 0,12 mm | | f = 0,20 mm | | f = 0,32 mm | | | |
| | | | | | | μ | SD | μ | SD | μ | SD | | |
| Sklo laminát | 5,3 | Zbrojovka | HSS | zoa1 | 30,0 | | | 229 | 28 | | | | |
| | 6 | Stim-Zet | HSCO | so61 | 33,9 | | | 127 | 25 | | | | |
| | | Platit | HSS, povlak TiN | po61 | | | | 165 | 23 | | | | |
| | | | HSS, povlak UniversAl | po62 | | | | 125 | 12 | | | | |
| | | Gühring | HSS, povlak TiN | go61 | | | | | | 122 | 23 | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk61 | | | 76 | 3 | 121 | 2 | 189 | 3 | |
| | | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk61 | | | 78 | 2 | 111 | 4 | 166 | 4 | |
| | 8,6 | Zbrojovka | HSS | zod6 | 30,3 | | | 318 | 53 | | | | |
| | 9,6 | Stim-Zet | HSCO | so11 | 33,8 | | | 178 | 45 | | | | |
| | 10 | Gühring | HSS, povlak TiN | go11 | 35,2 | | | 193 | 37 | | | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk11 | | 106 | 2 | 153 | 3 | 230 | 3 | | |
| | | | gk12 | 56,5 | | | | 151 | 10 | | | | |
| | 10,5 | | PKD | gd11 | 36,9 | | | 120 | 4 | | | | |
| | 10 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk11 | 35,2 | 148 | 2 | 204 | 2 | 264 | 2 | | |
| | 13,5 | Zbrojovka | HSS | zog4 | 30,1 | | | 391 | 90 | | | | |
| | 14,5 | Stim-Zet | HSS | so51 | 32,3 | | | 378 | 75 | | | | |
| | 14 | Gühring | HSCO, povlak TiN | go41 | 31,2 | | | 273 | 67 | | | | |
| | | | | | 123,2 | | | 898 | - | | | | |
| | | | go51 | 32,3 | | | 305 | 42 | | | | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk41 | 31,2 | 121 | 2 | 165 | 6 | 227 | 2 | | |
| 14,5 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk51 | 123,2 | | | 280 | 1 | | | | | |
| | | | | 32,3 | 250 | 5 | 347 | 17 | 449 | 6 | | | |
| | | | | 127,5 | | | 351 | - | | | | | |
| Prepreg | 6 | Gühring | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk61 | 33,9 | 130 | 1 | 191 | 1 | 265 | 5 | | |
| | 10 | | | gk11 | 35,2 | 209 | 6 | 269 | 4 | 354 | 7 | | |
| | 14 | | | gk41 | 31,2 | 260 | 10 | 317 | 2 | 385 | 4 | | |
| | 6 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk61 | 33,9 | 171 | 2 | 233 | 4 | 287 | 4 | | |
| | 10 | | | mk11 | 35,2 | 321 | 2 | 407 | 2 | 494 | 8 | | |
| 14,5 | | | mk51 | 32,3 | 540 | 8 | 694 | 3 | 809 | 19 | | | |

Střední hodnoty (μ) a směrodatné odchylky (SD) axiální složky řezné síly F_x a krouticího momentu M_k jsou pro jednotlivé zkoušené vrtáky uvedeny v tabulce č. 4 (F_x) a č. 5 (M_k). Vzhledem k tomu, že použitá měřicí aparatura je schopna zaznamenat a vyhodnotit velmi rychlé časové změny řezných sil, bylo prokázáno, že v průběhu každé otáčky vrtáku se měřené hodnoty (F_x i M_k) mění podle toho, zda je obráběný materiál odřezáván podélně nebo napříč vyztužujících vláken (hodnoty podél vláken jsou vyšší). Vzhledem k uvedeným dynamickým změnám jsou maximální naměřené hodnoty ve srovnání se středními hodnotami uvedenými v tabulkách č. 4 a č. 5 u sklolaminátu vyšší až o 30 % (F_x) a 60 % (M_k), u prepregu až o 50 % (F_x i M_k). Vrtáky Mitsubishi mají na obou čelech úzkou negativní fazetku, a proto vykazují vyšší hodnoty sil i momentů (přestože prakticky nemají žádné příčné ostří) než vrtáky Gühring, vyšší mechanické vlastnosti prepregu (ve srovnání se sklolaminátem) se projeví vyššími naměřenými hodnotami u vrtáků obou výrobců.

Tab. 5 Střední hodnoty krouticího momentu M_k

| Obráb. mat. | Vrták | | | | M_k [Nm] | | | | | | |
|-------------|------------|-------------------------|----------------------------|----------|------------------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | D mm | Výrobce | Materiál | Označení | v_c m min ⁻¹ | f = 0,12 mm | | f = 0,20 mm | | f = 0,32 mm | |
| | | | | | | μ | SD | μ | SD | μ | SD |
| Sklolaminát | 5,3 | Zbrojovka | HSS | zoa1 | 30,0 | | | 0,26 | 0,03 | | |
| | | Stim-Zet | HSCO | so61 | | | | 0,21 | 0,04 | | |
| | 6 | Platit | HSS, povlak TiN | po61 | 33,9 | | | 0,23 | 0,02 | | |
| | | | HSS, povlak UniversAl | po62 | | | | 0,21 | 0,01 | | |
| | | Gühring | HSS, povlak TiN | go61 | | | | 0,17 | 0,02 | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk61 | | 0,11 | 0,01 | 0,17 | 0,02 | 0,24 | 0,01 |
| | | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk61 | 0,13 | 0,01 | 0,20 | 0,03 | 0,31 | 0,03 | |
| | 8,6 | Zbrojovka | HSS | zod6 | 30,3 | | | 0,56 | 0,10 | | |
| | 9,6 | Stim-Zet | HSCO | so11 | 33,8 | | | 0,42 | 0,06 | | |
| | 10 | Gühring | HSS, povlak TiN | go11 | 35,2 | | | 0,54 | 0,08 | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk11 | | 0,43 | 0,02 | 0,53 | 0,02 | 0,83 | 0,06 |
| | | | | gk12 | 56,5 | | | 0,54 | 0,06 | | |
| | 10,5 | | PKD | gd11 | 36,9 | | | 0,32 | 0,04 | | |
| | 10 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk11 | 35,2 | 0,45 | 0,04 | 0,55 | 0,08 | 0,73 | 0,12 |
| | 13,5 | Zbrojovka | HSS | zog4 | 30,1 | | | 1,29 | 0,17 | | |
| | 14,5 | Stim-Zet | HSS | so51 | 32,3 | | | 1,07 | 0,19 | | |
| | 14 | Gühring | HSCO, povlak TiN | go41 | 31,2 | | | 1,33 | 0,17 | | |
| | | | | | 123,2 | | | 1,86 | - | | |
| | | | go51 | 32,3 | | | 1,12 | 0,07 | | | |
| | | | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk41 | 31,2 | 0,75 | 0,06 | 0,89 | 0,02 | 1,46 | 0,05 |
| | | | | 123,2 | | | 0,99 | 0,23 | | | |
| 14,5 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk51 | 32,3 | 0,93 | 0,16 | 1,24 | 0,02 | 1,91 | 0,05 | |
| | | | | 127,5 | | | 1,46 | - | | | |
| Prepreg | 6 | Gühring | SK – K10/K20, povlak TiAlN | gk61 | 33,9 | 0,29 | 0,03 | 0,37 | 0,01 | 0,47 | 0,02 |
| | 10 | | | gk11 | 35,2 | 0,84 | 0,05 | 1,07 | 0,04 | 1,33 | 0,04 |
| | 14 | | | gk41 | 31,2 | 1,55 | 0,09 | 2,08 | 0,01 | 2,70 | 0,03 |
| | 6 | Mitsubishi | SK – GP 20M, povlak TiN | mk61 | 33,9 | 0,30 | 0,02 | 0,39 | 0,01 | 0,46 | 0,02 |
| | 10 | | | mk11 | 35,2 | 0,79 | 0,01 | 1,11 | 0,04 | 1,45 | 0,04 |
| | 14,5 | | | mk51 | 32,3 | 1,75 | 0,02 | 2,43 | 0,03 | 2,99 | 0,04 |

