

VZNIK SAMOBUDENÉHO KMITANIA VPLYVOM MENIACEJ SA HRÚBKY TRIESKY PRI ČELNOM FRÉZOVANÍ NA VRCHNEJ CNC FRÉZKE

INFLUENCE OF CHANGING THICKNESS OF CHIPS ON THE FORMATION OF SELF-FORMED VIBRATION IN FRONT ROUTING ON CNC MILLING MACHINE

Ján Šustek – Štefan Barčík

ABSTRACT

The paper presents is to highlight the possibility of self-formed vibration in front routing influence of changing the size of the thickness of layers of material procurement and angular geometry of the instrument. The increase of mechanical vibration, depending on the value of the nominal thickness of chips was observed in changing the technical parameters of the influence of feed speed milling and cutting speeds. Monitoring the mechanical vibration induced in the piece was evaluated using two separate measuring devices, laser vibrometer LV-01 and contact piezoelectric accelerometer HA VIS 015.

Key words: CNC routing machines, mechanical vibrations, laser vibrometer, thickness of chips.

ÚVOD

Pri obrábaní dreva vznikajú zložité procesy kmitania, ktoré vzniká v sústave stroj – nástroj – obrobok. Pričom niekedy, je kmitanie také malé, že nemá nijaký nepriaznivý účinok. Sú však aj také prípady, keď je kmitanie pri obrábaní dreva veľmi intenzívne. Z hľadiska fyzikálnej podstaty môžu sa v technologickej sústave vyskytovať druhy kmitov (BUDA *et al.* 1988, TEORET 2003): vlastné kmity, vynútené kmity a samobudené kmity.

Vlastné kmity v troj-zložkovej sústave, prípadne v niektorých uzloch tejto sústavy sú vyvolané nárazom (napr. pri zapnutí zubovej spojky, pri zábere nástroja a pod.) (BUDA *et al.* 1988).

Vynútené kmity – Charakteristickým znakom vynútených kmitov je, že ich frekvencia sa zhoduje s frekvenciou budiacej sily. Vynútené kmity zvyčajne vždy sprevádzajú vlastné kmity, pretože v telese, ktoré sa odkláňa od rovnovážnej polohy, vznikajú pružné sily, ktoré sa usilujú dostať teleso do rovnovážnej polohy (TLUSTÝ 1955). V prípade, že bolo teleso v pokoji a začne kmitať v dôsledku pôsobenia vynucujúcej sily, amplitúda vynútených kmitov bude vzrastať, kým sa neustáli na určitej hodnote. Amplitúda vynútených kmitov je úmerná amplitúde budiacej sily. Budiaca sila nemusí mať sínusový alebo kosínusový priebeh. Aby vyvolala kmitanie stačí, aby mala periodický charakter. Zmysel budiacej sily sa nemusí meniť, no priebeh závislosti sily od výchylky musí tvoriť uzavretú krivku (TEORET 2003).

Samobudené kmity vznikajú vo všeobecnosti v sústavách bez vonkajšieho periodického vplyvu. Periodicky sa meníaca sila, ktorá toto kmitanie udržuje, vzniká iba v dôsledku kmitavého pohybu. Ako náhle kmitavý pohyb prestane, zanikne aj menlivá sila (TLUSTÝ 1955). Podľa TEORET (2003) je charakter samobudených kmitov určený výhradne štruktúrou kmitajúcej

sústavy. Zdroj energie je neoddeliteľnou súčasťou sústavy. Samobudené kmity pri obrábaní môžu byť **skoroharmonické** alebo **relaxačné**.

