

Vývoj nástrojů pro obrábění vláknových kompozitů s termoplastickou matricí

Ing. Petr Kolář, Ph.D., Ing. Petr Mašek, Ing. Pavel Zeman, Ph.D., doc. Ing. Martin Vrabec, CSc.

Článek popisuje vývoj nástrojů pro obrábění vláknových kompozitů s termoplastickou matricí. Na základě znalostí z literatury a úvodních testů byly navrženy nové typy nástrojů, které byly vyrobeny s ohledem na omezení konkrétní výrobní technologie. Experimentálně byla porovnána velikost ořepů a životnost nástrojů při ořezu C/PPS a C/PEEK. V závěru článku jsou vyvinuté nástroje porovnány z hlediska celkových nákladů technologie.

ÚVOD

Kompozity s termoplastovou matricí (Fibre Reinforced Thermoplastics – FRTC) jsou velkou skupinou kompozitových materiálů, jejichž struktura je tvořena termoplastovou matricí a vláknovou výztuží. Mezi nejčastěji používané materiály matic patří PEEK, PEKK, PPS a PA12. Matrice může být vyztužena jednosměrnými vlákny nebo tkaninou nejčastěji z uhlíkových nebo skelných vláken. Tyto kompozity jsou dostupné v různých typech polotovarů, např. v tenkých páskách s jednosměrnými vlákny nebo deskách o různých tloušťkách vyztužených tkaninami. Velkou výhodou termoplastových kompozitů je možnost skladování prepregů v běžných podmínkách a dále možnost opakovaného zpracování.

Kompozity s termoplastovou matricí FRTC lze principiálně zpracovávat následujícími technologiemi: technologie pro přidávání materiálu do dílce (additive manufacturing – kladení nebo navíjení), technologie pro tváření a modifikaci tvaru za tepla (termoforming, inserting), technologie odebrání a dělení materiálu (třískové obrábění, řezání laserem, vodním paprskem nebo vibračním nožem), technologie spojování (svařování laserem nebo ultrazvukem).

OBRÁBĚNÍ FRTC

Většina dostupných publikací se věnuje především obrábění kompozitů s termosetovou matricí [1-6]. Obrábění kompozitů s termoplastovou matricí je determinováno odlišným fyzikálním chováním materiálu matrice. Na rozdíl od termosetu je termoplastová matrice houževnatá. Při obrábění tedy vzniká celistvá tříška a nikoliv prach. Problémy s delaminací nejsou tudíž při obrábění FRTC tak výrazné. Pro oba typy kompozitů je shodné, že životnost nástroje a kvalitu řezu ovlivňuje typ a orientace vláken ve struktuře. Vysoká abrazivnost vláken v kombinaci s malým řezným odporem matrice vedou na požadavek diamantových řezných nástrojů s vysoce pozitivní geometrií na čele.

V tomto článku je stručně popsán vývoj nástrojů pro ořez kompozitů s termoplastovou matricí. Vyvinuté nástroje jsou porovnány s komerčně dostupnými nástroji. Parametry hodnocení jsou velikost ořepu, životnost nástroje a celkové náklady technologie.



Označení	DEMO1	DEMO2	DEMO3	DEMO4	komerční nástroj
Materiál	PCD	slinutý karbid	PCD	PCD	slinutý karbid
Typ povlaku	nepovlakovaný	CVD diamantový	nepovlakovaný	nepovlakovaný	na bázi titanu
Průměr	12 mm	12 mm	12 mm	8 mm	12 mm
Počet zubů	4	5	1	2	2
Úhel hřbetu	10.5/10.6	13.8/6.1	11/10.9	14.5/14.9	22.6/20.4
Úhel čela*	2.2/3.9	20.1/20.2	4.4/4.5	2.6/3.8	21.2/25.7
Úhel šroubovice*	16.6/15.9	20.1/27.9	10/9.9	4.9/5.7	17.9/17.9

* Změřené hodnoty pro horní/dolní skupinu nástrojů (v případě nástrojů s dvojtout šroubovicí)

Tab. 1: Přehled nástrojů použitých v testu

POPIS TESTOVANÝCH NÁSTROJŮ

Pro testy bylo použito pět typů nástrojů. Čtyři z nich byly prototypy nástrojů vyrobené s výše zmíněným požadavkem na pozitivní geometrii a ořezuvzdornost. S ohledem na dostupnou technologii výroby nástrojů

z PCD (polykrystalický diamant) a slinutého karbidu se nástroje liší geometrií břitu, počtem zubů, materiálem břitu a typem použitého povlaku.

