

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav základního zpracování dřeva



**Lesnická
a dřevařská
fakulta**

**Pilový kotouč v procesu podélného řezání materiálů na bázi
dřeva**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2014

Ing. Přemysl Veselý





Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: *Pilový kotouč v procesu podélného řezání materiálu na bázi dřeva* zpracoval sám a uvedl všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje disertační práce byla zveřejněna v souladu s § 47 b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a uložena v knihovně Mendelovy univerzity v Brně, zpřístupněna ke studijním účelům ve shodě s Vyhláškou rektora MENDELU o archivaci elektronické podoby závěrečných prací.

Autor kvalifikační práce se dále zavazuje, že před sepsáním licenční smlouvy o využití autorských práv díla s jinou osobou (subjektem) si vyžádá písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuje se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla dle řádné kalkulace.

V Brně dne 25. 9. 2014

.....

podpis



Poděkování

Děkuji svému školiteli disertační práce Doc. Ing. Zdeňku Kopeckému, CSc. za pomoc při experimentech a odborném vedení této práce. Děkuji také Ústavu základního zpracování dřeva a Ústavu lesnické a dřevařské techniky za umožnění měření na zkušebním zařízení Stend. Dík patří také osobám Doc. Ing. Jánů Svoreňovi, CSc. z Technické univerzity Zvolen, Doc. Ing. Emilovi Svobodovi, CSc. z Univerzity obrany v Brně a RNDr. Pavlu Mazalovi, Ph.D. z naší fakulty za pomoc při provádění některých experimentů. V neposlední řadě děkuji i mé rodině za podporu ve studiu.



Abstrakt:

Název práce: Pilový kotouč v procesu podélného řezání materiálů na bázi dřeva

V této disertační práci je uvedena charakteristika pilových kotoučů, jejich rozdělení, vliv konstrukčních úprav na výsledné chování pilového kotouče v procesu obrábění, problematika kmitání pilových kotoučů a s tím vzájemná interakce mezi kvalitou obrobeného povrchu, hlučností a prašností.

Práce se podrobně zabývá problematikou kmitání pilových kotoučů jak při chodu na prázdno tak i za vykonávání práce – řezného procesu a to za použití třech pilových kotoučů s různými konstrukčními úpravami. Tyto zmíněné konstrukční opatření se dále vzájemně porovnávají vzhledem ke standartním provedením konstrukce pilových kotoučů nejen z pohledu kmitání, ale i drsnosti obrobené plochy, rozboru dřevního odpadu vzniklého při řezání a hlučností.

V teoretické části je uvedena analýza dostupné literatury a vědeckých prací. Shrnuty jsou zejména publikace věnované metodám určování tvarů kmitů, stanovování kritických, rezonančních a doporučených otáček, konstrukcím pilového kotouče, včetně možných modifikací, teorii obrábění pilovými kotouči včetně určení velikosti a tvaru třísky a účinkům hlučnosti na pracovní prostředí.

Důležitou částí práce je metodika zahrnující přímé měření pro zjištění nestabilních stavů kotoučů (rezonanční a kritické otáčky). V této části je dále vyhodnoceno měření kmitání na zkušebním pilovém kotouči a ověření navržené metodiky s jinou a již běžně praxí zaběhlou metodou tzv. chladných obrazců. Autor se také snaží prozkoumat a stanovit vliv rozdílné rozteče zubů a způsobu provedení dilatačních drážek spolu s odhlučňovacími drážkami na hladiny hluku, výslednou kvalitu obrobeného povrchu různých dřevin a vzniklý odpad podrobit rozboru dřevních částic s rozdělením do jednotlivých velikostních skupin s procentuálním zastoupením jednotlivých třisek. Výsledky experimentu jsou v diskuzi konfrontovány s dostupnými vědeckými pracemi při zohlednění běžných provozních podmínek, z čehož je vyvozen závěr práce.

Klíčová slova: pilový kotouč, vibrace, frekvence, kritické otáčky, rezonanční otáčky, hlučnost, prašnost, kvalita povrchu



Abstract:

Title: Circular saw blade in the process of longitudinal cutting of wood-based material

In this dissertation thesis there is listed characteristics of circular saw blades, their distribution, influence of construction adjustments on final behavior of blade in the process of machining, problematic of oscillation of blades a mutual interaction among quality of machined surface, noise and dust.

The thesis covers the problems of oscillation of circular saw blades as when idling and operating - the cutting process; and by the use of three circular saw blades with different construction modifications. These aforementioned construction measures are also compared to each other due to the implementation of standard construction saw blades not only from the perspective of oscillation, but also from the perspective of the roughness of the machined surface and the analysis of wood waste generated during cutting and noise.

In the theoretical part there is an analysis of available literature and scientific theses. It outlines the particular publications devoted to methods of determining the shapes of oscillation, determining critical, resonant and recommended speed, blade constructions, including possible modifications, the theory of cutting saw blades including determining the size and shape of the splints and the effects of noise on the work environment.

An important part of this work is methodology involving direct measurements for detection of unstable states of discs (resonance and critical speed. In this section it is further evaluated measuring of the oscillation of the test saw blade and verification of the proposed methodology with a different and practiced, commonly known method, so called cold shapes: The author also seeks to explore and determine the effect of different tooth pitch and method of execution of slots along with soundproofing grooves on noise levels, the resulting quality of the machined surface of various wood. The generated waste is then analyzed for splitting wood particles in particular size group with the percentage of each chip. The results of the experiment are in discussion confronted with the available scientific theses, taking into account with normal operating conditions, of which the conclusion is drawn.

Key words: circular saw blade, oscillation, frequency, critical speed, resonance speed, noise, dust, surface quality



OBSAH

Úvod	9
1. Cíl	11
2. Literární přehled	12
2.1. Analýza poznatků o pilovém kotouči	12
2.2. Kinematika řezání	20
2.3. Analýza používaných metod pro určování tvarů kmitů, rezonančních a kritických otáček pilových kotoučů	22
2.4. Úpravy pilových kotoučů s ohledem na snížení kmitání a hygienických parametrů	36
2.4.1 Úprava předpětí	36
2.4.2 Úprava dilatačními drážkami	37
2.4.3 Odhlučňovací drážky a otvory v těle kotouče	38
2.4.4 Plastické povlaky na těle pilového kotouče	39
2.4.5 Lepené desky a fólie na tělo pilového kotouče	39
2.4.6 Upínací příruby a přidavné disky	39
2.4.7 Vliv teploty pilového kotouče	40
2.5 Účinky vibračí pilového kotouče na hlučnost	40
2.6 Charakteristika dřevního odpadu a jeho účinky na člověka	42
3 Metodika práce	44
3.1 Použité metody	44
3.1.1 Metodika měření vibračí	44
3.1.2 Metodika měření hlučnosti	46
3.1.3 Metodika měření drsnosti povrchu	46
3.1.4 Metodika měření prašnosti	47
3.2 Měřicí aparatura a použitý materiál	49
3.2.1 Zkušební zařízení	49
3.2.2 Pilové kotouče	55
3.2.3 Dřeviny	59
4 Výsledky	61
5 Diskuse	83
6 Závěr	88



7	Shrnutí.....	91
8	Summary	93
9	Seznam skratek	95
10	Seznam tabulek	97
11	Seznam obrázků	98
12	Literatura.....	101
13	Přílohy.....	106



ÚVOD

Kotoučová pila jako stroj určený k řezání materiálů je známá již více než 200 let. Stále, ale výrobci podstupují kroky, které vedou k vývoji těchto strojů. Řezání dřeva kotoučovými pilami patří v dřevařském průmyslu k nejrozšířenějšímu způsobu technologie obrábění a dělení materiálu a to díky poměrně jednoduché konstrukci samotných strojů, ale hlavně díky variabilitě použitelnosti pilového kotouče jako nástroje na opracování širokého spektra materiálů na bázi dřeva. Použití kotoučových pil sahá od primárního zpracování dřeva až po sekundární výrobu. Avšak největší péči a údržbu u tohoto způsobu obrábění je zaměřena na jeho srdce, tedy pilový kotouč.

Podle konstrukce se dá pilový kotouč použít na různorodé materiály, jak na bázi dřeva, tak i na plasty, kovy, kámen, beton a třeba i sklo. Nás samozřejmě nejvíce zajímají ty kotouče, které jsou určeny k řezání dřevěných materiálů. Ty se liší jak svou velikostí (tedy rozměry), tak i tím, zda jsou určeny k řezání masivního dřeva, vrstvených dřevěných materiálů nebo aglomerovaných materiálů. U masivního dřeva známe konstrukce pilových kotoučů, které umožňují řezat dřevo v obou směrech (příčný a podélný směr řezání). V dřevě většinou se však, ale používají typy kotoučů, jenž jsou určeny na jednotlivé výše zmíněné způsoby řezání. Z toho plyne, že se podle druhu materiálů volí i druhy pilových kotoučů, které jsou pro opracování vhodné. Tedy správná volba kotouče pro daný materiál má tudíž zásadní vliv nejen na otupování zubů nástroje, ale také na kvalitu řezu - zejména drsnost a rovinnost obrobenej plochy.

Na již zmíněnou kvalitu řezu má vliv i řada dalších faktorů, které jsou pro řezný proces nežádoucí. Mezi tyto faktory patří nejvíce kmitání a s ním úzce spojená hlučnost pilových kotoučů. Velikost kmitání v konečném důsledku může vést až k nestabilním stavům pilových kotoučů. Proto je obrovskou snahou všech výrobců, jak tuzemských tak samozřejmě i zahraničních, problémy nestability nástroje v procesu řezání eliminovat a snižovat amplitudy kmitů.

V současné době se v dřevařském průmyslu nejčastěji používá takový pilový kotouč pro podélné řezání, ve kterém jsou pomocí laseru vyrobeny různé drážky, které mají za úkol snižovat vibrace a hlučnost kotouče a umožňovat tak přesnější obrábění se současným zúžením řezné spáry a tím zvyšování výtěžnosti materiálu za lepších podmínek pro obsluhu. Tvar drážek, počet drážek, umístění a ukončení drážek se



pochopitelně zobrazuje na výsledku a jednotlivé variace provedení jsou více či méně účinné buď na vibrace, nebo naopak na hlučnost.

V minulosti se problematikou obrábění dřeva zabývalo mnoho vědců, kteří provedli celou řadu různých experimentů. Na základě těchto výzkumů jsou již známé empirické vztahy pro výpočet rezonančních, kritických a pro praxi nejvíce užitečný vztah optimálních otáček. Pro bezproblémový řez s maximální kvalitou a produktivitou je důležité znát právě tyto pásma otáček, při kterých pilový kotouč různě kmitá. Všeobecnou základní snahou výrobců je tedy, aby amplituda kmitání kotouče byla minimální a řezání probíhalo v optimálních otáčkách. Vyhneme se tak rezonančním otáčkám a hranici kritických otáček. Význam kritických otáček není třeba zvlášť zdůrazňovat. Jedná se o takové otáčky, při kterých dochází vlivem budící síly k velkému rozkmitání nástroje, doprovázenému nadměrným dynamickým namáháním. V takovém případě hrozí nejen nebezpečí poškození nástroje (jeho destrukci), ale také celého strojního zařízení, případně k úrazu obsluhující osoby (Rychtář, 2011).

Z těchto důvodů jsou teoretické a experimentální práce prováděné v oblastech měření tvarů kmitů, zjišťování a eliminování jejich příčin, vzniku a výzkumu různých protivibračních a protihlukových opatření nepostradatelné.

Mnoho prací se také zabývá stanovením energetických a dynamických prvků v procesu obrábění dřeva za pomoci různých metod. Mezi nejdůležitější parametry lze zařadit řezný odpor a řezný výkon. Tyto parametry jsou velmi důležité pro konstrukci strojního zařízení a dimenzování jednotlivých prvků stroje a samozřejmě nástroje. Zároveň umožňuje optimalizovat technologické podmínky obrábění tak, aby nedocházelo ke zbytečně vysoké spotřebě energie a poškození strojů a nástrojů.



1. CÍL

Hlavním cílem disertační práce je ověření konstrukčních úprav prototypového pilového kotouče s nepravidelnou roztečí zubů pro podélné řezání dřeva v závislosti na hodnotících provozních kritériích. Tento cíl je dán faktem, že podstatnou měrou samotná konstrukce pilového kotouče významně ovlivňuje výsledný proces obrábění. Z toho důvodu se tato práce věnuje právě vlivu různě veliké zubové mezery, která se pochopitelně s rozdílnou roztečí zubů na pilovém kotouči a jeho obvodu mění, čímž dochází ke změnám tuhosti těla kotouče a posunu oblasti rezonančních a kritických otáček.

Díličními cíli plynoucí z hlavního cíle jsou analýza používaných metod pro zjišťování rezonančních a kritických otáček, návrh metody přímého měření vibrací fázově posunutými snímači a posouzení vlivu nepravidelné rozteče zubů prototypového kotouče na kmitání, kvalitu řezné spáry, hlučnost a prašnost v porovnání s pilovými kotouči se standardním provedením.

Při realizaci těchto cílů je brán zřetel na současnou dostupnou literaturu (zejména ve vědeckých pracích a výzkumech prováděných v tomto oboru) a její obsahové řešení efektivně zapracovat do této disertační práce.



2. LITERÁRNÍ PŘEHLED

Jelikož se tato disertační práce zabývá nejen vyhodnocováním výsledků získaných měření v procesu obrábění pilovými kotouči, ale i formou prezentace informací dříve zpřístupněných odborné veřejnosti. Proto je třeba stav řešené problematiky pojmout jednak z pohledu konstrukce samotného kotouče a jednak z pohledu současných moderních metod získání informací o chování pilových kotoučů v procesu obrábění materiálu na bázi dřeva.

2.1. Analýza poznatků o pilovém kotouči

Pilový kotouč je rotační řezný nástroj určený především pro strojní obrábění dřeva a materiálů na bázi dřeva, jehož charakteristika se vyznačuje malou tloušťkou a mnohonásobně větším průměrem. Přičemž je uprostřed kotouče otvor sloužící pro jeho uchycení na stroj a dále zuby (funkční řezné hrany) umístěné po obvodě. Materiál, ze kterého se samotný pilový kotouč skládá, závisí na druhu konstrukce pilového kotouče a posléze i na materiálu, ze kterého je složen samotný břit. Z toho plyne materiálové složení pilové kotouče:

- celistvé pilové kotouče z nástrojové oceli
- pájené pilové kotouče se slinutými karbidy (SK)
- pájené pilové kotouče se stelitovými plátky
- pilové kotouče s keramickými plátky
- pilové kotouče s polykrystalickými diamanty (PKD).

Tvar a rozměr zubů nám určuje použití pilového kotouče, odtud rozeznáváme několik základních typů pilových kotoučů:

- *pilový kotouč pro příčný pořez dřeva* - tento kotouč má z pravidla 3 tvary zubů, které se na kotouči ve stejném pořadí opakují. Jedná se o dva zuby takzvané „nařezávací“ (levostranné a pravostranné), u kterých je úhel čela negativní a jejich hroty přesahují na řezné kružnici zuby „vyklízcí“.
- *pilový kotouč pro podélný pořez dřeva* - konstrukce tohoto kotouče je prakticky pouze vtom, že se střídají jednostranně broušené zuby a jejich rozteč spolu se zubovou mezerou je poměrně veliká, protože se při tomto modelu řezání tvoří



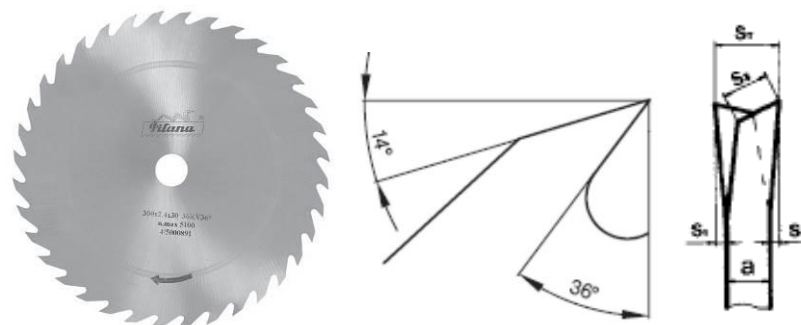
dlouhé souvislé třísky. Během tohoto obrábění se nehledí přespříliš na kvalitu řezné spáry, ale spíše na kvantitu vyrobeného řeziva, neboť vždy posléze následuje další obrábění. Nicméně se vyvinuly rozmítací pilové kotouče patřící do této skupiny pil, které obsahují takzvané hoblovací nože, a výsledná řezná spára vykazuje menší drsnost povrchu.

- *pilový kotouč pro ruční elektrické stroje* - jelikož se jedná o lehké stroje kde je poukázováno na bezpečnost obsluhy, proto musí mít pilový kotouč v takovém případě opatření, aby nedošlo k velkému zatížení stroje a to například tzv. omezovače tloušťky třísky a poměrně malé dimenze rozměrů.
- *pilový kotouč předřezávací* - skládá se ze dvou malých kotoučů, které se vzájemně spojí a mezi ně se vkládají distanční kroužky, aby se dosáhlo požadované velikosti řezné spáry. Tato spára musí být o technologickou míru větší (0,1 mm na každou stranu) než je řezná spára hlavního pilového kotouče.
- *pilový kotouč pro pořez kompozitních materiálů na bázi dřeva* - rozteč a zubová mezera pilových kotoučů pro kompozitní materiály bývá dosti malá a tudíž počet zubů veliký, aby se dosáhlo vysoké kvality řezné spáry a nebyly vidět pouhým okem rýhy od zubů, jelikož u takových materiálů bývá řezání pilovými kotouči v podstatě poslední obráběcí operací. Dále u těchto pilových kotoučů bývá poměrně vysoká řezná rychlost spojená se zahříváním a hlučností kotouče, je proto v konstrukci několik zásahů, jenž důsledky negativních jevů způsobených při řezání eliminují (dilatační a odhlučňovací drážky). Co se týče kompozitních materiálů, tak bývají dosti abrazivní vůči pilovému kotouči. Tudíž se na zuby pilových kotoučů používají vyvinuté speciální materiály odolné takovým zátěžím s ohledem na životnost nástroje, produktivitu práce a na ekonomičnost.
- *pilový kotouč pro pořez materiálů měkkých kovů a plastů* - jedná se přibližně o stejný pilový kotouč jako pro kompozitní materiály, ale jsou odlišné od nich v různých řezných úhlech břitových destiček.



2.1.1 Pilové kotouče z nástrojové oceli

Celý pilový kotouč tvoří pouze jeden materiál. Tělo kotouče se vyrábí dvěma způsoby: lisováním (starší technologie výroby) nebo řezáním pomocí laseru, popřípadě kombinací obou těchto technologií z ušlechtilé nástrojové oceli. Tento způsob provedení konstrukce pilového kotouče vyžaduje tzv. rozvod zubů a to zpravidla bývá do velikosti 1/4 tloušťky těla pily. Rozvádí se pouze horní třetina zubu. Rozvod musí být symetrický, jinak pilový kotouč zabíhá na stranu většího rozvodu. Rozvod se zásadně upravuje před ostřením, po ostření se pouze překontroluje a poopraví, je-li třeba. Při použití příliš malého rozvodu se pilový kotouč zahřívá, ztrácí tuhost a zabíhá. Při příliš velkém rozvodu vznikají ztráty větším prořezem, vyšší spotřebou energie a zvětšenou drsností řezné plochy. (www.pilana.cz)



Obr. 1 Pilový kotouč z nástrojové oceli (www.pilana.cz)

Nástrojové ocele, ze kterých se pilové kotouče vyrábí, jsou ocele ušlechtilé a vyznačují se především velkým obsahem uhlíku. Tyto ocele obsahují základní strukturní složky martenzit, austenit a karbidy. Nástrojové ocele se dělí do skupin podle chemického složení na uhlíkové, slitinové a rychlořezné, přičemž právě rychlořezné ocele jsou nejvíce využívány pro konstrukci pilového kotouče v této kategorii.

Rychlořezné ocele (RO) jsou v podstatě nástrojové ocele legované vysokou přísadou wolframu. Wolfram zvětšuje řezivost nástroje a jeho obsah bývá u RO 5 až 20% a ve struktuře oceli vytváří s uhlíkem sloučeninu tzv. karbid wolframu, který je velmi tvrdý a odolný proti otěru. Další chemické prvky obsažené v RO jsou Chrom, který zlepšuje kalitelnost (obsah cca 4%) a vanad V (1 až 4%), jenž zvětšuje odolnost proti popouštění a opotřebení. U některých druhů rychlořezných ocelí může být wolfram částečně nebo úplně nahrazen Molybdenem. Kromě dobré řezivosti má RO i příznivé mechanické vlastnosti, tvrdost, pevnost, houževnatost, které se dobře uplatňují



při namáhání nástrojů v řezu. RO si udržuje tvrdost získanou kalením i při vysokých teplotách obrábění (www.tumlikovo.cz)

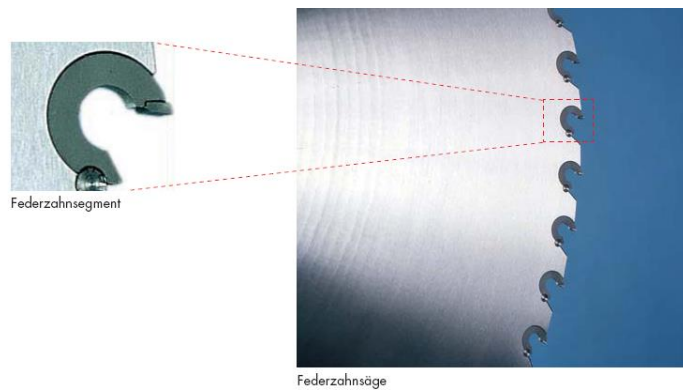
2.1.2 Pilové kotouče s SK plátky

Tyto pilové kotouče se vyrábí pro téměř všechny řezné operace v primárním a sekundárním zpracování dřeva. Avšak široké uplatnění nacházejí také v provedení pro řezání plastů, lehkých kovů a stavebních materiálů (např. heraklit, pórobeton, desek z minerálních vláken...).



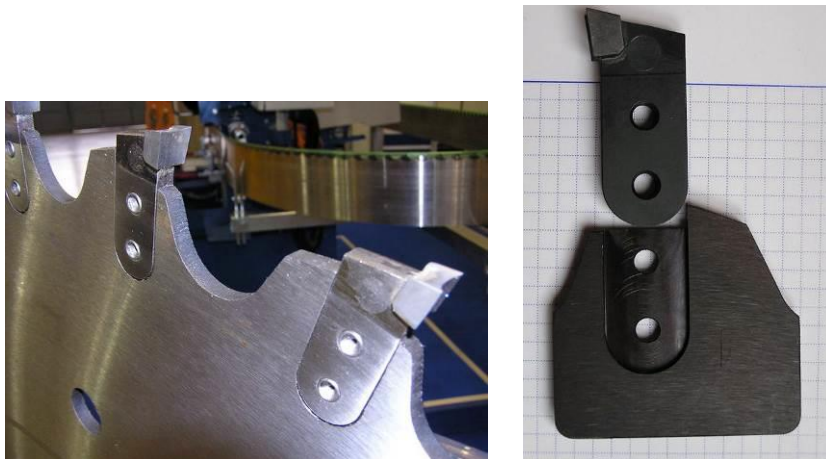
Obr. 2 Moderní pilový kotouč s SK plátky (www.fachshop.cz)

Konstrukce pilových kotoučů s SK plátky spočívá v tom, že řezné hrany neboli zuby jsou tvořeny z materiálu poměrně drahého, proto jsou použity pouze na ostří. Tvar břitu, především jeho hlavní úhle, je navržen podle toho na co bude pilový kotouč využíván. Nosnou část, jež je tělo kotouče, tvoří podstatně levnější materiál, vykazující dostatečné vlastnosti pro přenos veškerých zatížení, které se vyskytnou v procesu obrábění. Tloušťka těla kotouče je menší než samotný SK plátek, což má za následek, že nedochází ke tření těla kotouče v řezné spáře. Tyto dva nejdůležitější konstrukční celky jsou k sobě spojeny nejčastěji pevným nerozebíratelným spojem pájením. I naproti tomu například německá firma Böhler&Miller vyvinula výměnné zuby na pilovém kotouči. Princip spočívá v upnutí segmentu ve tvaru písmene C, jenž je opatřen břitovou destičkou a na venkovní straně segmentu je odlitá drážka do V. Celý tento systém je zajištěn na tělo kotouče speciálním nýtem na konci segmentu.



Obr. 3 Způsob výměnných destiček firmy Böhler&Miller (<http://www.interknife.com>)

Další možností, jak docílit výměny břitových destiček přišla firma Richard FELDE GmbH, která využívá speciálního unášeče břitové destičky, jenž se k tělu kotouče nasunutím a posléze zajištěním speciálními nýty upevní ve správné poloze.



Obr. 4 Způsob výměnných destiček firmy Richard Felde GmbH (www.reparo.cz)

Slinutý karbid

Slinuté karbidy jsou výrobky práškové metalurgie. Jsou tvořeny jemnými částicemi tvrdých karbidů některých kovů, jako W, Ti a Ta, které jsou navzájem spojeny zpravidla kobaltem. Poměrné množství jednotlivých druhů karbidů a kobaltu určuje pak vlastnosti slinutého karbidu.

Volba vhodného slinutého karbidu závisí hlavně na druhu a tvrdosti obráběného materiálu a velikosti rázu při funkci nástroje. S rostoucím obsahem kobaltu vzrůstá houževnatost, ale klesá tvrdost a odolnost slinutého karbidu proti opotřebení. (www.cs.wikipedia.org)



	FZ	rovný zub		TFZ	trapezový zub střídavě s rovným zubem
	FZ N	rovný zub s negativním úhlem čela		TFZ N	trapezový zub střídavě s rovným zubem s negativními úhly čela
	LFZ	rovný zub s omezovačem úběru třísky			
	WZ	střídavý zub		DHZ	rovný dutý zub střídavě se střechovitým dutým zubem
	WZ N	střídavý zub s negativním úhlem čela		DHZ N	rovný dutý zub střídavě se střechovitým dutým zubem s negativními úhly čela
	LWZ	střídavý zub s omezovačem úběru třísky			
	TZ	trapezový zub		KON	kónický zub

Obr. 5 Označení tvarů zubů (www.pilana.cz)

2.1.3 Pilové kotouče se stelitovými plátky

Pro stelit na rozdíl od SK plátek je vhodný úběr na zub 1mm, což znamená i menší počet zubů a následně opět levnější nástroj. Častou chybou bývá právě malý úběr na zub, který vede ze zkušeností k rychlejšímu otupení stelitované kotoučové pily. Paradoxně je tedy třeba posuvovou rychlost zvyšovat, čímž dosáhneme jak lepší produktivity, tak delší trvanlivosti ostří. Řežeme-li SK plátky čerstvé dřevo, dochází navíc k chemickému otupení a to ještě před otupením mechanickým, což se u stelitu neděje a proto je na pořez syrové kulatiny doporučován. Stelit se skládá z kobaltu a chromu s přísadou dalších prvků.