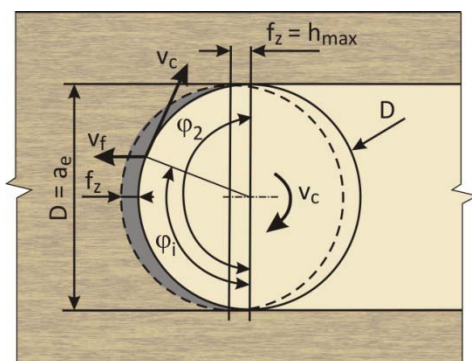
Skoroharmonické samobudené kmity pri rezaní majú tieto charakteristické znaky: Neexistuje vonkajšia periodická budiaca sila. Kmity vyvoláva samotná rezná sila. Frekvencia kmitov v zásade neurčuje rezné pomery, ale tuhosť a hmotnosť časti systému stroj – nástroj – obrobok (TLUSTÝ 1955). Spravidla je blízka frekvencii vlastných kmitov sústavy alebo niektorého jej člena. Amplitúda kmitov pri konštantných podmienkach je rovnaká, avšak charakter kmitov je odlišný od sínusového priebehu. Podľa BUDA *et al.* (1988) kmitavý pohyb nemožno vyjadriť lineárnou rovnicou, a preto má kmitanie charakter tzv. nelineárnych kmitov. Pri samobudenom kmitaní existuje tzv. spätná väzba medzi reznou silou, ktorá vyvoláva kmitavý pohyb a samotným kmitavým pohybom.

Relaxačné samobudené kmity obvykle vznikajú v dôsledku trenia vodiacich plôch suportu a lôžka v hydraulických obvodoch, ale môžu vznikať aj v zóne rezania, najmä pri málo tuhom nástroji. Vznik relaxačných kmitov je podmienený zmenou koeficientu trenia s relatívnymi rýchlosťami pohybu, čo je v bežných prípadoch zákonitý jav. Priebeh relaxačných kmitov sa odlišuje od sínusového priebehu, ktorý je charakteristický pre harmonické kmity. Relaxačné kmity môžu mať aj tlmený priebeh.

Cieľom tohto príspevku je poukázať na možnosť vzniku tzv. samobudeného kmitania pri čelnom frézovaní vplyvom meniacej sa veľkosti hrúbky odoberanej vrstvy materiálu a uhlovej geometrie použitého nástroja. Nárast hodnôt mechanického kmitania v závislosti od hodnoty nominálnej hrúbky triesky bol sledovaný pri meniacich sa technických parametroch procesu frézovania vplyvom posuvnej rýchlosti a reznej rýchlosti.

METODIKA A MATERIÁL

Frézovanie je veľmi rozšírenou metódou trieskového obrábania dreva a drevných materiálov. Účelom frézovania je opracovanie dielca (trieskotvorným procesom) na požadovaný rozmer, tvar a povrchovú kvalitu. Frézovaním je podľa LISIČANA (1996) proces rezania dreva s reznými hranami na obvode rotujúceho nástroja, s posuvom dielca v smere kolmom alebo približne kolmom na os rotácie nástroja pri reznej výške (t.j. hĺbke úberu) menšej, než je hrúbka dielca a polomer nástroja, s cykloidálnym indikovaným rezným pohybom a hrúbkou triesky v medziach $0 < h < h_{\max}$ (Obr. 1).



Obr. 1 Prvky teoretického výpočtu nominálnej hrúbky odfrézovanej triesky čelného frézovania
Fig. 1 Elements of a theoretical calculation of the nominal thickness chips of a frontal milling

Minimálna hrúbka triesky h_{\min} [mm]:

$$h_{\min} = f_z \cdot \sin 0 = 0 \quad (1)$$

Kde: f_z – bočný posuv na reznú hranu [mm]

Maximálna hrúbka triesky h_{\max} [mm]:

$$h_{\max} = f_z \cdot \sin \frac{\pi}{2} = f_z \quad (2)$$

Stredná hrúbka triesky h_{str} [mm]:

