

Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí

Autor: Ing. Petr Mašek

Školitel: prof. Dr. Ing. František Holešovský

Školitel specialista: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Úvod a cíle disertační práce

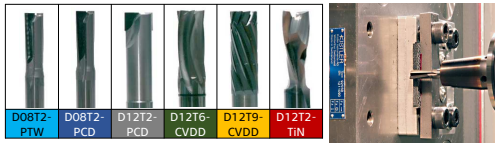
Kompozitní materiály s termoplastickou maticí (FRTC) jsou obtížně obrobitelné. Obtížná obrobitelnost je dána některými nepříznivými technologickými vlastnostmi materiálu. Zejména strukturální nehomogenitou vedoucí k delaminaci mající často charakter otřepu, velkou tvrdostí a pevností vláknových výtžů která vede k rychlému opotřebení méně tvrdých řezných materiálů (SK), relativně nízkými teplotami tavení matrice (desítky až stovky °C). Návrh technologie frézování je tímto aspekty podmíněn. Cíle disertační práce reagují na zásadní problémy, které vznikají při frézování kompozitů s termoplastickou maticí, konkrétně ovlivnění kvality povrchu tepelným a silovým zatížením a životnosti nástroje. Řešení je pak zaměřeno na překonání zásadních problémů s obráběním těchto materiálů, návrhem vhodné technologie obrábění (řezného nástroje, řezných podmínek a strategií obrábění) pro maximalizaci produktivity při zachování nebo zlepšení kvality obrobenej plochy.

Cíle disertační práce je výzkum a definice nástroje pro dosažení optimální kvality povrchu při obrábění kompozitních materiálů s termoplastickou maticí.

- Návrh konceptu frézovacího nástroje včetně tvaru, řezné geometrie a řezného materiálu za účelem dosažení vysoké kvality obrobenej plochy a vysoké produktivity obrábění při bočním frézování (ořezu) deskových vláknových termoplastových kompozitních materiálů (FRTC).
- Návrh optimálních řezných podmínek za účelem zvýšení kvality povrchu a produktivity s přihlédnutím k limitům daným materiálovými vlastnostmi obrobku.
- Návrh a realizace metody měření teploty při frézování za účelem maximalizace řezných podmínek při nepřekročení limitní teploty obrábění.
- Na základě měření teplot vypracovat model pro predikci teploty povrchu obrobenej plochy za účelem nalezení limitních řezných podmínek pro frézování kompozitů s termoplastickou maticí.
- Návrh modelu řezných sil pro zvolení optimální tvaru nástroje za účelem predikce řezných sil v netestovaných stavech při frézování kompozitů s termoplastickou maticí.

Vývoj frézy pro boční frézování C/PPS a G/PA12

Cílem vývoje stopkové frézy je splnit požadavky koncového uživatele: vysokou trvanlivostí bříty, vynikající řezivost s ohledem na jakost obrobenej plochy, vysokou produktivitu frézování. Bylo vybráno 6 katalogových nástrojů na testy jakosti obrobenej plochy pro zjištění nejvhodnější geometrie k frézování C/PPS a G/PA12.



Vybrané katalogové nástroje s kódovým označením. Frézování katalogovými nástroji.

Pro měření delaminace byla vyvinuta speciální metoda vyhodnocení otřepu ze standardní fotografie. Vzorek byl fotografován z několika pohledů pro záznam ploch otřepů na horní i dolní hraně obrobenej plochy. Plocha otřepu byla vybrána v grafickém editoru a byla určena pro každý fotografovaný pohled horního i spodního otřepu. Výsledná plocha jako suma čtverců byla vydělena délkou obrobenej plochy.

Shnutí poznatků testů katalogových nástrojů:

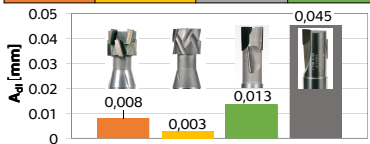
Z testů vyplynulo, že velmi dobré výsledky stran kvality obrobenej povrchu a velikosti F_a měly nástroje D12T2-TIN a P08T2-PTW. Na základě výsledků testů byly stanoveny požadavky na výrobu prototypových fréz.