2.1.4 Pilové kotouče s keramickými plátky

Řezná keramika patří mezi anorganické, nekovové převážně krystalické materiály. Přestože neexistuje normou stanovené rozdělení řezné keramiky, lze ji podle chemického složení rozdělit na dva základní typy oxidickou a neoxidickou řeznou keramiku. Všechny druhy řezné keramiky mohou být vyztuženy pomocí tenkých vláken submikronového průměru – whiskerů (např. SiC), které značně zvyšují řezné vlastnosti. Řezná keramika je charakterizována nízkou měrnou hmotností, vysokou tvrdostí i za vysokých teplot, tepelnou odolností, chemickou stálostí, odolností proti opotřebení. Tyto parametry zaručují při správném použití vysokou trvanlivost břítu nástroje i při vysokých řezných rychlostech.



Obr. 6 Řezný pilový kotouč Exact typ CERMET (www.bld.cz)

2.1.5 Pilové kotouče PKD

Pilové kotouče s diamantovými řeznými břity svými výkony a příznivou ekonomikou provozu jsou výhodné především pro velkoplošné formátování, při zachování vysoké životnosti ostří a velkého řezného výkonu. Příčinou mimořádné tvrdosti diamantu je skutečnost, že každý atom se váže se svými čtyřmi sousedními atomy čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů.



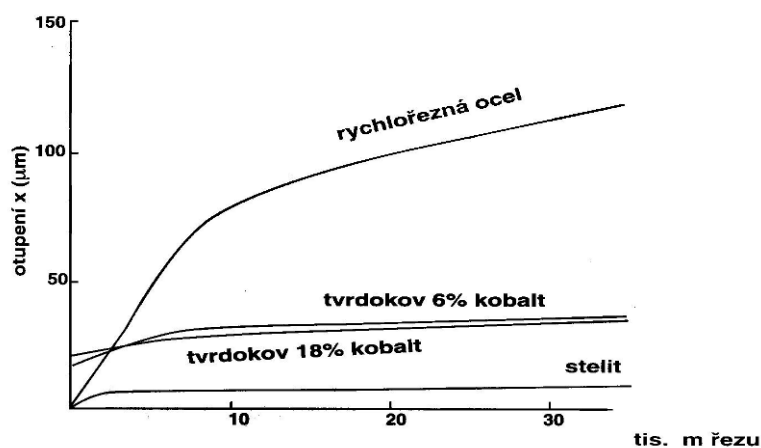
Obr. 7 Diamantový pilový kotouč (www.pilana.cz)

PKD zuby se brousí elektrojiskrovým obráběním. Metoda a princip samotný je velmi starý - asi 50 let. Nepatrný elektrický výboj přeskochí mezi obrobkem a nástrojem (nástrojem je pro profilové obrobky drát, pro rovné břity kotouček). Výboj vytvoří na obou stranách nepatrný kráter - čím odolnější materiál na straně nástroje, tím samozřejmě lepší. Kapalina je dielektrikum, složí k chlazení a čištění. Takže jde o tisíce drobných výbojů, jejichž intenzita nesmí překročit určitou mez.

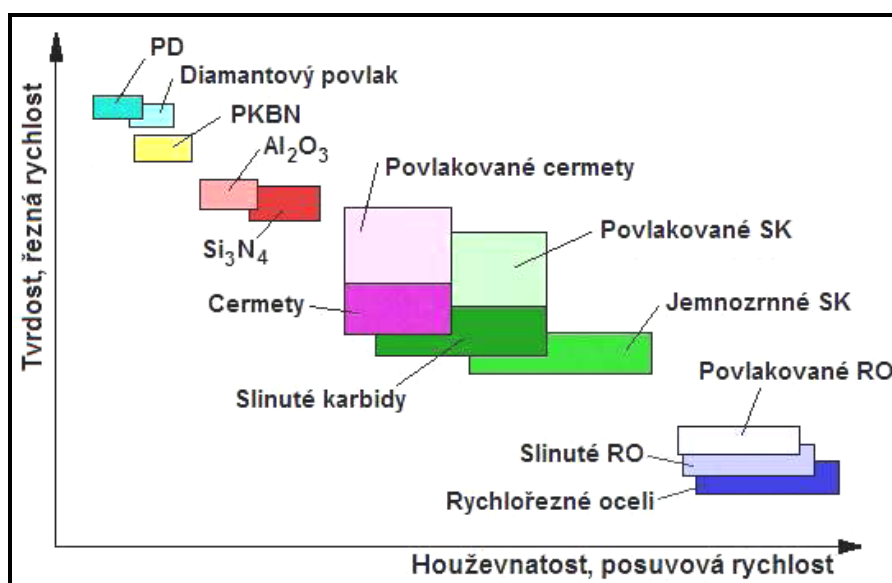


2.1.6 Shrnutí

Tato kapitola se věnovala rozdělení pilových kotoučů v závislosti na použitém řezném materiálu na výrobu samotného kotouče i na rozdělení kotoučů pro jednotlivé skupiny použití. Obecně lze však stanovit, že technika stelitování je neustále na vzestupu pro použití na syrové dřevo a pravděpodobně zatím nebylo vynalezeno nic lepšího. SK a PKD kotoučové pily budou v budoucnu neustále významnou měrou používány na kompozitní materiály, neboť zajišťují jak dobrou přesnost, tak dobrou kvalitu povrchu a vysokou životnost ostří. Rozvádění a pýchování zubů nástrojových ocelí je však jistě na ústupu a nacházejí pouze uplatnění v přípravě palivového dříví.



Obr. 8 Otupení řezných materiálů v závislosti na běžných metrech řezu v čerstvém kmeni (www.reparo.cz)

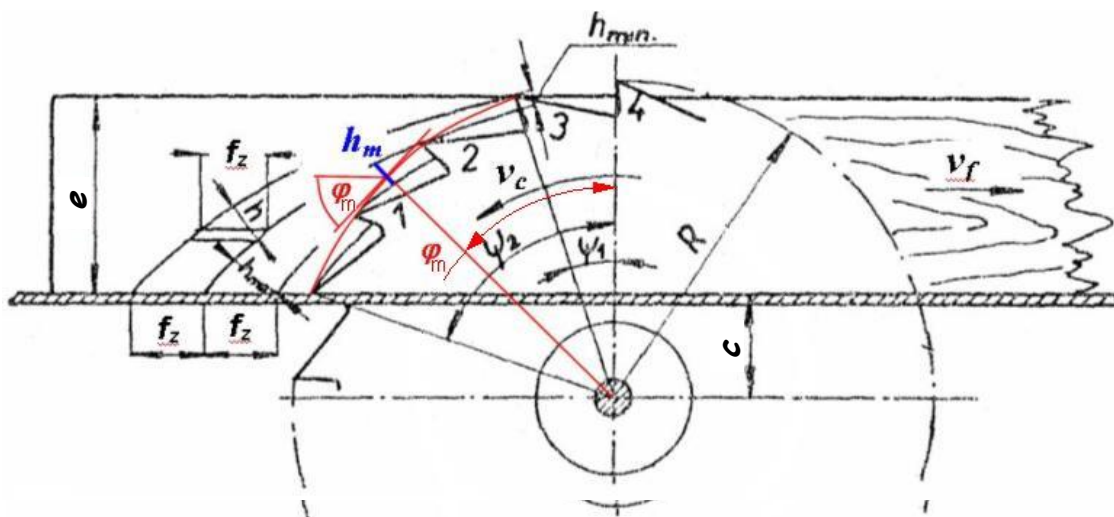


Obr. 9 Oblasti aplikace nejpoužívanějších materiálů pro řezné nástroje (Humár, 2012)



2.2 Kinematika řezání

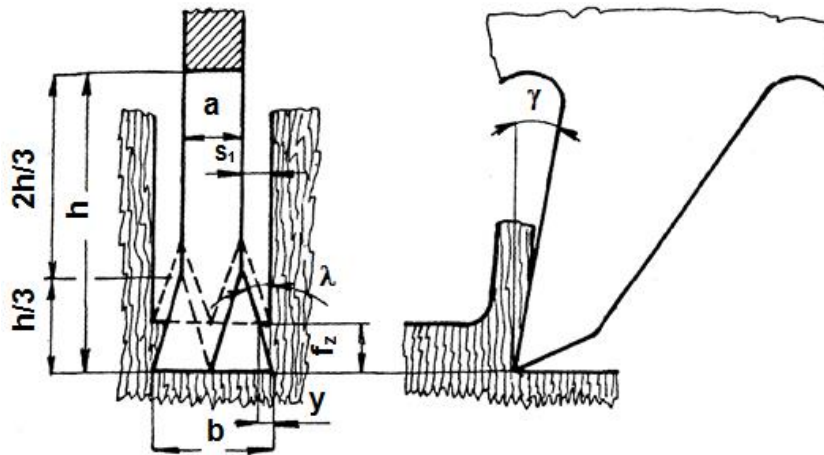
Z kinematiky řezání je známo, že břity pilového kotouče se pohybují konstantní řeznou rychlostí po kruhové dráze. Při řezání se skládá rotační pohyb pilového kotouče s přímočarým pohybem obrobku, tzn., že řezná hrana zubu se pohybuje po cykloidě. Exaktní výpočet tloušťky třísky i cykloidní dráhy zubu je poměrně obtížný. Proto si můžeme výpočet zjednodušit tím, že cykloidu nahradíme kruhovým obloukem, aniž bychom se dopustili větší chyby. Je to možné, protože řezná rychlost je ve srovnání s posuvnou mnohonásobně vyšší a navíc pila pracuje s velmi malým posuvem na zub. Rotační pohyb řezného nástroje a rovnoměrný posuv zapříčiňují plynulou změnu tloušťky třísky. Kinematika řezání pilovým kotoučem je znázorněna na obr. 10.



ψ_1 - vstupní úhel pilového kotouče ($^\circ$), ψ_2 - výstupní úhel pilového kotouče ($^\circ$), φ_m - střední úhel přeřezávání vláken ($^\circ$), v_f - podávací rychlost ($m \cdot \text{min}^{-1}$), v_c - řezná rychlost ($m \cdot s^{-1}$), f_z - posuv na zub (m), h_m - střední tloušťka třísky (m), e - řezná výška (tloušťka obrobku) (m), c - vzdálenost obrobku od osy rotace kotouče (m).

Obr. 10 Schéma řezání (Kopecký a kol., 2008)

Proces hledání optimálních konstrukčních a provozních parametrů pilových kotoučů je nutné doplnit hodnocením kvality povrchu řezné spáry. Procesy obrábění jsou vlastně řezáním v drážce s velkým počtem řezných klínů na těle nástroje. Z praxe je známo, že se zuby proti nadměrnému zahřívání v řezné spáře upravují rozváděním nebo pěchováním, aby řezná spára byla větší než tloušťka řezného nástroje. Právě v důsledku sklonu bočních ostří zubů vzniká na obou stranách nástroje řezaný povrch, který je rýhovaný, viz obr. 11. (Lisičan, 1996)



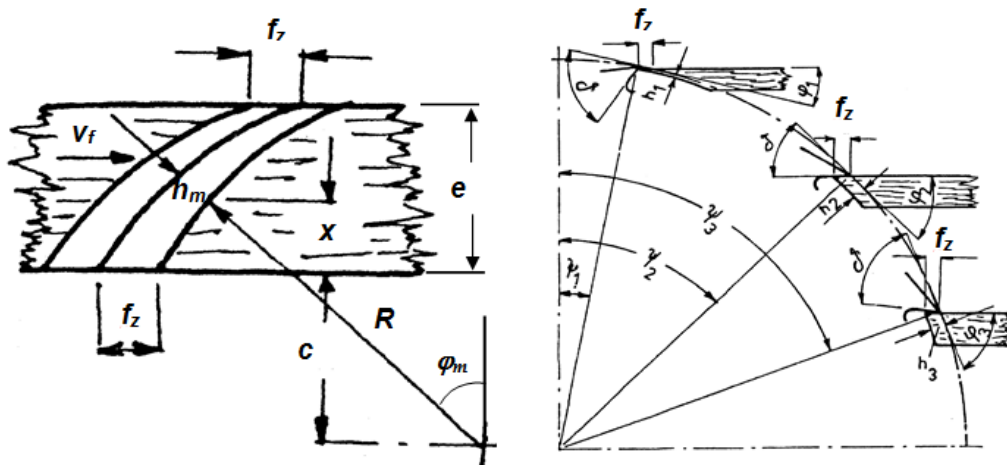
Obr. 11 Vliv rozvodu zubů na hloubku rýh (Kopecký a kol.2008)

Pro pýchované zuby nebo zuby ze slinitých karbidů s lichoběžníkovým profilem lze stanovit teoretickou hloubkou rýh y a vypočítat jí podle rovnice (1). Tento vztah, ale platí pouze pro zuby s přímočarým pohybem, např. u pilových pásů.

$$y = \frac{3 \cdot s_1}{h} \cdot f_z \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

kde s_1 ... vychýlení zubu vlevo
 h ... výška zubu
 f_z ... posuv na zub
 $\text{tg } \lambda = 3s_1/h_z$

Z důvodů nepřesnosti rozvádění zubů, ale zejména chvění pilového kotouče, je skutečná hloubka rýh podstatně větší než hloubka vypočítaná, řádově až 4 – 5 krát. (Lisičan, 1996)



Obr. 12 Indikace tloušťky třísky odřezávané pilovým kotoučem (Kopecký a kol., 2008)



Při řezání pilovým kotoučem je hloubka rýhování proměnlivá. Závisí na poloze pilového kotouče vůči obrobku, obr. 12 a současně na tom, je-li osa rotace kotouče nad stolem nebo pod stolem. Také závisí na poloze zubu v rozřezávaném materiálu. Z obrázku je patrné, že se změnou výšky obrobku vůči ose pilového kotouče se podstatně mění tloušťka třísky při stejném posuvu na zub.

Vyjdeme-li z úvahy, že teoretická hloubka rýhování y je podstatně ovlivněna tloušťkou třísky, můžeme analogicky z geometrie na obr. 12 sestavit rovnici (3) a dosazením za střední tloušťku třísky h_m z rovnice tuto rovnici dále rozvinout.

$$y = \frac{s_1}{h} \cdot h_m = \frac{s_1}{h} \cdot f_z \cdot \sin \varphi_m \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

dosazením za $\sin \varphi_m = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_m}$, přičemž $\cos^2 \varphi_m = \left(\frac{c+x}{R} \right)^2$

dostaneme obecný výraz pro výpočet teoretické hloubky rýhování povrchu pilovým kotoučem s trapézovým profilem zubu:

$$y = \frac{s_1}{h} \cdot \frac{v_f}{n \cdot z} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c+x}{R} \right)^2} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

kde $x \cong 1/2e$

2.3 Analýza používaných metod pro určování tvarů kmitů, rezonančních a kritických otáček pilových kotoučů

Abychom mohli popisovat metody pro určování tvarů kmitání, tak si blíže osvětlíme vlastní teorii kmitání. Kmitání někdy nazývané oscilace nebo kmitavý děj, je změna, typicky v čase, nějaké veličiny vykazující opakování nebo tendenci k němu. Nejznámější je mechanické kmitání - kmitavý pohyb, oscilační pohyb nebo vibrace, což je takový mechanický pohyb hmotného bodu, při kterém je tento hmotný bod vázán na určitou rovnovážnou polohu. Mezi toto kmitání můžeme zařadit i vlnění pilového kotouče, které je předmětem našeho zájmu. Okamžitá poloha bodu nebo skupiny bodů při mechanickém kmitání, kterou zaujímá vzhledem k rovnovážné poloze, se označuje jako okamžitá výchylka. Okamžitá výchylka je hlavní veličinou, která se časem periodicky mění. Počet periodických dějů (kmitů) za časovou jednotku (obvykle jednu sekundu) je označován jako frekvence kmitání a jeho jednotkou je Hertz (Hz).

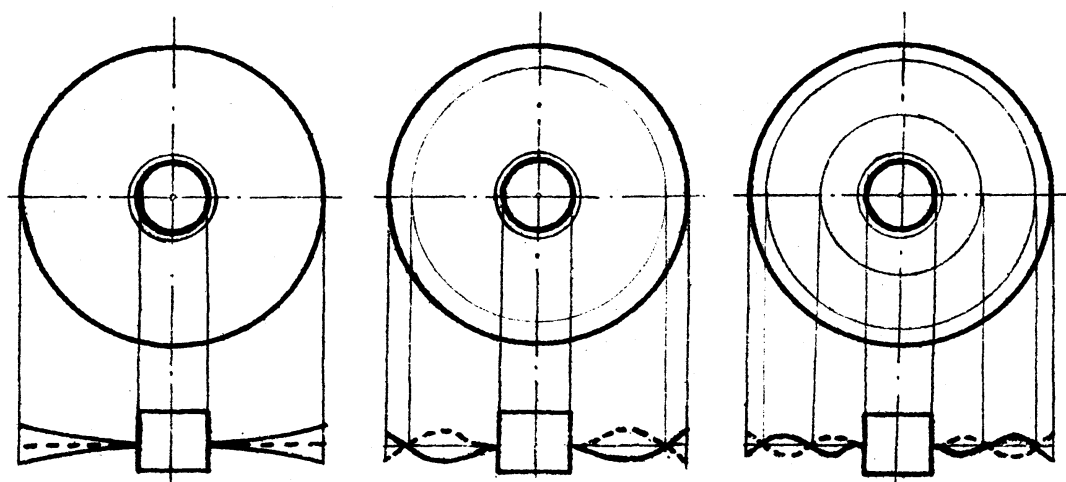


Absolutní hodnota okamžité výchylky se nazývá velikost okamžité výchylky nebo také velikost vibrace. Nejvyšší a nejnižší hodnota okamžité výchylky se nazývá amplituda kmitání (www.cs.wikipedia.org).

V pracovním procesu dochází otáčením pilového kotouče kolem své osy ke kmitání vlivem různých faktorů, jako je např. nerovnost kotouče, nepřesnost přírub, nesouměrnost obvodu kotouče vypálených zubů po obvodu kotouče apod. (Prokeš, 1965).

Při provozu kotouče v určitých pracovních otáčkách je velice důležité určení vlastních frekvencí disku kotouče, tzv. statické frekvence. Disk kotouče může mít teoreticky nekonečný počet vlastních statických frekvencí. Tvary kmitů dělíme na středově symetrické a nesymetrické, které se dají popsat uzlovými průměry, uzlovými kruhy nebo kombinací obou (Kopecký, 2007).

Kotouč, který se otáčí kolem své osy, kmitá ohybovými středově symetrickými kmity. Při tomto kmitání vznikají místa klidu tzv. uzlové křivky, které vytvářejí soustředné kružnice. Počet těchto soustředných kruhů se označuje, jako c . Teoreticky mohou nabývat hodnot $0, 1, 2, 3, \dots$. V reálném provozu dochází většinou pouze k tvaru kmitu $c=0, c=1$. Toto kmitání způsobuje zvýšené tření kotouče o obrobek, čímž dochází ke zvyšování teploty se všemi negativními důsledky na tuhost a stabilitu disku kotouče (Kopecký 2007). Tyto kmity a tvar kotouče jsou znázorněny na obrázku č. 1.

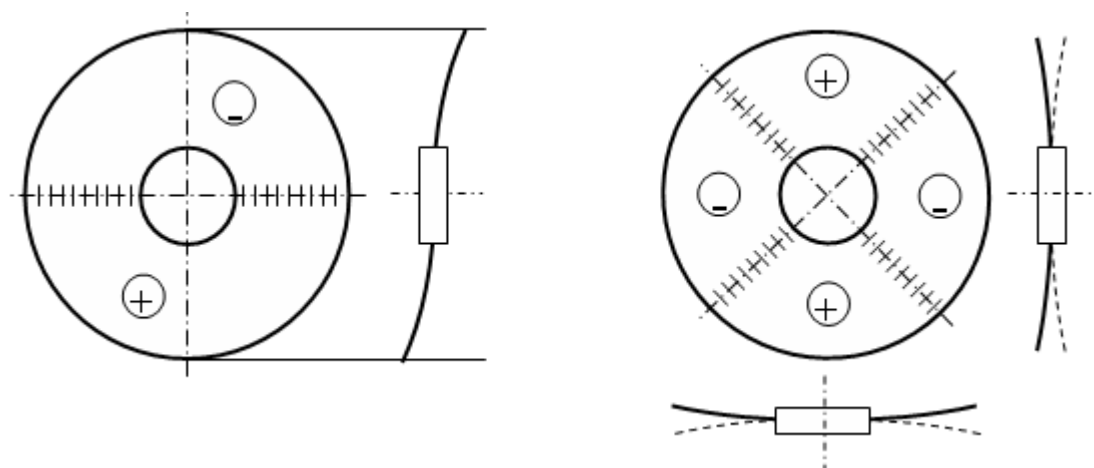


*Obr. 13 Tvary středově symetrických kmitů pilového kotouče $c=0, 1, 2$
(Černoušek, 1965)*



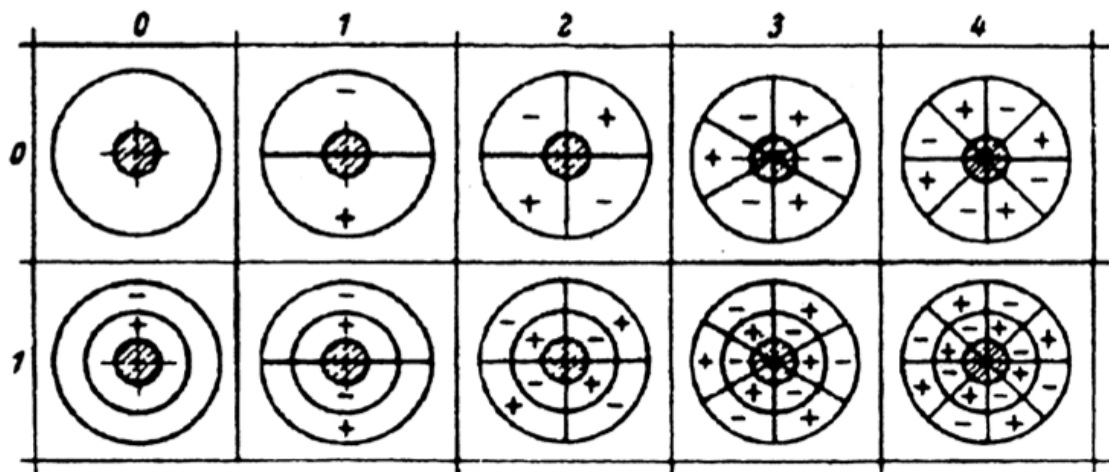
Daleko větší problém, při kterém dochází ke vzniku nadměrného vlnění, vyšší hlučnosti a nestabilitě pilového kotouče, jež může vést k jeho poškození nebo dokonce roztržení, způsobuje středově nesymetrické kmitání. Při tomto kmitání se místa klidu - uzlové křivky c mění na tzv. uzlové průměry označované jako k a jejich počet je označen číslem.

Středově nesymetrické kmitání stojícího pilového kotouče si můžeme představit jako složení dvou běžících vln, které se po obvodě kotouče šíří navzájem proti sobě. Tyto vlny mají stejnou úhlovou rychlost rovnající se tzv. statické vlastní rezonanční frekvenci kmitání kotouče f_{st} . V důsledku svého diskovitého tvaru může mít pilový kotouč nekonečný počet vlastních statických frekvencí (Kopecký, 2007). Každá frekvence pilového kotouče odpovídá specifickým vibracím, ty vytvoří obrazec charakteristického tvaru pro různé uzlové průměry.

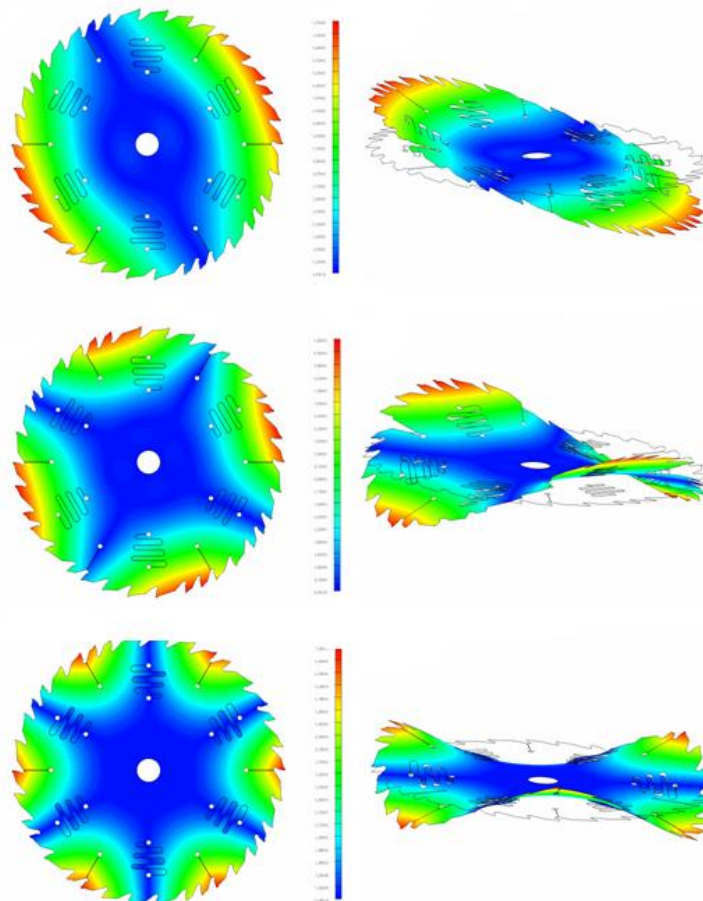


Obr. 14 Tvary středově nesymetrických kmitů pilového kotouče $k = 1$ a 2 (Kopecký, 2007)

Složené ohybové kmity jsou ty, které vznikají složením ohybových kmitů středově symetrických a středově nesymetrických (viz výše). Se zvětšováním hodnot c a k , rostou hodnoty vlastních frekvencí, ale zmenšují se výchylky. Lze tedy říci, že v případě rezonance směrem k vyšším tvarům ohybových kmitů se snižuje napětí a tím i nebezpečí vzniku trhlin. Za nejnebezpečnější se považují složené kmity $k=2, 3, 4$ společně s $c = 1, 2$ (Siklienka a Svoreň, 1997). Složené kmity pro uzlové průměry $k=0$ až 4 a středově symetrické kmity $c = 0$ a 1 jsou zobrazeny na obr. č. 15.



