

---

# Stratégie frézovania tenkostenných komponentov z ťažkoobrobiteľného materiálu

---

## Jakub Hrbál, Ing.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.  
E-mail: jakub.hrbal@stuba.sk, Tel.: + 421 948 954 326

## Marek Vozár, Ing., PhD.\*

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.  
E-mail: marek.vozar@stuba.sk, Tel.: + 421 948 038 796

## Boris Pätoprstý, Ing., PhD.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.  
E-mail: boris.patoprsty@stuba.sk, Tel.: + 421 902 287 050

## Ivan Buranský, doc. Ing., PhD.

Ústav výrobných technológií, Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave,  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Ulica Jána Bottu 25, 91724 Trnava.  
E-mail: ivan.buransky@stuba.sk, Tel.: + 421 948 936 662

## Milling strategies for thin-walled components made of difficult-to-cut material

**Abstract:** The paper deals with the issue of the influence of machining strategies and tool parameters on the quality of the machined surface of thin-walled parts made by *WAAM technology*. The current state of machining thin-walled parts is complemented by cutting tools in terms of materials, geometry, and tool wear. From the point of view of surface integrity, the roughness and flatness of machined thin-walled parts made of *Inconel 718* nickel alloy material will be observed. The machining strategy and cutting tool geometry were designed by experimental machining. The results of the experiment are presented in the conclusion. Achieved experimental results are a contribution to the efforts to expand the knowledge on the topic of machining thin-walled parts.

**Keywords:** milling strategy, thin-walled part, end mill, *WAAM*, optical 3D scanning

---

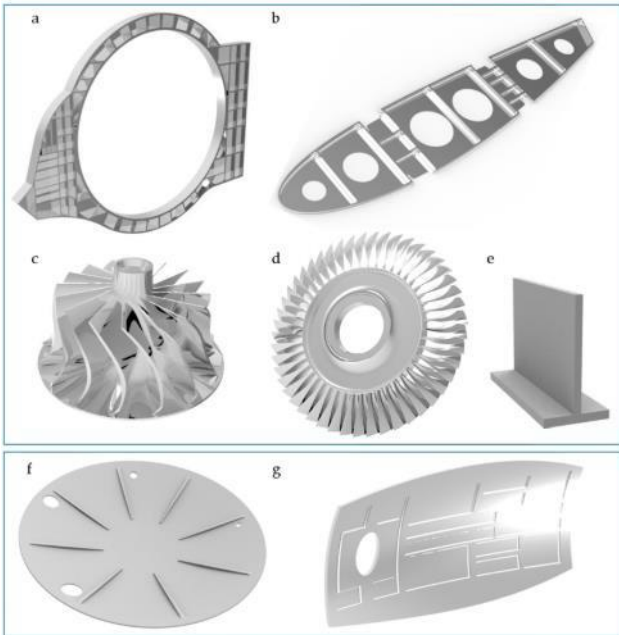
## ÚVOD

Technológia obrábania je jednou z najbežnejšie používaných metód na výrobu rôznych komponentov. Medzi dôvodmi pretrvávajúcej potreby uskutočňovať štúdie obrábania je rastúci dopyt po vyšších rýchlostiach úberu materiálu a zavádzanie nových materiálov. Na jednej strane je potreba zvýšiť produktivitu zvýšením rýchlosti úberu kovu alebo odstránenie, čo najmenšieho množstva materiálu k dosiahnutiu finálneho tvaru súčiastky. Na druhej strane je úsilie priemyslu nájsť materiály s vynikajúcimi vlastnosťami, ktoré by vyhovovali požiadavkám na dizajn a dokážu vydržať extrémne pracovné podmienky. Nové materiály majú jedinečné metalurgické vlastnosti a prinášajú nové výzvy v

obrábaní. Pre tieto materiály sa používa pojem ťažkoobrobiteľné materiály (*difficult-to-cut materials*). Tieto materiály sa vyznačujú vysokou húževnatosťou, odolnosťou proti korózii, oxidácii a zachovávajú si svoje mechanické vlastnosti pri vysokých teplotách [1].

