

VLIV KONSTRUKCE TĚLA PILOVÉHO KOTOUČE NA JEHO KRITICKÉ OTÁČKY A VIBRACE V PÁSMU POUŽITELNÝCH OTÁČEK

Přemysl Veselý – Zdeněk Kopecký – Ján Svoreň

Abstract

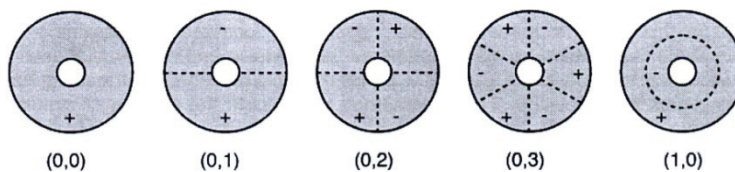
The paper deals with the resonance and critical speed of similar circular sawblades with various construction modifications. Vibrations were analysed in the area of utilizable rpm at sawblades of STELIT and PILANA companies (diameter 350 mm and 36 teeth), which were intended for machining solid (native) wood. Through the measurement of static and dynamic frequencies of eigenvibrations of sawblades the eccentric coefficient was determined necessary to calculate resonance and critical speed. The utilizable operational rpm of sawblades were subsequently specified by the direct measurement of vibrations on an experimental stand.

Key words: circular-saw blade, spacing of teeth, critical revolutions, vibration

1 ÚVOD

Vibrace a oblast, kde se nachází rezonanční a kritické otáčky pilových kotoučů, podstatným způsobem ovlivňují průběh chování parametrů při řezání. Snížení amplitudy kmitů je nezbytné pro zlepšení kvality obrobeneho povrchu, zvýšení výtěžnosti materiálu, prodloužení trvanlivosti ostří a v neposlední řadě i snížení hladiny hluku. Již zmíněné kmity kotouče a s tím spojené tzv. pískání lze různými konstrukčními úpravami zmírnit.

Pilový kotouč v důsledku svého diskovitěho tvaru může mít nekonečný počet vlastních statických frekvencí, které jsou charakterizovány určitými tvary kmitů. Vyskytují se středově symetrické kmity s uzlovými kružnicemi $c = 0$ a 1 (f_{00} a f_{10}), a asymetrické kmity podle uzlových průměrů $k = 1$ až 3 (f_{01} , f_{02} , f_{03}), obr. 1.



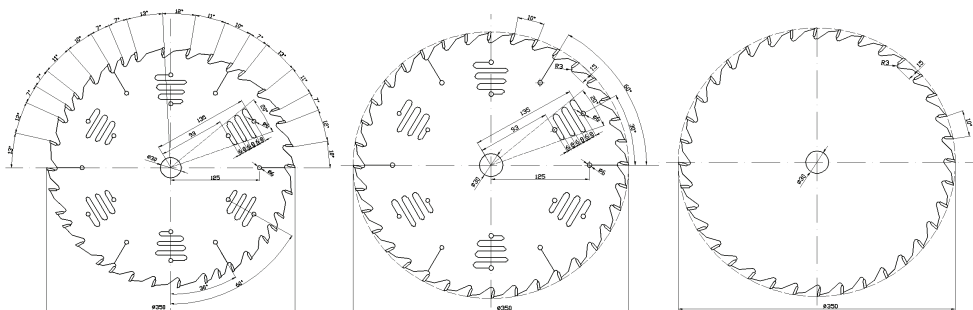
Obr. 1 Tvary kmitů pilových kotoučů

2 MATERIÁL A METODIKA

Při experimentu byl použit prototyp pilového kotouče slovenské firmy STELIT, který má nepravidelnou rozteč zubů (obr. 2a.) a dále dva prototypy pilových kotoučů od českého výrobce PILANA (jeden totožný s kotoučem STELIT, ale s pravidelnou roztečí zubů, obr. 2b, druhý taktéž s pravidelnou roztečí, ale bez radiálních a odhlučňovacích drážek, obr. 2c.). Pilové kotouče jsou určeny pro řezání nativního materiálu a to v podélném směru. Technické parametry pilových kotoučů jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Parametry pilových kotoučů