Dosažení pozitivní geometrie na PCD nástrojích není snadné. Protože PCD destičky mají geometrii obvykle s nulovým úhlem čela, je pozitivní geometrie na čele dosahováno natočením celé destičky v lůžku nástroje. Hodnota velikosti úhlu čela není konstantní podél ostří, protože destička je naklopená pro nastavení nenulového úhlu šroubovice.

Výsledky těchto nástrojů byly srovnávány s komerčně dostupným monolitickým nástrojem ze slinutého karbidu s povlakem na bázi titanu, který vyšel jako nejlepší při úvodních testech komerčních nástrojů [7]. Parametry všech nástrojů jsou shrnuty v tab. 1.

TEST TVORBY OTŘEPŮ

Čtyři experimentální nástroje (DEMO1 - DEMO4) byly testovány na velikost otřepu, který vzniká na obráběném dílci. Jak bylo uvedeno v úvodu, při obrábění FRTC není zásadní problém s delaminací (ta se u frézování prakticky nevyskytuje), ale právě s velikostí otřepů. Otřepy jsou tvořeny nedoříznutými vlákny a vytlačenu matricí.

Při testu byla obráběna deska (= ořez v plné tloušťce materiálu) z materiálu C/PEEK s jednosměrnými vlákny. Polotovarem pro výrobu desky byly UD prepregy z uhlíkových vláken AS4. Velikost otřepu byla vyhodnocována optickou metodou, kdy byla měřena plocha otřepu podél hrany o konstantní délce. Řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 2. Výsledky testu jsou shrnuty v tab. 3.

Výsledky jednotlivých nástrojů jsou ovlivněny kombinací velikosti úhlu čela a šroubovice u konkrétních nástrojů. Nejmenší otřep vytvořil nástroj DEMO2. Tento nástroj má nejpozitivnější hodnotu úhlu čela a také největší nastavení úhlu šroubovice (20°). Nástroj DEMO1 má

proti tomu relativně malý úhel čela, ale poměrně velký úhel šroubovice 16° umožnil snížit velikost výsledného otřepu. Nástroje DEMO3 a DEMO4 dosáhly horších výsledků. Oba mají menší hodnotu úhlu čela i šroubovice než nástroje DEMO1 a DEMO2. V případě nástroje DEMO3 je na testovaném dílci vidět výrazně vysoký podíl nepřerýznutých vláken. Z tohoto důvodu byl nástroj vyřazen z dalších testů.

TEST ŽIVOTNOSTI NÁSTROJŮ

Životnost nástrojů byla testována při obrábění materiálů C/PPS a C/PEEK. Řezné podmínky použité při testech jsou uvedeny v tab. 3. Nástroj DEMO3 byl v testech nahrazen standardním komerčním nástrojem (viz tab. 1).