Tenkostenné súčiastky sa vo väčšine prípadov klasifikujú z hľadiska pomeru rozmerov súčiastky. Na základe odbornej a vedeckej literatúry by sa dala tenkostenná súčiastka definovať ako súčiastka tvorená stenami, ktoré sú vysoké, tenké a aj pri malých rezných silách sa deformujú. Hlavnou charakteristikou tenkostennej súčiastky je nedostatočná tuhosť a vznik chvenia pri obrábacom procese. Na výrobu tenkostenných súčiastok sa

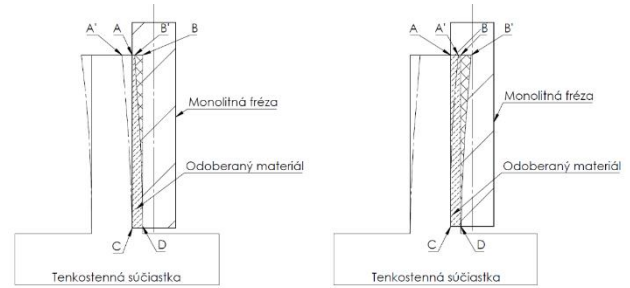
používajú spôsoby obrábania, ako sú frézovanie, sústruženie a progresívne metódy obrábania. Produktivita procesu obrábania tenkostenných súčiastok, typických pre letecký a energetický priemysel, je stále obmedzená problémami s presnosťou. Tenkostenné súčiastky majú malú tuhosť a pri obrábaní dochádza ku chybám, ktoré sú spôsobené vibráciami [2] a statickou deformáciou [3]. Príklady typických tenkostenných súčiastok sú znázornené na obr. 1.



Obr. 1. Príklady tenkostenných súčiastok: a) rám, b) rebro, c) obežné koleso, d) turbína, e) jednoduchá tenkostenná súčiastka, f) prepážka, g) kryt [4]

Kľúčový faktor ovplyvňujúci presnosť je statické vychýlenie obrobku, ktoré je spôsobené reznou silou vznikajúcou pri procese obrábania. Pri výrobe súčiastok frézovaním dochádza k zmene tuhosti súčiastky s postupným odoberaním materiálu, čo má nepriaznivý vplyv na celý proces výroby. Odoberaním materiálu sa znižuje tuhosť obrobku a vplyvom rezných síl môže dôjsť ku vzniku samobudeného chvenia. Nestabilita obrobku pri obrábaní je určená relatívnou kmitavou výchylkou medzi nástrojom a obrobkom. Takáto výchylka tenkostennej súčiastky spôsobuje zhoršenie integrity povrchu obrobenej plochy. Proces frézovania tenkostennej súčiastky je veľmi komplikovaný, pretože vznikajúce rezné sily sa periodicky menia a pôsobia na súčiastku a nástroj staticky a dynamicky. Pri obrábaní tenkostenných súčiastok je nutné uvažovať o dynamickej poddajnosti obrobku pri optimalizácii technologických podmienok [2, 3].

Pri prerušovanom obrábaní sa proces môže stať nestabilným. Medzi obrobkom a nástrojom dochádza k vzniku vibrácií a chvenia, čo má za následok deformáciu tenkostennej súčiastky. Vznik deformácií tenkostenných súčiastok je znázornený na obr. 2.



Obr. 2. Deformácia tenkostennej súčiastky pri obrábaní [5]

Na obr.2 sú znázornené body ABCD, ktoré reprezentujú odobraný materiál. Pôsobením rezných síl pri obrábaní sa bod A posunie do polohy A' a bod B sa posunie do bodu B'. Vplyvom deformácií sa odreže materiál, ktorý je reprezentovaný bodmi ABCD. Po frézovaní sa obrobený povrch elasticky vráti späť. Materiál ACA nie je odobratý a tým dochádza ku vzniku hrubšej steny v hornej časti súčiastky. V druhom prípade dochádza ku vzniku hrubšej spodnej časti súčiastky. Materiál sa elasticky vráti späť a spolu s materiálom ABCD je odrezaný materiál ACA. Pri frézovaní tenkostenných súčiastok sa používajú stopkové frézy, ktoré majú veľké vyloženie a môže dôjsť k odtlačeniu nástroja. Takto vychýlený nástroj neobrába celý materiál, ale vzniká tvarová odchýlka a zhoršuje sa kvalita obrobeného povrchu. Vplyvom odtlačenia nástroja vzniká na obrobenom povrchu nerovnomerná hrúbka steny. Obrobený povrch pozostáva z povrchov vytvorených jednotlivými reznými hranami. Pri valcovom frézovaní nie je hrúbka triesky konštantná. Autori *Laamouri a kol*, *Ratchev a kol* používali pri svojich experimentoch súbežné frézovanie [6, 7]. Pri frézovaní tenkostenných súčiastok je súbežné frézovanie lepšie ako protibežné [8].