Pokud je porovnávána velikost F_x a M_k u vrtáků z rychlořezných ocelí a slinutých karbidů (srovnatelné průměry a řezné rychlosti), vykazují první jmenované vždy vyšší naměřené

hodnoty (zejména u axiální složky F_x jsou tyto hodnoty někdy i více než dvojnásobné). Tento fakt je nutno připisat velmi intenzivnímu nárůstu opotřebení nástroje v průběhu šesti (většinou) po sobě vrtaných děr, kdy rozdíly hodnot M_k a zejména F_x mezi první a poslední dírou jsou velmi výrazné (střední hodnoty F_x i M_k jsou stanoveny jako průměr ze všech šesti vrtaných děr).

Vzhledem k rozdílné geometrii použitých vrtáků z rychlořezných ocelí nelze zcela jednoznačně stanovit vliv povlakování na hodnoty složek řezné síly (hlavně u M_k se rozdíly mohou pohybovat v rámci statistické chyby). Rozdílná geometrie však umožňuje posoudit vliv některých geometrických parametrů na velikost hodnot F_x a M_k .

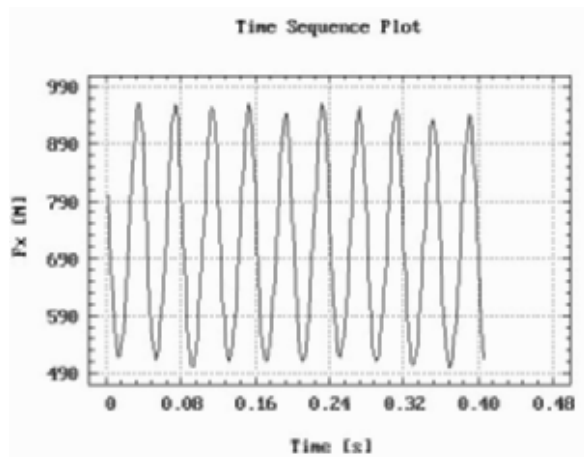
Zejména dlouhé vedlejší ostří výrazně zvyšuje velikost hodnot M_k , ale především F_x , což lze prokázat např. porovnáním výsledků získaných ze zkoušek vrtáků Platit **po61** a **po62**, jejichž geometrie je téměř identická, až na délku vedlejšího ostří (**po61** – 0,21 mm, **po62** – 0,15 mm) – **po61**: $F_x=165$ N, $M_k=0,23$ Nm, **po62**: $F_x=125$ N, $M_k=0,21$ Nm (viz tabulky č.4 a č. 5). Negativní vliv vedlejšího ostří lze potvrdit porovnáním výsledků měření složek řezné síly u vrtáků Zbrojovka, Stim-Zet a Gühring které je uvedeno v tabulce č.6.

Tab. 6 Porovnání hodnot F_x a M_k pro vrtáky Zbrojovka, Stim-Zet a Gühring

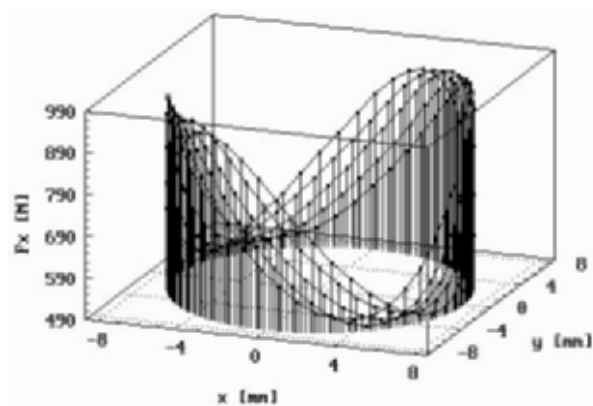
| Vrták | | | | Příčné ostří | | | F_x | M_k |
|-----------|----------|--------|-------------|-----------------|---------|------------|-------|-------|
| Výrobce | Označení | Povlak | Průměr [mm] | Charakteristika | Obrázek | Délka [mm] | [N] | [Nm] |
| Zbrojovka | zoa1 | bez | 5,30 | nezkrácené | 7 | 1,09 | 229 | 0,26 |
| Stim-Zet | so61 | | 6,00 | zkrácené | 6 | 0,18 | 127 | 0,21 |
| Gühring | go61 | ano | 6,00 | | 2 | 0,45 | 122 | 0,17 |
| Zbrojovka | zod6 | bez | 8,60 | nezkrácené | 7 | 1,73 | 318 | 0,56 |
| Stim-Zet | so11 | | 9,60 | zkrácené | 6 | 0,27 | 178 | 0,42 |
| Gühring | go11 | ano | 10,00 | | 2 | 0,88 | 193 | 0,54 |
| Zbrojovka | zog4 | bez | 13,50 | nezkrácené | 7 | 2,63 | 391 | 1,29 |
| Stim-Zet | so51 | | 14,50 | | | 2,88 | 378 | 1,07 |
| Gühring | go41 | ano | 14,00 | zkrácené | 3 | 1,36 | 273 | 1,33 |