Životnost nástrojů při obrábění C/PPS

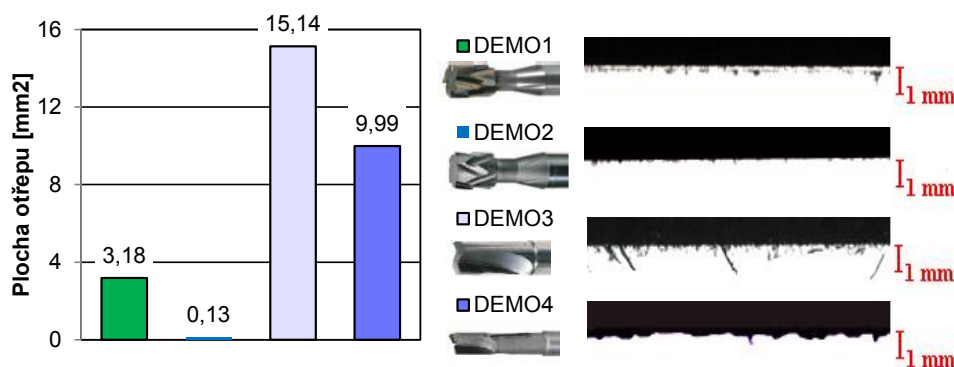
Pro testy životnosti byl použit materiál C/PPS s atlasovou vazbou a uhlíkovými vlákny T300. Opatření nástroje (otěr na hřbětě) bylo vyhodnocováno optickým mikroskopem dle ISO 3685, ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2. Výsledky testu jsou zobrazeny na obr. 2. Zobrazené výsledky jsou ze tří opakování experimentu.

Jak je vidět z grafu, nástroje s diamantovým břittem (DEMO1 a DEMO4) dosáhly v průběhu testů přibližně šestkrát menší hodnoty opotřebení než karbidový nástroj s diamantovým povlakem (DEMO2) a přibližně dvanáctkrát menší hodnoty než karbidový nástroj s povlakem na bázi titanu (Standard Tool). Drsnost povrchu a velikost otřepů v průběhu testů narůstala u všech testovaných nástrojů. To ukazuje, jak je důležité používat pro dokončovací obrábění neopotřeбенé nástroje. Výsledky testů také celkově ukazují na výhodu PCD, který je více ořezuvzdorný, než povlakované karbidy.

Z technologických důvodů je však možno na karbidových nástrojích vyrobit více zubů než u nástrojů s destičkami z PCD (5 zubů u DEMO2, 4 zuby u DEMO1). Tyto dva nástroje byly proto porovnány i při obrábění C/PEEK.

Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Radiální šířka řezu a_e [mm]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_t [mm]
5	3	400	0,05

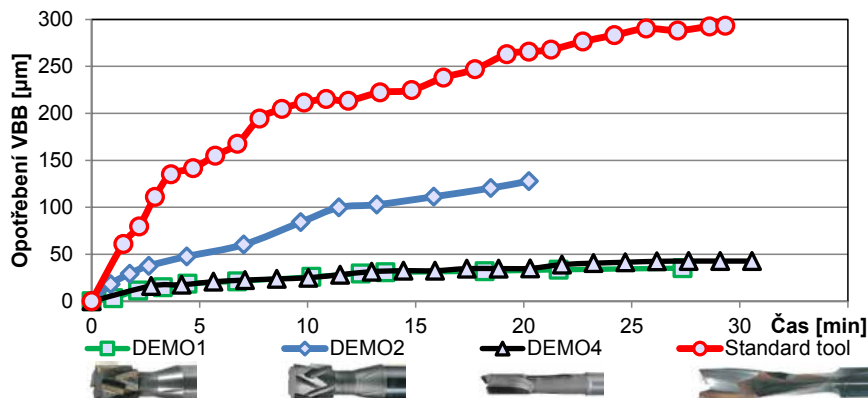
Tab. 2: Řezné podmínky použité při testu tvorby otřepů



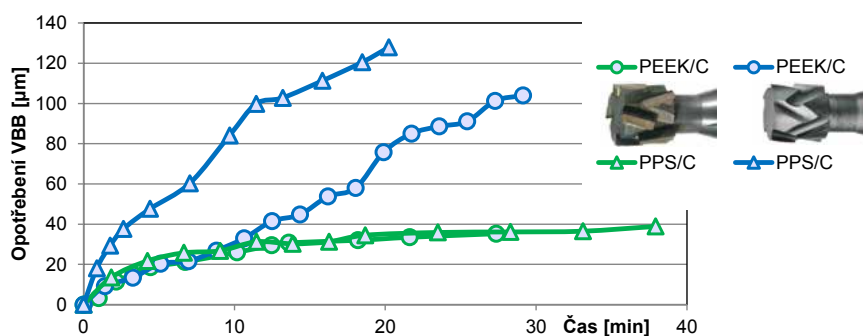
Obr. 1: Porovnání velikosti otřepu při obrábění C/PEEK různými nástroji

Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Radiální šířka řezu a_e [mm]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_t [mm]
5	3	300	0,05

Tab. 3: Řezné podmínky použité při testu životnosti nástrojů



Obr. 2: Průběh opotřebení na čele při frézování C/PPS



Obr. 3: Porovnání opotřebení nástrojů na hruběti při obrábění C/PEEK a C/PPS.

Porovnání životnosti nástrojů při obrábění C/PEEK a C/PPS

Pro další testy životnosti byl použit materiál C/PEEK. Laminát o skladbě (0°/45°/-45°/90°) byl vytvořen z UD prepregu z uhlíkových vláken AS4. Výsledky jsou uvedeny na obr. 3. Testovány byly pouze nástroje DEMO1 a DEMO2 z důvodu nejvyššího potenciálu produktivity, protože mají z testovaných nástrojů největší počet zubů. Výsledky obrábění C/PEEK jsou v grafu porovnány s výsledky obrábění C/PPS uvedených na obr. 2.

Z grafů je vidět, že nástroj s diamantovým břitem (DEMO1) dosáhl v obou případech menšího opotřebení na hruběti, než nástroje z povlakovaných karbidů. Z grafu je vidět, že opotřebení nástroje s diamantovým břitem bylo necitlivé na typ a strukturu vláken. Proti tomu v případě povlakovaného karbidového nástroje (DEMO2) je vidět rozdílná hodnota opotřebení v závislosti na typu obráběného kompozitu. Oba materiály měly stejný objem vláken. Vlákná T300 v C/PPS mají podobné materiálové vlastnosti jako vlákna AS4 v C/PEEK. Materiály se liší strukturou vláken (atlasová vazba vs. jednosměrná vlákna). Tyto výsledky ukazují, že typ struktury vláken a jejich orientace mají v případě karbidových nástrojů významný vliv, zatímco v případě nástrojů a diamantovými břity není tento vliv podstatný.

CELKOVÉ NÁKLADY OBRÁBĚNÍ

Pro posouzení každé technologie jsou důležité celkové náklady. Pro porovnání výsledků nástrojů DEMO1, DEMO2 a standardního komerčního nástroje byla proto provedena kalkulace celkových nákladů obrábění C/PPS, aby bylo možno nástroje objektivně porovnat. Nástroje se vzájemně liší počtem zubů (tedy i potenciálem produktivity), trvanlivostí a pořizovací cenou. Cena nástrojů a jejich životnost jsou shrnuty v tab. 4. Pro posouzení relativních celkových nákladů technologie byly uvažovány tři různé typy strojů lišící se vybavením a pořizovací cenou (viz tab. 5). Na základě dat uvedených v tab. 5 je možno spočítat celkové náklady strojního pracoviště CNSP [EUR/hod] včetně nákladů na obsluhu a spotřební materiál:

$$CNSP = \frac{CS}{OD} + MN + SN \quad (1)$$

kde CS je pořizovací cena stroje v [EUR], OD je odpisová doba v [hod] (daná počtem dnů v roce, kdy stroj pracuje, počtem osmihodinových směn a dobou odpisu investice), MN jsou mzdové náklady obsluhy stroje a SN jsou náklady na spotřební materiál (řezná média, tlakový vzduch apod.).

Objem odebraného materiálu během doby životnosti břitu MRT [cm³] lze vypočítat:

$$MRT = a_e \cdot a_p \cdot f_z \cdot Z \cdot T_{0,1} \cdot n \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

kde a_e je radiální hloubka řezu [mm], a_p je axiální hloubka řezu [mm], f_z je posuv na zub [mm], Z je počet zubů [1], $T_{0,1}$ je životnost nástroje pro dosažení opotřebení VBB=0,1 mm a n jsou otáčky vřetena [1/min].