Voľba vhodnej stratégie frézovania môže do značnej miery ovplyvniť výsledok obrábacieho procesu. Výber stratégie obrábania závisí od tvaru, veľkosti obrábaných plôch a od požadovanej kvality obrábaného povrchu. Proces obrábania delíme na hrubovacie a dokončovacie operácie. Hrubovacími operáciami odoberáme podstatnú časť materiálu z polotovaru až po rozmery súčiastky, ktoré sú zväčšené o prídavok na dokončovacie obrábanie. Pod pojmom dokončovacie obrábanie sa rozumie obrábanie s takými reznými parametrami, pri ktorých by mali byť dosiahnuté požadované vlastnosti súčiastky a integrity povrchu [9].

## 1 MATERIÁLY A METÓDY

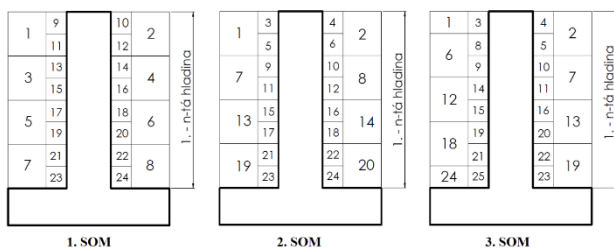
*Inconel 718* patrí do skupiny tzv. „superzliatin“. Pojem *superzliatiny* označuje skupinu zliatin, ktoré sú schopné udržať si svoje mechanické vlastnosti po dlhodobom vystavení zvýšeným teplotám. Vďaka svojim vynikajúcim chemickým, mechanickým a fyzikálnym (tab. 1) vlastnostiam sa zliatiny niklu stali atraktívnym materiálom pre letecký, jadrový

a kozmický priemysel. Používajú sa na výrobu raketových motorov, lopatiek turbín a pri stavbe reaktorov a ako tyče palivových čerpadiel. *Superzliatiny* sa rozdeľujú do troch skupín podľa ich primárnych zložiek, konkrétne na zliatiny na báze železa a niklu, niklu a kobaltu. *Superzliatiny* na báze kobaltu a niklu vykazujú vynikajúce vlastnosti pri zvýšených teplotách [10, 11].

**Tab. 1. Základné fyzikálne vlastnosti zliatiny Inconel 718 [12]**

Parameter	Hodnota
Hustota	8190 kg·m <sup>-3</sup>
Koeficient tepelnej rozťažnosti	13,0 μm·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Teplota tavenia	1260-1336 °C
Špecifické teplo	435 J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Tepelná vodivosť	11,4 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>

Prístup k riešeniu problematiky obrábania tenkostenných súčiastok nadväzoval na dizertačnú prácu *doc. Ing. Ivana Buranského, PhD.* Autor skúmal vplyv stratégií frézovania na kvalitu obrobeného povrchu tenkostenných súčiastok. Materiál obrobku bola zliatina hliníka EN 6082. V dizertačnej práci boli vybrané tri spôsoby odoberania materiálu (*SOM*). Tieto spôsoby odoberania materiálu sa používajú pre obrábanie tenkostenných súčiastok (1.1.3). Použité spôsoby odoberania materiálu, ktoré boli experimentálne použité (1. *SOM*, 2. *SOM* a 3. *SOM*) sú zobrazené na obr. 3.