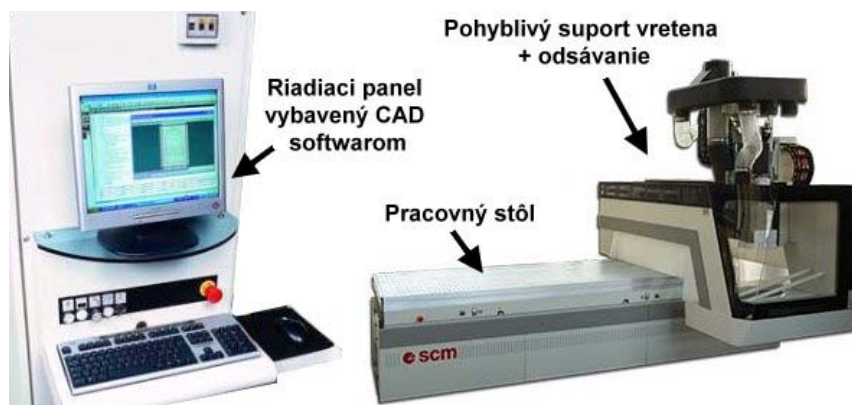
$$h_{\text{str}} = f_z \cdot \sin \varphi_{\text{str}} \quad (3)$$

Kde: φ_{str} – stredný uhol posuvu [°]

Posuvu na reznú hranu f_z [mm]:

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} \quad (4)$$

Pre sledovanie frekvenčnej analýzy kmitania bola použitá zostava laserového vibrometra LV-01. Vibrometer LV-01 pracuje na princípe dvojfrekvenčného laserového systému. Zostava laserového vibrometra pozostáva z hlavy vibrometra umiestnenej na polohovateľnom statíve, vyhodnocovacej jednotky a záznamového zariadenia v tomto prípade prenosného PC. Účelom vyhodnocovacej jednotky je v teréne nahradiť internú A/D kartu zabudovanú v počítači a umožniť tak transformáciu analógového signálu na digitálny. Mobilná vyhodnocovacia jednotka umožňuje taktiež vykonať základné frekvenčné analýzy sledovaného signálu. Takou je napríklad aj rýchla fourierova transformácia (FFT), ktorá umožňuje určenie početnosti harmonických frekvencií v sledovanom signále. Vyhodnotený signál je potom možné prakticky okamžite sledovať na prenosnom počítači pomocou softwaru „Scope“. Program Scope obsahuje niekoľko funkcií potrebných pre správne vyhodnotenie, záznam meraní a ich neskoršiu analýzu. Program taktiež umožňuje prepínanie medzi režimom sledovania frekvencie v čase (real-time) a režimom FFT analýzy.



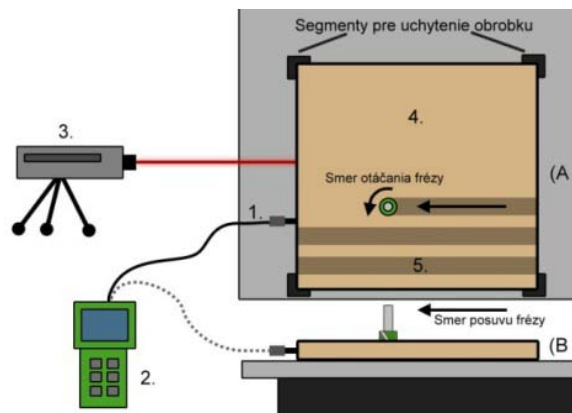
Obr. 2 Zostava vrchnej CNC frézy typu SCM Record 110 NT
Fig. 2 Complet CNC milling machine SCM Record 110 NT

Pre experimenty bol z pohľadu vlastností a použitia v praxi vybraný ako skúšobný materiál MDF. Podľa medzinárodného štandardu ISO 818 patrí MDF do skupiny polotvrdých vláknitých dosiek. Suchým výrobným spôsobom sa vyrábajú MDF o hustote 650 až 850 kg·m⁻³. Hustota MDF použitých pri experimente bola 724,96 kg·m⁻³.