Obr. 15 Složené tvary kmitů pilového kotouče (Siklienka a Svoreň, 1997)



Obr. 16 Modelované tvary (metoda FEM) středově nesymetrických kmitů pilového kotouče $k = 1, 2, 3$ (Kopecký a kol., 2011)



Tvary kmitů, rezonanční a kritické otáčky se určují pomocí různých metod. Jsou to metody analytické, numerické a experimentální. Tyto metody se prolínají, nejsou v následující kapitole od sebe odděleny, protože např. některé koeficienty pro výpočet určitého kotouče se musejí zjistit z experimentu. Výpočet pro daný pilový kotouč tedy nelze provést na základě vstupních hodnot jiných kotoučů. Při výpočtech některých hodnot je také třeba zohlednit řadu faktorů, které jsou proměnné, a proto se výpočet samotný stává složitějším a méně přesným.

Matematicky vyjádřit vztah pro statickou frekvenci vlastních kmitů kotouče f_{st} je obtížné. Její složitost spočívá v množství proměnlivých činitelů, které vstupují do výpočtu. Současná podoba rovnice (5) je zpřesněná Javorkem (2006) a zohledňuje mimo jiné upnutí a počáteční stav napětí.

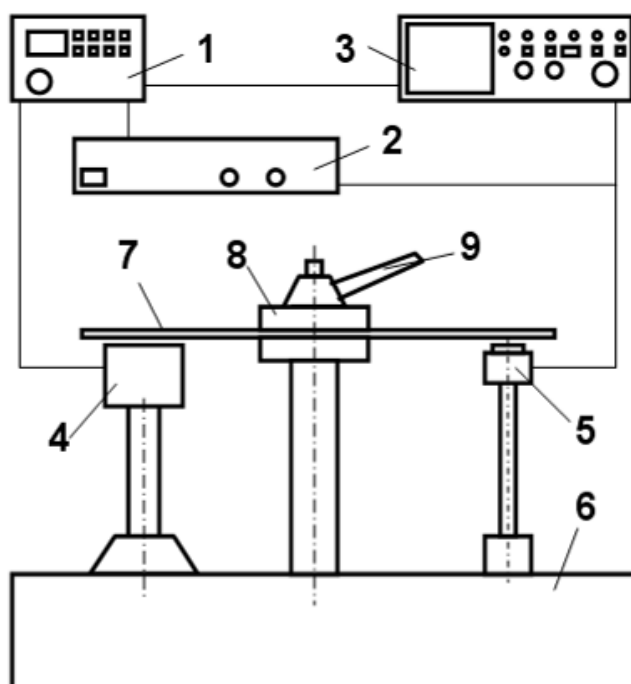
$$f_{st} = \kappa_{k(\alpha)} \frac{s}{D^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{3\rho} \cdot \frac{1}{1-\nu^2}} \quad [\text{Hz}] \quad (5)$$

kde $\kappa_{k(\alpha)}$... koeficient zohledňující poloměr upnutí, tvary kmitání a vnitřní napětí v kotouči, který je závislý na tvaru desky kotouče, způsobu upnutí a tvaru chvění
 D ... průměr kotouče
 E ... modul pružnosti (pro ocel $2,1 \cdot 10^5$ MPa)
 a ... tloušťka disku kotouče
 ρ ... hustota materiálu kotouče (pro ocel $7\,800$ kg.m⁻³)
 ν ... Poissonova konstanta ($\nu = 0,3$)

Z rovnice (5) můžeme vyvodit, že vlastní frekvence stojícího pilového kotouče se úměrně zvyšují s jeho tloušťkou a kvadraticky klesají s průměrem kotouče. Kromě toho jsou závislé na modulu pružnosti a hustotě materiálu (Kopecký, 2007).

Další možnosti jak získat hodnoty f_{st} pro pilové kotouče jsou pomocí speciálního software CSAW (Schrajer, 1993), pro většinu běžně používaných rozměrů a tvarů kotoučů jsou také součástí ruské normy (Stachiev, 1989) nebo z numerických modelů počítaných pomocí metody konečných prvků (Orlowski et al., 2007).

Nejpřesnější stanovení vlastní statické frekvence se však provádí experimentálně. Děje se pomocí tzv. impulsně budících testů (Orlowski et al., 2007). Princip testů a postup stanovení frekvence si můžeme popsat na příkladu experimentální měřicí aparatury pro přesné určování statických frekvencí vlastních kmitů kotoučů sestavenou Siklienka a Svoreň (1997) znázorněná a pospaná na obrázku č. 17.



1 – měnič kmitočtu FG 509, 2 – zesilovač QSA 260, 3 – osciloskop GoldStar S-9020P,
4 – elektromagnetický budič, 5 – indukční snímač kmitů, 6 – stojan, 7 – pilový kotouč, 8 –
příruba, 9 – matice

Obr. 17 Aparatura pro zjišťování statických rezonančních kmitočtů (Kopecký, 2007)

Působíme-li na neotáčející se pilový kotouč upnutý v horizontální poloze s definovaným průměrem přírub ($1/3D$) elektromagnetem v určité, libovolně zvolené frekvenci, kotouč se rozkmitá a vychyluje se z původní polohy o určitou amplitudu (Prokeš, 1965).

Posypeme-li kotouč jemnozrnným materiálem (jemný písek nebo krupice) a zvyšujeme-li plynule frekvenci chvění, pozorujeme, že jemný písek, kterým byl kotouč posypán, při určité frekvenci vlivem silného rozkmitání kotouče se vytvoří obrazec tzv. Chladného obrazec. Místa, kde se písek nahromadil, jsou místa klidu - uzlové průměry $k=1, 2, 3, \dots$, ostatní místa při dané frekvenci intenzivně kmitají frekvencí, již nazýváme statickou rezonanční frekvencí vlastních kmitů f_{st} a můžeme ji zaznamenat (Siklienka a Svoreň, 1997).



Obr. 18 Chladného obrazec ($k=3$), (Peršín 2006)

Nishio a Marui (1996) uvádějí výraz (6) pro průhyb w v bodě P staticky kmitajícího kotouče daného poloměrem r , v úhlu natočení φ a v uzlovém průměru k . S grafickým znázorněním na obrázku č. 19.

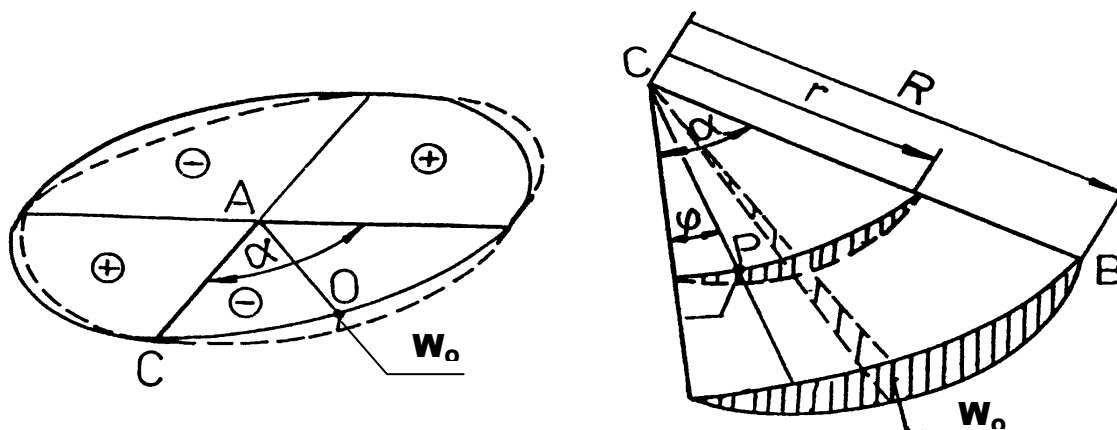
$$w(r, \varphi, t) = f(r, \varphi) \cdot \sin k\varphi \cdot \cos 2\pi \cdot f_{st} \cdot t \quad [\text{m}] \quad (6)$$

kde: $w(r, \varphi, t)$ – průhyb pilového kotouče, vyjádřený v polárním souřadném systému (r, φ) v čase t

w_0 – průhyb výchylka bodu O

$f(r, \varphi)$ – tvarová funkce, která vyjadřuje výchylku bodu P v polárním souřadném systému (r, φ)

f_{st} – frekvence vlastních tvarů kmitů stojícího kotouče.



Obr. 19 Průhyb disku kotouče (Javorek, 2006)

Při otáčení se kotouče s frekvencí n [min^{-1}], je možné pro úhel natočení φ použít rovnici (7):

$$\varphi = \frac{2\pi n t}{60} \quad [\text{rad}] \quad (7)$$

Z teorie kmitání vyplývá, že v každém kotouči se šíří dvě vlny. Tyto vlny jsou tzv. protisměrné, to znamená, že máme dopředu běžící vlnu a dozadu běžící vlnu. Celkový průhyb kotouče je dán složením průhybů od dopředu a dozadu postupující vlny dosazením do rovnice (6) a úpravou pomocí součinu trigonometrických funkcí $\sin\alpha \cdot \cos\beta$ je možné rovnici (6) přepsat do tvaru (8):

$$w(r, \varphi, t) = \frac{f(r, \varphi)}{2} \cdot \sin 2\pi \left(f_{st} + \frac{k \cdot n}{60} \right) \cdot t - \frac{f(r, \varphi)}{2} \cdot \sin 2\pi \left(f_{st} - \frac{k \cdot n}{60} \right) \cdot t \quad (8)$$

První člen rovnice (8) představuje vlnu s frekvencí rotace $60f_{st}/k$ [min^{-1}] postupující vpřed, tj. ve stejném směru jako je směr točení pilového kotouče. Druhý člen rovnice (8) představuje vlnu s frekvencí rotace $60f_{st}/k$ [min^{-1}] postupující vzad, tj. proti směru otáčení pilového kotouče. Tyto vlny jsou v odborné literatuře označovány jako „dopředu běžící vlna“ a „dozadu běžící vlna“ (Siklienka a Svoreň 1997, Stachiev 1989, Kopecký 2007).

Jak již bylo řečeno výše, kmitání stojícího kotouče, si lze představit jako složení dvou běžících vln, šířících se po obvodě disku stejnými úhlovými rychlostmi ω_{vt} , navzájem proti sobě matematicky vyjádřeno Kopecký (2007):



$$\omega_{vl} = f_{st} \cdot \frac{2\pi}{k} \quad [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (9)$$

Odtud můžeme frekvence otáčení postupujících vln statického kmitání vyjádřit jako

$$f_{vl} = \frac{\omega_{vl}}{2\pi} = \frac{f_{st}}{k} \quad [\text{Hz}] \quad (10)$$

přičemž: k ... počet vln po obvodě kotouče (uzlové průměry k).

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 $f_d(n)$ (Orlowski et al., 2007). Má-li disk kotouče obvodovou rychlost odpovídající frekvenci f_n , pak se tato frekvence přičítá k rychlosti vlny postupující vpřed a odečítá od rychlosti vlny postupující vzad (11)

$$f_1 = \frac{f_d}{k} + f_n \quad f_2 = \frac{f_d}{k} - f_n \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

kde: f_d ... vlastní dynamická frekvence kmitů kotouče

f_n ... frekvence otáčení pilového kotouče

Hodnoty frekvencí odpovídající běžícím vlnám pro konkrétní uzlové průměry k se potom určí v souladu s rovnicemi (10) a (11) jako součin frekvence otáčení dané vlny a počtu vln po obvodě kotouče - uzlových průměrů k . Frekvence otáčení postupující vlny vpřed f_v a dozadu postupující vlny f_z je možné vyjádřit podle vztahů (12) a (13) (Kopecký 2007):

$$f_v = k \cdot f_1 = f_d + k \cdot f_n \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

a analogicky pro frekvenci dozadu postupující vlny

$$f_z = k \cdot f_2 = f_d - k \cdot f_n \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

kde: f_v ... dynamická frekvence kmitů kotouče vlny postupující vpřed

f_z ... dynamická frekvence kmitů kotouče vlny postupující vzad.

Frekvence otáčení pilového kotouče si můžeme napsat jako:

$$f_n = \frac{n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (14)$$



Úpravou vztahů (12) a (13) s vyjádřením si frekvence otáčení f_n pomocí vztahu (14) dostane tvar pro výpočet frekvence dopředu postupující vlny f_v a dozadu postupující vlny f_z , který uvádí shodně Stachiev (1989) Schrajjer (1993) a další:

$$f_v = f_d(n) + \frac{k \cdot n}{60} \quad \text{a} \quad f_z = f_d(n) - \frac{k \cdot n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (15)$$

Vlastní dynamickou frekvenci kmitání rotujícího kotouče $f_d(n)$ je možné vypočítat ze vztahu (16) (Kopecký 2007). V důsledku odstředivé síly se vlastní dynamická frekvence zvyšuje kvadraticky s rostoucími pracovními otáčkami pilového kotouče. Bez znalosti statického rezonančního kmitočtu f_{st} ji není možné určit.

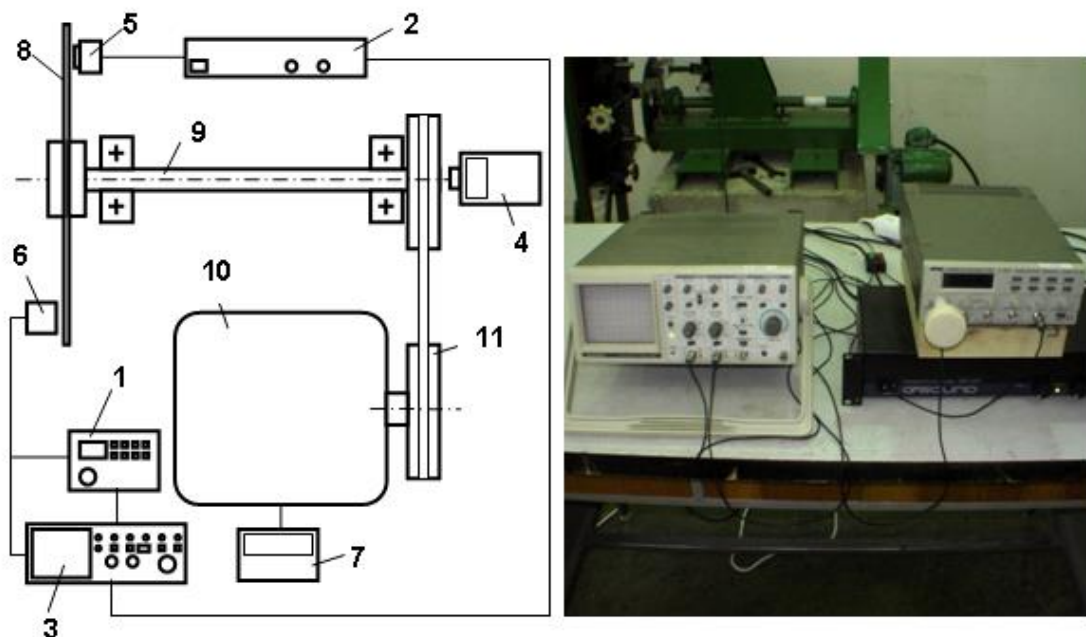
$$f_d(n) = \sqrt{f_{st}^2 + \lambda \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (16)$$

kde λ ... součinitel odstředivé síly

λ někdy uváděná jako K (Orlowski 2007) je bezrozměrná hodnota nezávislá na rychlosti otáčení. Hodnoty K nalezneme v některých literaturách jako např. (Nishio a Marui, 1996; Stachiev 1989). Ve zmíněných pramenech je však nedostatek údajů hodnoty K parametru pro některé druhy moderních a složitějších pilových kotoučů. Součinitel odstředivé síly je možné určit buď teoreticky např. z přibližného empirického vztahu (17) nebo přesněji pomocí experimentálního měření na speciálních zkušebních stendu sestaveném v dílnách a laboratořích TU Zvolen viz obrázek č.20 (Siklienka a Svoreň, 1997).

$$\lambda \cong \frac{1-\nu}{4} \cdot k^2 + \frac{3+\nu}{4} \cdot k \quad [-] \quad (17)$$

kde ν ... Poissonova konstanta ($\nu = 0,3$)

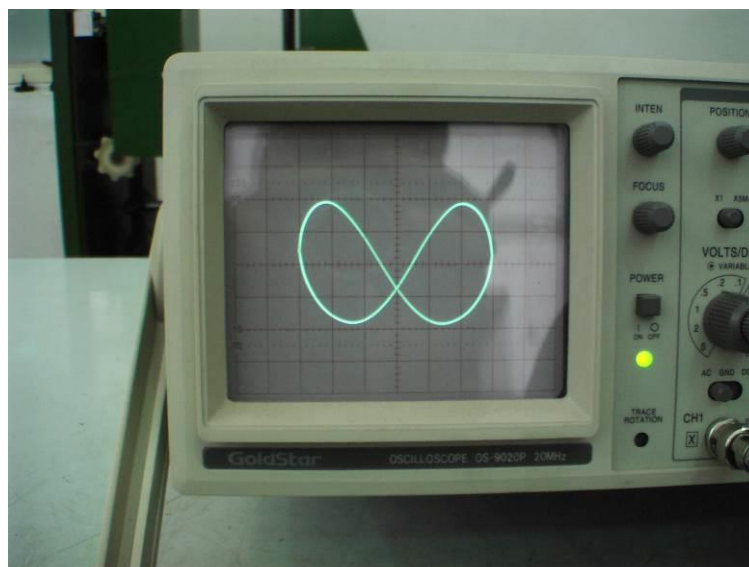


1 – měnič kmitočtu FG 509, 2 – zesilovač QSA 260, 3 – osciloskop GoldStar S-9020P, 4 – bezkontaktní otáčkoměr, 5 – elektromagnetický budič, 6 – indukční snímač kmitů, 7 – frekvenční měnič, 8 – pilový kotouč, 9 – hřídel, 10 – elektromotor, 11 – řemenový převod

Obr. 20 Měřicí aparatura pro měření frekvence dozadu postupující vlny rotujících pilových kotoučů (Siklienka a Svoreň, 1997)

Z teorie skládání různosměrných kmitů je známo, že výchylka bodu je podle principu superpozice v každém okamžiku vektorovým součtem jednotlivých výchylek. Při skládání dvou lineárních kmitů nesouměřitelných period pokryje stopa bodu část roviny hustou sítí proběhnuté dráhy, připomínající jemnou tkaninu. Když se podaří přesně vyladit oba kmitů tak, aby jejich periody a amplitudy byly v poměru malých čísel ($k=0,1,2,\dots$) zobrazí se nám na obrazovce oscilografu uzavřené křivky podobající se mašličce zvané, jako Lissajousovy obrazce viz obrázek. č. 21. Vytvoření obrazce je signálem pro záznam frekvence dozadu postupující vlny pro konkrétní uzlový průměr k (Kopecký 2007). Protože známe frekvence otáčení f_n , dosazením do rovnice (13) zjistíme dynamickou rezonanční frekvenci vlastních kmitů f_d . Společně s hodnotou vlastní statické frekvence f_{st} dosadíme do rovnice (16) odkud si snadno vyjádříme součinitel odstředivé síly λ .

Dle úpravy kotouč a příslušného uzlového průměr $k = 1,2,3\dots$ nabývá hodnot v rozmezí od $\lambda = 1,0 -4,0$.



Obr. 21 Lissajousův obrazec (Kopecký, 2007)

Ze vztahu (13) pro dozadu postupující vlnu f_z je patrné, že jakmile se frekvence otáčení pilového kotouče f_n začne vyrovnávat dynamické frekvenci vlastních kmitů kotouče $f_d(n)$ při konkrétním počtu uzlových průměrů k , bude frekvence dozadu postupující vlny rovná nule $f_z=0$. To má za následek vznik vlny nehybné, dozadu běžící vlna se jeví v prostoru jakoby stálá, kotouč se stane labilním a k jeho vychýlení postačí velmi nepatrná síla. Kotouč dosahuje maximálních hodnot amplitudy kmitů. Tato mezní frekvence dozadu běžící vlny se nazývá kritickou frekvencí otáčení a počet otáček, při nichž k tomuto jevu dojde, kritickými otáčkami. Hrozí nebezpečí zborcení a následné roztržení kotouče, řezání je tudíž nemožné. Kritické otáčky kotouče je možné vyjádřit úpravou vztahu (13) (Kopecký 2007) při $f_z = 0$ platí $f_d(n) = k \cdot f_n$ jsou pak kritické otáčky kotouče:

$$n_k = \frac{60 \cdot f_d(n)}{k} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (18)$$

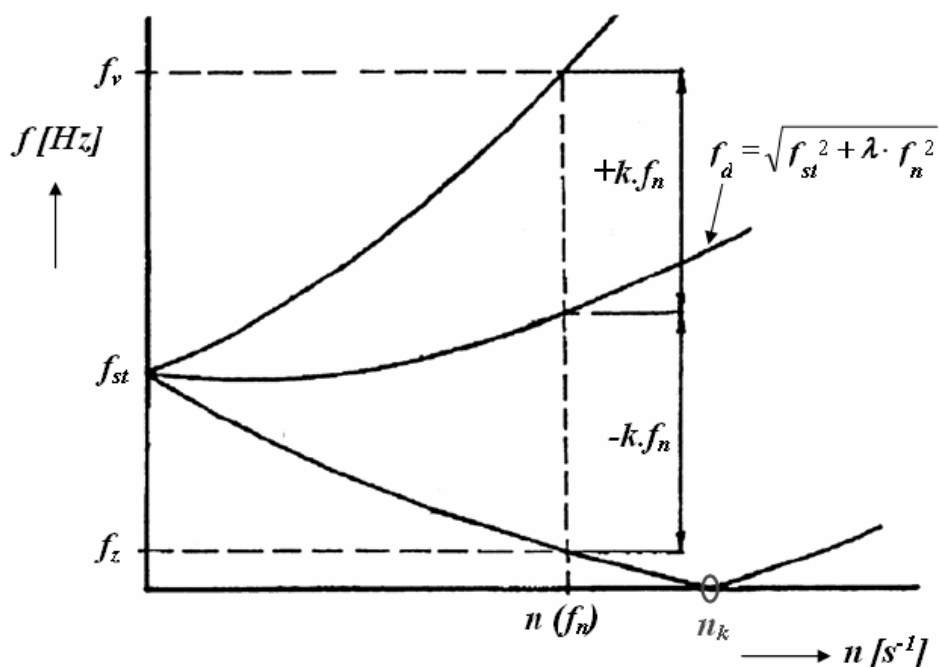
Dosazením vztahu (16) do rovnice (18) pak dostaneme známý vztah (19), který pro nejnižší kritické otáčky uvádí ve svých pracích Nishio a Marui (1996), Siklienka a Svoreň (1997) Stachiev (1989), Kopecký (2007):

$$n_k = \frac{60 \cdot f_{st}}{\sqrt{k^2 - \lambda}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (19)$$



Kritické otáčky se počítají pro uzlové průměry $k=2,3,4,\dots$. V uzlových průměrech $k=0$ a $k=1$ kritické otáčky nemohou nastat – neexistují. V praxi jsou důležité nejnižší kritické otáčky pro uzlový průměr $k=2,3$. Je nutné zmínit, že hodnotu otáček výrazným způsobem ovlivňuje také poměr mezi velikostí příruby a průměrem kotouče (Stachiev 1989).

Podmínku stojaté vlny a dosažení kritických otáček n_k si můžeme zobrazit graficky obr. č. 22 podle (Szymani a Mote, 1979).



Obr. 22 Podmínka stojaté vlny a dosažení kritických otáček (Szymani a Mote, 1979)

Labilní stav kotouče je vázán na širší oblast otáček nejen na kritický počet. K růstu amplitud kmitání přispívají i vyšší harmonické rezonanční kmitočty tzv. rezonanční otáčky pro různé uzlové průměry, které se vyjádří podle vztahu (Kopecký, 2007; Siklienka a Svoreň, 1997):

$$n_r = \frac{60 \cdot f_{st}}{\sqrt{(k+Z)^2 - \lambda}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (20)$$

kde: Z ... vyšší harmonická ($Z = 1,2,3 \dots$).

Existují dolní případně horní rezonanční otáčky, které snižují tuhost kotouče se všemi negativními důsledky na zahřívání kotouče a zhoršování jakosti řezané plochy.

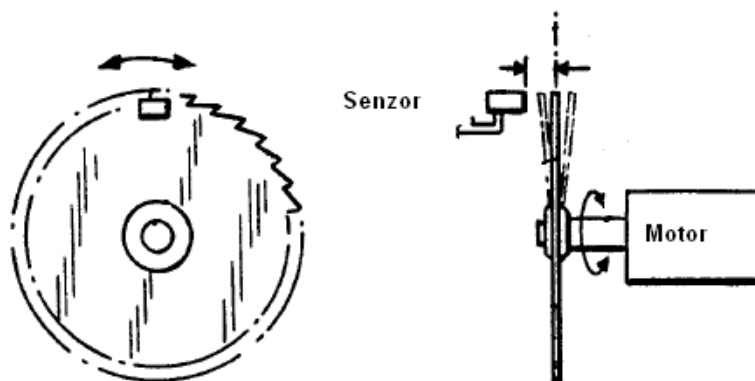


Předpokládá se, že více uzlové tvary kmitání více ovlivňují hlučnost kotouče než málo uzlové $k=1$ až 3, které mají podstatný vliv na tuhost a stabilitu kotouče (Kopecký 2007).