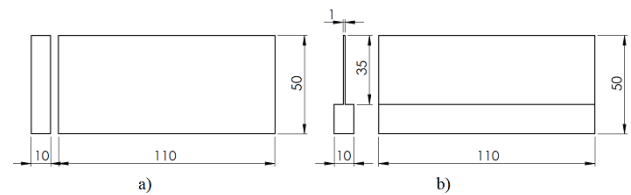


**Obr. 3. Použité stratégie pre obrábanie [5]**

Počas obrábania boli sledované rezné sily pomocou dynamometra *KISTLER typ 9552 A*, ktorý pracuje na princípe piezoelektrického javu. Pri frézovaní bola použitá stopková valcová fréza s priemerom 16 mm. Výsledky tohto experimentu viedli k záveru, že pre tenkostenné súčiastky je najvhodnejšie použiť spôsob odoberania materiálu 3. *SOM*. Pri tomto spôsobe obrábania bol priebeh rezných síl počas frézovania stabilnejší, pretože je stena z druhej strany podopretá neobrobeným materiálom, čím sa zvyšuje jej tuhosť. Tvar a rozmery súčiastky určenej pre experimenty sú uvedené na obr. 4.

Na výrobu stopkových rezných nástrojov bol použitý spekaný karbid *CTS24Z* od firmy *Ceratzit Group*. Polotovar pre výrobu rezných nástrojov mal rozmery 10h6 x 73 mm. Materiál sa používa na výrobu

vysokovýkonných rezných nástrojov na obrábanie ťažkoobrobiteľných nástrojov. Tento materiál ponúka vysokú priemyselnú kvalitu s dobrým pomerom cena/výkon. Tabuľka 2 zobrazuje základné vlastnosti materiálu *CTS24Z*.

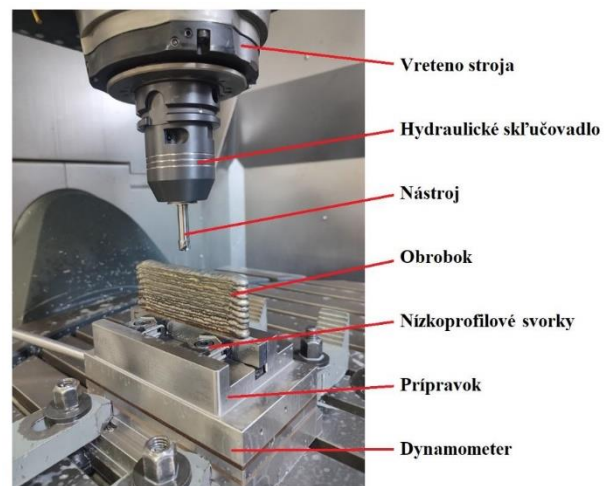


**Obr. 4. Tvar: a) polotovar, b) konečný tvar súčiastky**

**Tab. 2. Základné vlastnosti materiálu TS24Z [13]**

Hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	Tvrdosť HRA	Spojivo [hm %]	Pevnosť v ťahu [MPa]	ISO označenie
14,10	91,7	12,0	4000	K20-K40

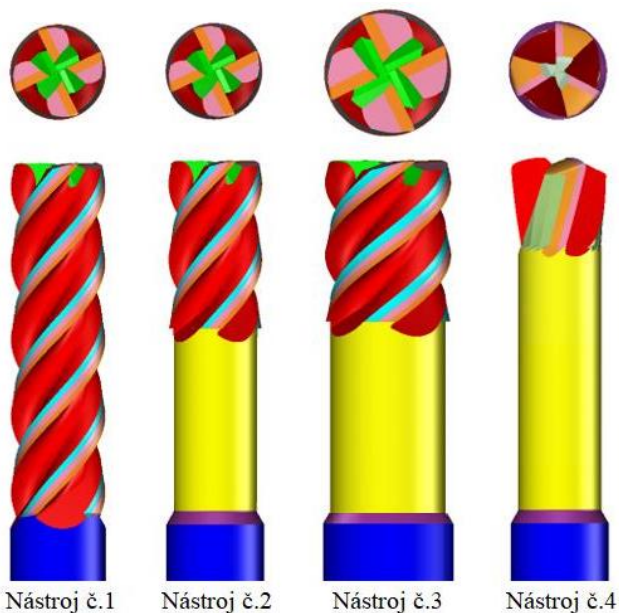
Experimenty frézovania sa uskutočnili na 5-osovom obrábacom centre *DMG DMU 85*. Ako upínací systém bolo použité hydraulické skľučovadlo *CoroChuck 930*. Dráhy nástroja sú generované pre operáciu čelného frézovania. Tieto parametre vychádzali z charakteru reznej operácie, použitého nástroja a opotrebovania nástroja. Dráhy nástroja s reznými parametrami boli vygenerované v softvéri *Autodesk PowerMill CAM*. Softvér sa používa v rade rôznych odvetví na určenie optimálnych rezných parametrov, dráh nástroja a na zníženie času výroby a výrobných nákladov. Obrázok 5 zobrazuje pracovné prostredie pre experimenty.