| Parametry pil. kotoučů | K8 Stelit nepravidelná rozteč zubů | K9 Pilana prototyp s drážkami | K 10 Pilana prototyp bez drážek |
|--------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Průměr pil. kotouče D (mm) | 350 | 350 | 350 |
| Počet zubů z | 36 | 36 | 36 |
| Průměr upínací díry d (mm) | 30 | 30 | 30 |
| Tloušťka těla kotouče s (mm) | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| Šířka zubu s_r (mm) | 4,45 | 4,45 | 4,45 |
| Výška zubu h (mm) | 15 | 15 | 15 |
| Rozteč zubu t (mm) | nepravidelná zrcadlová | 30,528 | 30,528 |
| Radiální kompenzační drážky | ano | ano | ne |
| Odhlučňovací drážky | ano | ano | ne |
| Kompenzační válcování | ne | 0,66 R | 0,66 R |
| Úhel hřbetu α (°) | 15 | 15 | 15 |
| Úhel břitu β (°) | 65 | 65 | 65 |
| Úhel čela γ (°) | 10 | 10 | 10 |
| Úhel zešikmení zubu ξ (°) | 10 | 10 | 10 |



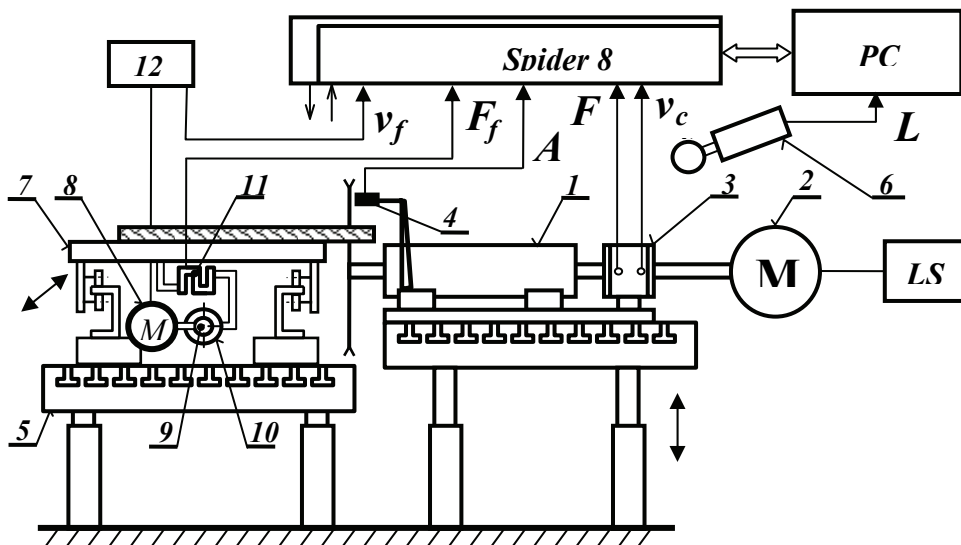
a) K8 - Stelit

b) K9 - Pilana

c) K10 - Pilana

Obr. 2 Použité pilové kotouče při experimentu

Přímé měření vibrací bylo provedeno experimentálně na měřicím stendu pro výzkum řezání pilovými kotouči (viz. obr. 3.), přičemž vibrace byly zjišťovány snímačem vibrací EPRO PR6423/000-001, který pracuje na principu vířivých proudů. Snímač byl umístěn u vněže kotouče v rovině pod zuby.