Pre experimenty boli použité stopkové drážkovacie frézy s naváranými HW plátkami (kde HW je – nepovlakový spekaný karbid na báze karbidu wolfrámu) od výrobcu SZT – Nástroje s.r.o. Turany. Stopkové frézy sa líšili len rozdielnym parametrom uhla čela $\gamma = (10, 15, 20, 25)$ [°] a mali priemer $\varnothing 30$ mm.

Experimentálne merania boli realizované v prevádzkových podmienkach spoločnosti Trium v.o.s. Budča na vrchnej CNC fréžke SCM Record 110 NT. Skúšobné vzorky z MDF o rozmeroch 900x900x22 mm boli pomocou uchytávacích segmentov upevnené na pracovnú dosku stola fréžky. Pred meraním bola vždy vykonaná kontrola vodorovnosti s cieľom zabezpečiť čo najpresnejšie meranie vzhľadom na hĺbku fréžovanej drážky. Do riadiaceho počítača fréžky bol vložený vykonávací program. Pred začatím merania vibrácií počas procesu obrábania boli vykonané referenčné merania pri chode na prázdno pri otáčkach vretena frézy n_{\min} , n_{str} , n_{\max} a rýchlosti posuvu $v_{f\min}$, $v_{f\text{str}}$, $v_{f\max}$ a priemere frézy $\varnothing 30$ mm samostatnou zostavou stopkových fréz.

Frézovanie skúšobných vzoriek bolo uskutočnené v smere kolmom na rovinu dosky. Pri sledovaní mechanických vibrácií stroja bolo do jednej skúšobnej vzorky vyfrézovaných 14 pozdĺžnych navzájom rovnobežných žliabkov o hĺbke 5 mm fréžou o priemere $\varnothing 30$ mm (Obr. 3). Parametre sa menili na troch úrovniach a to: rezná rýchlosť $v_c = (13, 16, 19)$ [m·s⁻¹], rýchlosť posuvu $v_f = (2, 4, 6)$ [m·min⁻¹] a geometria nástroja vplyvom meniaceho sa uhla čela v hodnotách $\gamma = (10, 15, 20, 25)$ [°].



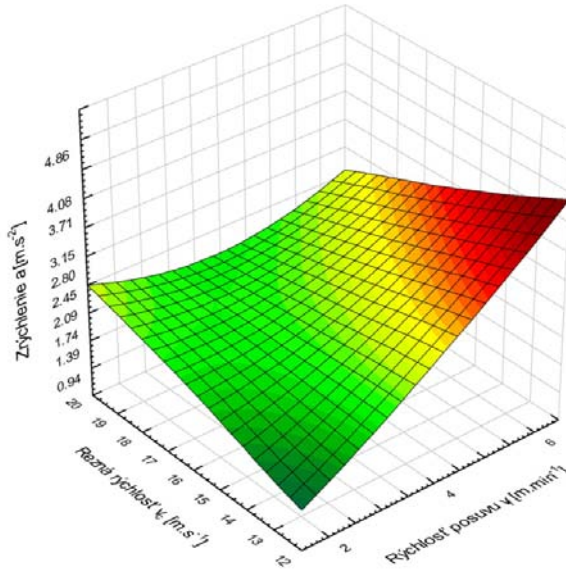
Obr. 3 Popis pracoviska pri sledovaní vibrácií: 1) kontaktná sonda zariadenia VIS, 2) porovnávacie zariadenie na meranie vibrácií VIS 015, 3) laserový vibrometer umiestnený na statíve, 4) obrobok MDF 900 × 900 × 22 mm, 5) odfrézovaná drážka, A) pohľad zhora, B) pohľad z boku.

Fig. 3 Description of work in pursuit of vibration: 1) Contact probe device VIS, 2) a comparative device to measure vibrations VIS 015, 3) laser vibrometer positioned on a tripod, 4) MDF work piece 900 × 900 × 22 mm, 5) Milling trace, A) Top view, B) View from the side.