Při zvýšení řezné rychlosti došlo ke zvýšení hodnot F_x i M_k , zejména u vrtáku go41 (Gühring, povlakovaná rychlořezná ocel), v menší míře u vrtáků gk41 (Gühring, monolitní povlakovaný SK) a mk51 (Mitsubishi, monolitní povlakovaný SK). Dalším důsledkem vysoké řezné rychlosti ($v_c > 120$ m min⁻¹ – maximální hodnota, kterou lze na použité vrtače pro dané průměry nástrojů nastavit) bylo vtahování vrtáku do záběru v takové intenzitě, že při vyjždění ze záběru došlo k vytažení upínacího redukčního kužele z pinoly vrtačky. Je zřejmé, že použití vyšších hodnot v_c vyžaduje jiné, spolehlivější upnutí nástroje, které daná vrtačka svojí jednoduchou konstrukcí neumožňuje.

Jak již bylo uvedeno, měřené hodnoty (F_x i M_k) se mění podle toho, zda je obráběný materiál odřezáván podél os vyztužujících vláken nebo kolmo k jejich osám. Tato skutečnost je zřejmá z obrázku č. 12, kde je uvedena část záznamu z měření osově složky F_x při vrtání uhlíkového prepregu (vrták Mitsubishi z monolitního SK s povlakem TiN, průměr $D=14,5$ mm, otáčky $n=710$ min⁻¹, řezná rychlost $v_c=32,3$ m min⁻¹, posuv na otáčku $f=0,20$ mm). Při 710 otáčkách za minutu trvá jedna otáčka vrtáku přibližně 0,08 s ($60/710 \approx 0,0845$) a jak je vidět z obrázku, za tuto dobu vykáže záznam dvě minima a dvě maxima, v přesně sinusoidním průběhu. To znamená, že minima a maxima se střídají vždy po 90°, což odpovídá ¼ otáčky vrtáku a souhlasí se změnou směru vyztužujících vláken ve vrtaném materiálu, která nastává rovněž po relativním pootočení o 90° (pravý úhel). Velmi názorně uvedený proces potvrzuje i obrázek č. 12, kde je část stejného záznamu odpovídající pěti otáčkám nástroje zpracovaná pomocí programu STATGRAPHICS do třírozměrného diagramu závislosti F_x na poloze břitů vrtáku vůči ose vyztužujících vláken.



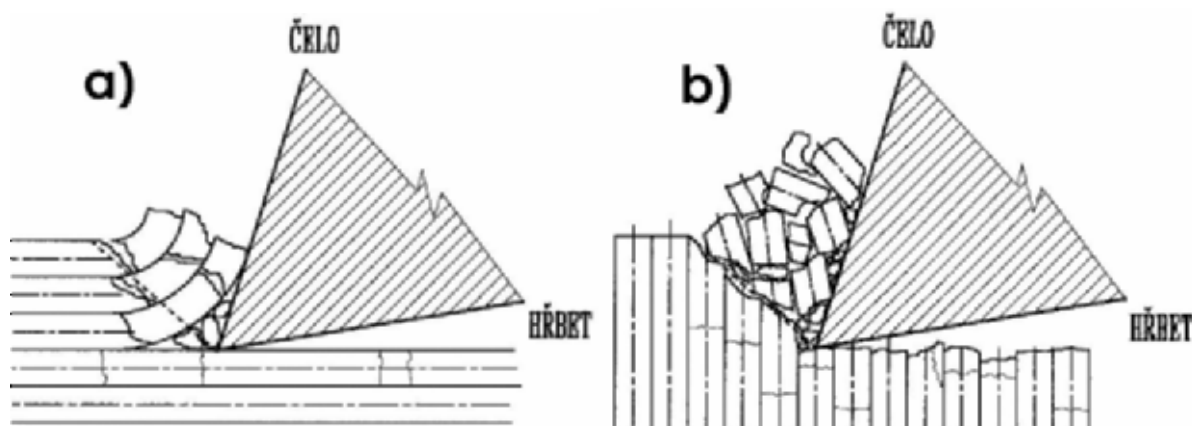
Obr. 11



Obr. 12

Cyklický průběh axiální složky řezné síly F_x i krouticího momentu M_k v průběhu každé otáčky vrtáku lze vysvětlit následovně:

- Když břit vrtáku řeže vyztužující vlákna ve směru jejich os, vlákna přilehlá k hřbetu jsou odtlačována a částečně ohýbána, případně porušována tahovým napětím (obr. 13a). Vlákna před čelem vrtáku jsou namáhána na tlak, vzpěr a ohyb a po překročení příslušných hodnot pevnosti dochází k jejich porušování křehkým lomem. Třecí i normálové síly na čele vrtáku jsou vysoké, a proto je pro oddělení třísky potřebné dodat vyšší množství energie (naměřené složky řezné síly jsou vyšší).
- Když břit vrtáku řeže vyztužující vlákna ve směru kolmém k jejich osám, dochází po překročení hodnoty smykové pevnosti k porušování vláken křehkým lomem (obr. 13b). Vzhledem k tomu, že smyková pevnost vláken je mnohem nižší než jejich pevnost v tlaku, ohybu a zejména tahu, je pro oddělení třísky potřebné menší množství energie a naměřené složky řezné síly jsou proto nižší.