1 – vřeteno, 2 – elektromotor s regulací otáček LS, 3 – snímač řezné síly F_c a rychlosti v_c , 4 – bezkontaktní snímač vibrací A , 5 – roštový stůl, 6 – hlukoměr, 7 – podávací vozík, 8 – elektromotor posuvu vozíku, 9 – kuličkový šroub, 10 – matice, 11 – snímač podávací síly F_f , 12 – frekvenční měnič pro rychlost v_f

Obr. 3 Schéma zkušebního stendu

Metodika určení kritických otáček vyplývá z teorie kmitání otáčejícího se pilového kotouče (Siklienka – Svoreň, 1997). Vlastní úhlová frekvence otáčejícího se pilového kotouče f_d je ovlivněna existující úhlovou rychlostí. Tedy frekvence f_d je funkcí otáček pilového kotouče n a můžeme ji napsat jako $f_d(n)$. Frekvence dopředu a dozadu postupující vlny jsou potom vyjádřeny jako rovnice:

$$\text{dopředu postupující vlna: } f_1 = f_d(n) + \frac{k \cdot n}{60} \quad (1)$$

$$\text{dozadu postupující vlna: } f_2 = f_d(n) - \frac{k \cdot n}{60} \quad (2)$$

Kritické otáčky pilového kotouče nastávají v okamžiku vyrovnání frekvence dozadu postupující vlny s frekvencí otáčení pilového kotouče (kromě případů, kdy počet uzlových průměrů $k = 0$ a 1). Při těchto otáčkách se úhlová rychlost pilového kotouče rovná rychlosti vlny v pilovém kotouči a dozadu postupující vlna se jeví jako by v prostoru stála. To je rezonanční bod, kdy i malá boční síla způsobí velké příčné vychýlení pilového kotouče. Z rovnice (2) je možné potom odvodit následující vztah:

$$n_k = \frac{60 \cdot f_d(n)}{k} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

V důsledku odstředivé síly se vlastní úhlová frekvence otáčejícího se pilového kotouče parabolicky zvyšuje s narůstajícími pracovními otáčkami. Vztah mezi vlastní úhlovou frekvencí otáčejícího se pilového kotouče a otáčkami je vyjádřený rovnicí:

$$f_2(n)^2 = f_{(n=0)}^2 + \lambda \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

Dosažením rovnice (4) do rovnice (3) dostaneme po úpravě rovnici pro kritické otáčky:

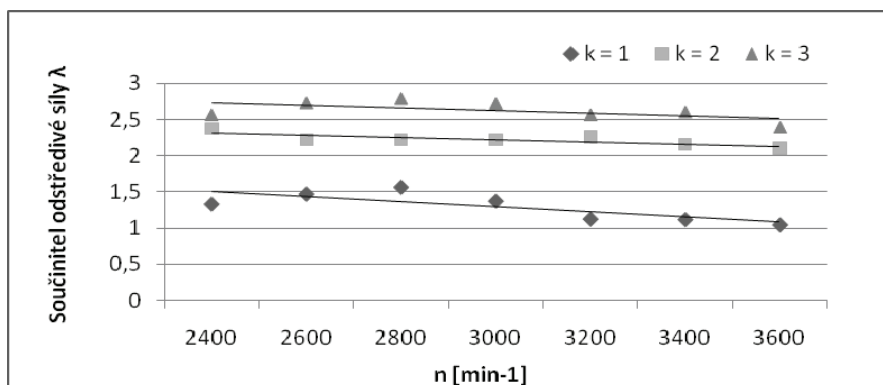
$$n_k = \frac{60 \cdot f_{(n=0)}}{\sqrt{k^2 - \lambda}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (5)$$

kde: $f_{(n=0)}$ – vlastní úhlová frekvence kmitů pilového kotouče v klidu
 k – počet uzlových průměrů ($k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$)
 λ – koeficient odstředivé síly