VÝSLEDKY

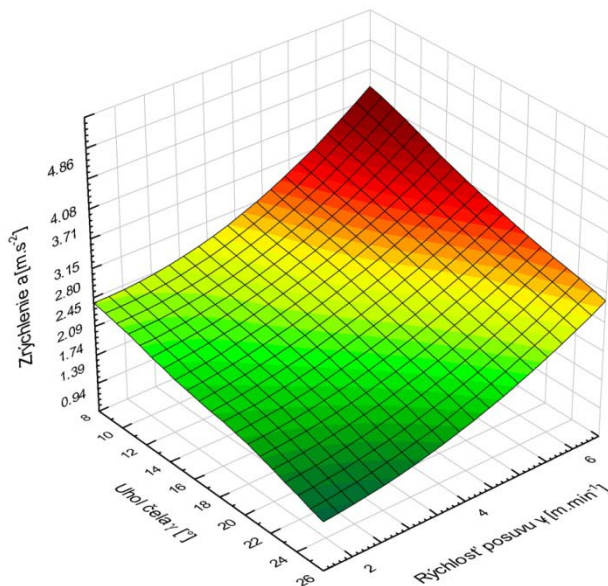
Výsledky experimentálnych meraní sú predstavené prostredníctvom grafov na obr. 4, 5, 6 a 7. Priestorový graf na obr. 4 reprezentuje závislosť zrýchlenia mechanického kmitania od reznej rýchlosti a rýchlosti posuvu. Podľa grafu na obr. 4 môžeme konštatovať, že najnepriaznivejšie podmienky vzhľadom na hodnotu zrýchlenia nastanú pri najvyššej hodnote posuvnej rýchlosti

a najmenšej hodnote reznej rýchlosti. Za najoptimálnejšie hodnoty reznej a posuvnej rýchlosti vzhľadom na optimalizáciu procesu z pohľadu zrýchlenia mechanického kmitania môžeme považovať ich hodnoty na úrovni $v_c=19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v_f=4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 4 Priestorový graf závislosti hodnoty zrýchlenia mechanického kmitania na hodnoty reznej rýchlosti a rýchlosti posuvu.

Fig. 4 Dimensional graph according to the value of the acceleration of mechanical vibration on the value of cutting speeds and the feed speed.



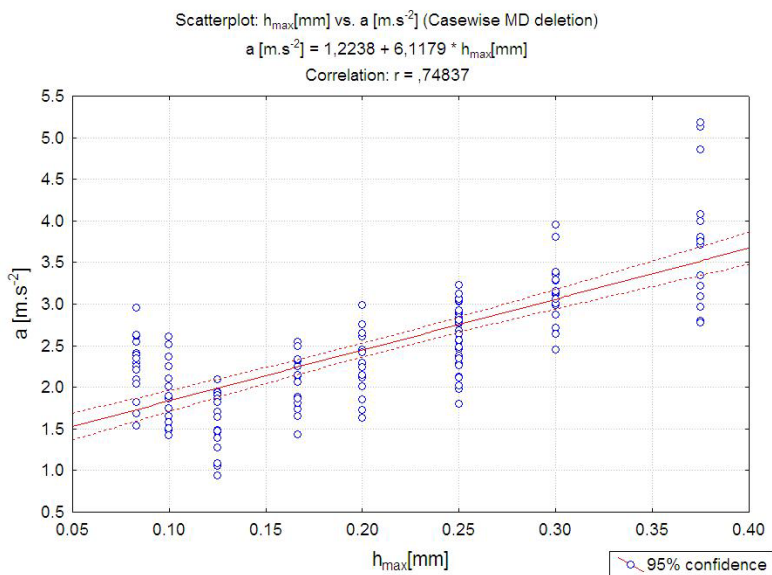
Obr. 5 Priestorový graf závislosti hodnoty zrýchlenia mechanického kmitania na hodnoty uhla čela a rýchlosti posuvu.

Fig. 5 Dimensional graph according to the value of the acceleration of mechanical vibration on the value of the angle of the forehead and the feed speed.