Doporučené otáčky pro řezání se podle literatury Lisičan (1996) obvykle stanovují jako 60 % hodnoty otáček kritických.

Exaktnější metodou, kterou lze poměrně přesně určovat průhyb kotouče ($\pm 0,01\text{mm}$) je přímé měření amplitud kmitů disku kotouče.

Výhodou této metody je experimentální určení amplitud kmitů disku nebo větve kotouče přímo na pile (na zkušebním standu) se zahrnutím všech vlivů, které ovlivňují vlastní kmitání kotouče a co nejméně se podobá skutečným podmínkám v běžných provezech. Zkušební stendy mají různou podobu, viz vědecké práce např. Orłowski (2005), Stachiev (2003), Li et al. (1992), Redcliffe a Mote (1983). Princip se však neliší, spočívá v umístění snímače kolmo na plochu pilového kotouče v určité vzdálenosti a snímání amplitudy kmitů (měnící se vzdálenost) pilového kotouče při regulovaném otáčení pilovým kotoučem (Li et al.;1992).

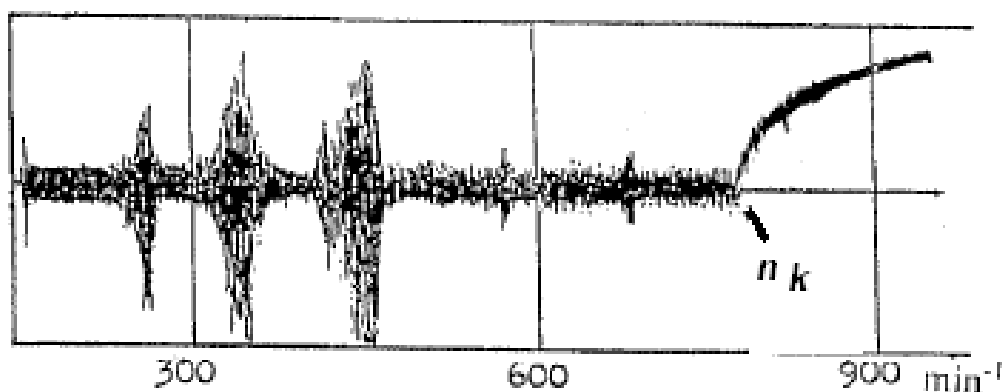


Obr. 23 Princip metody přímého měření (Li et al.1992)

Jako vhodné snímací zařízení k měření kmitání pilových kotoučů slouží indukční snímač využívající vířivých proudů (Redcliffe a Mote 1983). Princip zařízení je následující: cívka je pevně uložena v určité vzdálenosti od elektricky vodivé, ale nemagnetické desky. Magnetické pole cívky prochází částečně deskou, ve které vznikají vířivé proudy. Ty vyvolávají magnetické pole působící proti změně, která je vyvolala. Zmenšují výslednou intenzitu magnetického pole a tím i indukčnost cívky. Výsledná změna je závislá na vzdálenosti a tloušťce desky (mimo frekvence napájecího proudu a materiálu desky). Jejich charakteristika je výrazně nelineární (Janák, 2003). Další možností měření kmitání je použití laserových snímačů (Orłowski 2005).



Z teorie kmitání a metod výše popsaných jsem schopni přesně určit kmitání, rezonanční, kritické a optimální otáčky početně. Přímým měřením jsme schopni objevit pásma zvýšených vibrací při různých otáčkách kotouče, bohužel nejsme schopni ale určit tvar kmitu. Ke zpracování snímaných dat se užívá speciální software, kterým jsou změřená data transformována a zobrazena v grafické formě s on-line záznamem. Jak můžeme vidět např. v obr. č. 24 převzatého z Stachiev (2003), lze nalézt taková pásma otáček, kdy kotouče vykazují velkou amplitudu kmitu, jsou tedy labilní a tento jev můžeme přisuzovat rezonančním otáčkám. V grafu je též dobře patrné chování kotouče v kritických otáčkách. Optimální otáčky jsou v místech, kdy je amplituda kmitání pilového kotouče co nejnižší a řezné podmínky jsou tedy optimální.



Obr. 24 Průběh vibrací v závislosti na otáčkách (Stachiev 2003)

2.4 Úpravy pilových kotoučů s ohledem na snížení kmitání a hygienických parametrů

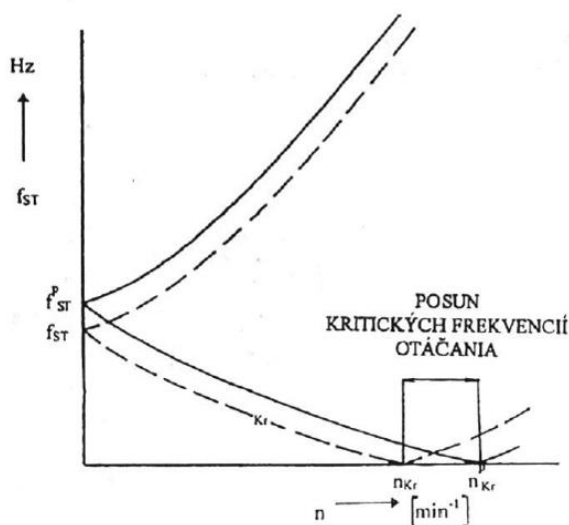
Pro správné chování pilového kotouče v procesu obrábění vedly skutečnosti z praxe výrobce k jednotlivým konstrukčním opatřením, aby se nežádoucí jevy při obrábění snížily či dokonce odstranily.

2.4.1 Úprava předpětí

Podmínkou správného řezání je dostatečná axiální tuhost kotouče. Výsledné napětí v tlaku na okraji kotouče, které je hlavním zdrojem nestability, způsobuje ztrátu tuhosti a kotouč při řezání zabíhá. Úpravou předpětí se nepříznivý vliv výsledného napětí v tlaku vyrovnává. Tato úprava se provádí dvěma možnými postupy. Starší metodou pomocí úderů kladivem. Novější metoda je pomocí válcování. Válcování je



mechanický proces prováděný na speciálních válcovacích strojích, při kterém se pilový kotouč lokálně stlačuje mezi dvěma otáčejícími se tlačnými kladkami válcovací silou, v důsledku otáčení vznikají mělké proužky, plastické tenčení materiálu, které mají za úkol příznivě měnit napětí kotouče. V důsledku deformací je vnější prstenec s řeznou částí kotouče napínán a vnitřní část kotouče stlačována. Tento efekt je výhodný proti účinkům tangenciálních (tlakových) napětí, vznikajících zahříváním pilového kotouče.



Obr. 25 Posun statické frekvence a kritických otáček pilového kotouče v důsledku předpětí válcováním (Siklienka a Svoreň, 1997)

2.4.2 Úprava dilatačními drážkami

Tyto laserem vypálené obvodové radiální drážky (obr. č. 26) směřují od okrajové části ke středu těla pilového kotouče. Hloubka těchto drážek je většinou 1/10 průměru kotouče (Prokeš, 1985). Přerušením okrajové části kotouče se opět snižují tangenciální napětí vznikající v okrajových částech kotouče. Nedochozí k nadměrnému vlnění věnce kotouče a snižují se tím vibrace, kroucení a tím i hlučnost (Kopecký et al., 2010). Svoreň a Javorek (2006) uvádějí při použití měděných nýtů na konci dilatačních drážek posunutí hranice kritických otáček do vyšších hodnot. Měděný nýt má jinou roztažnost a jiné mechanické vlastnosti a tím dochází ke snížení vibrací pilových kotoučů. Zvyšuje se i koeficient odstředivé síly. Hlučnost je však za použití měděných nýtů vyšší, než u dilatačních drážek bez nýtů, což je nežádoucí.



Obr. 26 Radiální drážka v tělese pilového kotouče (www.pilana.cz)

2.4.3 Odhlučňovací drážky a otvory v těle kotouče

Odhlučňovací drážka viz obr. č. 27 je moderní metoda pro snížení hlučnosti u pilových kotoučů s SK plátky. Zpravidla každý výrobce používá různý sobě vlastní tvar a počet odhlučňovacích drážek v tělese kotouče. U asymetrických pilových kotoučů, určených pro řezání aglomerovaných materiálů, bylo experimentálním měřením zjištěno snížení kmitání kotouče a pokles hladiny hluku až o 8 dB. (Siklienka a Svoreň, 1997).

Pro zvýšení tuhosti pilových kotoučů se jako další z možných metod používá vypálení různých otvorů do těla pilového kotouče. Snížením napětí v kotouči se kotouč zklidní a sníží se jeho vibrace potažmo i hlučnost. Prokeš (1985) uvádí snížení hluku při pracovních otáčkách pilového kotouče o 3 až 5 dB. Otvory se do těla pilového kotouče vypalují laserem při výrobě tvaru těla kotouče. U těchto otvorů je důležitý nejen rozměr, ale také jejich tvar a umístění. Stachiev (1989) dokazuje, že na velikost vibrační má vliv nejenom tvar otvoru, počet, ale také jeho úhel odklonu osy tvaru otvoru od osy pilového kotouče, čím je tento úhel větší, tím nižší jsou vibrace pilového kotouče.



Obr. 27 Drážky a otvory v těle kotouče (www.hobbyhorazdovice.cz, www.pilana.cz)



2.4.4 Plastické povlaky na těle pilového kotouče

Někteří výrobci nástrojů používají při výrobě pilových kotoučů jako finální úpravu nanesení plastického povlaku. Tento plastický povlak v tloušťce asi kolem 0,02 mm až 0,2 mm slouží ke snížení přilnavosti nečistot na tělo kotouče, díky tomu lze dosáhnout mimořádně čistých řezných hran. Další z pozitivních vlastností těchto povlaků je snížení hladiny hluku. Při chodu naprázdno je toto snížení asi o 15 dB a při řezu až o 7 dB (Bohdálek, 2010). Povlak dále chrání pilový kotouč před korozí a udržuje kotouč chladný.

2.4.5 Lepené desky a fólie na tělo pilového kotouče

Lepené desky a fólie jsou typickým protihlukovým opatřením. Lepené desky na tělo pilového kotouče se skládají ze dvou vrstev, vnitřní zpravidla korková a vnější z nalepeného ocelového plechu. Prokázané snížení hladiny zvuku je až 10 dB při chodu na prázdno, při řezání je toto snížení hlučnosti 6 až 8 dB (Prokeš, 1985). Tlakem upínací příruby by mohlo dojít k uvolnění lepidla a k odklonu tlumicí desky. Proto se používá tlumicí deska ve tvaru mezikruží až nad upínací přírubou.

Kromě jednostranné tlumicí desky je možné používat nalepení kovových fólií. Tyto kovové fólie jsou tlusté 0,1 mm a nalepeny pod patu pilového zubu. Kotoučem s nalepenými foliemi se dosáhne snížení hladiny hluku při řezání asi o 2 až 6 dB a při chodu naprázdno asi o 8 dB (Bohdálek, 2010).

2.4.6 Upínací příruby a přidavné disky

Příruba jako upínací zařízení musí plnit dvě základní funkce: Za prvé - přenos výkonu z pohonného hřídele na pilový kotouč a umožnění řezání (zabezpečení kotouče proti přesmyknutí - průměr přírub a sílu přitlaku na kotouč je potřebné stanovit); Za druhé - omezení axiálního (příčného) kmitání kotouče. Všeobecně platí zásada, že s větším průměrem příruby se zvyšuje i axiální tuhost samotného pilového kotouče díky uchycení mezi dvěma pevnými plochami. Průměr příruby by se měl pohybovat v rozmezí 0,25 až 0,3 násobku průměru pilového kotouče.

Přidavné disky jsou ocelové disky pro zvětšení průměru příruby. Tyto přidavné disky stabilizují otáčející se kotouč a tím i hlučnost kotouče. Čím větší je upínací plocha, tím klidnější a stabilnější jsou pak pilové kotouče.



2.4.7 Vliv teploty pilového kotouče

Při řezání pilovými kotouči vzniká v důsledku tření teplo. Část tohoto tepla se přijímá okolním vzduchem a část řezaným materiálem. Teplo přijaté pilovým kotoučem se odvádí ve směru otáčení a přitom se současně odevzdává okolnímu vzduchu. Tímto dějem dochází k ohřívání zubové zóny pilového kotouče více než ohřívání jeho středové části. Vliv různých faktorů způsobuje nerovnoměrné zahřívání pilového kotouče, což způsobuje vnitřní napětí. V zubové zóně jsou tato napětí tlaková a ve středové zóně pilového kotouče tahová. Změna vnitřních napětí v pilovém kotouči způsobuje posunutí statické frekvence pilového kotouče do nižších hodnot jako důsledek nerovnoměrného zahřívání, což znamená vyšší nestabilitu pilového kotouče při nižších vlastních frekvencích pilového kotouče (Švejda, 2008).

2.5 Účinky vibrací pilového kotouče na hlučnost

Vibracemi se rozumí kmitavé (tedy periodické) působení těles. Hluk a chvění spolu úzce souvisí. Vibrace člověk vnímá pomocí centrální nervové soustavy a ty jsou pak přenášeny do mozku, kde je člověk vnímá jako subjektivní vjem. Vibrace o nižších kmitočtech jsou vnímány také receptory ve šlachách, kloubech a svalech lidského těla. Vyšší vibrace jsou vnímány i pomocí měkkých tkání a kůží. Vibrace u člověka ovlivňují jeho psychiku, ale také jeho fyziologický stav.

Zvuk je podélné mechanické vlnění, je vytvářen chvěním zdroje vibrací. Toto chvění je přenášeno na sousední molekuly vzduchu. Přitom vznikají zhuštěné a zředěné oblasti vzduchu, které se od zdroje šíří jako zvuková vlna. Počet těchto kmitů za sekundu se označuje jako frekvence tónu. Jeho frekvence je v rozmezí asi 20 Hz – 20 kHz. Mechanické vlnění s frekvencí $f < 20 \text{ Hz} \Rightarrow \text{INFRAZVUK}$, s frekvencí $f > 20 \text{ kHz} \Rightarrow \text{ULTRAZVUK}$. Vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají ve stejné fázi, je vlnová délka. Jednotkou frekvence je jeden Hertz (Hz). Více tónů dohromady označujeme jako zvuk. Zvuk se šíří v prostředí plynném, kapalném i pevném, ale musí toto prostředí být pro zvuk vodivé. Ve vzduchu se zvuk šíří prostorově všemi směry. Při šíření zvukového vlnění vznikají oblasti se zhuštěním a se zředěním, které znamenají změnu tlaku vzduchu. Akustický tlak je potom hodnota těchto změn vztažená k barometrickému tlaku.



Hladina akustického tlaku (dB)

$$B = 2 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad (21)$$

kde: p je akustický tlak
 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa – nejnižší hodnota akustického tlaku působícího na ušní bubínek

Účinky hluku na člověka závisí na jeho individuálním fyzickém a psychickém aktuálním stavu. Hluk má především vliv na sluchový orgán, na nervovou soustavu a psychiku člověka. Hranice působení hladin hluku:

- větší jak 30 dB negativně působí na nervovou soustavu
- více jak 35 dB během spánku negativně působí na psychický stav člověka a jeho náladovost
- nad 45 dB dochází k poruchám během spánku a ke zdravotním problémům spojených s nimi
- hluk vyšší jak 55 dB negativně ovlivňuje vegetativní systém. Některé zdroje uvádějí, že u jedinců s kardiovaskulárními nemocemi může dojít k zhoršení jejich stavu a v krajním případě až k ohrožení jejich života (zvýšení krevního tlaku a pulsu, snížení pohyblivosti a žaludečního svalů a tím trávící problémy, zvýšení svalového napětí v těle atd.).
- více než 75 dB škodí zdraví člověka
- nad 100 dB je hluk vnímán jako bolest
- nad 140 dB dochází při jednorázovém působení i k sluchovému poškození, protržení bubínku a k nevratnému poškození převodních kůstek. Může dojít až k poškození nervových drah v mozku vlivem hluku.
- nad 150 dB dochází k vibracím v dutině hrudní
- nad 160 dB dochází k trhání plicní alveoly

Hygienické požadavky v oblasti hlučnosti a jeho účinků na zdraví člověka jsou vymezeny v hygienickém předpisu ČR § 30 až 34 zákona č. 258/2000 Sb. Zákon o ochraně zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, který v uvedených paragrafech stanovuje hygienické limity hluku a vibrací veřejných prostorů, budov a v neposlední míře i pracovního prostředí.



2.6 Charakteristika dřevního odpadu a jeho účinky na člověka

Při řezání dřeva kotoučovými pilami se uvádí vznik středně hrubé a hrubé frakce (0,5 mm a více), ale i v tomto odpadu se nevyhnutelně nacházejí jemnější částice. Charakter prachových částic závisí jak na druhu nástroje, tak na vlhkosti dřeva, typu nástroje (např. tvar zubu), ostrosti nástroje a řezné rychlosti nástroje vztažené k posunové rychlosti obrobku.

Problematika vzniku dřevního prachu při obrábění se zabývají ve svých pracích (Dzurenda, 2005), (Kos a Lučič, 2002), (Očkajová a Beljaková, 2004). (Dzurenda, 2007) uvádí, že dřevní prach jako sypká dřevní hmota je charakteristický tím, že jednotlivé částice (třísky) nevyplňují celý objem prostoru, v kterém se nachází. Mezi částicemi se nachází vzduch. Proto se sypká dřevní hmota řadí do kategorie disperze. Z důvodů, že částice dřevního prachu mají různou velikost, označuje se tato soustava za polydisperzní. Stanovení disperzity prachu je důležitou úlohou, neboť znalost rozložení částic podle velikostí je z technického hlediska velmi důležitá. Rozhoduje o volbě a dimenzování odlučovačů prachu, o volbě odsávacích a dopravních rychlostí, o konstrukci sacích nástavců a zákrytů a o rozptylu prachu ve venkovní atmosféře (Kopecký, Rousek 2007).

Dřevní prach může způsobovat u člověka dráždění horních cest dýchacích, očních spojivek nebo sliznic, případně i kožní onemocnění. Hlavní a nejčastější cestou vstupu prachu do lidského organismu jsou dýchací cesty. Hrubé prachové částice jsou zadržovány v horních cestách. Pohybem řasinkového epitelu, kterým je vystlána nosní dutina, se dostávají s hlenem do nosohltanu a jsou spolknuty, vykašlány nebo vykýchány. Větší částice postupně v dýchacích cestách sedimentují (horní cesty dýchací zachytí většinu částic větších než $5 \mu\text{m}$), menší částice pronikají hlouběji. Se zmenšující se velikostí částic pravděpodobnost průchodu do plicních sklípků stoupá, pro částice velikosti $3 \mu\text{m}$ je tato pravděpodobnost vyšší než 50 %. Frakce prachu tvořená malými částicemi, která je vdechnuta až do plic je z hlediska zdravotního rizika nejnebezpečnější (Hollerová, 2007).

V případě řezání aglomerovaných materiálů je ovšem nezanedbatelný nárůst jemného prachu pod $100 \mu\text{m}$. To vyplývá i z výsledků (Očkajová a Beljaková 2004), protože tyto částice tvoří zhruba jednu třetinu vzniklého odpadu. Svůj podíl na tom má zejména nástroj, ale i struktura aglomerovaného materiálu. Zuby pilových kotoučů pro



formátování mají poměrně malý úhel čela. Při malých úhlech čela se v důsledku toho tvořící se tříska velmi ohýbá a značně drobí, což právě zvyšuje podíl jemných prachových částic.

Dzurenda (2007) dále uvádí, že prach z tvrdých dřevin (jako jsou buk a dub), patří podle německých výzkumných prací, mezi škodlivé látky s důvodným podezřením na karcinogenní účinky sliznic nosních dutin.



3 METODIKA PRÁCE

Těžiště disertační práce je zaměřeno na hodnocení vlivu konstrukčních úprav prototypových pilových kotoučů na nestabilní stavy (rezonanční a kritické otáčky), hlučnost, kvalitu povrchu řezné spáry a prašnost při řezání. Určení rezonančních a kritických otáček prototypových kotoučů pomocí experimentálních metod (kap. 2.3) je nezbytným předpokladem, pro další provádění experimentů, nicméně v práci je popsán nový experimentální přístup při určování kritických a rezonančních otáček pomocí fázově posunutých snímačů vibrací.

Aby výsledky byly relevantní, posuzovala se i tzv. statická házivost testovaných kotoučů, což je odklon těla kotouče od pomyslné roviny při chodu naprázdno. Měření probíhalo záměrně v nízkých otáčkách (80 min^{-1}), kde kmitání kotouče není ovlivněno žádnými silami, tepelným namáháním ani napětím v kotouči. Výrobci pilových kotoučů uvádí, že maximální odchylka by neměla být větší jak 0,1 mm.

3.1 Použité metody

Jak už z podnadpisu vyplývá, jedná se o několik druhů odlišných metod vyhodnocování různých parametrů. Proto jsou níže popsány a pro přehlednost rozděleny do podskupin, kde je mezi nimi do určité míry daná součinnost.

3.1.1 Metodika měření vibrací

Důležitým krokem této části práce je stanovení řezných podmínek, které představují stabilní i nestabilní stavy zkoušených pilových kotoučů zjištěných vlastním měřením vibrací v závislosti na otáčkách, od kterých se následně odvíjí i další metodiky této disertační práce.

První metodikou zjištění zmíněných rezonančních a kritických otáček je experimentem získaná statická frekvence (Chladného obrazce) daného pilového kotouče a k ní příslušný odstředivý součinitel λ pro uzlový průměr $k = 1, 2, 3, \dots$. Z toho dle rovnice (19) vypočítány kritické otáčky pro příslušný uzlový průměr. Touto problematikou jsem se intenzivně zabýval na TU Zvolen, kde jsem byl na studijním



pobytu v rámci programu CEEPUS. Tato metodika je již popsána v kapitole 2.3 a proto ji zde dále znovu neuvádím.

Přímé měření amplitud kmitů disku kotouče neboli určování rezonančních otáček, bylo provedeno také experimentálně na zkušebním Stendu (popsaném v samostatné kapitole). Tato dílčí metodika pojednává o naměření a zaznamenání průběhu vibrací pilového kotouče v otáčkovém pásmu od 2000 do 6000 min⁻¹, to představuje běžný rozsah využívaných otáček u všech vyráběných dřevoobráběcích pil a také konstrukčních možností daných tímto způsobem obrábění. Z průběhu amplitud vibrací lze snadno vysledovat oblast zvýšených vibrací a naopak ustálený chod. Měřená data vibrací se průběžně zobrazují ve formě grafu v programovém prostředí Conmes Spider. Z tohoto programu, lze data exportovat do běžně přístupných uživatelských programů a dále zpracovat a vyhodnocovat.

Nově navrhovaná metoda měření vibrací s fázově posunutými snímači spočívá v získání podrobnějších informací o tvarech kmitání. To nám poskytne data ze dvou měřených míst, které mezi sebou vzájemně porovnáme a vysledujeme, jak se pilový kotouč deformuje v důsledku šíření dozadu a dopředu jdoucí vlny. Nastavení snímačů s fázovým posunem 180° bohužel nepřinášelo jednoznačné výsledky při určování tvaru kmitů, zejména pro první a druhý uzlový průměr. Proto byly snímače přemístěny k věnci kotouče v rovině pod zuby a navzájem svírajícím úhlem 90°. Toto je také podstatná výhoda současného řešení uspořádání Stendu, díky které lze bez problému změnit polohu snímačů umístěných na masivních magnetických stojáncích.

Při určování rezonančních a kritických otáček pilového kotouče v provozních podmínkách je nezbytné nejprve vyšetřit také vlastní frekvence kmitání f_{st} stojícího disku kotouče $f_n = 0$, pro další propočty. Tady se sama přímo nabízí impulsní rázová metoda, kterou použili ve své práci i Orłowski, Sandak a Tanaka (2007). Takto naměřená data byla podrobena Fourierově transformaci (FFT - Fast Fourier Transform), z níž získáme přirozené frekvence kmitání disku kotouče v jednotlivých uzlových průměrech ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Vzhledem k tomu, že tato metoda měření vibrací fázově posunutými snímači vyžaduje dostatečné „samovybuzení“, bylo přistoupeno k osazením malých přírub na hřídel a použití kotouče s poměrně malou tloušťkou těla vzhledem k jeho průměru. Tyto předpoklady splňuje kotouč K400B firmy Pilana pro velkoplošné formátování, jehož



parametry jsou uvedeny v tabulce č. 3. Tento experiment byl zaměřen pouze na samotné měření vibrací a nedal se zkombinovat s procesem řezání a měření hlučnosti a dalších veličin z důvodu omezených vstupů do sběrnice dat a nedostatku místa pro měření při současném procházejícím obrobku.

3.1.2 Metodika měření hlučnosti

V laboratoři, kde je veškerá zkušební technika, není provedeno žádné odhlučnění ani jiné úpravy, které by mohly zkreslovat měřené hodnoty akustického tlaku. Můžeme konstatovat, že se bude tedy jednat o simulované provozní měření pro vzájemné porovnání hluku jednotlivých kotoučů. Součástí této zkušební soustavy je mimo jiné odsávací zařízení, jehož hluk by mohl eventuálně ovlivňovat naměřené výsledky. Avšak měřením bylo prokázáno, že není nutné provádět korekce na hluk pozadí, protože hladiny hluku při chodu naprázdno celé soustavy bez pilového kotouče činily 77 dB, a při chodu se všemi zkoušenými pilovými kotouči byla hlučnost v rozmezí od 88 do 89 dB. To tedy činí rozdíl 11 dB a více. Pouze pokud je rozdíl hladin akustického tlaku zdroje a pozadí nižší než 10 dB (uvedeno v literatuře Prokeše a Bělohoubka), je nutné provést korekci k získání akustického tlaku měřeného zdroje.

Metodika měření hluku spočívá jednak v zaznamenávání hodnot akustického tlaku v závislosti na pozvolném zvyšování otáček z 2000 až na 6000 min⁻¹ u všech tří pilových kotoučů a na vyhodnocení těchto informací. Tímto je vyřešena problematika hlučnosti pilových kotoučů při chodu na prázdko. Metodika měření hluku při procesu řezání v optimálních otáčkách zástupců měkké (smrk) a tvrdé (buk) dřeviny je takový, že se zaznamená ustálená hodnota hladiny hluku a doplní se do tabulky, odpovídajících řezných podmínek.