Z požadavků na vysokou životnost nástroje při frézování FRTC materiálu vyplývající z rešeršní části práce a měření katalogových nástrojů byly navrženy 3 PCD a 1 CVD-D povlakovaná fréza. Cílem bylo implementovat kompresní geometrii s co největším úhlem čela (až 20°) do nástroje s dlouhou životností a vytvořit na nástroji co nejvíce bříty s dostatečnou drážkou pro odvod třísek. Konkrétnější požadavky na podobu nástrojů byly předány výrobcům UniCut s.r.o., Hoffmaister s.r.o. a Hufschmied GmbH.

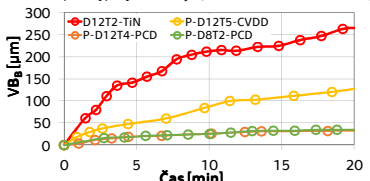


Charakteristiky prototypových nástrojů.

Označení nástroje	z	D [mm]	Úhel hřbetu	Úhel čela	Úhel šroubovice
P-D12T4-PCD	4	12	10,6°	3,9°	15,9°
P-D12T5-CVDD	5	12	13,8°	21,1°	27,8°
P-D12T1-PCD	2	12	11°	4,4°	10,0°
P-D8T2-PCD	2	8	4,9°	3,8°	14,5°



Porovnání prototypových nástrojů (velikost delaminace na C/PPS).



Vývoj opotřebení na prototypových nástrojích v porovnání s povlakovaným SK nástrojem D12T2-TIN.

Výsledky testů prototypových fréz druhé řady

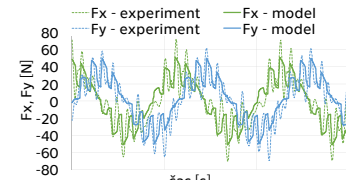
Kvůli nevhodné technologii pájení použité výrobcem PCD fréz lze doporučit spíše úpravu úhlu čela buď podbroušením lážka nebo vytvořením utvařiče třísek laserem spíše než kompresní šroubovicí. U SK povlakovaných CVD diamantem se osvědčila geometrie s $\varphi_a = 25^\circ$ a $\lambda_s = 28^\circ$ z hlediska redukce otřepů.

Vybrané publikace autora

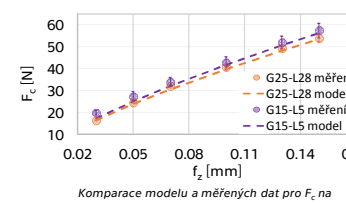
- MAŠEK, P., ZEMAN, P., KOLÁŘ, P., HOLEŠOVSKÝ, F. Edge trimming of C/PPS plate. The International Journal of Advanced Manufacturing, Technology. 2018, ISSN 0268-3768. DOI 10.1007/s00170-018-2857-1
- MAŠEK, P., KOLÁŘ, P., ZEMAN, P. Optimization of trimming operations for machining carbon fibre reinforced thermoplastic composite. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. Stockholm, 27.10.2013. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology. 2013, s. 73-82. ISBN 978-91-7501-892-8.
- MAŠEK, P., ZEMAN, P., KOLÁŘ, P. Development of a Cutting Tool for Composites with Thermoplastic Matrix [online]. MM Science Journal. 2013, 0s. 422-427. ISSN 1805-0476.