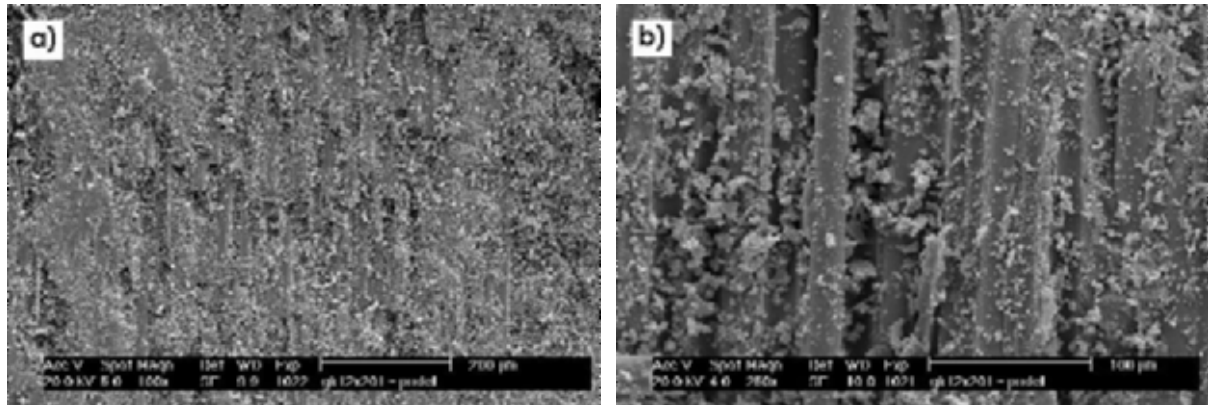


Obr. 13

3.2.4 Kvalita povrchu obrobené plochy

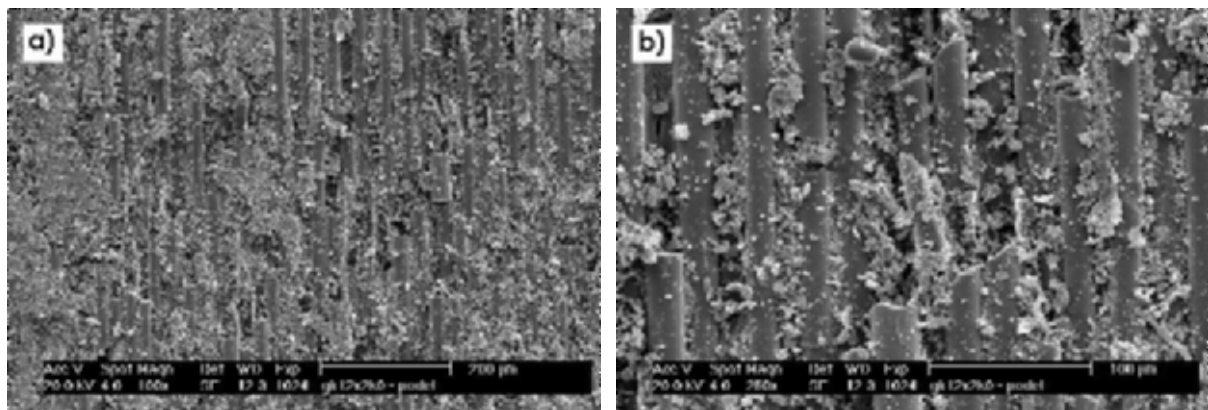
Povrch vrtaných děr (ve směru os vyztužujících vláken, i kolmo na osy vláken) byl analyzován na elektronovém řádkovacím mikroskopu Philips, vybrané ukázky jsou uvedeny na obrázcích č. 14 až 25. Osa díry probíhá u všech obrázků vodorovně, snímky byly pořizo-

vány vždy v nejnižším bodě kruhové výseče vzorku vyříznutého z vyvrtané díry (90° – jedna čtvrtina obvodu díry).



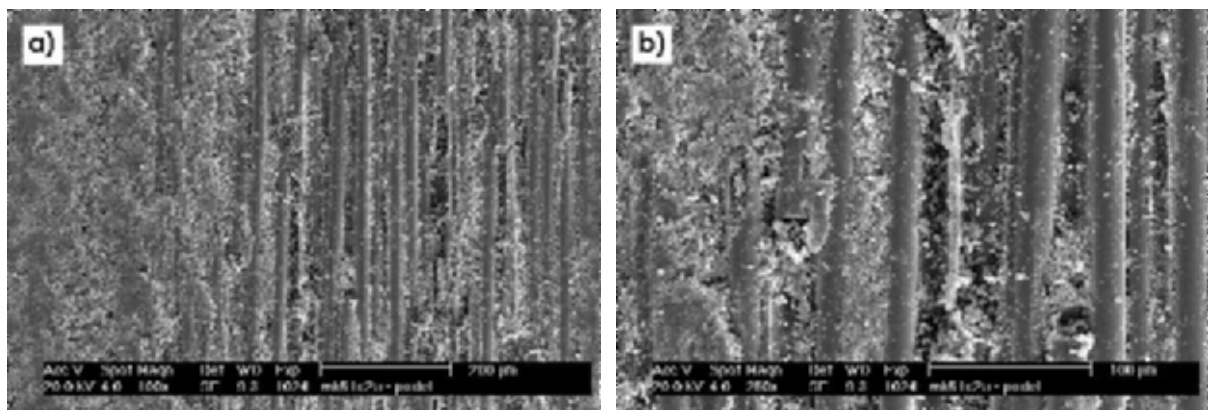
Obr. 14

| Vrták | Nástrojový mat. | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný mat. | Směr | Vrtaná díra |
|---------|-----------------|--------|--------------------------|--------|---------------|-------|-------------|
| Gühring | povlakovaný SK | 10,00 | 56,5 | 0,20 | sklolaminát | podél | 1. |



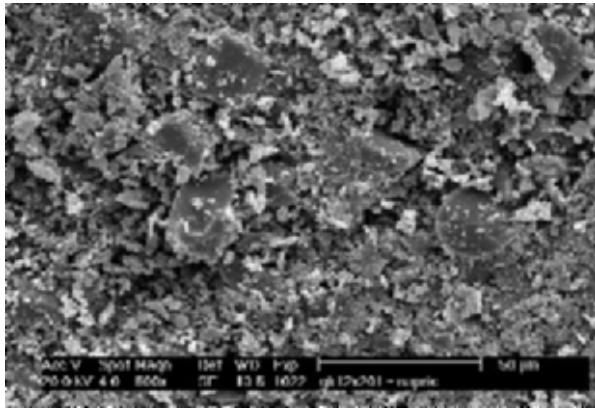
Obr. 15

| Vrták | Nástrojový mat. | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný mat. | Směr | Vrtaná díra |
|---------|-----------------|--------|--------------------------|--------|---------------|-------|-------------|
| Gühring | povlakovaný SK | 10,00 | 56,5 | 0,20 | sklolaminát | podél | 200. |