Priestorový graf na obr. 5 reprezentuje závislosť zrýchlenia mechanického kmitania od uhla čela nástroja a rýchlosti posuvu. Podľa grafu na obr. 5 môžeme konštatovať, že

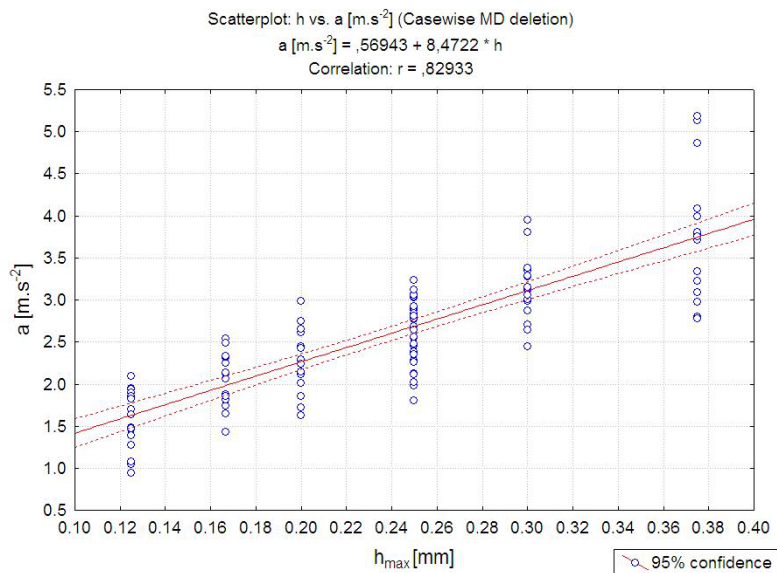
najnepriaznivejšie podmienky vzhľadom na hodnotu zrýchlenia nastanú pri najvyššej hodnote posuvnej rýchlosti a najmensej hodnote uhla čela. Za najoptimálnejšie hodnoty reznej a posuvnej rýchlosti vzhľadom na optimalizáciu procesu z pohľadu zrýchlenia mechanického kmitania môžeme považovať ich hodnoty na úrovni $v_f = 6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $\gamma = 20^\circ$.

Graf na obr. 6 reprezentuje výsledok regresno-korelačnej analýzy závislosti zrýchlenia mechanického kmitania od nominálnej hrúbky triesky vyjadrenej hodnotou h_{\max} [mm]. Pre výpočet bol použitý modul Basic v programe Statistica v.6. Podľa tohto grafu môžeme konštatovať, že medzi hodnotou zrýchlenia mechanického kmitania a nominálnou hrúbkou triesky existuje lineárna závislosť, ktorá je silnejšia v oblasti samobudeného kmitania kde $h_{\max} > 0.10 \text{ mm}$.



Obr. 6 Výsledný graf a matematické vyjadrenie lineárnej závislosti medzi zrýchlením mechanického kmitania a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] a hodnotou hrúbky triesky h_{\max} [mm].

Fig. 6 The resulting graph, and mathematical expression of linear dependence between the mechanical vibration and acceleration „ a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]“ and the value of the thickness of chips „ h_{\max} [mm]“.



Obr. 7 Výsledný graf a matematické vyjadrenie lineárnej závislosti medzi zrýchlením mechanického kmitania $a \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$ a hodnotou hrúbky triesky $h_{\max} \text{ [mm]}$ v oblasti predpokladaného samobudeného kmitania.

Fig. 7 The resulting graph, and mathematical expression of linear dependence between the mechanical vibration and acceleration „ $a \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$ “ and the value of the thickness of chips „ $h_{\max} \text{ [mm]}$ “ in the predicted onself vibration.