**Obr. 5. Pracovné prostredie obrábacieho centra**

Vďaka nízkej tepelnej vodivosti materiálu *Inconel 718* je dôležité zabezpečiť dostatočné chladenie počas obrábacieho procesu, aby sa zabránilo vytvoreniu stvrdnutej podpovrchovej vrstvy na obrobenom povrchu. Chladiaca kvapalina *Blaser EcoCut MD25* na vodnej báze, ktorej koncentrácia bola 5 % bola použitá pre vykonanie experimentov. Experimenty obrábania tenkostenných súčiastok boli

zamerané na spôsoby odoberania materiálu a geometriu rezného nástroja. Na obrobených súčiastkach bola sledovaná drsnosť a rovinnosť obrobeného povrchu. Rovinnosť bola vyhodnocovaná pomocou farebných máp odchýlok, ktoré boli získané optickým skenovaním. Obrobený povrch bol naskenovaný optickým skenerom *ATOS Triple Scan II*. Tenkostenné súčiastky vyrobené rôznymi reznými nástrojmi vykazovali rozdiel v kvalite povrchu už pri predbežnej vizuálnej kontrole. V dôsledku spôsobu odoberania materiálu sa na povrchu súčiastok vytvorili vlny, ktoré sú spôsobené chvením vznikajúcim počas frézovania tenkostennej súčiastky. Pre obrábanie tenkostenných súčiastok boli použité štyri rezné nástroje s rôznou geometriou, ktorých modely sú zobrazené na obr. 6.



Obr. 6. Modely nástrojov použité v experimentoch

Pre kvantifikovanie rozmerovej odchýlky tenkostenných súčiastok boli optickým skenerom skenované súčiastky, ktoré boli porovnané s *CAD* modelom. Výsledkom porovnania sú farebné mapy odchýlok, ktoré poskytujú informácie o rozmerových odchýlkach. Na obr. 7 až obr. 10 je zobrazený

obrobený povrch súčiastky po frézovaní z oboch strán, farebná mapa odchýlok a geometria nástroja. Tabuľka 3 zobrazuje použité rezné podmienky pre frézovanie.

## 2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na obr. 7 je zobrazený obrobený povrch, ktorý bol vyrobený pomocou nástroja č. 1, ktorého rezná časť bola 37 mm. Vplyvom nízkej tuhosti nástroja dochádzalo k najväčšiemu chveniu sústavy *SNOP*, čo sa prejavovalo aj neprijemným zvukom počas obrábania. Chvenie a nedostatočná tuhosť nástroja malo za následok nerovnomerné odstránenie materiálu. Na obrobenom povrchu je vidieť dráhy po nástroji, ktoré sú medzi sebou vzdialené axiálnou hĺbkou rezu. Dráhy po nástroji, ktoré sa objavili na povrchu, sú spôsobené malou tuhosťou rezného nástroja a jeho odtlačeníom od obrábaného povrchu.

Zmenšením veľkosti reznej časti nástroja a použitím odľahčenia drieku sa zvýši tuhosť rezného nástroja. Rezná časť nástroja mala dĺžku 15 mm. Rozdiel v kvalite povrchu bol viditeľný už vizuálnou kontrolou. Zvýšením tuhosti rezného nástroja nedošlo k tak veľkému odtlačeníu nástroja ako v prvom prípade. Obrázok 8 zobrazuje farebné mapy odchýlok a obrobený povrch, kde bol použitý nástroj s odľahčeným driekom. Na obrobenom povrchu je vidieť menší rozdiel v hrúbke steny medzi jednotlivými dráhami nástroja. Už pri nástroji č. 2 je vidieť, že zvyšovaním tuhosti rezného nástroja sa dosahuje lepšia kvalita obrobeného povrchu.