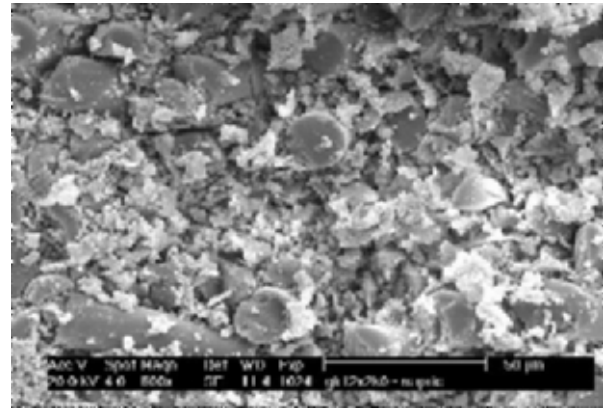


Obr. 16

| Vrták | Nástrojový mat. | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný mat. | Směr | Vrtaná díra |
|------------|-----------------|--------|--------------------------|--------|---------------|-------|-------------|
| Mitsubishi | povlakovaný SK | 14,50 | 32,3 | 0,20 | sklolaminát | podél | 1. |

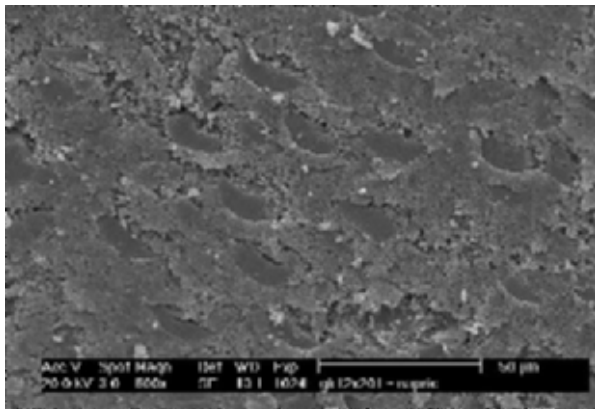


Obr. 17 – první vrtná díra

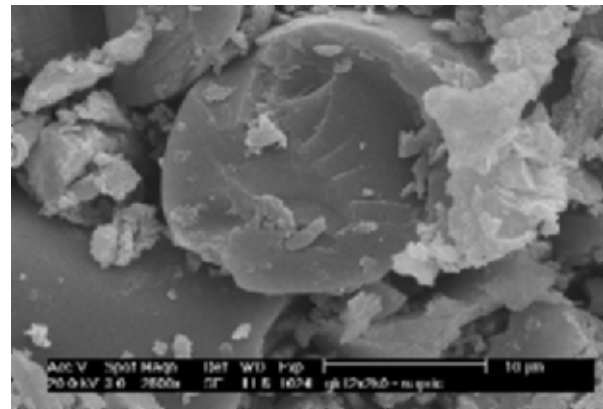


Obr. 18 – dvoustrá vrtná díra

| Vrták | Nástrojový materiál | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný materiál | Směr |
|---------|---------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------|--------|
| Gühring | povlakovaný SK | 10,00 | 56,5 | 0,20 | sklolaminát | napříč |

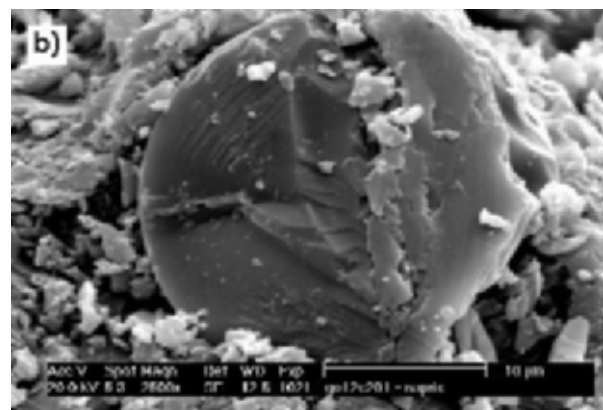
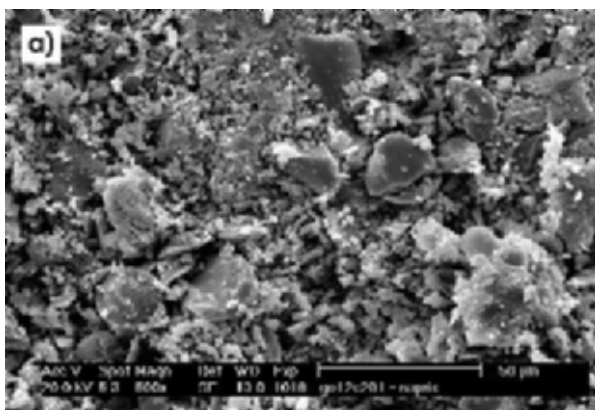


Obr. 19 – první vrtná díra



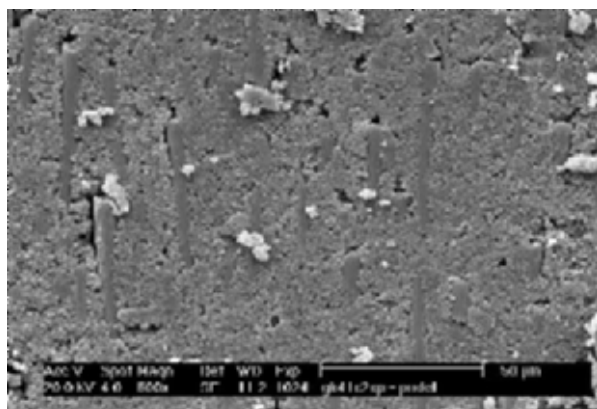
Obr. 20 – dvoustrá vrtná díra

| Vrták | Nástrojový materiál | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný materiál | Směr |
|---------|---------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------|--------|
| Gühring | povlakovaný SK | 10,00 | 56,5 | 0,20 | sklolaminát | napříč |

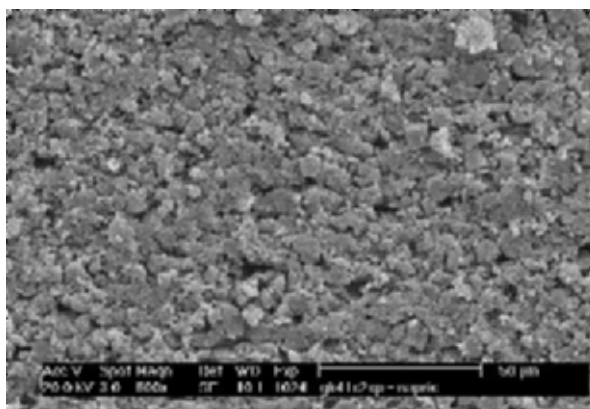


Obr. 21

| Vrták | Nástrojový mat. | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný mat. | Směr | Vrtná díra |
|---------|-----------------|--------|--------------------------|--------|---------------|--------|------------|
| Gühring | povlakovaná HSS | 10,00 | 35,2 | 0,20 | sklolaminát | napříč | 1. |