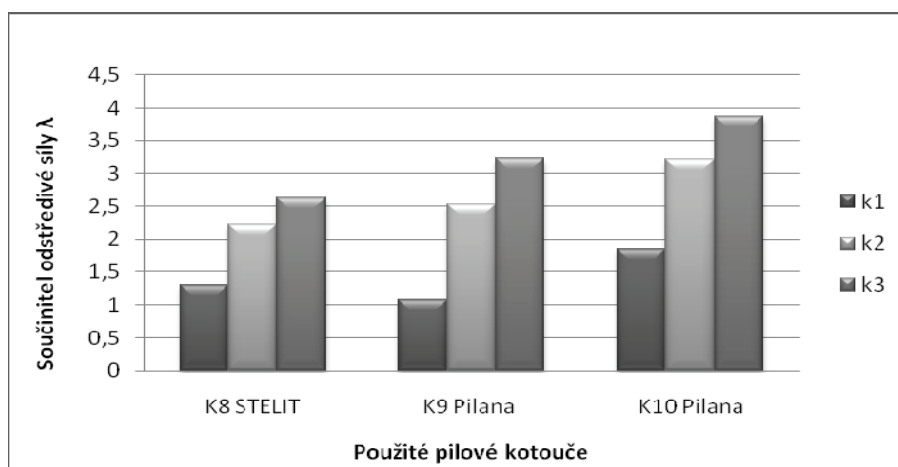
Vlastní úhlové frekvence kmitů neotáčejících se pilových kotoučů byly experimentálně určeny pro $k = 1; 2; 3$ na měřicí aparatuře TU Zvolen (Kopecký Z. – Svoreň J. – Hric J. – Peršin M., 2007). Koeficienty odstředivé síly λ byly vypočítány podle rovnice (5) na základě experimentálně naměřených hodnot frekvencí dozadu postupující vlny f_2 . Při experimentu byly použity upínací příruby o průměru $d = 110$ mm (upínací poměr 0,314). Pracovní otáčky, při kterých se vykonávalo měření, byly zvoleny v rozsahu $n_p = 2400\text{--}3600$ min^{-1} s krokem 200 min^{-1} . Pro měření frekvencí dozadu postupující vlny f_2 byla použita taktéž měřicí aparatura TU Zvolen, (Kopecký Z. – Svoreň J. – Hric J. – Peršin M., 2007).

3 VÝSLEDKY

Koeficienty odstředivé síly λ pro testované pilové kotouče byly vypočítané na základě naměřených hodnot frekvencí $f_{(n=0)}$ a frekvencí f_2 pro jednotlivé pracovní otáčky podle rovnice (4). Z vypočítaných koeficientů se pro každý uzlový průměr $k=1; 2; 3$ určila střední hodnota. Příklad grafického znázornění výsledků měření je na obr. 4 a 5. Kritické otáčky uvedených kotoučů byly vypočítány podle rovnice (5) a jsou uvedeny v tabulce 2.

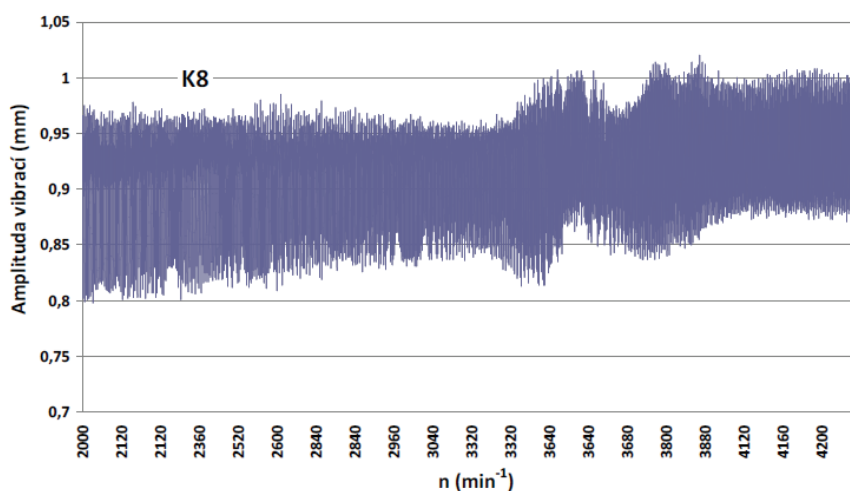


Obr. 4 Graf závislosti součinitele odstředivé síly na otáčkách pro pilový kotouč Stelit (nepravdělná rozteč zubů + odhlučňovací a dilatační drážky)