Ďalším spôsobom zvýšenia tuhosti je použitie rezného nástroja s väčším priemerom. Pre dosiahnutie lepšej kvality obrobeného povrchu bola použitá fréza s priemerom 14 mm. Použitím nástroja s väčším priemerom bola dosiahnutá najlepšia kvalita povrchu, z klasických valcových fréz. Zvyšovaním tuhosti rezného nástroja sa chvenie nástroja znižuje v dôsledku väčšej tuhosti. Obrázok 9 zobrazuje obrobený povrch a farebnú mapu odchýlok pri použití rezného nástroja s priemerom 14 mm. Väčšiu tuhosť nástroja je možné získať aj zväčšením priemeru jadra

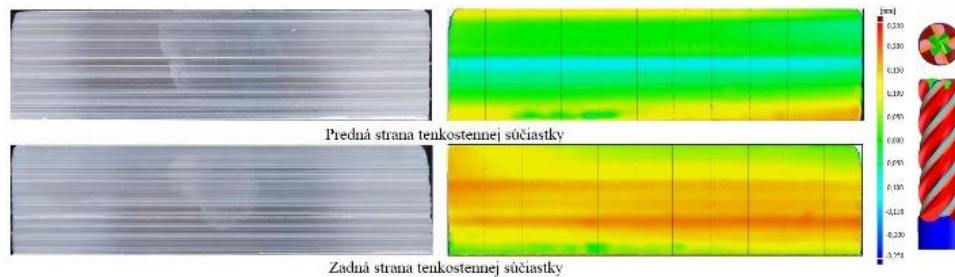
Tab. 3. Rezné parametre použité pri realizácii experimentov

No.	Operácia	Axiálna hĺbka rezu [mm]	Radiálna hĺbka rezu [mm]	Posuv na zub [mm]	Rezná rýchlosť [m·min <sup>-1</sup> ]
1	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
1	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
2	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
2	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
3	Hrubovanie	10	1,3	0,03	65
3	Dokončovanie	10	0,2	0,03	65
4	-	0,4	4,5	0,16	38

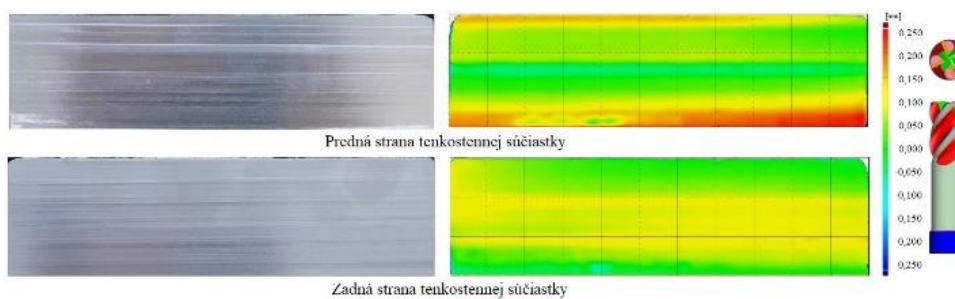
nástroja. Zväčšením jadra získame tuhší nástroj, avšak je nutné počítať s menšou hĺbkou drážky, pretože tieto geometrické parametre nástroja sú na sebe závislé. Zväčšením jadra by sme museli meniť aj rezné podmienky, čo sú ďalšie faktory ovplyvňujúce kvalitu obrobeného povrchu.