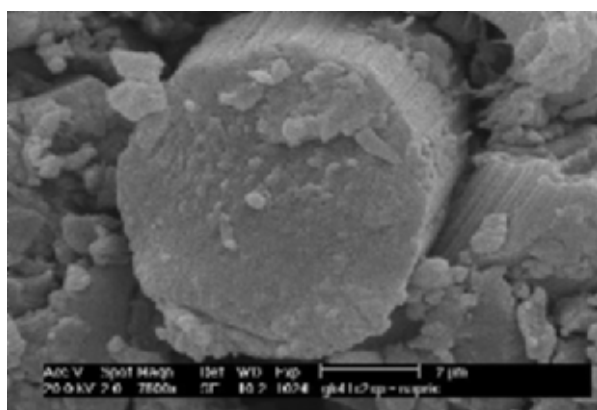


Obr. 22 – podél

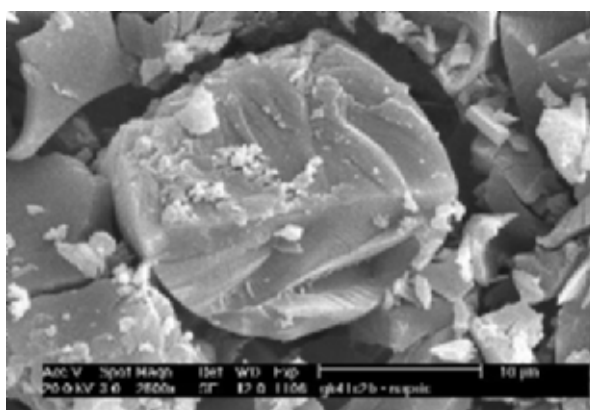


Obr. 23 – napříč

| Vrták | Nástrojový materiál | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný materiál | Vrtaná díra |
|---------|---------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------|-------------|
| Gühring | povlakovaný SK | 14,00 | 31,2 | 0,20 | uhlíkový prepreg | 8. |



Obr. 24 – prepreg, osmá díra



Obr. 25 – sklolaminát, patnáctá díra

| Vrták | Nástrojový materiál | D [mm] | v [m min ⁻¹] | s [mm] | Obráběný materiál | Směr |
|---------|---------------------|--------|--------------------------|--------|-------------------|--------|
| Gühring | povlakovaný SK | 14,00 | 31,2 | 0,20 | uhlíkový prepreg | napříč |

U sklolaminátu se na povrchu děr ve směru podél vláken (obr. 14 až 16, **a**) – základní obrázek, **b**) – detail) nacházejí celistvá a poškozená vyztužující vlákna a je vidět, že došlo i k porušení vazby mezi vlákny a pryskyřičnou matricí. Vzhled obrobeného povrchu není ovlivněn použitým nástrojem nebo jeho geometrií (monolitní povlakované karbidové vrtáky Gühring a Mitsubishi, stejný vzhled měl i povrch děr vrtaných nástroji z rychlořezné oceli), ani počtem odvrtných děr.

Na povrchu děr ve směru kolmém k osám vláken (obr. 17, 18 a 21a) jsou vidět příčně porušená vyztužující vlákna, uvolněná vazba mezi vlákny a matricí a zejména velké množství drobných částicek třísky vytvořených z rozdrčených skelných vláken i polyesterové matrice, které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolního prostředí. Vzhled povrchu není ovlivněn použitým nástrojem, ani počtem odvrtných děr. Obrázek č. 19 dokumentuje skutečnost, že v místech, kde pryskyřice dokonale smočila povrch vyztužujících vláken a vyplnila volný prostor mezi nimi, nedochází k výraznějšímu narušení vazby mezi vlákny a matricí. Obrázky č. 20 a 21b potvrzují předpoklad, že dominantním mechanismem porušování skelných vláken při zatížení břitem řezného nástroje je křehký lom.

Povrch děr vrtaných v uhlíkovém prepregu (obr. 22 a 23) je mnohem kompaktnější než povrch děr vrtaných v kompozitu vyztuženém skelnými vlákny. Pryskyřičná matrice vy-

plňuje prostor mezi vlákny rovnoměrně, vazba mezi vlákny a matricí je pevnější, nedochází k tak výrazné tvorbě drobných částic třísky. Vyztužující uhlíková vlákna mají menší průměr než skelná vlákna (odhadem asi třetinový) a neporušují se křehkým lomem (srovnej obrázky č. 24 a 25).

4 ZÁVĚR

Intenzita opotřebení vrtáků z rychlořezných ocelí při vrtání kompozitu vyztuženého skelnými vlákny je velmi vysoká. Po necelých dvou minutách celkové čisté doby funkce se šířka fazetky hřbetního opotřebení na obvodu nástroje pohybuje v hodnotách, které jsou při vrtání kovových slitin zcela neobvyklé (např. pro $v_c \cong 30 \text{ m min}^{-1}$, $f = 0,20 \text{ mm}$: $VB > 1,2 \text{ mm}$ u nepovlakovaných vrtáků a $VB > 1,0 \text{ mm}$ u povlakovaných vrtáků – z uvedených hodnot vyplývá, že povlak sice snižuje intenzitu opotřebení nástroje, jeho vliv ale není příliš významný). Velmi zajímavým se jeví fakt, že uvedené hřbetní opotřebení se směrem od vnějšího obvodu nástroje ke špičce zmenšuje jen velmi pozvolna. I při velmi nízké řezné rychlosti, kterou břit pracuje v místě napojení hlavního ostří na ostří příčné, dosahuje šířka fazetky VB v tomto místě hodnotu několik desetin milimetru. Tento jev naznačuje, že při vrtání kompozitu vyztuženého skelnými vlákny je hlavní příčinou intenzivního opotřebení nástroje abrazivní účinek vyztužujících vláken, význam řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) je druhořadý.

Opotřebení nástroje výrazně ovlivňuje sledované složky řezné síly (v menší míře M_k , velmi intenzivně F_x). Hodnoty krouticího momentu M_k mohou v souladu s rostoucím opotřebením vrtáků narůst zhruba $2,5\times$, hodnoty axiální složky řezné síly F_x dokonce téměř $7\times$.