Matematický model sil při frézování C/PPS a G/PA12

Byl navržen matematický model řezné a kolmé řezné síly pro nástroje s kompresní šroubovicí. K tomu bylo potřeba provést experiment na zjištění koeficientů k_{c1} , m_c , k_{c1N} , m_{cN} a F_{ce} pro 6 CVD diamantem povlakovaných nástrojů s 3 různými úhly šroubovice a 2 různými úhly čela. Model zahrnoval prvek překryvu šroubovice, který dosavadní modely ignorovaly. K modelu bylo přistupováno jako k nástroji se třemi řeznými částmi, které jsou z pohledu obrobku značeny jako axiální hloubky řezu (a_{p1} , a_{p2} , a_{p3}) v [mm] a které vstupují do řezu postupně se zpožděním ψ daným osovou pozicí nástroje m vůči horní hraně obráběné desky p. Průměrná chyba modelu byla 3,2 %. Výpočet bylo prokázáno, že model sil s uvažováním překryvu šroubovice se liší od svých předchůdců.



Přímé porovnání průběhu modelu a měřených dat pro nástroj G25-L15.



Komparace modelu a měřených dat pro F_c na dvou testovacích nástrojích.

Matematický model delaminace

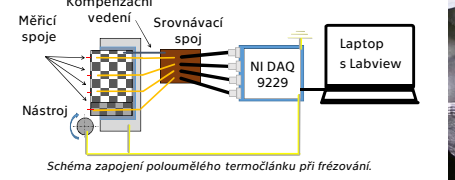
Byl navržen i model střední délky delaminace A_{dl} vycházející z její přibližné mocninné závislosti na posuvu na zub. Model byl navržen rovněž pomocí MNC včetně odhadu hodnot koeficientů.

$$A_{dl} = C_{Ad} \cdot f_a^{-uA} \cdot \lambda^{-u\lambda} \cdot \gamma^{-u\gamma} \quad [\text{mm}]$$

Výsledný empirický model má v případě materiálu C/PPS velikost koeficientu determinace $R^2 = 0,966$ v případě G/PA12 $R^2 = 0,909$. I přes poměrně vysoké hodnoty spolehlivosti je chyba modelu A_{dl} na f_z pro oba materiály v průměru 30 %.

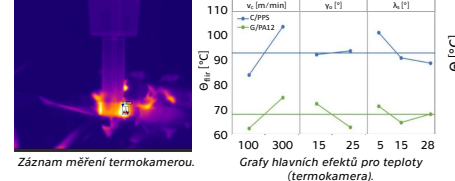
Měření teploty C/PPS a G/PA12

Pro měření teploty na obrobenej povrchu C/PPS byla modifikována metoda poloumělého termočlánku, která dříve nebyla celosvětově prezentována. Byl využit rozdíl v elektrických potenciálech uhlíkové vláknové výtžve v kompozitu a vloženého termočlánekového drátku Ni-Cr. Byla stanovena cejchovní závislost pro tento termočlánek pod pájkou. Pro převod a zpracování signálu byl navržen software v programu Labview. Byla měřena teplota ve vybraných bodech na obrobku. Opakovatelnost měření se pohybovala v rozptě 10 °C pro jednotlivá opakování kvůli optimálně navrženému vzorku C/PPS.



Šchéma zapojení poloumělého termočlánku při frézování.

Měření prokázala statisticky významnou závislost řezné rychlosti na teplotě. Na základě toho byl navržen model opět pomocí MNC a odhadnuty koeficienty pro použité proměnné. Model byl odhadnut s koeficientem determinace $R^2 = 0,681$. Průměrná odchylka naměřených hodnot od modelu byla spočtena menší než 7,5 %.



Záznam měření termokamerou. Grafy hlavních efektů pro teploty (termokamera).

Pro materiál G/PA12 byla navržená metoda měření termovizí pro komparaci teplotního chování obou testovacích materiálů. Kvůli rozdílnému utváření třísek a rozdílným charakteristikám matic a vláken v kompozitech jsou rozdílné i výsledky měření teplot napříč změnou řezných podmínek i vlivu řezné geometrie nástroje. Teploty měřené na G/PA12 jsou v průměru o 17 % nižší než na C/PPS. U G/PA12 sledujeme dále např. pozitivní vliv úhlu čela na snížení teploty.