Hlukoměr je umístěn ve vzdálenosti 1,5 m od pilového kotouče a ve výšce 1,5 m. Uvedené rozměry vzdálenosti snímače hluku odpovídají tomu, kde se může vyskytovat sluchový orgán člověka při práci na kotoučové pile.

3.1.3 Metodika měření drsnosti povrchu

Další fází experimentu je měření vibrací a momentu za současného řezání měkkého a tvrdého dřeva v optimálních otáčkách a to z důvodu následného hodnocení kvality povrchu. Pro všechny řezy byly z důvodu porovnatelnosti a opakovatelnosti



stanoven stejný posuv na zub s odpovídající střední tloušťkou třísky $h_m = 0,049$ mm při daných otáčkách (zjištěných dle předchozí kapitoly jako optimální). Vzdálenost stolu od vrcholu zubu pilového kotouče byla 34 mm a zvolena byla právě tak, aby byly v záběru vždy 3 zuby vzhledem k tloušťce řezaného materiálu a tudíž byla splněna zásada správného technologického postupu obrábění pilovými kotouči. Při řezech byla vždy nastavena taková míra, aby vznikl odřezek - vzorek (fixem popsán, za jakých podmínek vznikl), na kterém se provede analýza kvality povrchu speciálním zařízením Talysurf (viz obr. 32), který je majetkem Univerzity obrany v Brně. Obrobené povrchy byly hodnoceny základními parametry plochy Sa a SaW a profilu vlnitosti Wa. Naměřené hodnoty 3D a 2D parametrů jsou opět zobrazeny ve formě přehledných grafů a následně okomentovány.

Tabulka 1 Základními parametry plochy Sa, SaW a profilu Wa

Parametry	Označení	Popis
3D parametry plochy	Sa	průměrná aritmetická úchylka základního povrchu
	SaW	průměrná aritmetická úchylka povrchu vlnitosti získaného filtrací ze základního povrchu
2D parametr profilu	Wa	průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti

3.1.4 Metodika měření prašnosti

Jednou z mnoha metod měření prašnosti stroje je přesné měření koncentrace prachu v odsávacím potrubí, kde je v proudu plynu unášen dřevní odpad. Toto měření se také jinak nazývá izokinetický odběr dřevních částic, protože se odběry realizují pomocí tzv. izokinetické sondy umístěné v odsávacím systému. Podmínkou izokinetického odběru je, aby rychlost proudu vzduchu v izokinetické sondě byla stejná jako rychlost proudu vzduchu v místě odběru. Princip takového odběru spočívá v tom, že částice, které „vplouvají“ do sondy putují do cyklonu hrubých částic, kde se usadí. Účinnost cyklonu není 100%, proto je v aparatuře za cyklonem ještě umístěn jemný filtr, který je s přesností na setiny gramu zvážen. Počet řezů byl zvolen tak, aby bylo izokinetickou sondou odebráno nejméně 50 g pro granulometrickou analýzu. Obvyklý počet pro dosažení alespoň tohoto minimálního potřebného množství pilin je v tomto případě cca 20 řezů a více.



Z pohledu prašnosti je bezpředmětné provádět řezání pilovým kotoučem K10 jehož řezná geometrie je totožná s kotoučem K9 a pro hodnocení vlivu rozdílné rozteče nám postačuje pouze kotouč K9. Vzdálenost stolu od vrcholu zubu pilového kotouče byla opět zvolena na 34 mm. To z důvodu aby byly jednak v záběru vždy 3 zuby a také protože takto nastavenou polohou kotouče vůči obrobku vzniká různorodá tříška. Součinnosti otáčení pilového kotouče a posuvu obrobku dochází k postupnému záběru břitu a tak k nárůstu jednak tloušťky třísky ale také k prodloužení její délky. Z hlediska rozboru dřevního odpadu tímto modelem řezání nám vzniká velká rozmanitost tvaru třísky a máme tedy reálnou šanci zastoupení jednotlivých frakcí pro granulometrickou analýzu. Řezy se současným odběrem dřevních částic z odsávacího zřízení se prováděly současně s metodikou pro hodnocení kvality povrchu a hlučnosti při stejných řezných podmínkách.

Pro vyhodnocování velmi jemného prachu je vhodné provést váhovou metodu, kde mezi sebou porovnáme hmotnosti mezi čistým a zaneseným speciálním filtrem ze skelných vláken, jelikož již usazený prach nelze z filtru nikterak preparovat. Další metodou pro hodnocení větších dřevních částic usazených v cyklonu z důvodů různé četnosti, velikosti a tvaru, byla zvolena granulometrická analýza. Tou se zjistí distribuční rozložení jednotlivých frakcí částic dle velikosti ok v sítích (0,1 0,25 0,5 a 1mm). Síta jsou zvážena a poskládána na plném dně vzestupnou řadou. Amplituda vibrační 2 mm a čas síťování 10 min. tvořily nastavené přesívací podmínky na přístroji Retsch AS 200. Výstupem granulometrické analýzy jsou hmotnosti jednotlivých frakcí (rozdíl hmotnosti síta od síta se zachycenými dřevními částicemi) a získaná křivka propadu. Velmi jemné částice, které propadly přesívacím přístrojem až na dno, byla následně provedena mikroskopická analýza jemného prachu. Před vlastním snímáním mikroskopickou kamerou byla provedena tzv. rozměrová kalibrace systému (do systému byly vloženy reálné rozměry zobrazované scény vzhledem k aktuálnímu zobrazovacímu měřítku. Po zaostření expozice byla získaná obrazová data uložena, na kterých máme skutečné fyzické rozměry (délka, šířka) snímaných objektů. K rychlejšímu vyhodnocení uvedených rozměrů byl vypracován speciální podprogram systému NIS, který dokáže kvantifikovat základní morfometrické charakteristiky - průměrnou šířku, délku, cirkularitu, obvod, plochu částice a další.



U každého získaného vzorku jemných částic propadnutých při sítování na dno bylo analyzováno v průměru 5000 částic, které byly následně podrobeny pravděpodobnostní analýze výskytu. Pro pravděpodobnostní analýzu jemného prachu a sypkých materiálů se obecně používá Logaritmicko-normální rozdělení. Vedle standardně používaného Log-normálního zákona pravděpodobnosti je možné pro popis výskytu částic do 100 μm použít univerzální dvouparametrický Weibullův model, který vyhovuje většině případů výskytu náhodné veličiny. Vzhledem k tomu, že parametry Weibullova modelu – parametr tvaru (b) a parametr měřítka (a) jsou pohyblivé, tj. závislé na statistickém rozložení částic, může Weibullův model přejít např. v Gausův ($b=3.43$), log-normální ($b=1.3$), exponenciální ($b=1$) a jiné modely pravděpodobnosti (Kopecký, Mazal, 2005).

S využitím aparátu matematické statistiky, teorie pravděpodobnosti a metod regresní analýzy byly stanoveny parametry Weibullova modelu a následně vypočítány průběhy hustot pravděpodobnosti výskytu jemných prachových částic. Hustota pravděpodobnosti Weibullova modelu byla vypočítána podle známého matematického vztahu:

$$f(x) = \frac{b}{a^b} \cdot x^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad (22)$$

kde: a - parametr měřítka (má rozměr náhodné veličiny)
 b - parametr tvaru (je bezrozměrný)
 x - rozměr částice

3.2 Měřicí aparatura a použitý materiál

3.2.1 Zkušební zařízení

Zkušební stend, jako první popisovaný a nejdůležitější strojní zařízení, je využíván nejen k výzkumným a testovacím pracím, ale také k běžné výuce. Tento zkušební stroj vyobrazený na obrázcích a jednoduchém schématu je strojní zařízení, na kterém lze simulovat skutečné řezání jako na kotoučové pile. Získané výsledky co nejdříve odráží skutečné podmínky v běžném reálném provozu.

Na tomto zařízení lze provádět několik měřících operací na jednou. Jedná se o výchylky pilového kotouče do stran neboli amplitudy kmitání. Dále lze zapisovat do



paměti PC potřebnou energii pro oddělení třísky obráběním (řezný moment a z něj vypočtena řezná síla, podávací síla, hluchnost a otáčky vřetene). Tady již možnosti výzkumného stroje z hlediska měření parametrů procesu řezání končí. Dále lze provádět izokinetické odběry pilin a realizovat následné pokusy v oblasti kvality řezného povrchu.

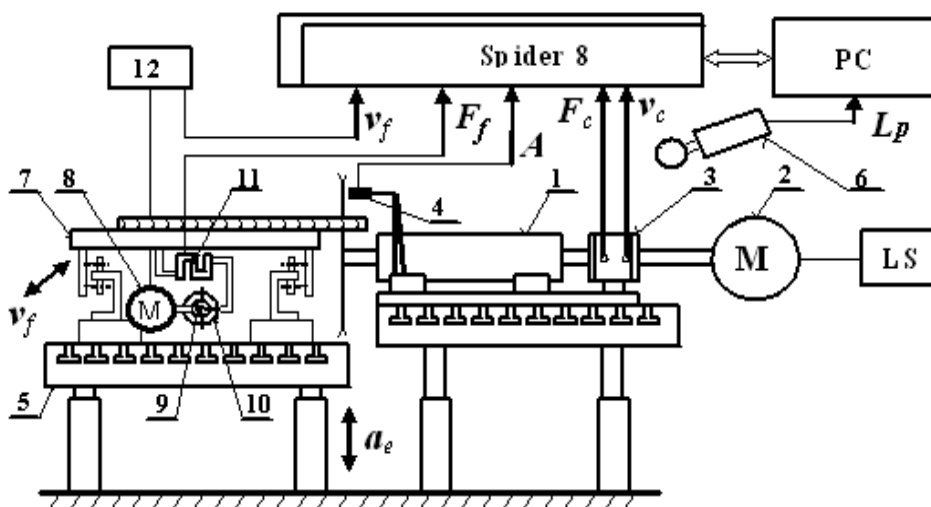
Otáčky vřetene osazeného pilovým kotoučem v přírubách lze plynule měnit a to pohonem, který tvoří motor původního dynamometru a Leonardovo soustrojí. Rozsah otáček činí $n = 0$ až 12 000 za minutu, což pro veškeré prováděné výzkumy postačuje, protože při experimentech jsou používány otáčky maximálně do 6000 otáček za minutu. Průměr upínacích přírub v našem případě představuje $d_u = 110$ mm a je odvozen ze vzorce se závislostí na průměr dotčeného pilového kotouče.

$$d_u = \frac{D}{3} \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

Pro měření veličin odporu dělení je materiál upínán excentrickými upínkami na pohyblivém vozíku. Ten je do řezu posouván prostřednictvím přesného kuličkového šroubu a matice. Matice je upevněna na vozíku a šroub pohání asynchronní elektromotor, jehož regulace otáček je řízena frekvenčním měničem. Tímto je možné zvyšovat či snižovat rychlost jízdy vozíku, která je v mezích od 3 až do 22 m.min⁻¹. Abychom zjistili, jakou silou je vozík tažen, je mezi maticí a vozíkem vložen tenzometrický snímač síly.



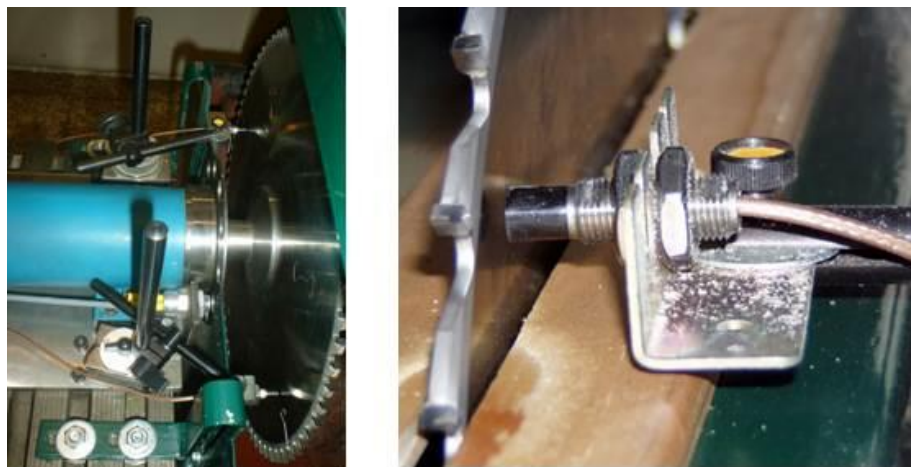
Obr. 28 Zkušební stand



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 - hlučkoměr, 7 – podávací vozík, 8 – elektromotor posuvu vozíku, 9 - kuličkový šroub, 10 – matice, 11 – snímač podávací síly F_f , 12 – frekvenční měnič pro změnu podávací rychlosti v_f

Obr. 29 Schéma zkušebního stendu (Kopecký, 2007)

Pro měření vibrací u pilového kotouče je možnost použít dva snímače EPRO PR 6423/000-001 viz obr. č. 30. Vzhledem k disku kotouče je možné jejich polohu měnit. V tomto případě umístění snímače bylo ve vzdálenosti 155 mm od středu kotouče. Tyto snímače pracují na principu vířivých proudů. Signály ze snímače jsou zpracovány v měřicí ústředně Spider 8 a dále jsou transferovány do PC. V PC jsou uloženy ve formě datového souboru a současně jsou znázorněny ve formě grafu v programovém prostředí Conmes Spider. Z programu Conmes Spider lze hodnoty exportovat do programu MS Excel a dále je zpracovávat a vyhodnocovat (Kopecký, 2007).



Obr. 30 Snímač vibrací EPRO PR 6423/000-001d



K měření hluku v bezprostředním prostoru okolo pilového kotouče je použit měřič hluku Chauvin Arnoux C.A 834 s funkcí připojením přes kabel k počítači pro zpracování a ukládání dat s přesností měření $\pm 1,5$ %. Poloha hlukoměru je ve výšce a vzdálenosti 1,5 m od kotouče, což v podstatě odpovídá poloze sluchového orgánu, tak jak se běžně v praxi můžeme setkat.



Obr. 31 Hlukoměr Chauvin Arnoux C.A 834 v sestavě se zkušebním Stendem

Kvalita řezné spáry potažmo její drsnost a vlnitost byla hodnocena zařízením Talysurf CLI 1000 s vysoce účinnými měřicími prostředky k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Tento systém měření nabízí možnosti analýzy povrchu ve třech základních osách, s indukčním dotykovým nebo bezdotykovým způsobem reprezentovaný laserovou triangulační sondou a CLA konfokálním snímačem. Rychlost měření může dosahovat až 30 mm/s, což umožňuje poměrně rychlé automatické měření. Účinná plocha měřícího prostoru je dána 100 x 100 x 100 mm a nosností max. 20 kg. Velikou předností popisovaného přístroje Talysurf CLI je spojení tradičního 2D (mechanické a analytické prostředky pro komplexní měření) a 3D prostorového hodnocení do jednoho přístroje. Programového vybavení přístroje Talysurf CLI je Talymap, který zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací i informační služby. Program nabízí pro charakteristiku povrchu 120 parametrů v režimu 2D a 40 parametrů pro 3D. Navíc dovoluje vyjmout z hodnoceného povrchu jeden profil a provést jeho hodnocení (2D). Popisovaná měřící aparatura drsnosti a vlnitosti povrchu je majetkem Univerzity obrany v Brně a obrázek č. 32 spolu s popisem funkčnosti byl poskytnut pro účely této disertační práce a publikace



v odborných periodikách doc. Ing. Emilem Svobodou, CSc. zaměstnancem uvedené univerzity, který prováděl samotné měření na dodaných vzorcích.

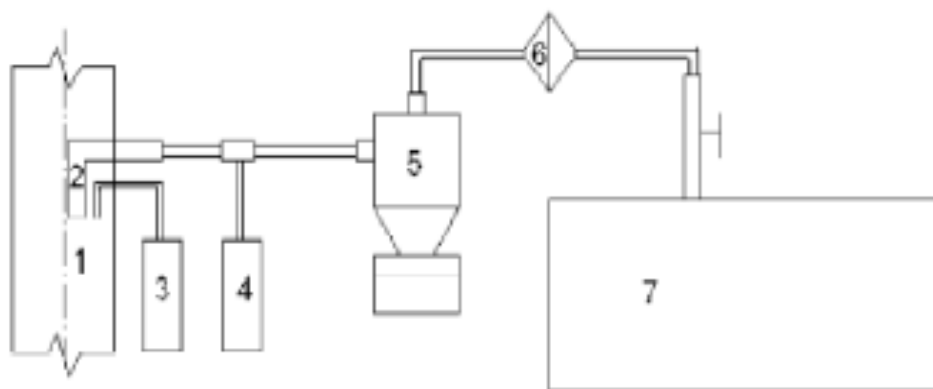


Obr. 32 Talysurf CLI 1000

Pro izokinetické odběry dřevního prachu z odsávacího systému realizovaného jedno pytlou technikou Urban, bylo využito strojního aparátu skládajícího se z přímého úseku potrubí dlouhého 0,5 m, které je opatřeno otvorem pro izokinetickou hubici ($\varnothing 20$ mm), otvorem pro Prandtlovu trubici a průzorem z čírého plastu pro kontrolu umístění trubice, kterou se provádí kontrola rychlosti proudění vzduchu za použití tlakové difference. Aby byla splněna podmínka stejné rychlosti proudění vzduchu v potrubí a sondě je do okruhu dále zařazena vakuová pumpa Becker VT, která disponuje regulací průtoku vzduchu. Tu je možné nastavit dle hodnot zjištěných Prandtlovou trubicí. Cyklónový odlučovač z antikorozi oceli spolu s jemným filtrem ze skelných vláken (pórovitost $0,39 \mu\text{m}$ a filtrační účinnost 99,975) uloženým na mřížce mezi dvěma plastovými trychtýři zabezpečuje důkladnou separaci dřevního odpadu od proudícího vzduchu.



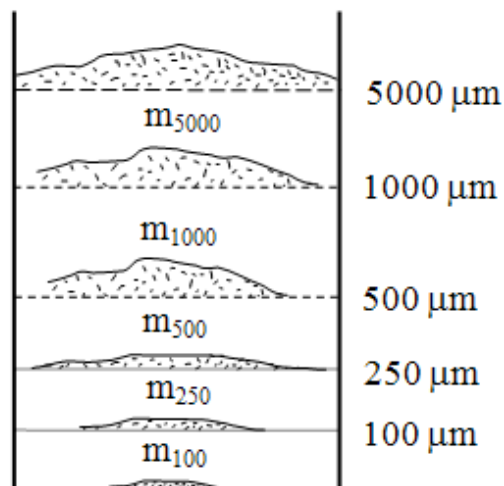
Obr. 33 Odsávací zařízení se sondou pro izokinetické odběry



1 – potrubí odsávacího zařízení, 2 – izokinetická sonda, 3, 4 – Prandtlova trubice, 5 – cyklón, 6 – filtr na zachytávání jemných částic, 7 – vakuové čerpadlo

Obr. 34 Schéma zapojení soustavy pro izokinetické měření (Kopecký a kol., 2012),

Zmíněný dřevní odpad usazený v cyklonu byl podroben granulometrické analýze na přístroj Retsch AS 200 digit s možností plynulého nastavení amplitudy vibrací sít ve třech osách. Zmíněná síta o rozměrech 5 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm a 100 μm (podle ISO 565 (DIN ISO 3310-1) byly pro určení procentuálního rozložení skladby dřevního odpadu přesně zváženy na digitální váze Vibra AJ-420-CE s přesností na 0,001g.



Obr. 35 Retsch AS 200 digit spolu se schématem síťování (Kopecký a Rousek 2007),

Pro částice, které propadly přístrojem až na dno, byla následně provedena mikroskopická analýza jemného prachu pomocí analýzy a zpracování obrazu NISElements AR. Zařízení sestává se z prosvětlovacího mikroskopu Nikon Optiphot-2 s objektivem Nikon 4x, digitální kamery a počítače. Obraz z mikroskopu byl snímán digitální 5 Mpix kamerou Nikon DS.



3.2.2 Pilové kotouče

V rámci experimentů byly použity čtyři pilové kotouče pracovníě označené K8, K9, K10 a K6. Zmíněné první tři prototypové kotouče byly navrženy v rámci zpracování této disertační práce a vyrobeny pro tyto účely firmami Pilana Hulín a Stelit Trenčín. K ověření navrhované metody zjišťování kritických a rezonančních otáček fázově posunutými snímači byl použit standardně vyráběný kotouč pro velkoplošné formátování od firmy Pilana.

Tabulka 2 Pracovní označení pilových kotoučů

Označení	Popis	Výrobce
K6	Pilový kotouč pro velkoplošné formátování	Pilana
K8	Pilový kotouč s rozdílnou roztečí zubů	Stelit
K9	Pilový kotouč ve standardním provedení	Pilana
K10	Pilový kotouč bez doplňujících úprav	Pilana

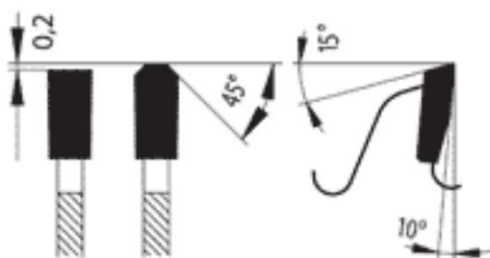
Tabulka 3 Parametry pilových kotoučů

Parametry	Pilové kotouče			
	K6	K8	K9	K10
Průměr pilového kotouče D (mm)	400	350	350	350
Počet zubů z	72 TFZ	36	36	36
Průměr upínací díry d (mm)	30	30	30	30
Šířka těla kotouče s (mm)	3,2	2,4	2,4	2,4
Šířka zubu (mm)	4,4	4,45	4,45	4,45
Výška zubu h (mm)	-	15	15	15
Rozteč zubu t (mm)	17,4	Rozdílná	30,528	30,528
Radiální kompenzační drážky	Ano	Ano	Ano	Ne
Odhlučňovací drážky	Ano	Ano	Ano	Ne
Kompenzační válcování	0,66 R	0,66 R a 0,7R	0,66 R	0,66 R
Úhel hřbetu α (°)	15	15	15	15
Úhel břitu β (°)	65	65	65	65
Úhel čela γ (°)	10	10	10	10
Úhel zešíkmení čela ξ (°)	-	10	10	10



Pilový kotouč K6

Jedná se o standardně vyráběný formátovací pilový kotouč firmou Pilana a.s., Hulín, jehož použití je na pořez aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Vyznačuje se mimořádně tvrdými SK plátky odolávající abrazivním účinkům materiálového složení kompozitních materiálů, jako jsou např. DTD, LTD, DVD apod. Vysoký počet zubů, tvar a jejich geometrie zaručuje vysokou kvalitu obrobené plochy a celistvost řezné hrany bez tzv. otřepů. Na pilovém kotouči najdeme několik konstrukční úprav jako dilatační a odhlučňovací drážky, válcování a broušený povrch těla kotouče.

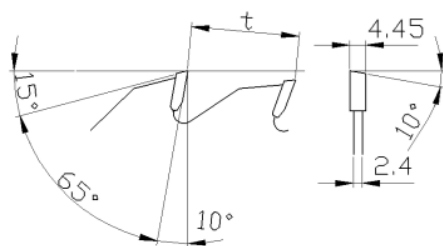


Obr. 36 Tvar zubu TFZ pilového kotouče K6 (www.pilana.cz)



Obr. 37 Pilový kotouč K6

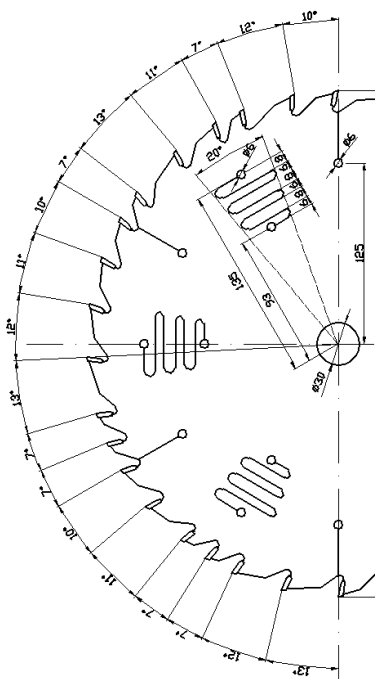
Navržené pilové kotouče K8, K9 a K10 splňují předpoklady pro bezpečné obrábění dřeva v podélném směru. Všechny tři kotouče mají stejný počet a geometrii zubu (úhel hřbetu, břitu i čela, výšku zubů a rádius zakončení zubu), aby porovnávací testy byly objektivní. Zuby jsou ze spékaných karbidů, které jsou naletovány do laserem vypálených sedel na věnci pilového kotouče.



Obr. 38 Tvar zubu prototypových pilových kotoučů K8, K9 a K10

Pilový kotouč K8

Prototypový kotouč K8 byl navržen ve spolupráci s TU Zvolen, Katedrou drevářských strojů a zařízení a vyroben firmou Stelit v Trenčíně. Tento kotouč má nepravidelnou rozteč zubů, která je provedena zrcadlově tak, aby byl pilový kotouč vyvážený. Velikost jednotlivých roztečí a jejich umístění po obvodu odpovídá obrázku č. 39. V těle kotouče jsou také protihlukové drážky od sebe vzdálené 60°, které jsou především kvůli šíření trhlin zakončeny otvory o průměru 6 mm. Ve stejných rozstupech jsou na těle pilového kotouče dále vyrobeny radiální dilatační drážky pro kompenzaci tangenciálního napětí, které jsou opět zakončeny otvory. Na kotouči je provedena úprava pnutí kompenzačním válčováním (provedeno dodatečně ve firmě Pilana) v místech 0,66R a 0,7 R.