Významným faktorem, který ovlivňuje složky řezné síly při vrtání, je geometrie nástroje. Vrtáky Mitsubishi mají na obou čelech úzkou negativní fazetku, a proto vykazovaly vyšší hodnoty sil i momentů (přestože prakticky nemají žádné příčné ostří), než vrtáky Gühring. Z dalších geometrických parametrů je to zejména dlouhé vedlejší ostří, které výrazně zvyšuje velikost hodnot M_k , ale především F_x .

Při zvýšení řezné rychlosti dojde rovněž ke zvýšení hodnot F_x i M_k , zejména u vrtáků z rychlořezných ocelí. Dalším důsledkem vysoké řezné rychlosti je vtahování vrtáku do záběru, a proto použití vyšších hodnot v vyžaduje velmi spolehlivé upnutí nástroje.

Pokud je porovnávána velikost F_x a M_k u vrtáků z rychlořezných ocelí a slinutých karbidů (srovnatelné průměry a řezné rychlosti), vykazují prvně jmenované vždy vyšší naměřené hodnoty (zejména u axiální složky F_x jsou tyto hodnoty někdy i více než dvojnásobné). Tento fakt je nutno připsat velmi intenzivnímu časovému nárůstu opotřebení nástrojů z RO.

Bylo prokázáno, že v průběhu každé otáčky vrtáku se měřené hodnoty (F_x i M_k) mění podle toho, zda je obráběný materiál odřezáván podélně nebo napříč vyztužujících vláken.

Kvalita povrchu obrobené plochy je při vrtání kompozitů poměrně nízká. U sklolaminátu se na povrchu děr ve směru podél vláken nacházejí celistvá a poškozená vyztužující vlákna a bylo prokázáno i porušení vazby mezi vlákny a pryskyřičnou matricí. Vzhled obrobeného povrchu není ovlivněn použitým nástrojem nebo jeho geometrií (monolitní povlakované karbidové vrtáky Gühring a Mitsubishi, stejný vzhled měl i povrch děr vrtaných nástroji z rychlořezné oceli), ani počtem odvrtných děr. Na povrchu děr ve směru kolmém k osám vláken lze nalézt příčně porušená vyztužující vlákna, uvolněnou vazbu mezi vlákny a matricí a zejména velké množství drobných částecek třísky vytvořených z rozdrčených skelných vláken i polyesterové matrice, které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolního prostředí.

Dominantním mechanismem porušování skelných vláken při zatížení břitem řezného nástroje je křehký lom.

Vzhledem k vyšší odolnosti proti opotřebení se pro vrtání vláknově vyztužených kompozitů velmi dobře hodí vrtáky ze slinutých karbidů. U dražších celokarbidových, monolitních nástrojů, které mohou být vzhledem k velikosti pracovní části mnohokrát přeostřovány, lze očekávat velmi dlouhou životnost. Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. U levnějších nástrojů s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů lze předpokládat menší životnost, protože počet ostření je omezen velikostí samotné destičky.

Provedené zkoušky prokázaly, že složky řezné síly jsou při vrtání vláknově vyztužených kompozitů mnohem nižší než při vrtání ocelí. Anizotropie mechanických vlastností kompozitů a uspořádání vyztužujících vláken způsobují poměrně velké dynamické změny všech složek řezné síly v průběhu každé otáčky nástroje. Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a mají rozhodující podíl na velmi vysoké intenzitě opotřebení vrtáků z nepovlakovaných i povlakovaných rychlořezných ocelí. Vrtáky z povlakovaného monolitního slinutého karbidu jsou schopny zajistit velké úběry kompozitních materiálů za velmi příznivých ekonomických podmínek. Vyšší mechanické vlastnosti prepregu (ve srovnání se sklolaminátem) se projeví vyššími naměřenými hodnotami F_x i M_k .

5 LITERATURA

1. BRATUKHIN, A. G., BOGOLYUBOV, V. S.: *Composite Manufacturing Technology*. Chapman & Hall, London, United Kingdom, 1995, ISBN 0412582503, 433 pp.
2. HUMÁR, A.: Vláknově vyztužené kompozity. *MM – Průmyslové spektrum*. 5/1999, ISSN 1212-2572, s. 68–70.
3. HUMÁR, A.: Vrtání vláknově vyztužených kompozitů. *MM – Průmyslové spektrum*. 6/1999, ISSN 1212-2572, s.18, 20–21.
4. HUMÁR, A.: Vliv opotřebení nástroje na složky řezné síly při vrtání kompozitů vyztužených skleněnými vlákny. In *Sborník přednášek „Mezinárodní konference NÁSTROJE '99“*. Zlín, ISBN 80-214-1426-X, 12.–13. 10. 1999, s. 55–60.
5. HUMÁR, A. and PÍŠKA, M.: Cutting Forces Analysis when Drilling Glass Fibre Reinforced Plastics. In *Proceedings of the 31st International SAMPE Technical Conference, Volume 31, Advanced Materials & Processes Preparing for the New Millenium*. McCormick Place, Chicago, Illinois, USA, ISBN 0-938994-85-9, October 26–30, 1999, pp. 276–285.
6. HUMÁR, A., PÍŠKA, M.: Obrábění kompozitních materiálů. In *Sborník semináře „Aplikace kompozitních materiálů v konstrukci součástí strojů“*. Ústav výrobních strojů a mechanismů ČVUT-FS a Českomoravská společnost pro automatizaci, Praha, 2. 2. 2000, s. 24–30.
7. HUMÁR, A., PÍŠKA, M., PODRÁBSKÝ, T.: Frézování kompozitů. *MM – Průmyslové spektrum*. 4/2000, ISSN 1212-2572, s. 14–15.
8. HUMÁR, A. and PÍŠKA, M. Tool Life when Machining Glass Fibre Reinforced Plastic. In *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference "Development of Metal Cutting DMC 2000, Košice"*. Katedra strojárskkej metalurgie a technológie Strojníckej fakulty TU Košice, Slovensko, 3.– 4. 7. 2000, ISBN 80-7099-505-3, pp. CZ8–CZ11.