Spomenuté poznatky o tom, ako je možné dosiahnuť

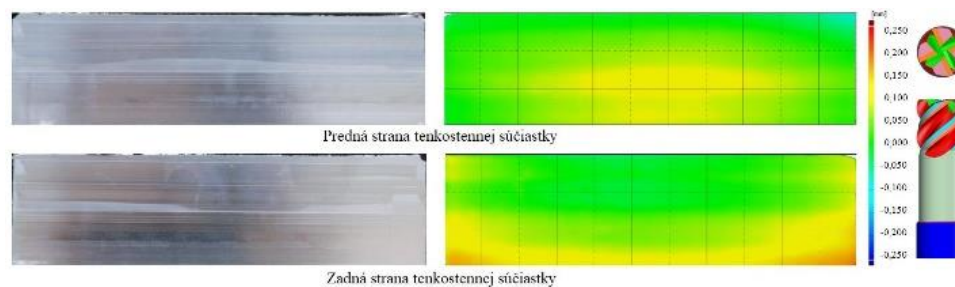
*feed milling*). *HFM* je v podstate metóda hrubovania vyvinutá pre vysoké rýchlosti úberu kovu, aby sa zvýšila produktivita a ušetril čas obrábania. *HFM* používa menšiu hĺbku rezu (zvyčajne nie viac ako 2 mm), čím sa vytvára tenšia trieska, ktorá odvádza teplo preč z reznej hrany. Má tiež vysoký posuv na zub: až päťkrát vyšší posuv na zub ako bežné



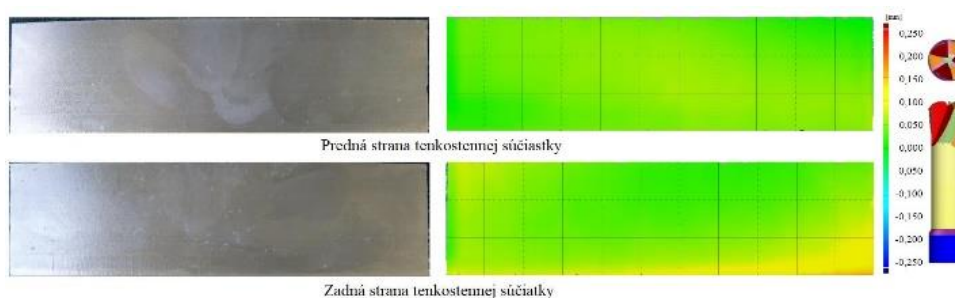
Obr. 7. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 1



Obr. 8. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 2



Obr. 9. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 3



Obr. 10. Povrch a mapa odchýlok pri nástroji č. 4

väčšiu tuhosť nástroja a tým dosiahnuť lepšiu kvalitu povrchu sú všeobecne známe. Ďalšou možnosťou ako zmenšiť chvenie sústavy *SNOP*, ktoré vzniká vplyvom rezných síl je zmeniť samotnú stratégiu obrábania. V dnešnej dobe sa pre odstránenie čo najväčšieho množstva materiálu v čo najkratšom čase používa frézovanie s vysokým posuvom (*HFM - high-*

frézovanie. Tento prístup znižuje tvorbu tepla, čo má za následok predĺženie životnosti nástroja a poskytuje vyššiu rýchlosť úberu. Použitím *HFM* sú rezné sily smerované do vretena stroja v axiálnom smere, čo znižuje riziko vibrácií a stabilizuje obrábanie. To umožňuje použiť vyššie rezné parametre aj pri obrábaní s veľkým vyložením. Ďalšou časovou

výhodou *HFM* je počet operácií. Keďže obrábanie s vysokým posuvom pri malých hĺbkach rezu vytvára povrch s veľmi dobrou drsnosťou je možné eliminovať dokončovacie operácie, a tým sa zjednodušuje *NC programovanie*. Okrem toho proces *HFM* nevyžaduje zvýšenú reznú rýchlosť. Obrázok 10 zobrazuje povrch a farebnú mapu odchýlok po vysokoposuvovom obrábaní (*HFM*). Je možné vidieť, že použitím vysokoposuvového obrábania bol dosiahnutý povrch s najlepšou drsnosťou a rozmerovou presnosťou.

Porovnaním farebných máp odchýlok bolo zistené, že použitie nástroja s nekonvenčnou geometriou malo pozitívny vplyv na rozmerovú presnosť vyrobenej súčiastky. Na obrobenom povrchu bola meraná dosiahnutá drsnosť. Drsnosť povrchu súčiastky, ktorá bola obrábaná navrhnutou frézou bola porovnateľná s konvenčnými nástrojmi.