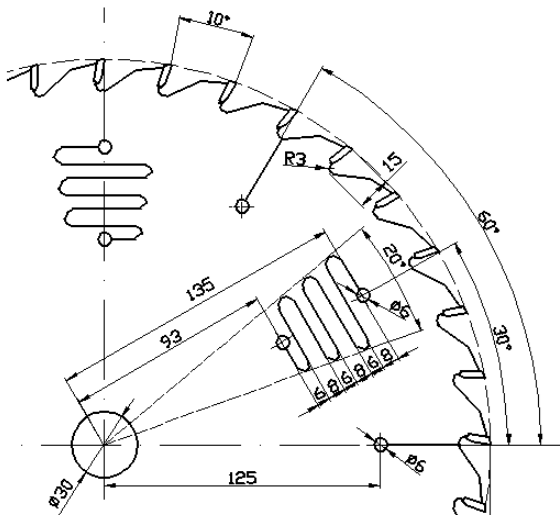


Obr. 39 Pilový kotouč K8



Pilový kotouč K9

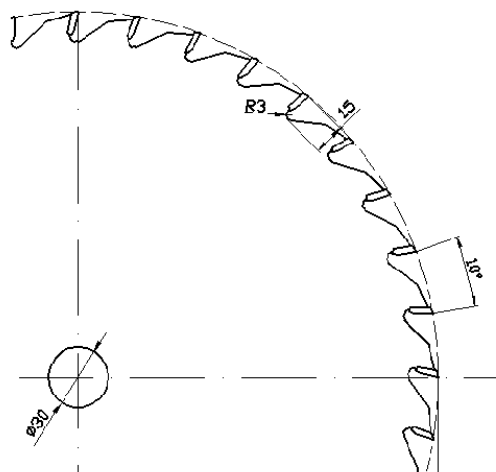
Navržený pilový kotouč má velmi podobnou konstrukci jako kotouč K8. Diametrální odlišnost je v rozteči zubů, která je rovnoměrná a odpovídá hodnotě 10° . Pilový kotouč K9 byl vyroben firmou Pilana z uhlíkové nástrojové oceli 75Cr1 (DIN 1.2003) o tvrdosti 44-48 HRC, což splňuje předpoklady právě pro použití na tělo pilového kotouče (tuhost a pevnost).



Obr. 40 Pilový kotouč K9

Pilový kotouč K10

Tento kotouč má také pravidelnou rozteč zubu s rozestupem 10° a oproti výše popisovaným kotoučům pouze jednu konstrukční úpravu, která je nazývána kompenzační válcování. I tento pilový kotouč dle našeho požadavku vyrobila na zakázku firma PILANA.



Obr. 41 Pilový kotouč K10



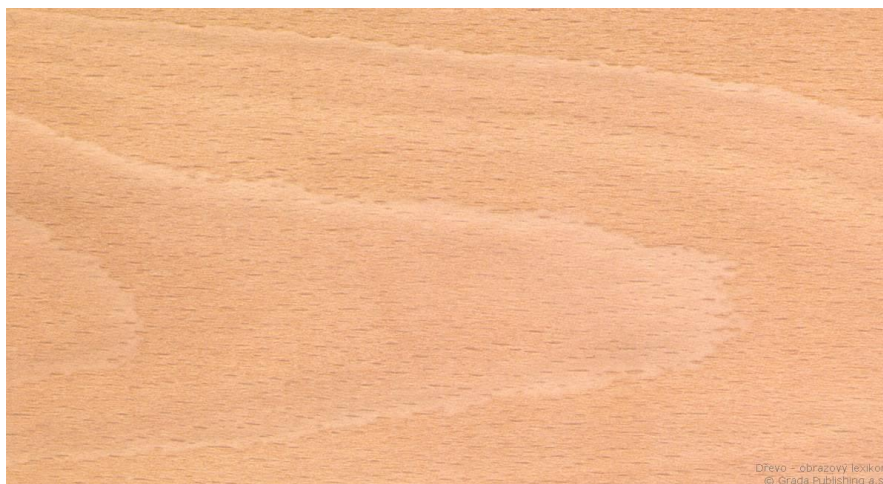
3.2.3 Dřeviny

V experimentu budou použity nevýznamnější a nejvíce zpracovávané dřeviny v České republice z oblasti tvrdších a měkkých dřev. Smrk ztepilý (*Picea abies*) s hustotou 470 kg/m^3 (u řezaných vzorků) byl vybrán jako zástupce měkkých jehličnatých dřevin. Vyznačuje se menší trvanlivostí a odolností proti biotickým škůdcům, ale s poměrně dobrým poměrem mezi hmotností a pevností. Dobře se opracovává, suší, nicméně se hůře impregnuje. Patří mezi dřeva bělová s vyzrálým dřevem a s pryskyřičnými kanálky. Využívá se zejména ve stavebnictví k trámovým konstrukcím, výrobě dýh a velkoplošných materiálů. Potom v truhlářském průmyslu především na masivní nábytek, rámové konstrukce oken, dveří apod. Výskyt agresivity dřeva smrku a jeho prachu na člověka je poměrně vzácný jev. Po opakované dlouhodobé expozici může působit alergizujícími účinky a v některých případech vyvolat i respirační problémy.



Obr. 42 Foto dřeva smrku (www.tfdesign.cz)

Buk lesní *Fagus sylvatica* patří k nejvíce zastoupeným listnatým dřevinám v České republice a proto také byl vybrán pro experiment. Dřevo buku je méně trvanlivé, odolné vůči biotickým škůdcům a z technologického hlediska hůře vysušitelné (sklon k tvorbě trhlin a zborcení). Oproti tomu se dobře impregnuje, paří, a moří. Pro své vlastnosti a barvu se především využívá v nábytkářství potažmo k výrobě ohýbaného nábytku (židle, křesla). Dále se z něho ve velké míře vyrábí dýhy, překližky, parkety, železniční pražce (dříve než byly nahrazeny betonovými) apod.



Obr. 43 Foto dřeva buku (www.tfdesign.cz)

Rozměrové dimenze řeziva použitého k tvorbě zkušebních řezů činily: délka 740 mm a tloušťka 21 mm. Parametr šířky je rozdílný, neboť pro náš způsob provedení zkoušek řezáním není podstatný. Vlhkost řezaného materiálu smrku a buku kolísala v rozmezí $10\% \pm 0,5\%$, kdy tato hodnota byla zjištěna vlhkoměrem Merlin HMB 325. Průměrná hustota bukového řeziva použité v experimentu byla 705 kg.m^{-3} a smrku 470 kg.m^{-3} .



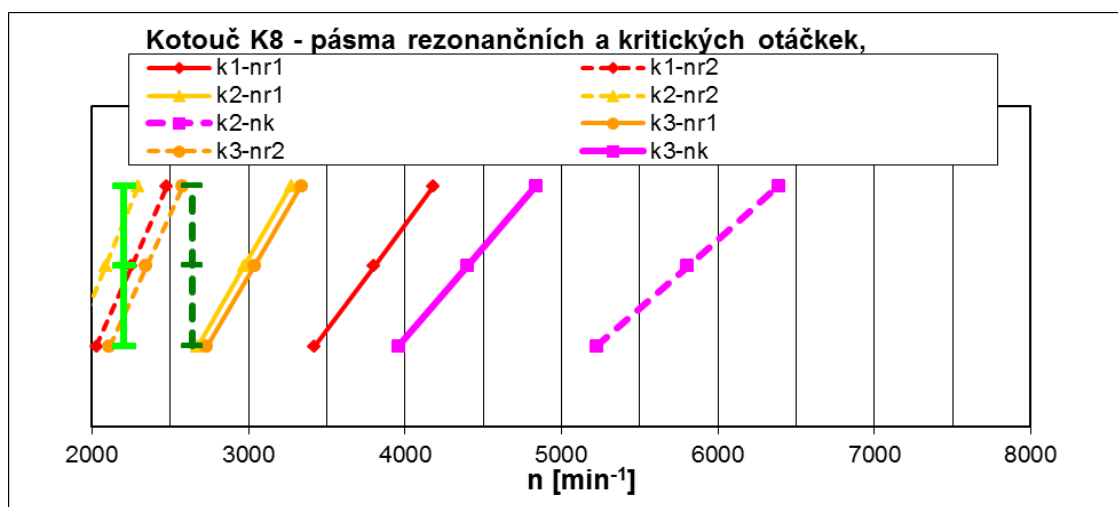
4 VÝSLEDKY

Na následujících grafech a tabulkách jsou uvedeny jednotlivé porovnávací výsledky kotoučů při řezání v optimálních a rezonančních otáčkách pro buk i smrk. Samozřejmě důležitým krokem práce bylo stanovení řezných podmínek. Vycházelo se přitom z již dříve zjištěných informací vyobrazených na grafech v předchozí kapitole daných pilovými kotouči a z rozhodujícího hlediska vlastního měření vibrací pilových kotoučů v závislosti na otáčkách. Tedy statická házivost a průběhy amplitud vibrací v závislosti na otáčkách kotoučů byly zjištěny metodou přímého snímání amplitud kmitů kotouče na experimentálním stendu, kdy se do měřicí aparatury doplnil další snímač pro podrobnější analýzu získaných dat.

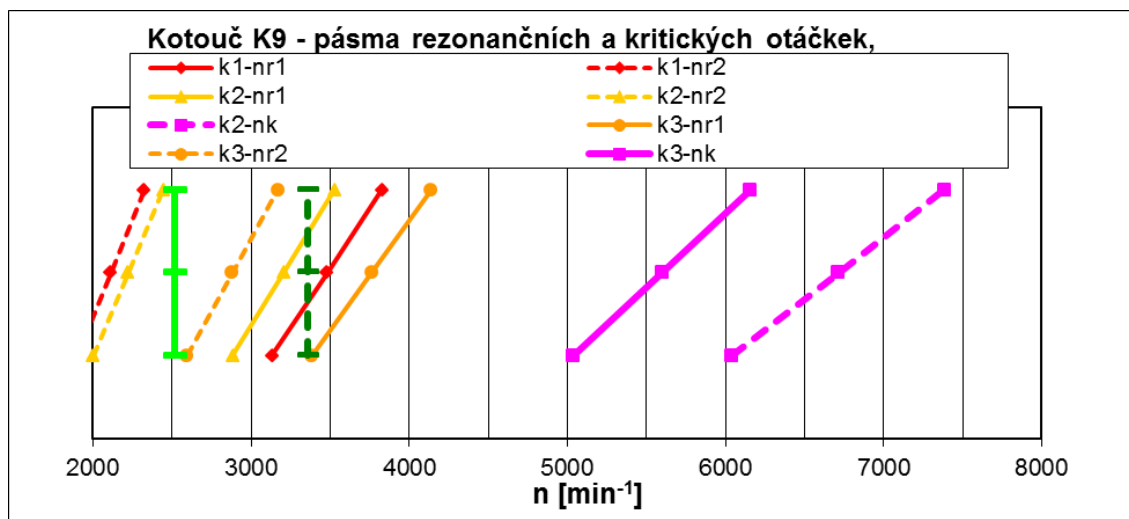
Výsledky jsou opět rozděleny z důvodu přehlednosti do podkapitol, věnujících se jednotlivým úsekům této disertační práce.

4.1 Rezonanční a kritické otáčky prototypových pilových kotoučů

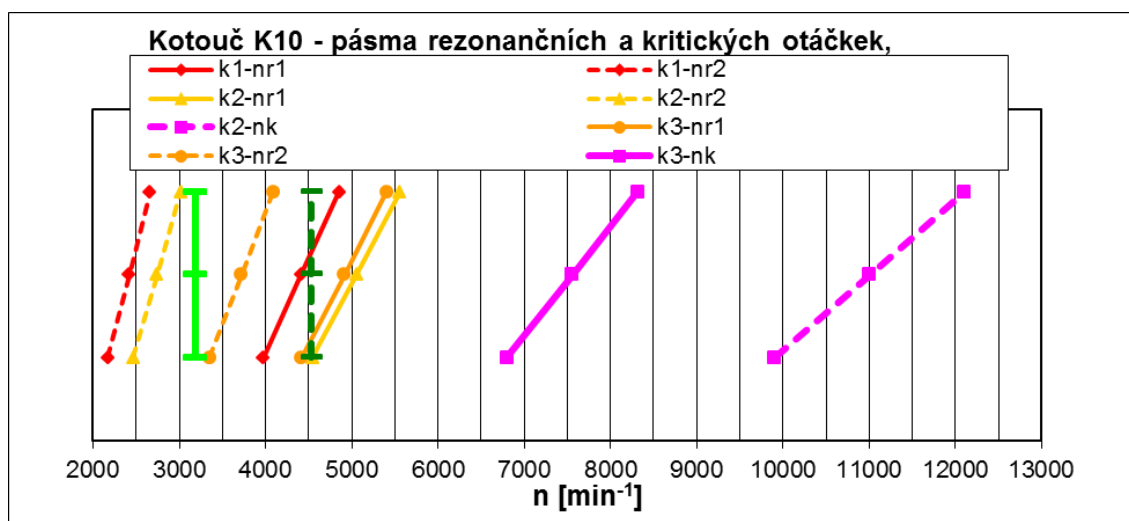
U všech předmětných kotoučů níže uvádím obrázky, na kterých jsou znázorněny otáčkové diagramy pilových kotoučů. Ty vznikly na základě naměřených hodnot, jak už bylo výše několikrát řečeno ve spolupráci s Technickou univerzitou ve Zvolenu, zapsaných do tabulky a pomocí vložených rovnic vypočteny odstředivé součinitele, rezonanční a kritické otáčky dle uzlových průměrů. Tyto tabulky jsou obsahem přílohy této disertační práce.



Obr. 44 Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K8



Obr. 45 Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K9



Obr. 46 Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K10

Jelikož se doporučené otáčky u této metodiky stanovují od kritických, kde se bere v úvahu pravidlo, že doporučené otáčky činí 60% kritických (Lisičan, 1996). Nicméně dle této metodiky nám doporučené otáčky spadají do oblastí s vysokou četností rezonančních otáček jednotlivých uzlových průměrů (vyznačené zelené úseky). Proto je vhodnější z diagramů považovat za optimální otáčky místa, mimo úseky rezonančních otáček. Co se týče kritických otáček, pilový kotouč K10 je má dosti vysoké, což poukazuje na fakt, že tělo kotouče s celistvým diskem (bez narušení různými vypálenými drážkami) má velkou tuhost. Porovnáme-li u všech pilových kotoučů výši kritických otáček, tak zjistíme, že nepravidelná rozteč zubů způsobuje posun těchto otáček blízko k běžně používaným otáčkám v dřevařských provozech.

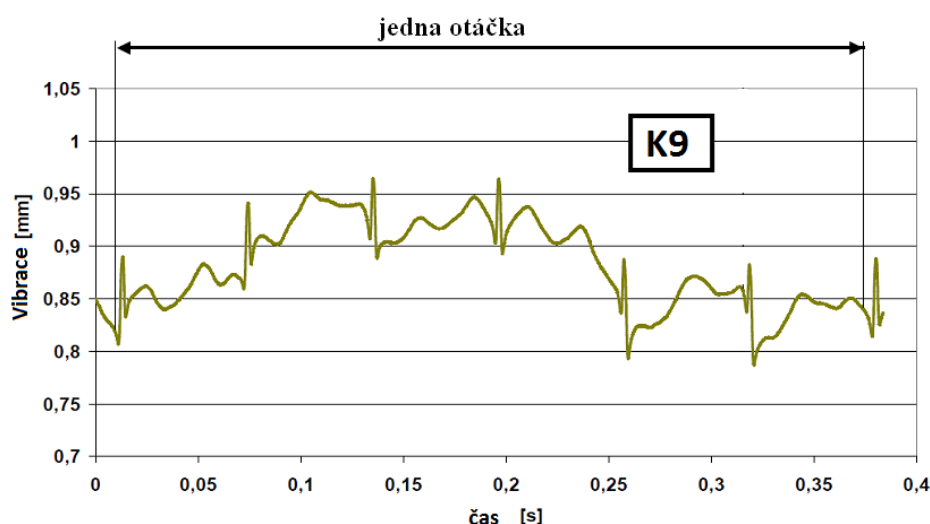


4.2 Optimální - doporučené otáčky pro zkoušené kotouče

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky házivosti disku kotoučů a průběhy vibrací v závislosti na plynule se zvyšujících otáčkách. Vibrace kotoučů, respektive časové průběhy amplitud vibrací v závislosti na zvyšujících se otáčkách vřetene byly postupně naměřeny u každého kotouče a to především z důvodu následného určení dvou základních rovin pro hodnocení dat. První je určení optimálních otáček, které se projevují dobrou stabilitou kotouče a druhá je určení rezonančních otáček, kde je pilový kotouč do značné míry rozkmitán. Jak se jednotlivé kotouče K8, K9 a K10 projeví je znázorněno v grafech na obr. 48 až 50. Samozřejmě, aby byla všechna měření objektivní a mohla se porovnávat, uvádím také výsledky z měření rovinnosti pilového kotouče, kterou jsem zjišťoval jednak vizuálně pomocí ocelového pravítka, ale rozhodující měření spočívalo z výsledné statické házivosti pilového kotouče, kde se jeho rovinnost měřila při velmi malých otáčkách za pomoci snímače vibrací.

Tabulka 4 Statická házivost pilových kotoučů

Pilový kotouč	Max. (mm)	Min. (mm)	Rozdíl (mm)
K8	1,05	0,748	0,302
K9	0,95	0,82	0,13
K10	0,96	0,86	0,1

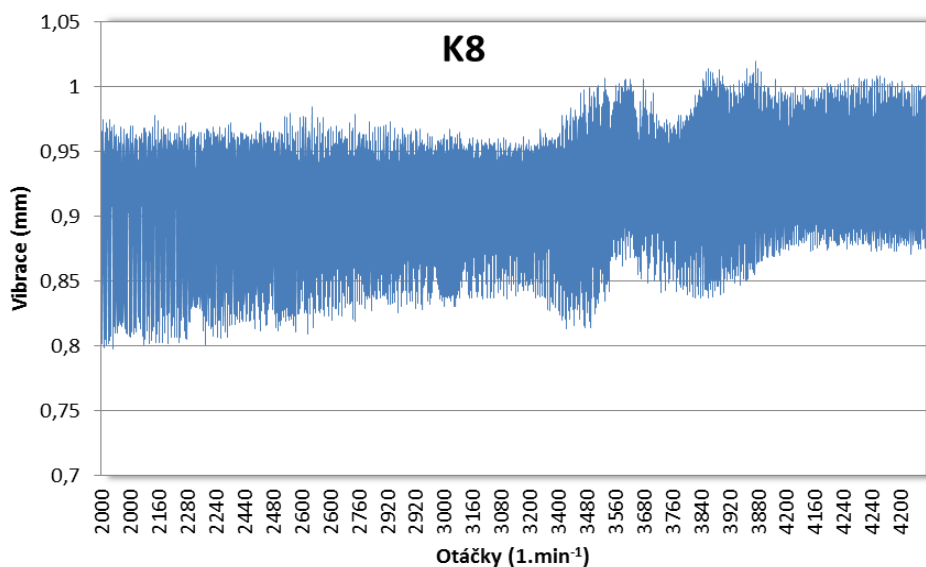


Obr. 47 Záznam statické házivosti pilového kotouče K9

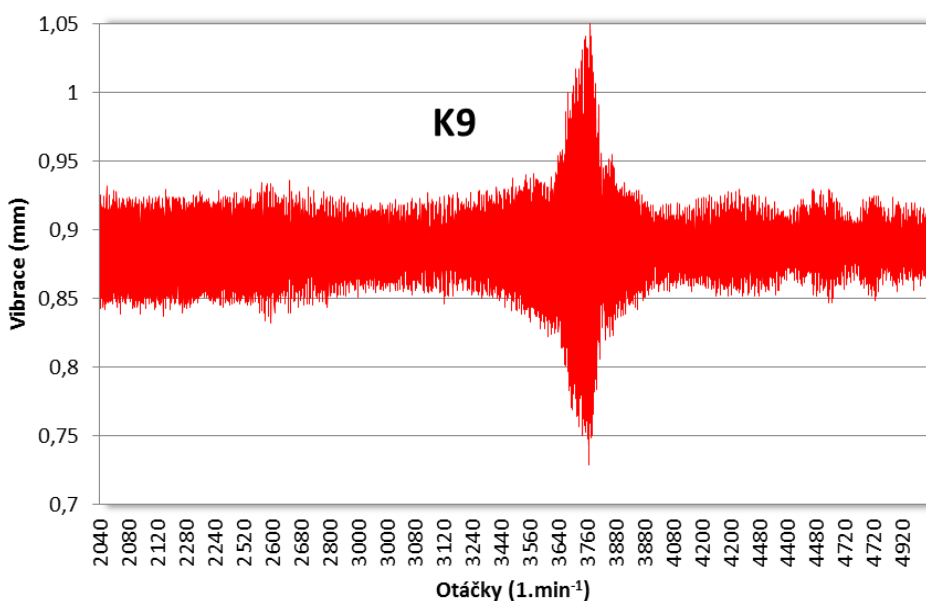
U kotouče K8 Stelit je stav poměrně složitý, protože disk kotouče vykazuje velkou statickou házivost, která je zapříčiněna značnou deformací disku kotouče, která překračuje běžnou úroveň (0,1 mm) více jak třikrát, viz tabulka 4. červeně zvýrazněné



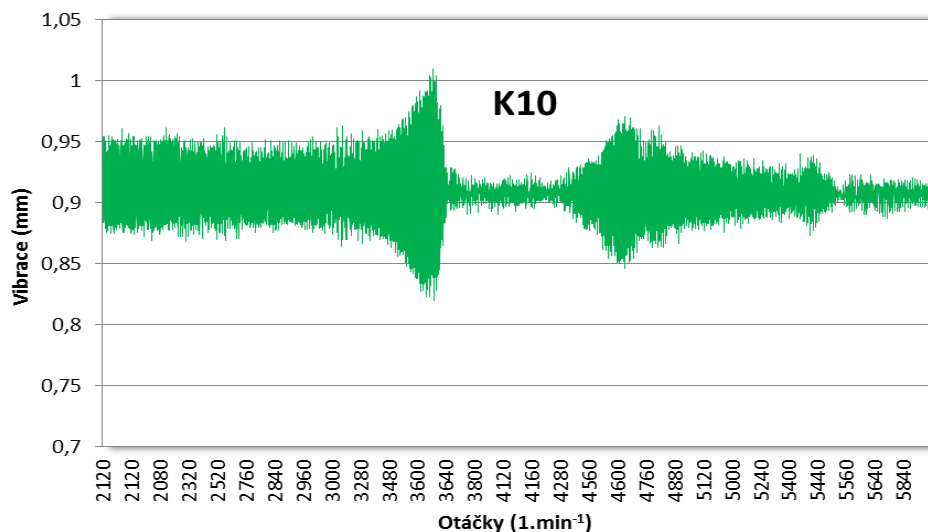
číslo. Tato vada byla viditelná i po přiložení ocelového pravítka, proto byl dán pilový kotouč do firmy Pilana Hulín a.s. k vyrovnání těla pilového kotouče. Po odstranění vady se provedla opětovná kontrola házivosti, kde již pilový kotouč K8 splnil v literatuře uváděnou mez házivosti 0,1 mm, naměřena byla 0,98 mm. Na obrázku 47. uvádím jako příklad průběh statické házivosti u pilového kotouče K9, kde je mimo jiné viditelné i šest dilatačních drážek na těle kotouče ve formě skokové změny měřeného signálu (tzv. píky). Dále je pozorovatelné, že mezi jednotlivými drážkami jsou úseky do jisté míry zvlněny, což je pochopitelný děj po technologii vypalování těla kotouče laserem.



Obr. 48 Průběh vibrací kotouče K8



Obr. 49 Průběh vibrací kotouče K9



Obr. 50 Průběh vibrací kotouče K10

Z obrázku 48, kde je zobrazen průběh vibrací pilového kotouče K 8 v závislosti na zvyšujících se otáčkách vřetene, je patrné pozvolné snižování vibrací z 0,176 mm při otáčkách 2 000 min⁻¹ až na 0,115 mm při otáčkách 3 400 min⁻¹. Dále následuje zneklidnění chodu kotouče až na rozkmitání 0,201mm. Z děje je dále patrný posun osy vibrací při otáčkách 3600 až 3800. Kotouč se zde musí deformovat na jednu stranu. Toto nasvědčuje nebezpečné oblasti otáček se značnou boční nestabilitou. Proto je vhodné s tímto kotoučem v dřevařském provozu nepracovat v oblasti otáček vymezené těmito hodnotami. Lze také usuzovat, že se jedná o stav s dominantními amplitudami vibrací v prvních rezonančních otáčkách prvního uzlového průměru n_{r1} .

Kotouč K9 Pilana obr. 49 vykázal velmi dobrou stabilitu v poměrně širokém pásmu otáček. Pásmo zvýšených amplitud vibrací se vyskytlo v oblasti prvních rezonančních otáček prvního a třetího uzlového průměru (opodstatněno otáčkovými diagramy viz obr. 39.). Zde amplitudy kmitů překračovaly hodnotu až 0,3 mm.

Obdobně pilový kotouč K10 Pilana bez provedených úprav obr. 50 vykazoval také poměrně dobrou stabilitu a posun dominantních kmitů do oblasti otáček 4500 až 4750 min⁻¹, kde se jako v předešlých případech promítlo pásmo prvních rezonančních otáček prvního uzlového průměru.

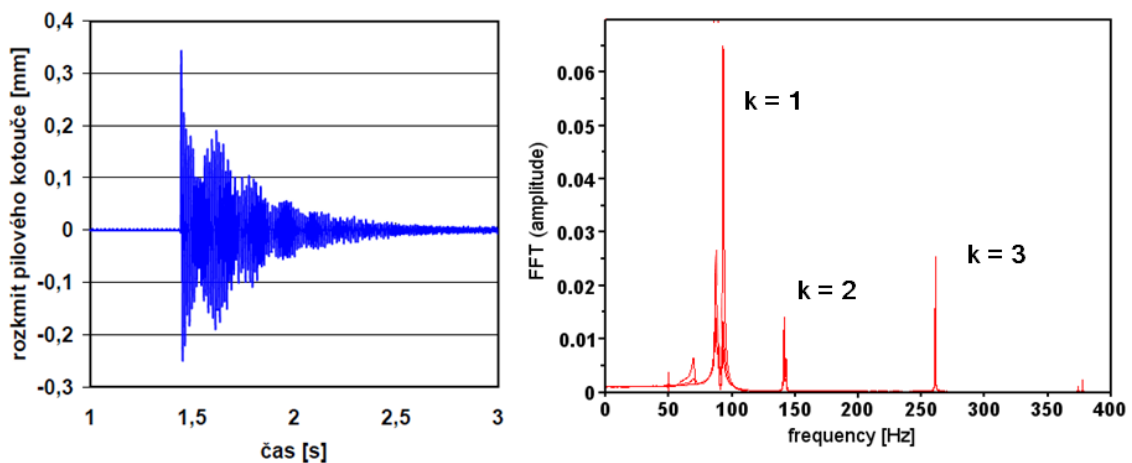
Na základě těchto analyzovaných informací získaných z průběhů vibrací jednotlivých kotoučů lze stanovit otáčky, při kterých se bude provádět veškerá další měření. Pro posouzení vlivu konstrukčních úprav testovaných kotoučů na jejich hlučnost bylo právě tedy zvoleno pásmo s minimálními vibracemi a k tomu odpovídající



otáčky $n = 4200 \text{ min}^{-1}$. Při těchto otáčkách všechny zkoumané kotouče vykazují dobrou stabilitu a je také dosažena běžně používaná řezná rychlost $v_c = 77 \text{ m.s}^{-1}$ pro kotouče tohoto typu, s průměrem $D = 350 \text{ mm}$.