Relativní celkové náklady na odebraný 1 cm³ materiálu RCN [EUR/cm³] lze potom vypočítat:

$$RCN = \frac{CN}{MRT} + CNSP \cdot \frac{T_{0,1}}{60 \cdot MRT} \quad (3)$$

kde CN je cena nástroje [EUR].

Celkové relativní náklady jsou porovnány na obr. 4. Jak vyplývá z grafu, náklady na nástroje jsou dominantní položkou celkových relativních nákladů. To znamená, že cena stroje nehraje rozhodující roli v celkové ceně technologie. Nástroje s břity z PCD jsou neefektivnější pro dosažení nízkých relativních celkových nákladů technologie. Klíčovým faktorem je, že extrapolovaná životnost nástrojů s PCD břity je desetkrát větší než u karbidových nástrojů s diamantovým povlakem a čtyřicetkrát vyšší než u karbidových nástrojů s povlakem na bázi titanu. Právě dlouhá životnost je hlavním benefitem, který kompenzuje vysokou absolutní pořizovací cenu nástroje. Návratnost investice do dražších nástrojů je vidět na obr. 5, kde jsou porovnány absolutní celkové náklady ACN technologie v závislosti na objemu odebraného materiálu. Uvedené ceny nástrojů jsou platné pro kusovou výrobu prototypů; u sériově vyráběných nástrojů lze očekávat snížení ceny.

ZÁVĚR

Vývoj nástrojů pro frézování a ořez kompozitů s termoplastovou maticí je komplexní úloha. V úvahu je nutno vzít řezný materiál, geometrii břitu a jeho povlak, aby byla současně minimalizována velikost otřepu na obrobeném dílci a nástroj měl dostatečnou životnost. Vzhledem k rozdílným výrobním technologiím nástrojů existují rozdílné typy nástrojů jak z hlediska materiálu a povlaku, tak z hlediska geometrie a počtu zubů. Porovnání rozdílných nástrojů je možné pouze pomocí porovnání celkových nákladů na konečnou technologii.

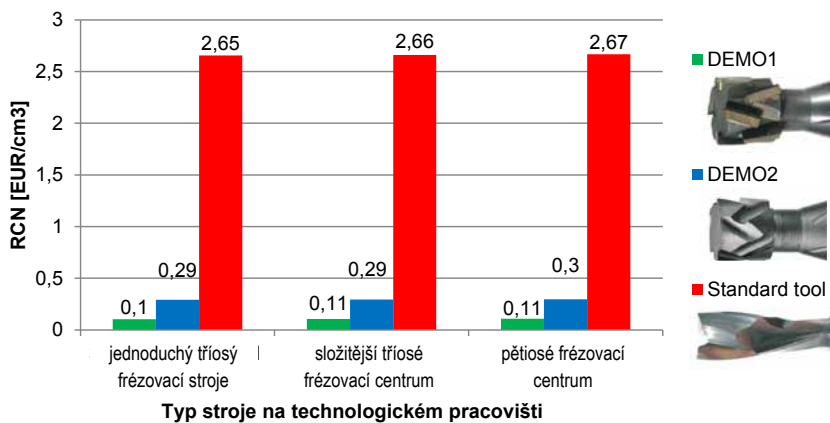
Článek prezentuje ukázky vyvinutých nástrojů pro ořez kompozitů s termoplastovou maticí. Experimenty byly provedeny při obrábění C/PPS a C/PEEK. Závěry experimentů lze shrnout takto:

- Nástroje pro ořez FRTC by měly mít pozitivní úhel čela a nenulový úhel šroubovice. Tyto parametry společně s uspořádáním zubů do dvojité kompresní šroubovice pro zajištění kompresního směru řezné síly při ořezu materiálu minimalizují velikost otřepu na obráběném dílci.
- Z hlediska řezných podmínek je limitem dosažení teploty tavení matrice. Nejvyšší řezné rychlosti ověřené při experimentech byly 300 m/min. Nejvyšší posuv na zub byl 0,05 mm. Pro vyšší