DISKUSIA

Hľadanie lokálneho max. alebo minima zrýchlenia mechanického kmitania v závislosti na parametroch reznej a posuvnej rýchlosti je, vzhľadom na vstupný matematický rozbor aj na základe citovanej literatúry, možné nahradiť spojitým faktorom hrúbky odoberanej vrstvy vyjadrenej v tomto prípade parametrom h_{\max} .

Podľa autorov BUDA (1988) a tiež TEORET (2003) práve faktor teoretickej hrúbky triesky (hrúbky odoberanej vrstvy) najviac vplýva na hodnotu reznej sily, ktorá spôsobuje nielen vynútené, ale aj samobudené kmitanie. Podľa BUDA (1988) nie absolútna hodnota reznej sily, ale jej periodická zmena t.j. rozdiel medzi jej max a min. hodnotou vplýva na tvorbu kmitania v sústave. Taktiež treba zdôrazniť, že na hodnotu reznej sily vplýva aj počet rezných hrán nástroja. Podľa BEŇA (1999) je rozdiel v hodnote periodickej sily pri nástrojoch s malým počtom rezných hrán vyšší ako pri nástrojoch s vyšším počtom rezných hrán. Tento faktor sme zohľadnili aj my pri tvorbe metodiky merania s cieľom zvýšiť hodnoty budiacich síl vplývajúcich v sústave na tvorbu mechanických kmitov.

Pri najnižšej hodnote faktora posuvnej rýchlosti ($v_f = 2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) sa hodnota teoretickej hrúbky triesky vyjadrená parametrom h_{\max} pohybuje v rozsahu 0,0833–0,125 mm. Môžeme predpokladať, že pri tomto rozsahu odoberanej vrstvy má výraznejší vplyv na hodnoty zrýchlenia vonkajšia budiacia sila, v tomto prípade periodická sila závislá od počtu otáčok rezného nástroja. Podľa BUDA (1988) s veľkosťou odoberanej vrstvy súvisí aj nárast rezných síl spojených s procesom tvorby triesky. Je možné predpokladať, že výraznejší vplyv rezného procesu na hodnotu zrýchlenia kmitania sa dostaví až pri určitých hodnotách rezných síl. Podľa tohto rozboru je možné určiť parametre rezného procesu, pri ktorých vzniká alebo nevzniká samobudené kmitanie spojené s rezným procesom.

V práci TEORET (2003) bol sledovaný vplyv faktora uhla čela na vznik mechanického kmitania pri obrábaní materiálu a výsledkom práce sú závery, že so zmenšujúcim sa uhlom čela kmitanie narastá, pričom najnepriaznivejšie sú nástroje s malým alebo až záporným uhlom čela. K tomuto záveru sme dospeli aj my podľa našich výsledkov. Analógiu podľa predchádzajúceho rozboru môžeme hľadať aj v prácach autorov zaoberajúcich sa problematikou veľkosti reznej sily vzhľadom na veľkosť uhla čela. Autori KIVIMAA (1950) a BUDA (1988) sa zhodujú na názore, že so zmenšujúcim sa uhlom čela rezná sila narastá. Zvýšená rezná sila má za následok zvýšenie mechanického kmitania, čo je spôsobené najmä vyššou hodnotou budiacej sily vynútených kmitov.

Treba si taktiež uvedomiť, že kmitavý pohyb ovplyvňuje skutočné uhly rezného klina (uhla čela) pri rezaní, a tým aj reznú silu. Skutočný uhol čela pri pohybe rezného klina do obrábaného materiálu bude väčší ako pri pohybe rezného klina vystupujúceho z obrábaného materiálu. Preto v danej polohe rezného klina vznikajú dve rôzne hodnoty reznej sily v závislosti od smeru pohybu: menšia sila, ak sa rezný klin pohybuje do obrábaného materiálu a väčšia sila, ak sa nôž pohybuje von z obrábaného materiálu. Tieto periodické zmeny rezných síl vedú k tvorbe ďalších mechanických kmitov v sústave a môžu zapríčiniť ich nárast, ale aj pokles vzhľadom na interferenciu jednotlivých kmitov.