4.3 Nestabilní stavy pilového kotouče zjišťované metodou fázově posunutých snímačů

Z dat obrázku 51, který znázorňuje vibrace pilového kotouče K6 po aplikaci impulsní metody - úderu kladiva a následné FFT, můžeme konstatovat identickou shodu statických frekvencí této metody s metodou Chladného obrazců, jak je vidět z obr. 51 a tab.5.



Obr. 51 Vlastní frekvence kmitání kotouče (Veselý a kol. 2012)

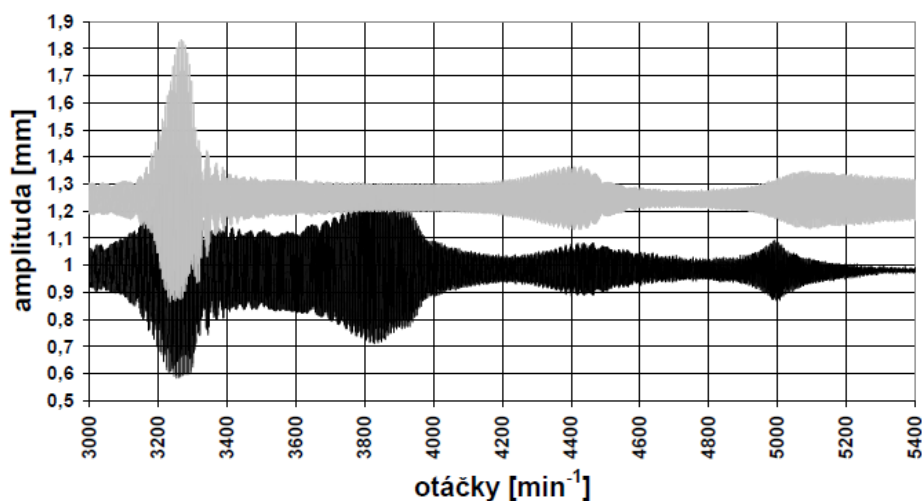
Tabulka 5 Statické úhlové frekvence pilového kotouče dle metody Chladného obrazce (Kopecký, 2007)

Měření statických úhlových frekvencí	Počet uzlových průměrů			
	k	1	2	3
f_{st} (Hz)	89	147	262	

Přímým měřením kmitání za použití dvou snímačů byla v dalším postupu experimentu nalezena pásma zvýšených vibrací a oblasti s nízkou amplitudou kmitu při jmenovitých otáčkách, kdy celý rozsah otáček a vibrací je vyobrazen na obr. 52. Toto je záměrně děláno pro následný podrobnější záznam vibrací při otáčkách pilového kotouče, kdy samotný kotouč vykazuje nestandardní výkyvy. Již z prostého porovnání průběhů dat od obou měřených míst je patrné, že v důsledku postupujícího vlnění

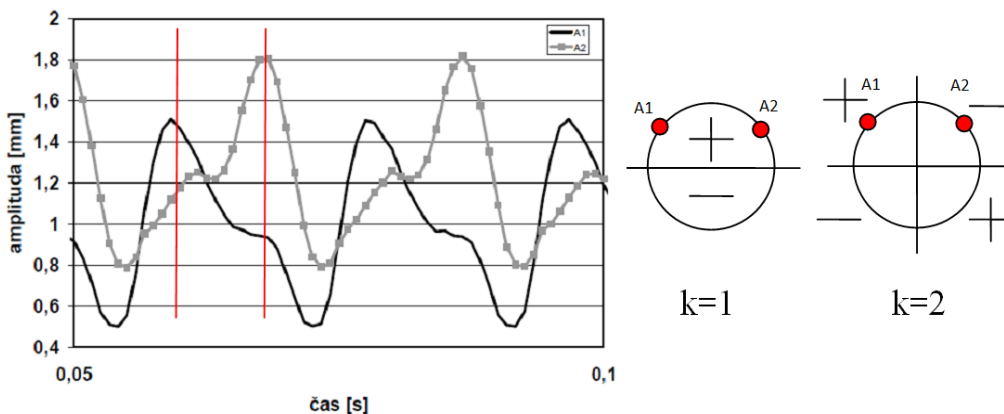


dochází k různě velikým amplitudám vychylování a deformacím jako reakce na dopředu a dozadu postupující vlny v těle pilového kotouče při daných otáčkách. Je známo, že při přibližování frekvence kmitání disku kotouče (zejména dozadu postupující vlny) k frekvenci jeho otáčení, nastávají nestabilní stavy popsané jako rezonanční a kritické otáčky. Takové otáčky se vyznačují právě nadměrnými vibracemi a nestabilitou těla kotouče. V oblasti okolo $3\,250\text{ ot. min}^{-1}$, což je oblast některých rezonančních otáček tato skutečnost potvrzuje.



Obr. 52 Průběh amplitud vibrací na věnci kotouče s fázovým posunem 90° (Veselý a kol. 2012)

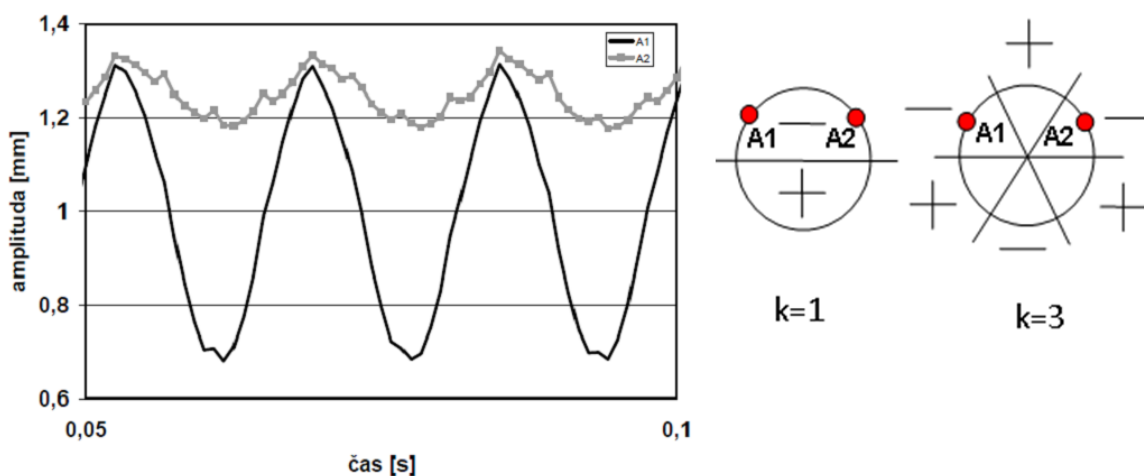
K rozlišení o jaké rezonanční otáčky se jedná a v jakém uzlovém průměru se vyskytují, bylo přistoupeno k měření tohoto jevu s vyšší vzorkovací frekvencí 1200 Hz (vážený průměr - filtrovací frekvence 150 Hz). Tento děj je zobrazen na následujících grafech. Měření probíhalo v otáčkách 3300 a 3720 min^{-1} obr. 53. a 54.



Obr. 53 Průběh amplitud vibrací při $3\,300\text{ ot. min}^{-1}$ s fázovým posunem snímačů 90° (Veselý a kol. 2012)

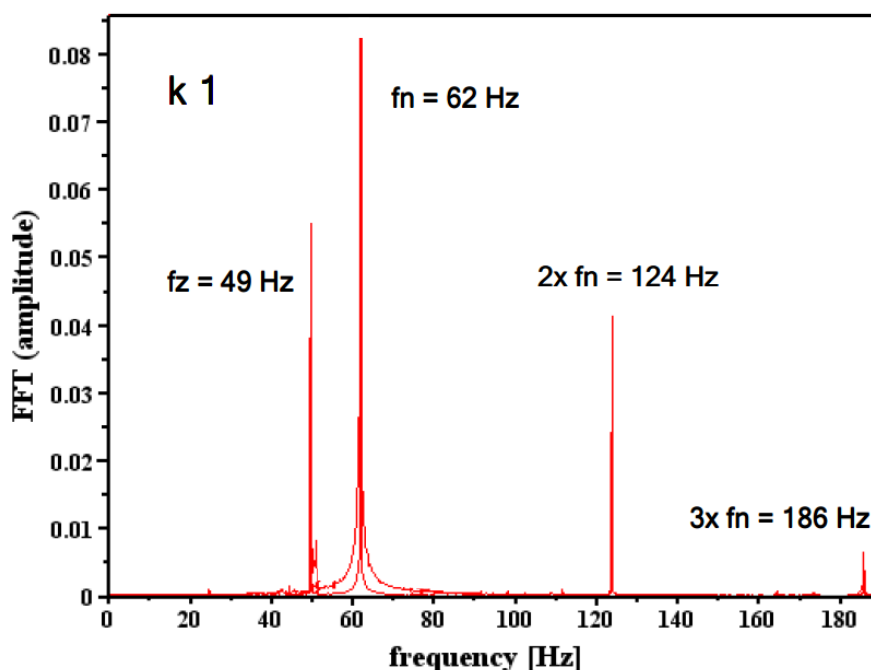


Z poměrně jednoduché úvahy, viz obr. 53, lze předpokládat dominantní kmity druhého uzlového průměru $k = 2$. Na obr. 52 byly hodnoty amplitud zaznamenané snímači přibližně shodné velikosti, ale z obr. 53 se ukázalo, že jsou zrcadlově obrácené a vlnění postupuje proti sobě, což je pro přehlednost v grafu ohraničeno červenými čarami. Právě proto usuzuji, že se jedná o druhý uzlový průměr, protože jedna hodnota nabývá max. velikosti, zatímco druhá klesá a to právě odpovídá teorii protichodných vln na disku kotouče tohoto uzlového průměru.



Obr. 54 Průběh amplitud vibrací při $3\,720\text{ ot. min}^{-1}$ s fázovým posunem snímačů 90° (Veselý a kol. 2012)

V otáčkách $3\,720\text{ min}^{-1}$ se může jednat o dominantní kmity třetího nebo prvního uzlového průměru. V důsledku pohybu vlnění po tělesu kotouče není zřetelný fázový posun mezi snímači, zato ale poměrně velký hodnotový rozdíl. Perioda vlnění je ve fázi. Provedená Fourierova transformace naměřeného signálu a následná kontrola s daty získanými klasickou metodou viz tab. 6. potvrdila hypotézu, že při otáčkách 3720 za minutu se jedná o dominanci prvního uzlového průměru. Je zde zřejmá frekvence dozadu postupující vlny při prvním uzlovém průměru $f_z = 49\text{ Hz}$ viz obr. 55. Ve frekvenčním spektru se taktéž vyskytují otáčkové frekvence $f_n = 62\text{ Hz}$ a její další harmonické.



Obr. 55 Amplitudově frekvenční spektrum kmitů kotouče při 3720 ot.min⁻¹
(Veselý a kol. 2012)

Tabulka 6 Jednotlivé frekvence pilového kotouče dle klasické metody

	Počet uzlových průměrů				k=1			Ø λ
	vlastní statická úhlová frekvence f_{st} [Hz]				89			
n [min ⁻¹]	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	
f_z [Hz]	61,8	59	57,8	57,4	55,6	54	50,2	
f_n [Hz]	40	43,33333	46,66667	50	53,33333	56,66667	60	
f_d [Hz]	101,8	102,33333	104,46667	107,4	108,93333	110,66667	110,2	
λ	1,5264	1,35858	1,374008	1,445504	1,38708	1,347232	1,173067	1,373124

Dosažením frekvence dozadu postupující vlny $f_z = 49$ Hz do vztahu (13) je možné vypočítat vlastní dynamickou frekvenci kmitání rotujícího kotouče f_d a jednoduchou úpravou uvedeného vztahu (16) určit součinitel odstředivé síly λ pro daný uzlový průměr. Součinitel odstředivé síly je pak jedním z nejdůležitějších parametrů při výpočtu rezonančních, případně kritických otáček, viz vztahy (19) a (20). V analyzovaném případě jsou první rezonanční otáčky ($Z = 1$) prvního uzlového průměru $n_{r1}(k1)$ rovny 3160 min⁻¹.

Velmi významnou informací z amplitudově frekvenční analýzy je zjištění frekvence dozadu postupující vlny f_z s možností přibližného určení součinitele



odstředivé síly λ a výpočtu rezonančních a kritických otáček. Metoda je ovšem poměrně citlivá na vybudení kmitání kotouče, např. od dynamické nevyváženosti kotouče, vlivu vlastního upnutí, změnu setrvačnosti pohonu a v neposlední řadě kmitání stroje. U prototypových kotoučů, vzhledem k jejich menšímu průměru, většímu upínacího poměru, celkové tuhosti disku a problémy s nedostatečným samovybuzením kotouče, tato metoda bohužel nepřinesla opakovatelné a tedy nepublikovatelné výsledky, proto bylo od ní v dalším experimentu upuštěno.

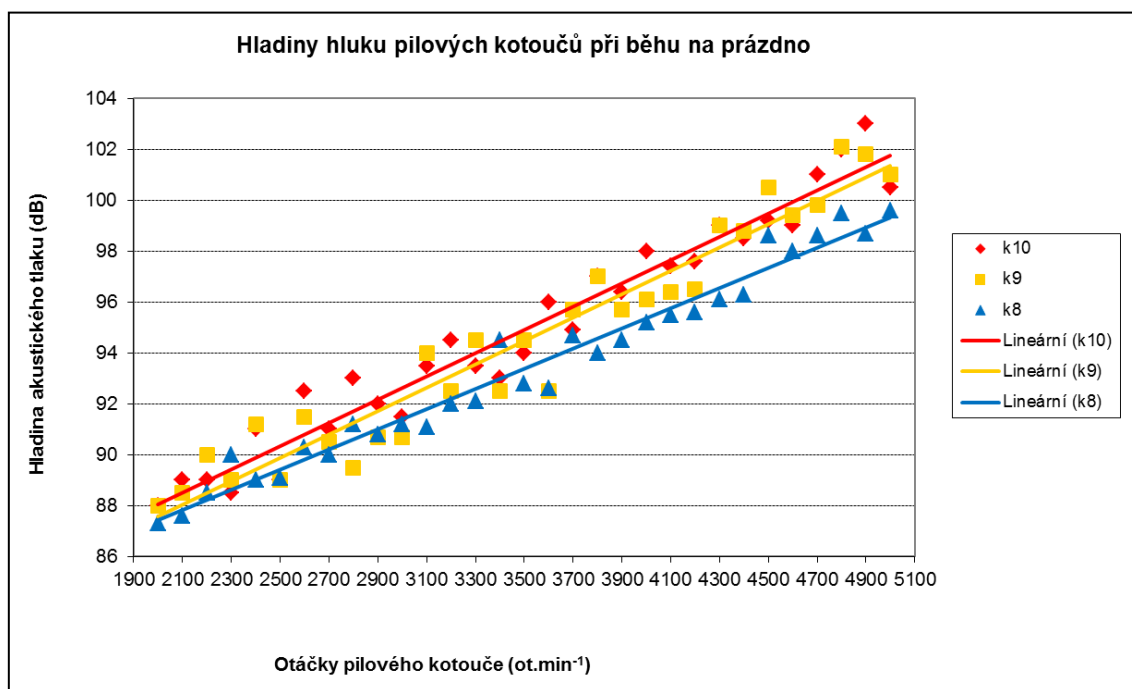
Tato stať vychází z již mnou a spoluautory publikovaného článku (Veselý a kol., 2012).

4.4 Vliv konstrukce pilového kotouče na jeho hlučnost

V následující části této podkapitoly se nadále věnuji problematice kmitání společně se vzájemnou vazbou na hlučnost, již při standardním sestavení zkušebního stendu a tedy možnosti měřit dané hodnoty potřebných veličin.

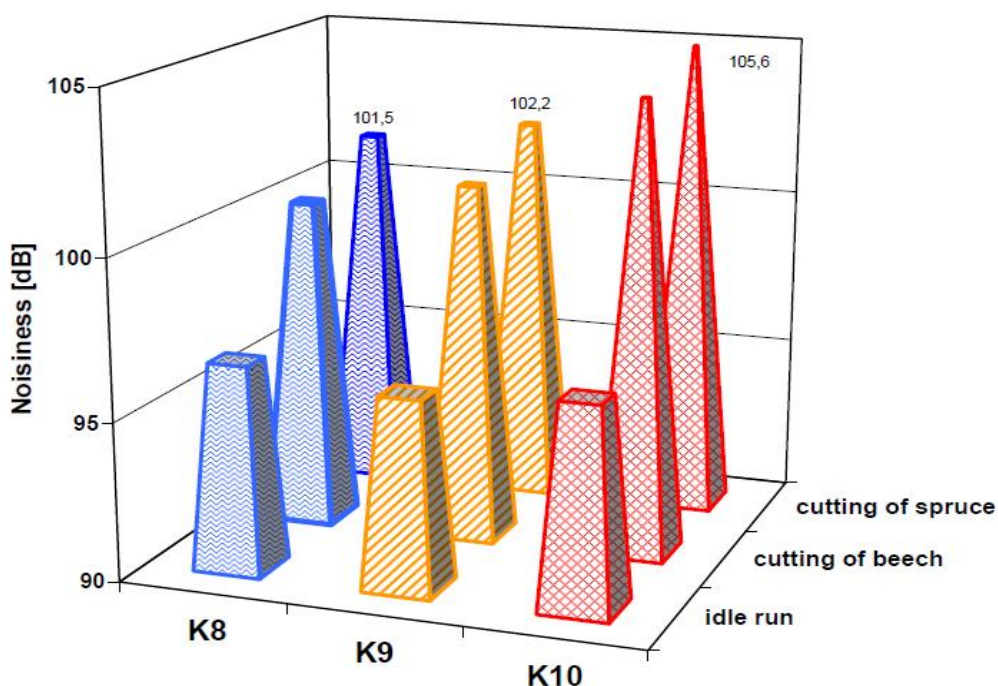
Zkouška hlučnosti, izokinetické odběry dřevního odpadu a vznikající odřezky dřev pro vyhodnocení kvality povrchu byly prováděny při běhu kotoučů naprázdno a při řezání měkké (SM) a tvrdé dřeviny (BK). Řezání se uskutečňovalo v podélně směru, přičemž vlákna dřevin měla převážně radiální směr. Vzdálenost stolu od vrcholu zubu pilového kotouče byla 34 mm a zvolena byla právě tak, aby byly v záběru vždy 3 zuby. Toto je praxí zavedené pravidlo, aby vznikala dobrá kvalita obrobené plochy a hlavně nedocházelo při řezání k vytrhávání dřevních vláken ze strany, kde pilový kotouč vychází ze dřeva. Při tomto řezání vzniká také delší tříska, protože v součinnosti otáčení pilového kotouče a posuvu obrobku dochází k postupnému nárůstu jednak tloušťky třísky ale i k zvětšení délky trajektorie břitu ve dřevě. Z hlediska rozboru dřevního odpadu tímto modelem řezání nám mimo jiné vzniká velká rozmanitost tvaru třísky a máme tedy reálnou šanci zastoupení jednotlivých frakcí pro granulometrickou analýzu.

Výsledky naměřené hlučnosti při měření naprázdno a při řezání bukových a smrkových deskového materiálu jsou uvedeny v grafu na obr. 56 a 57.



Obr. 56 Hlučnost pilových kotoučů při jmenovitých otáčkách

Při chodu naprázdno a jmenovitých otáčkách byly mezi kotouči K9 a k 10 nevýznamné rozdíly v hlučnosti, viz obr. 56, kde vložené lineární přímky mezi naměřené hodnoty jsou rovnoběžné a téměř na stejné hodnotě. Je to dáno tím, že v tomto případě je dominantní pouze aerodynamický hluk, kde se vliv dilatačních a odhlučňovacích drážek příliš neuplatňuje. Nicméně je zde zřetelný rozdíl u pilového kotouče K8, který má oproti předešlým dvěma kotoučům odlišnost v rozdílné rozteči zubu. Takže se dá říci, že tato úprava na pilovém kotouči je dosti ovlivňující z pohledu snížení hlučnosti pilových kotoučů za chodu na prázdko. K podobným závěrům dospěly i zahraniční výzkumy, kde je uveden pokles hlučnosti podobně upravovaných pilových kotoučů s nerovnoměrnou roztečí zubů o 2 až 4 dB (Svoren, 2006). Tyto poznatky dobře korespondují s uváděnými údaji v prospektových materiálech některých výrobců pilových kotoučů Leitz či Freud.



Obr. 57 Hlučnost pilových kotoučů při řezání Smrku a Buku (Kopecký a kol. 2012)

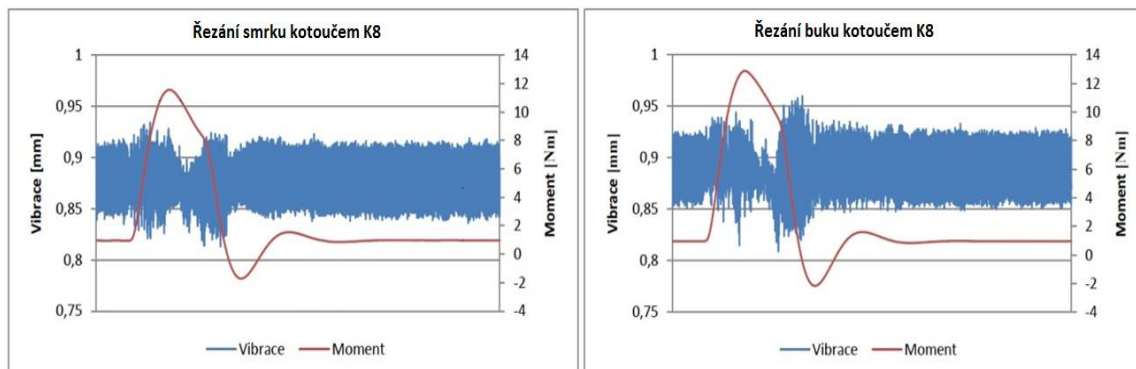
Uváděné výsledky byly již v minulosti publikovány v odborných časopisech, proto i v této práci jsou z nich použity některé obrázky a výsledky doplněné komentářem. Jedná se zejména o publikaci Kopecký a kol. 2012.

4.5 Výsledky v oblasti drsnosti obrobeného povrchu

Abychom mohli objektivně hodnotit kvalitu obrobeného povrchu, musíme předem znát, jak se pilové kotouče při řezání chovaly, tedy jaké vykazovaly průběhy vibrací.

4.5.1 Výsledky kmitání pilových kotoučů při obrábění dřeva

Na následujících několika stránkách jsou uvedeny výsledky chování pilových kotoučů při řezání v optimálních otáčkách $n = 4200 \text{ ot.min}^{-1}$ pro buk i smrk. Navíc je zde zobrazen i moment, díky jehož průběhu lze snadno rozpoznat, kdy kotouč najel do materiálu a naopak zase kdy z něho vyjel. Samotným řezáním a nastavením příslušné roviny řezu vznikly odřezky s tloušťkou cca 5 mm, na niž se vyznačila místa ohraničená obdélníčkem pro hodnocení povrchu a popisem za jakých podmínek vznikly.

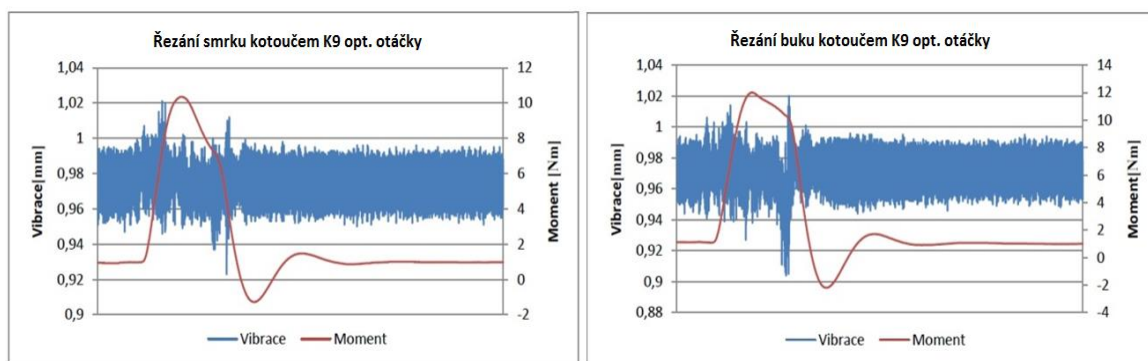


Obr. 58 Průběh vibrací při řezání smrku a buku kotoučem K8 v optimálních otáčkách

K8 – smrk: vibrace pilového kotouče K8 dosahovaly před vstupem do dřeva smrku zhruba 0,07 mm. Při prvotním styku kotouče s materiálem došlo ke skokovému namáhání kotouče, což zapříčinilo zvýšení rozkmitu na hodnotu 0,1 mm, poté došlo k ustálení kotouče v řezu a poklesu vibrací až na 0,03 mm. Zde je pozorovatelné, jako by byl kotouč okolním řevem držen a téměř nekmitá. V okamžiku, kdy kotouč opouští řezaný materiál, je kotouč zase namáhán jinými silami, proto opět dochází k rozkmitání až po dobu, než se síly vyrovnají a dojde k navrácení na původní hodnoty vibrací 0,07 mm, jako tomu bylo před řezáním.