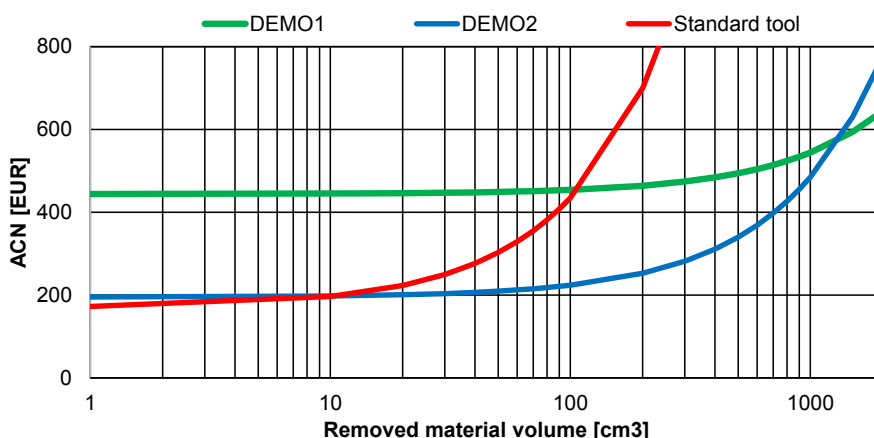
hodnoty posuvu vzniká neakceptovatelně velký otřep.

- Nástroje ze slinitých karbidů umožňují velmi přesně dosáhnout požadované geometrie břitu s úhly čela a šroubovice okolo 20°. Na druhou stranu, i při použití diamantových povlaků je životnost těchto nástrojů nižší, než v případě nástrojů s PCD břity. Karbidové nástroje dosahují díky dobře vyrobené geometrii břitu nejlepší výsledky z hlediska jakosti povrchu.
- Nasazení nástrojů s PCD břity je výhodné z hlediska životnosti. Nevýhodou jsou technologická omezení při dosažení požadované řezné geometrie natočení destičky v lůžku nástroje.
- Nástroje s PCD břity jsou také v absolutní ceně nejdražší. Tato nebhoda je však výrazně vyvážena uvedenou dlouhou životností nástrojů a proto vykazují nejnižší relativní celkové náklady na obrábění. Nástroje s PCD břity jsou tedy výhodné pro velkosériovou výrobu; pro kusovou a malosériovou výrobu jsou ekonomicky výhodnější povlakované karbidové nástroje.

Tyto výsledky byly získány v rámci projektu Fibrechain (grant č. 263385), který byl podpořen z prostředků Evropské unie v rámci 7. rámcového programu.



Obr. 4: Porovnání relativních celkových nákladů pro ořez C/PPS.



Obr. 5: Porovnání absolutních celkových nákladů pro technologii ořezu C/PPS.

Literatura:

- [1] König W., Wulf P., Graß P., Willerscheid H.: Machining of fibre reinforced plastics. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 34, no. 2, pp. 537-548, 1985.
- [2] Astrom B.: Manufacturing of Polymer Composites. CRC Press, 1997. ISBN-13: 978-0748770762
- [3] Sheikh-Ahmad J. Y.: Machining of polymer composites. New York: Springer Science, 2009. e-ISBN 978-0-387-68619-6.
- [4] Abrate S., Walton D.: Machining of composite materials. Part 1: Traditional methods. Composites Manufacturing, vol. 3, no. 2, pp. 75-83, 1992.
- [5] Teti R.: Machining of composite materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 51, pp. 611-634, 2002.
- [6] Davim P. J.: Machining composite materials. London: ISTE Ltd, 2010, ISBN: 978-1-84821-170-4.
- [7] Masek P., Zeman P., Kolar P.: Development of cutting tool for composites with thermoplastic matrix. MM Science Journal, pp. 422-427, 2013.