9. HUMÁR, A. and PÍŠKA, M.: Machining Fiber Reinforced Plastics. *Composites Fabrication*. Vol. 16, No. 9, September 2000, ISSN 1084-841X, pp. 16–23, 62, 64.
10. HUMÁR, A. and PÍŠKA, M.: Analysis of Cutting Forces when Drilling Composites. In *Proceedings of the XVI IMEKO World Congress IMEKO 2000, Volume III, Topic 3 – Measurement of Force, Mass and Torque*. Austrian Society for Measurement and Automation, Vienna, Austria, 25.–28.9.2000, ISBN 3-901888-05-5, pp. 97–102.
11. HUMÁR, A., PÍŠKA, M.: Frézování a vrtání perspektivních kompozitních materiálů. In *Sborník odborné konference „Frézování II“*. VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s. r. o. Šumperk a ZPS – Frézovací nástroje, a. s., Zlín. Brno, 23. a 24. 11. 2000. ISBN 80-214-1728-5, s. 196–214.
12. HUMÁR, A.: Nové povlaky a povlakovací metody pro řezné nástroje. In *Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003*. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.–22. 5. 2003, ISBN 80-7318-135-5.
13. JANČÁŘ, J.: *Tažené kompozitní profily a desky – materiály 21. století*. Aplikační seminář FCh-VUT, Brno, 18. 4. 1996.
14. JANČÁŘ, J.: *Základy technologie tažení kompozitních profilů*. Aplikační seminář FCh-VUT, Brno, 18. 4. 1996.
15. McDERMOTT, J.: Competing Through Precess Technology. *Composites fabrication*. Vol. 14, No. 4, April 1998, ISSN 1084-841X, p. 20–21, 24, 36.
16. MURPHY, J.: *The Reinforced Plastics Handbook*. Elsevier Science Ltd., Oxford, United Kingdom, Second Edition, 1998, ISBN 1 85617 348 8, 674 pp.
17. PANTĚLEJEV, L., KLAJKURKOVÁ, L., PODRÁBSKÝ, T., HUMÁR, A.: The Influence of Structure on the Characteristics of High Speed Steels with Molybdenum Basis. In *Proceedings of the 10th International symposium „Metallography'98“*. Technical University of Košice, Stará Lesná, Slovak Republic, 1998, ISBN 80-7099-32, pp. 577–578.

6 SUMMARY

Measuring and evaluating of torque and cutting force components (in axial and tangential directions) with four components piezoelectric dynamometer KISTLER 9272, when drilling a glass fibre reinforced plastic and carbon prepreg. A special PC-software and statistical assessment are used for evaluation of torque and forces with respect to an influence of machined material, orientation of the reinforcing fibres, cutting conditions and drill material, geometry and wear. Morphology of machined surfaces is observed and the cutting process is evaluated with a scanning electron microscope. The wear intensity of high speed steel drills is very high when drilling of reinforced plastics in comparison with the wear of sintered carbide drills. The values of torque/axial cutting force have increased approximately 2.5/7 times respectively, due to the high speed steel drill wear. The changes of the cutting force and torque values are cyclic in the frame of every revolution of a drill, according to the orientation of reinforcing fibres (these values are lower perpendicularly to fibres axes and higher along to fibres axes). Sintered carbide drills are suitable tools for machining fibre reinforced plastics from the all points of view (tool wear, tool life, cutting forces and torque, economical indexes).

7 PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Narozen 7. 4. 1946 v Brezně, Slovensko, docent Ústavu strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, E-mail: humar@ust.fme.vutbr.cz.

Kvalifikace

Ing., 1969 Vojenská akademie Brno, vojenskoprůmyslový směr, strojní inženýrství, specializace raketová technika

CSc., 1983 Vojenská akademie Brno, téma práce – Proces opotřebovávání slinutých karbidů při obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů

Doc., 1988 FS-VUT v Brně, jmenování

Doc., 1997 FSI-VUT v Brně, habilitační řízení, téma práce – Efektivní obrábění nových konstrukčních keramických materiálů

Průběh praxe

1970–1974: Vagónka Studénka, Vývoj a konstrukce Brno, samostatný konstruktér

1975–1984: Výzkumný ústav materiálu a technologie (později Výzkumný ústav 070, Výzkumný ústav 023) Brno, samostatný odborný pracovník-specialista

1985–1988: FS-VUT, Katedra strojírenské technologie, odborný asistent

1988 – dosud: FSI-VUT, Ústav strojírenské technologie, docent

Zaměření vědeckovýzkumné a odborné činnosti: proces opotřebování nových nástrojových materiálů (slinuté karbidy běžné i povlakované, cermety, řezná keramika), trvanlivost nástroje ve vztahu k nástrojovému materiálu, obráběnému materiálu, řezným podmínkám a geometrii nástroje, řezivost nových nástrojových materiálů (slinuté karbidy běžné i povlakované, cermety, řezná keramika) a obrobitelnost nových konstrukčních materiálů (včetně keramických materiálů a vláknově vyztužených kompozitů).

Autor jedné monografie – Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění, autor dvou statí v monografii – Tabulky materiálů a předvýrobků pro strojírenství, III. část – materiály výrobní nekovové, provozní a pomocné. Autor nebo spoluautor tří publikací v mezinárodních vědeckých časopisech, 7 publikací v národních vědeckých časopisech, 23 publikací v národních odborných časopisech. Autor nebo spoluautor 9 příspěvků ve sbornících světových nebo evropských vědeckých konferencí, 8 příspěvků ve sbornících národních nebo mezinárodních vědeckých konferencí, 22 příspěvků ve sbornících národních odborných konferencí, 53 opoňovaných výzkumných zpráv, spoluautor čtyř domácích autorských osvědčení.

Autor výukové pomůcky Obrábění (sada 97 barevných diapozitivů včetně doprovodného textu) a výukové videokazety Kompozitní materiály. Spoluautor skripty Teorie obrábění – Příklady a cvičení, autor studijních opor Výrobní technologie II, Technologie montáže, Technologie I – Technologie obrábění – 1. část, Technologie I – laboratorní cvičení a Technologie I – výpočtová cvičení.

Přednášené předměty v magisterském a bakalářském studiu: Technologie obrábění, Strojírenská technologie, Technologie II, Experimentální metody, Technologie montáže, Zkoušení materiálů a výrobků. Předseda komise pro státní závěrečné zkoušky v magisterském i bakalářském studijním programu „Strojní inženýrství“ v oboru „Strojírenská technologie“, předseda komise pro státní závěrečné zkoušky v magisterském studijním programu „Strojní inženýrství“ v oboru „Strojírenská technologie a průmyslový management“.