ZÁVER

V príspevku je sledovaný vplyv nominálnej hrúbky triesky na vznik samobudeného kmitania pri obrábaní MDF materiálu na vrchnej CNC frézke SCM Record 110 NT. Podľa analýzy závislosti zrýchlenia mechanického kmitania môžeme konštatovať, že so stúpajúcou nominálnou hrúbkou triesky hodnoty zrýchlenia mechanického kmitania narastali. Hodnoty mechanického kmitania v oblasti so samobudeným kmitaním boli až o 35 % vyššie ako hodnoty mechanického kmitania v oblasti bez vzniku interferujúceho samobudeného kmitania.

Vznik samobudeného mechanického kmitania sa nepotvrdil v oblasti nominálnej hrúbky triesky $h_{\max} < 0.2$ mm. Faktory ktoré priamo vplyvajú na nominálnu hrúbku triesky sú rezná rýchlosť, rýchlosť posuvu a počet rezných hrán nástroja. Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim mechanické kmitanie pri frézovaní sa ukázala byť aj uhlová geometria rezného nástroja.

Z pohľadu optimalizácie procesu frézovania na vrchnej CNC frézke SCM Record 110 NT je potrebné konštatovať, že najhorším prípadom vzhľadom na hodnoty mechanického kmitania je kombinácia podmienok rezného procesu pri nízkej reznej rýchlosti a vysokej hodnote rýchlosti posuvu, ktorá spôsobuje nárast nominálnej hrúbky triesky.

LITERATÚRA

- BARCÍK, Š., ŠUSTEK, J. 2005. Laserový vibrometer ako experimentálne zariadenie a didaktická pomôcka. In *Technické vzdelávanie ako súčasť všeobecného vzdelávania 2005*. Zborník prednášok z MVK. Veľká Lomnica 6–7.9.2005, s. 55–58, ISBN 80–8083–151–3.
- ŠUSTEK, J. 2002. Vplyv stability a tuhosti nástrojov na kvalitu opracovania. In *Drevorezné nástroje 2002*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, s. 107–111, ISBN 80-228-1199-8.
- LISIČAN, J. et al. 1996. Teória a technika spracovania dreva. Zvolen: Mat-centrum, s.102–104, ISBN 80-967315-6-4.
- BUDA J., SOUČEK J., VASILKO K. 1988. *Teória obrábania*. Praha: Štátní nakladatelství technické literatury, s. 356, ISBN – 7789-14-6.
- TEORET 2003. [online]. [s.a.] [Cit. 2008-2-6]. Dostupné na: <<http://www.prometheus.sk/teoret/index.htm>>.
- BEŇO, J. 1999. *Teória rezania kovov*. Košice: Viena, s. 260, ISBN 80-7099-429-0.
- TLUSTÝ, J. 1955. *Samobuzené kmity v obrábacích strojích*. Praha.
- KIVIMAA, E. 1950. *Cutting Force in Woodworking*. Helsinki: Technical Research Centre of Finland, Helsinki, 1950, Publication No. 18, p. 102.

KOMATSU, M. 1993. Machineng performance of router bit in the peripheral milling of wood I.: Effects of the helix angle of the peripheral cutting – edge on the cutting force and machined surface – roughness. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 39(6): 628–635.
StatSoft, Inc. 2004: STATISTICA data analysis software system, version 6. www.statsoft.com.

Pod'akovanie

Článok vznikol v rámci grantovej úlohy s názvom „Výskum procesu obrábania dreva vodným lúčom“ 1/0196/08, VEGA SR.

Adresa autorov

Ing. Ján Šustek, PhD.
Technická Univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
T.G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
sustek@vsld.tuzvo.sk

Doc. Ing. Štefan Barcík, PhD.
Česká zemědělská univerzita
Fakulta lesnická a dřevařská
Kamýcká 129
165 21 Praha 6 – Suchbátův
Česká republika
barcik@fld.czu.cz