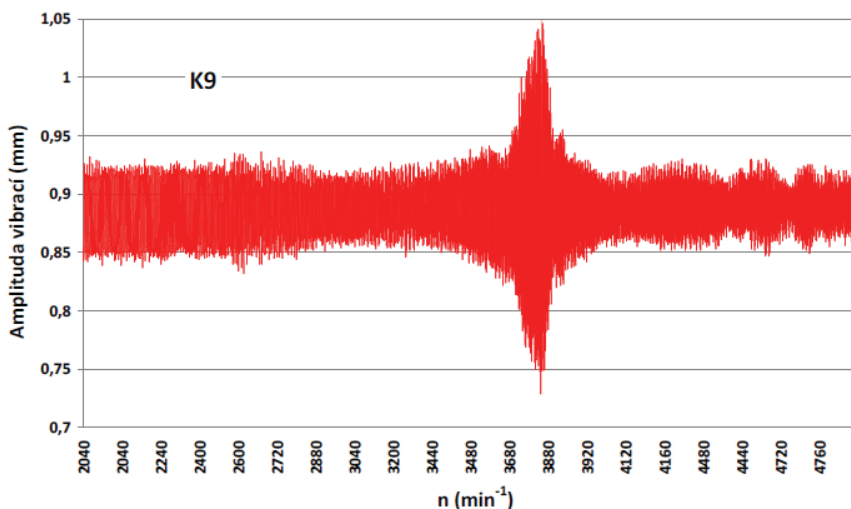
Obr. 5 Koeficienty odstředivé síly λ pro zkoušené pilové kotouče

Tab. 2. Vypočtené hodnoty kritických otáček pilových kotoučů

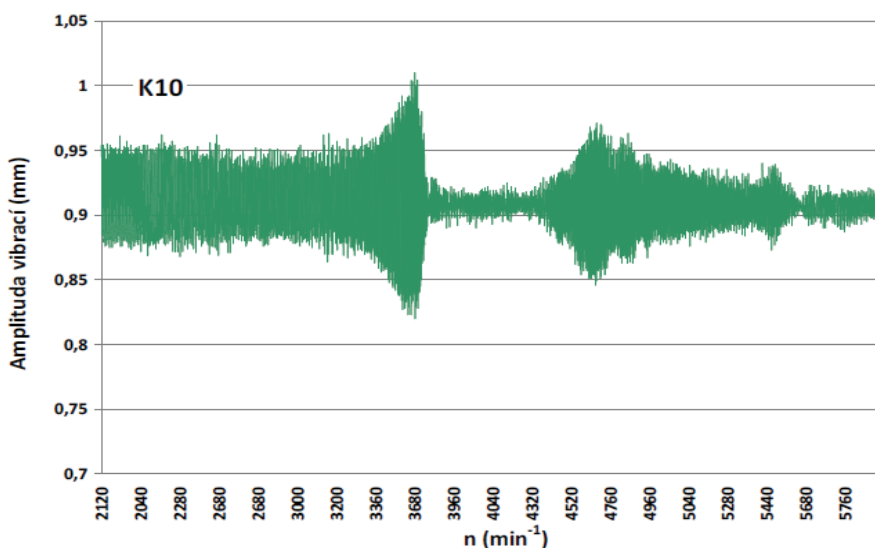
| Upínací poměr $\alpha = 0,314$ | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|-----------------------------|------------|-------------|
| k | $f_{(n=0)}$ [Hz] | | | λ | | | n_k [min^{-1}] | | |
| | K 8 Stelit | K 9 Pilana | K 10 Pilana | K 8 Stelit | K 9 Pilana | K 10 Pilana | K 8 Stelit | K 9 Pilana | K 10 Pilana |
| 1 | 104,2 | 99 | 107,6 | 1,29 | 1,08 | 1,86 | - | - | - |
| 2 | 129 | 136 | 163,5 | 2,22 | 2,52 | 3,21 | 5807 | 6713 | 11007 |
| 3 | 185 | 224 | 285 | 2,63 | 3,24 | 3,88 | 4398 | 5600 | 7557 |