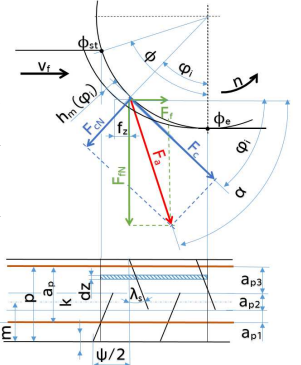
Přínos disertační práce

Přínos spočívá v definici a otestování vhodného nástroje pro frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí G/PA12 a C/PPS. Navržené PCD a diamantem povlakované frézy prokazatelně zvyšují kvalitu obrobenej povrchu v porovnání se standardní nabídkou výrobců frézových nástrojů. Navržené nástroje mají potenciál pro použití v praxi.

Přínos matematického modelu spočívá zejména v přidání parametru překryvu šroubovice, který významně zjednodušuje výpočet a tím i predikci sil při frézování. Stejně tak jsou prakticky využitelné i modely závislosti střední délky delaminace na posuvu na zub a teploty frézovaného povrchu na řezné rychlosti.

Navržené metody měření teploty obrobenej povrchu polymerních kompozitních materiálů dávají odpověď, jak v případě použití moderních nástrojů s diamantovým povlakem či PCD měřit teplotu při frézování kompozitních desk. Znalost teploty je důležitá pro stanovení limitních řezných podmínek obrábění pro danou polymerní matici a obráběcí nástroji. Metoda poloumělého termočlánku je v podobě, jak byla prezentována v této práci, bezchybnou použitelnou pro kompozity s vodivými uhlíkovými vláknami. Termovize je vhodnou doplňkovou metodou pro komparativní měření i pro elektricky nevodivé kompozity.

Výsledky této práce byly získány a publikovány v rámci mezinárodního projektu 7 rámcí FibreChain běžícího v letech 2011 až 2014, v interním projektu VCSVT 7-US.15.05...FrézFRTC v roce 2015 až 2016 a v projektu Centrum pokročilých leteckých technologií financovaného z ESIF od roku 2016 po současnost.

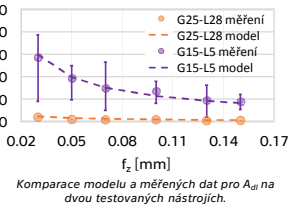


Výchozí záberové charakteristiky pro model sil.

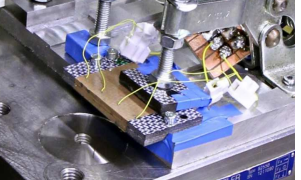
Geometrický model byl následně zobecněn, aby nebylo potřeba definovat pro každou geometrii řezného nástroje nové k_{c1} , m_c , k_{c1N} , m_{cN} a F_{ce} . Výsledný model byl vybrán jako varianta s nejvyšším měřeným koeficientem determinace ze všech navržených a testovaných variant pomocí metody nejmenších čtverců (MNC). Modelové rovnice byla testována s odhadnutými koeficienty vybraných parametrů v SW Statistica 12 CZ.

$$F_c(\varphi) = k_{c1} \left(\sum h_i(\varphi) \right) \left(\sum b_i(\varphi) \right) \gamma_a^{-m} k^{-mk} [N]$$

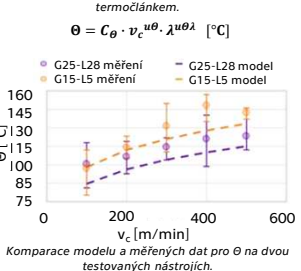
Výsledný matematický model umožňuje předvídat silové zatížení obrobku v mezích návrhu experimentu s vysokou spolehlivostí s koeficienty determinace pro kompozit C/PPS $R^2 = 0,989$ a pro kompozit G/PA12 $R^2 = 0,943$.



Komparace modelu a měřených dat pro A_{dl} na dvou testovacích nástrojích.



Vzorek C/PPS - měření teploty poloumělým termočlánekem.



Komparace modelu a měřených dat pro θ na dvou testovacích nástrojích.