Experimentálnym obrábaním bol priblížený proces obrábania tenkostenných súčiastok. Počas experimentov bola zmenená stratégia obrábania a geometria nástroja. Vykonaním experimentov bolo zistené, že použitím vysokoposuvového obrábania je možné získať lepšiu rozmerovú presnosť obrobeného povrchu ako pri stratégiách obrábania, ktoré sú odporúčané pre obrábanie tenkostenných súčiastok.

## ZÁVER

Tenkostenné súčiastky sa čoraz častejšie používajú v automobilovom, leteckom a energetickom priemysle, pre svoju nízku celkovú hmotnosť. Z vedeckých štúdií a preštudovanej literatúry možno konštatovať, že uvedená problematika je v priemysle aktuálna a vo väčšej miere riešená z hľadiska integrity povrchu a dynamiky procesu

rezania. V článku je prezentovaný teoretický základ založený na prehľade súčasného stavu problematiky obrábania tenkostenných súčiastok. Stručne je popísaná geometria rezného nástroja a materiály používané na ich výrobu. V kapitole bola popísaná technológia výroby *WAAM*, ktorá sa použila na výrobu tenkostenných súčiastok. Výsledkom experimentov je návrh a výroba rezného nástroja určeného na obrábanie tenkostenných súčiastok, ktoré sú vyrobené z ťažkoobrobiteľných materiálov.

## Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Vývoj nových progresívnych rezných nástrojov pre obrábanie súčiastok vyrobených technológiou *WAAM* aditívnou výrobou za účelom zníženia počtu rezných nástrojov pri obrábaní súčiastok tvorených rôznym typom materiálu, (ITMS2014+: 313011BWQ8), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## LITERATÚRA

- [1] BEŇO, J. (1999): *Teória rezania kovov*. Košice: Viena, s. 260, ISBN 80-7099-429-0.
- [2] BUDAK, E. (1995): *Tool exit*. Science, 353, 459–476.
- [3] SAGHERIAN, R. - ELBESTAWI, A. - The, I. (1990): *Applications A Simulation System for Improving Machining Accuracy in Milling User Forces Effective load Input Deflection I conditions Cutting*. In: Chip Calculation. 14, 293-305.
- [4] DEL SOL, I. - RIVERO, A. - DE LACALLE, L. N. L. - GAMEZ, A. J. (2019): *Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approaches*. In: Materials, 12(12).
- [5] BURANSKÝ, I. (2010): *Obrábanie tenkostenných súčiastok*: Trnava: STU MTF, Dizertačná práca. MTF-10906-4587.
- [6] LAAMOURI, A. - GHANEM, F. - BRAHAM, C. - SIDHOM, H. (2019): *Influences of up- milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105(1-4), 1209-1228.
- [7] RATCHEV, S. - LIU, S. - BECKER, A. A. (2005): *Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts*. In: Journal of Materials Processing Technology, 162-163(SPEC. ISS.), 673-681.
- [8] MICHALIK, P. - ZAJAC, J. - HATALA, M. - MITAL, D. - FECOVA, V. (2014): *Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling*. In: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 58, 416-428.
- [9] ZELINSKI, P. (2009): *How To Machine Aircraft Titanium: The 8-To-1 Rule For Finishing Walls And Ribs*. MMSOnline. [Online]: <http://www.mmsonline.com/articles/how-to-machine-aircraft-titanium-the-8-to-1-rule-for-finishing-walls-and-ribs>.
- [10] SHOKRANI, A. - DHOKIA, V. - NEWMAN, S. T. (2012): *Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57, 83-101.
- [11] WEGENER, K. - KUSTER, F. - WEIKERT, S. - WEISS, L. - STIRNIMANN, J. (2016): *Success Story Cutting*. In: Procedia CIRP, 46, 512-524.
- [12] METALCOR. *Datasheet 1.4435*. [online] ©2019. Available on the internet: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/16/>
- [13] CERATIZIT. *Round tool materials*. 2020. [online] ©2019. Available on the internet: <https://www.ceratizit.com/en/services/downloads/?fileid=2285>