Obr. 6 Závislost průběhu amplitud vibrací na otáčkách kotouče K8 Stelit



Obr. 7 Závislost průběhu vibrací na otáčkách kotouče K9 Pilana



Obr. 8 Závislost průběhu vibrací na otáčkách kotouče K10 Pilana

4 DISKUZE A ZÁVĚR

Z experimentálního měření zkoumaných pilových kotoučů na kritické otáčky a vibrace v pracovním rozsahu otáček vyplývají tyto závěry:

- Pro sledované uzlové průměry $k = 2; 3$ je u pilového kotouče K10 Pilana, který nemá odhlučňovací a dilatační drážky, zaznamenán posun kritických otáček do vyšších hodnot oproti kotoučům K9 Pilana a K8 Stelit, které tyto konstrukční úpravy mají.

- Dále lze vysledovat mírný pokles kritických otáček u pilového kotouče K8 Stelit, který má shodné dilatační a odhlučňovací drážky jako kotouč Pilana. To lze přičíst na vrub absenci úpravy vnitřního pnutí válcováním.
- Z analýzy kmitů vyplývá, že pilový kotouč, jenž nemá žádné konstrukční úpravy na těle kotouče kromě vyvácování, vykazuje podstatně větší stabilitu oproti zbylým dvěma kotoučům. Přičemž u pilového kotouče Stelit nedochází pouze k rozkmitání, ale v oblasti otáček od 3400 min⁻¹ do prvních kritických 4398 min⁻¹ dochází k jednostrannému vyduťutí kotouče.

Laserové vypalování drážek do těla pilového kotouče spolu s rozdílnou roztečí zubů má podstatný vliv na kmitání kotouče při volném chodu, ale i v procesu obrábění. Při návrhu kotoučové pily je nutné se vyvarovat provozním otáčkám, kde je výskyt vibrací největší a kotouč může dosáhnout kritických otáček.

LITERATURA:

- JAVOREK L'. – SOKOLOWSKI W. (2000): Drgania pil tarczowych plaskich. In.: *Proceedings 14th Scientific conference „Drewno – material wszech czasów“*. Warsaw, 2000, pp. 118 – 121.
- FENDELEUR D. – AUBRY E. – KAISER E. – RENNER M. (1999): Dynamical measurements and evaluation of the tension of circular saw blades. In.: *Proceedings 14th International Wood Machining Seminar. Paris 1999*.
- GOGLIA V. – LUCIC R.B. (1999): Some possibilities of Reducing circular saw idling noise. In.: *Proceedings 14th International Wood Machining Seminar. Paris 1999*.
- KOPECKÝ Z. – SVOREŇ J. – HRIC J. – PERŠIN M. (2007): Comparison of the circular-saw blade vibrations. In.: *Wood-Machine-Tool-Workpiece*. Bedlewo-Poznań 2007.
- LISIČAN J. (1992): Nástroje, náradie a prípravky. TU Zvolen 1992. 296s.
- SIKLIENKA M. – SVOREŇ J. (1997): Frekvencie vlastných tvarov kmitov pílových kotúčov pri statickom kmitaní. *TU Zvolen. [Scientific studies]*
- STACHIEV Y.M. (1989): Rabotosposobnost' ploskich kruglych pil. Moskva: Lesnaja promyšlenost, 1989, 384s.

Acknowledgement

This paper was prepared in connection with a partial project within the CR MSM 6215648902 Research Plan and IGA plan 1/2010 LDF MENDELU Brno. Have been included the results of activity and cooperation of authors by project CEEPUS network CII-SK-0310-02. The authors thank for a financial support to deal with the project.