V místě, kde dochází k růstu momentové křivky, vstupuje kotouč do materiálu a začíná oddělovat břity „třísky“. Moment vystoupal do výšky během řezání na 11 Nm. Při vyjetí kotouče z řezu moment pochopitelně klesá až na -1,7 Nm. Tento jev je dán setrvačností pilového kotouče a vřetena. Poté se hodnota momentu ustálí na hodnotě 1 Nm tak jak byla na začátku před řezáním, to odpovídá potřebné energii ke konstantním nastaveným otáčkám.

K8 – buk: průběh vibrací v řezu bukového dřeva pilovým kotoučem K8 je víceméně stejný jako u předešlého experimentu při řezání smrku. Rozdílné jsou pouze hodnoty řezného momentu. V tomto případě nárůst řezného momentu lze jednoduše odůvodnit vyšší hustotou a tvrdostí buku oproti smrku. Obecně je známo, že čím je větší hustota dřeva, tím rostou i mechanické vlastnosti. Proto i při dělení dřeva s větší hustotou musí zákonitě růst i odpor při obrábění.

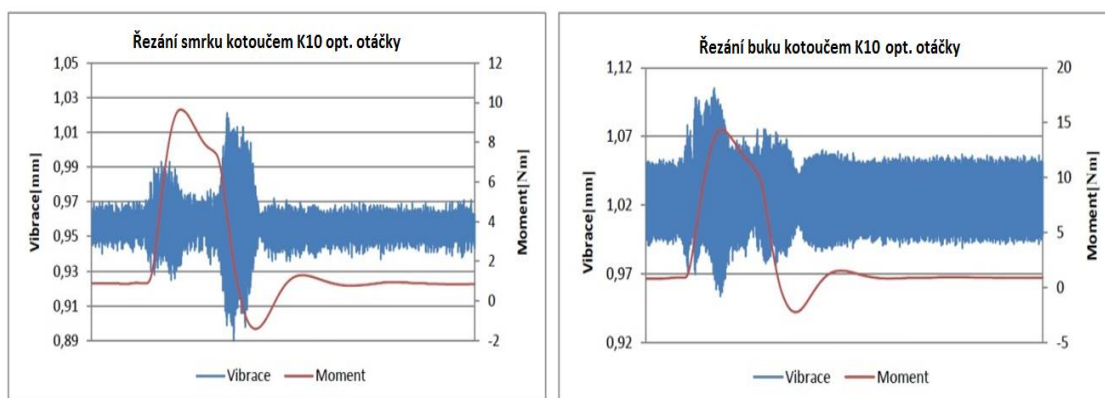


Obr. 59 Průběh vibrací při řezání smrku a buku kotoučem K9 v optimálních otáčkách

K9 – smrk: hodnoty vibrací u nastavených otáček jsou u kotouče K9 velmi malé, dosahují hodnot 0,04 mm před vstupem do řezu. V důsledku najetí kotouče do řezu se hodnoty zvýší na 0,06 mm. Během řezání dochází k poklesu vibrací na 0,04 mm a ustálení kotouče až do okamžiku vyjetí kotouče z materiálu, kdy dochází k rychlému nárůstu vibrací na hodnotu 0,07 mm. Po ukončení řezu se kotouč opět ustálí na původních vibracích, tedy hodnotě 0,04 mm.

Moment od řezné síly se pohybuje se standardním průběhem záznamu v rozmezí od 0,9 Nm do 10,3 Nm a při vyjetí kotouče moment přejde na zápornou hodnotu -1,2 Nm a poté se vrátí na původní hodnotu 0,9 Nm.

K9 – buk: hodnoty vibrací při pořezu buku jsou u kotouče K9 téměř totožné s řezáním smrku. Jediný rozdíl je v hodnotě vibrací před vyjetím kotouče z řezu, vibrace v tomto případě dosahují téměř 0,1 mm. Krouticí moment je zase opět větší než u předcházejícího měření smrku. Hodnota, o kterou je moment při řezání buku větší než u smrku pilovým kotoučem K9 je 1.4 Nm.



Obr. 60 Průběh vibrací při řezání smrku a buku kotoučem K10 v optimálních otáčkách

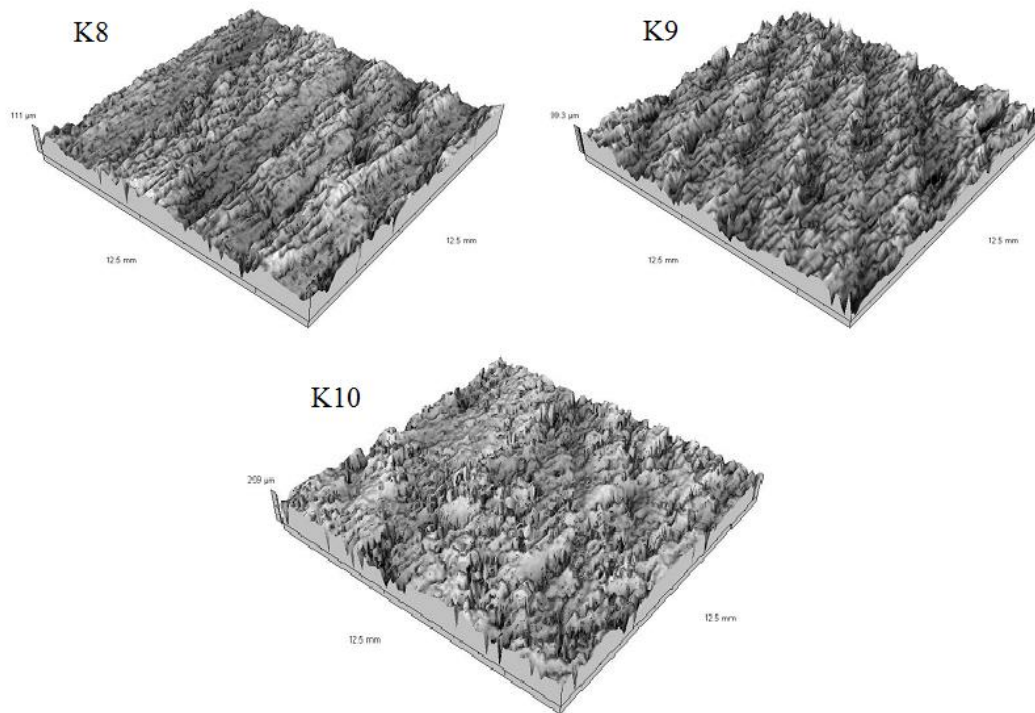


K10 – smrk: vibrace u kotouče činily při těchto otáčkách pouze do 0,02 mm, což poukazuje na velmi kvalitní provedení rovinnosti těla pilového kotouče. Při prvotním styku kotouče s řezaným materiálem se krátkodobě zvýšily až na 0,06 mm a následovalo „uklidnění“. Při vyjetí kotouče z řezu se rozkmit kotouče ještě trochu zvýšil na hodnotu 0,12 mm a následně poté dochází ke zklidnění kotouče a k poklesu vibrací na hodnotu 0,02 mm. Moment potřebný k obrábění tímto kotoučem dosáhl velikosti 9,6 Nm.

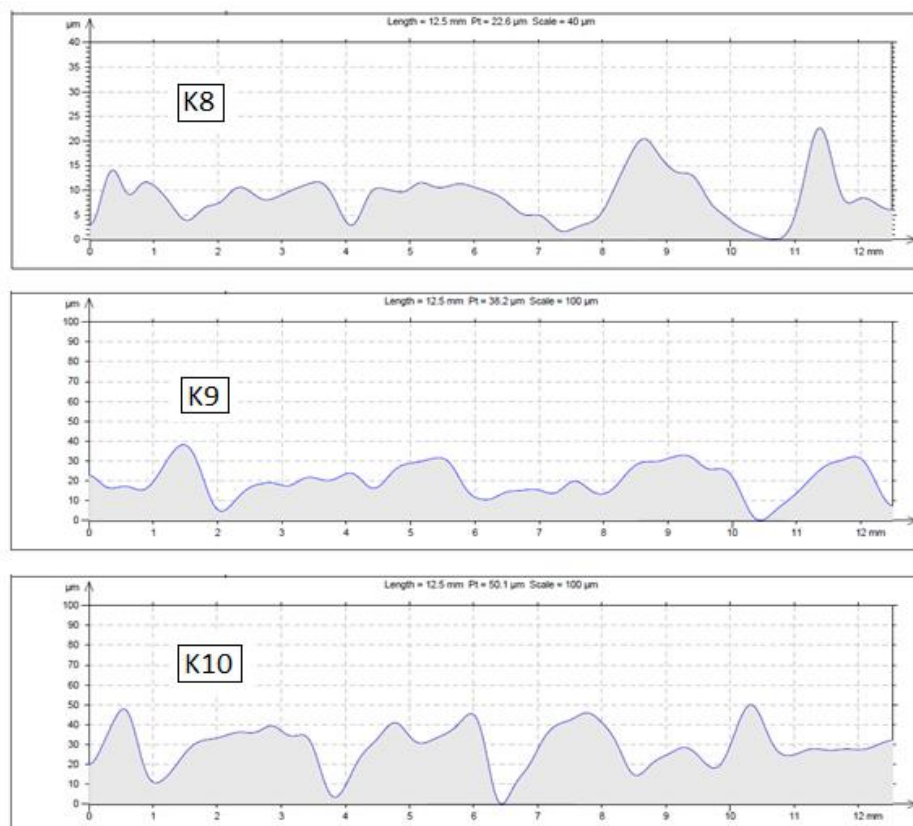
K10 – buk: při řezání buku kotoučem K10 v optimálních otáčkách vibrace dosahují hodnoty 0,06 mm před vstupem do řezu. To je oproti vibracím u řezání smrku trojnásobně větší hodnota, přičemž by měla být přinejmenším stejná či podobná. Tato skutečnost lze logicky vysvětlit absencí dilatačních drážek na těle pilového kotouče, protože tato měření s tímto kotoučem na bukovém dřevě se uskutečňovala po provedení na 20 řezech smrkového materiálu. Toto předpokládám, vedlo k mírnému zahřátí kotouče a také ke zvýšení vibrací. Na začátku řezání dochází k nárůstu vibrací na hodnotu 0,14 mm, poté dochází k poklesu na 0,09 mm a po vyjetí kotouče z řezu se hodnota ustálí opět na 0,06 mm rozkmitu. Krouticí moment dosahuje před řezáním hodnot od 0,8 Nm, což je hodnota odpovídající dodané energii potřebné k otáčení pilového kotouče konstantními otáčky 4200 za minutu na zkušebním stendu. Řezem moment vystoupal na 14,4 Nm. Zde je opět pozorovatelné ono dříve zmíněné pravidlo s hustotou, kde je tato hodnota o 4,8 Nm vyšší než u smrku. Po ukončení procesu obrábění s pilovým kotoučem K10 z materiálu buku klesá měřená veličina na zápornou hodnotu -2,2 Nm a následně se ustálí na 0,8 Nm.

4.5.2 Hodnocení kvality povrchu

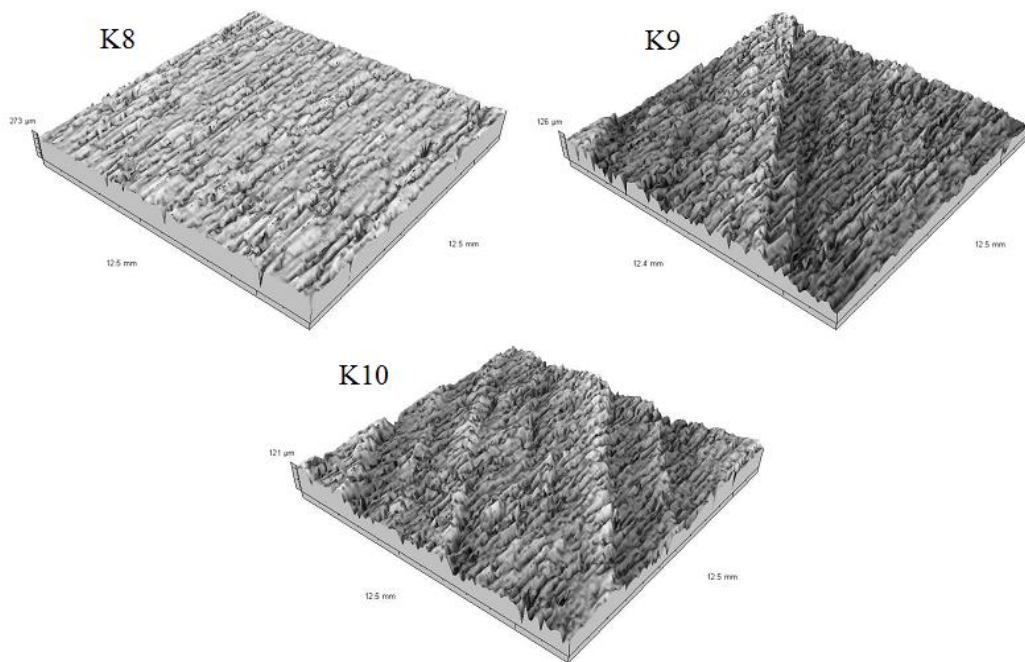
Z literárních pramenů jednoznačně vyplývá, že rozhodujícím pro hodnocení obráběného povrchu a v našem případě povrchu vzniklého rotačním způsobem obráběním (řezáním pilovými kotouči), je hodnotícím kritériem vlnitost. Na následujících obrázcích jsou uvedeny 3D modely základní plochy a z nich vytvořeny 2D řezy, ze kterých byly pomocí Gaussova filtru 0,8 mm získány profily vlnitosti.



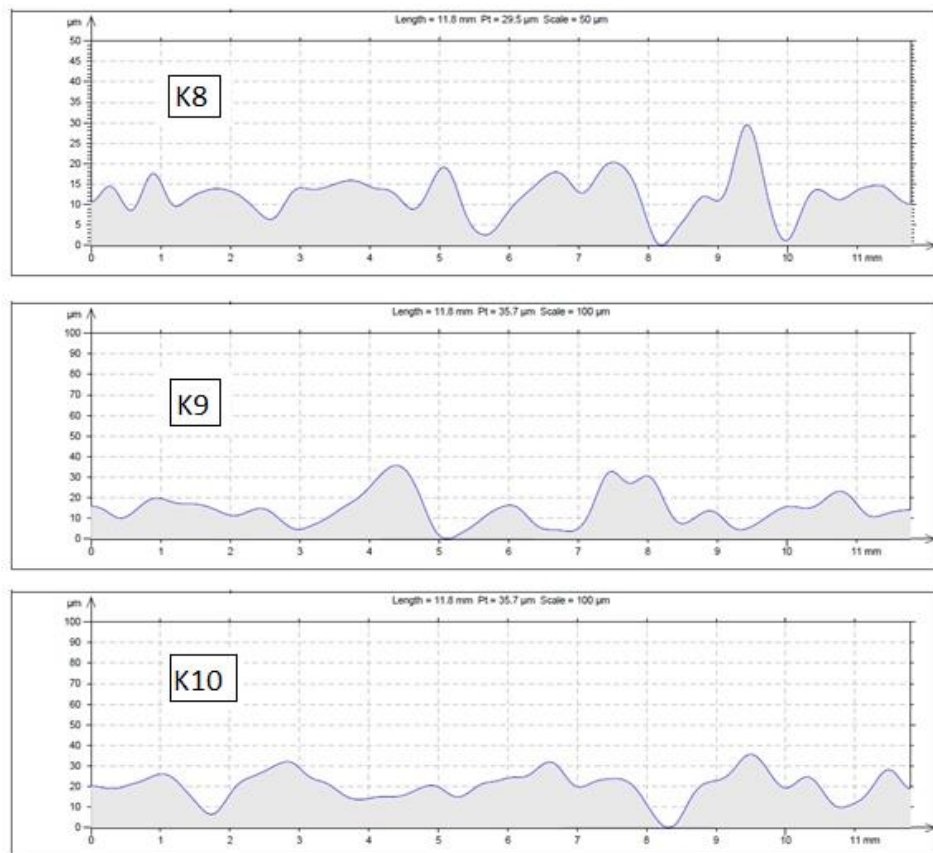
Obr. 61 3D modely plochy získané pilovými kotouči při řezání smrku v optimálních otáčkách (Hlásková a kol. 2012)



Obr. 62 2D profily vlnitosti povrchu vzniklé řezáním smrku pilovými kotouči v optimálních otáčkách (Hlásková a kol. 2012)



Obr. 63 3D modely plochy získané pilovými kotouči při řezání buku v optimálních otáčkách (Hlásková a kol. 2012)



Obr. 64 2D profily vlnitosti povrchu vzniklé řezáním buku pilovými kotouči v optimálních otáčkách (Hlásková a kol. 2012)



Tabulka 7 Hodnoty parametrů popisující kvalitu povrchu

Hodnotící parametry		Smrk			Buk		
		K8	K9	K10	K8	K9	K10
2D parametry drsnosti	<u>Ra</u> [μm]	1,62	3,076	4,336	2,426	2,346	1,92
	<u>Rq</u> [μm]	2,04	3,79	5,4	2,956	2,89	2,363
	<u>Rt</u> [μm]	18,1	29,8	54,9	24,233	28,033	18,3
	<u>Rz</u> [μm]	6,54	13,8	24,1	7,42	7,19	6,66
	<u>RSm</u> [mm]	0,415	0,535	0,589	0,539	0,617	0,443
2D parametry vlnitosti	<u>Wa</u> [μm]	3,85	11,686	11,626	5,19	7,636	8,1
	<u>Wq</u> [μm]	4,213	12,48	12,9	5,776	8,376	6,72
	<u>Wt</u> [μm]	23,2	58,133	60,5	31,1	37,366	36,133
	<u>Wz</u> [μm]	5,77	23	27,9	7,69	10,3	11
	<u>WSm</u> [mm]	2,743	2,553	2,396	2,01	2,54	2,313
3D parametry	<u>Sa</u> [μm]	14,3	13,4	35,7	15,2	16,4	14,8
	<u>Sq</u> [μm]	20,3	17,3	52,3	33,2	22,3	20,4
	<u>SaW</u> [μm]	9,86	9,27	18,2	6,64	11	9,7
	<u>SqW</u> [μm]	12,4	11,5	22,7	8,87	13,9	12,1

Obráběním smrku kotoučem K8 v optimálních otáčkách byla dosažena vlnitost povrchu 22,6 μm při střední aritmetické hodnotě W_z 5,77 μm . Vlnitost povrchu obráběného kotoučem K9 v optimálních otáčkách dosáhla 38,2 μm se střední aritmetickou hodnotou W_z 23 μm . A poslední vlnitost povrchu obráběného kotoučem K10 měla hodnotu 50,1 μm a k tomu odpovídající střední aritmetická hodnota W_z byla 27,9 μm .

Z obrázků a tabulky je zřejmé, že nejlepších výsledků při obrábění smrku v optimálních otáčkách bylo dosaženo kotoučem K8. Poměrně dobrých výsledků bylo dosaženo i při řezání kotoučem K9. Naproti tomu kvalita řezné spáry obráběná pilovým kotoučem K10 je minimálně dvakrát horší než ve srovnání se vzorky získanými obráběním kotouči K8 a K9. Hodnocením kvality povrchu pomocí 2D parametru Wa byla potvrzena nejlepší kvalita povrchu obrobena kotoučem také právě u K8. U povrchů vytvořených kotouči K9 a K10 byla hodnota parametru Wa téměř trojnásobně vyšší než u kotouče K8.

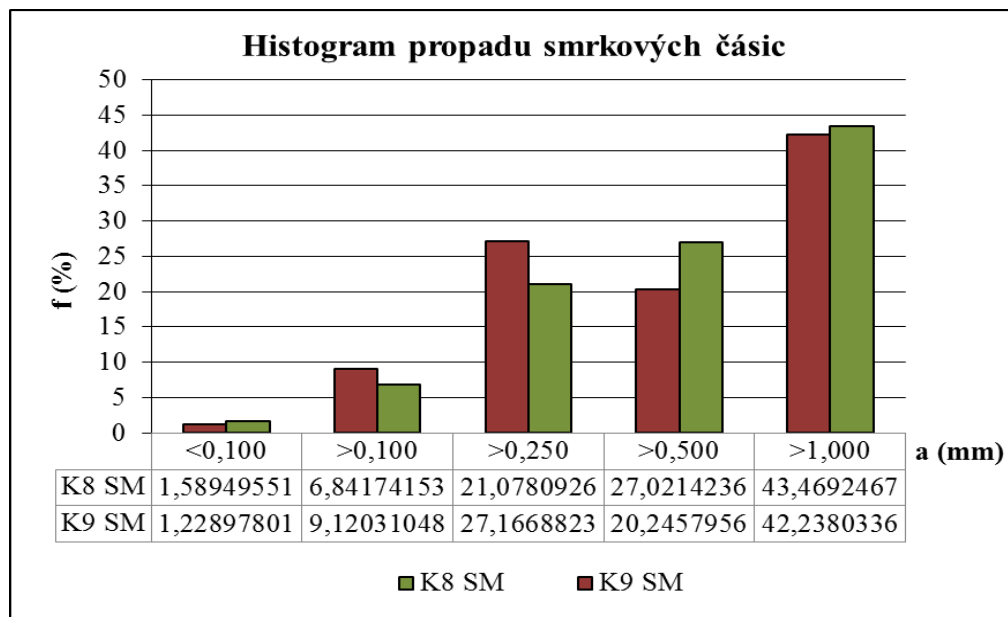
Při obrábění buku kotoučem K8 v optimálních otáčkách bylo dosaženo vlnitosti povrchu 29,5 μm u odpovídající střední aritmetické hodnotě W_z 7,69 μm . Vlnitost vzniklé řezné spáry (obroběného povrchu) kotoučem K9 v optimálních otáčkách dosáhla maxima 35,7 μm se střední aritmetickou hodnotou W_z 10,3 μm . Kotoučem K10



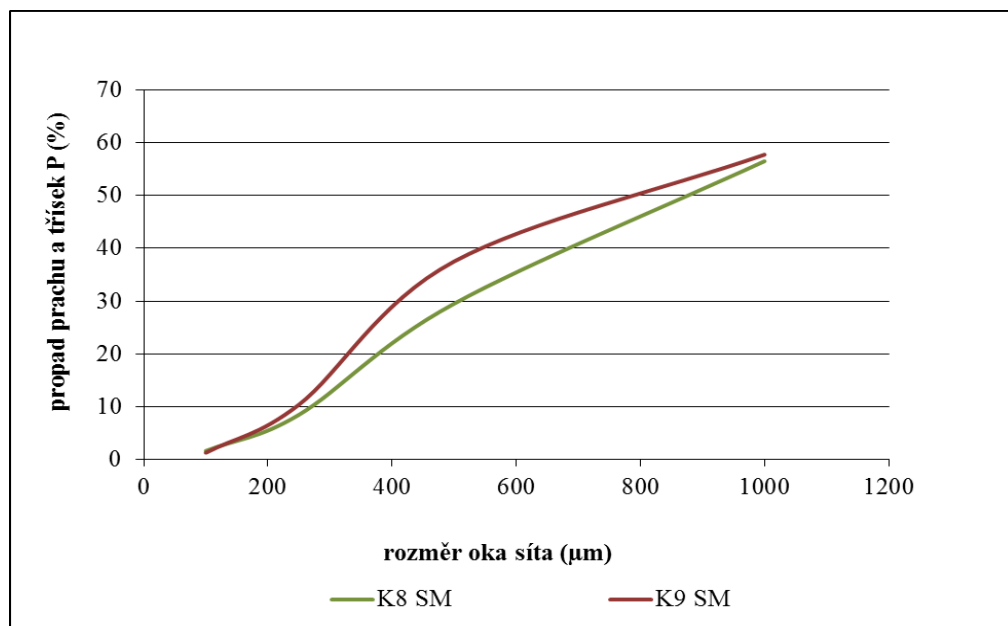
a jeho obráběním v optimálních otáčkách byla dosažena vlnitost povrchu 35,7 μm při střední aritmetické hodnotě W_z 11 μm .

4.6 Výsledky v oblasti prašnosti při obrábění dřeva pilovými kotouči

Hmotnosti dřevních částic jsou znázorněny na histogramu pro dané dřeviny ve formě procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí získaných z granulometrické analýzy z celého izokinetickou sondou odebraného množství třísek.



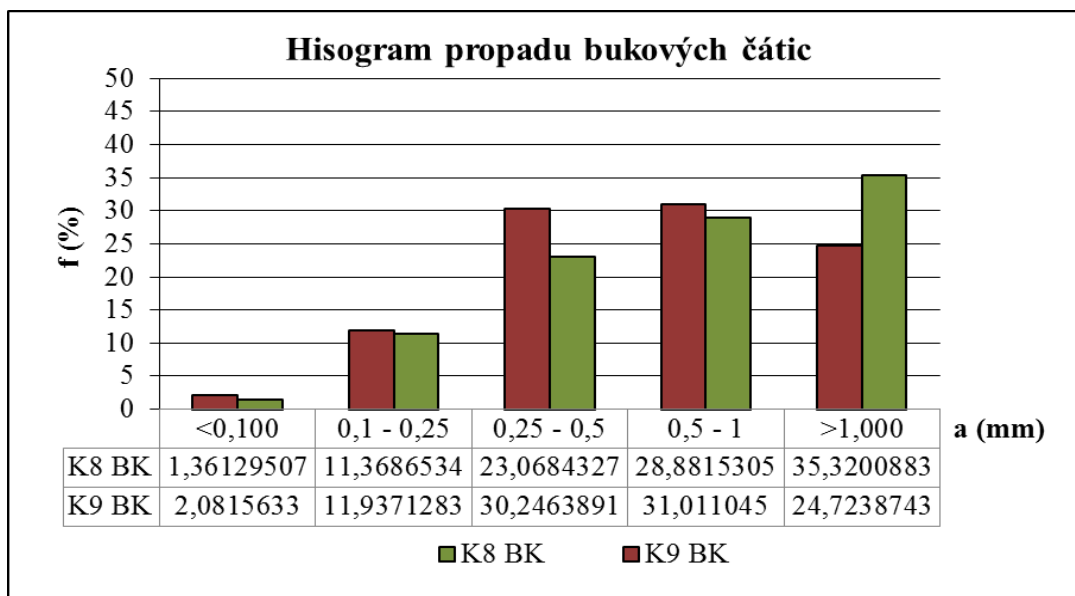
Obr. 65 Histogram propadu smrkových částic



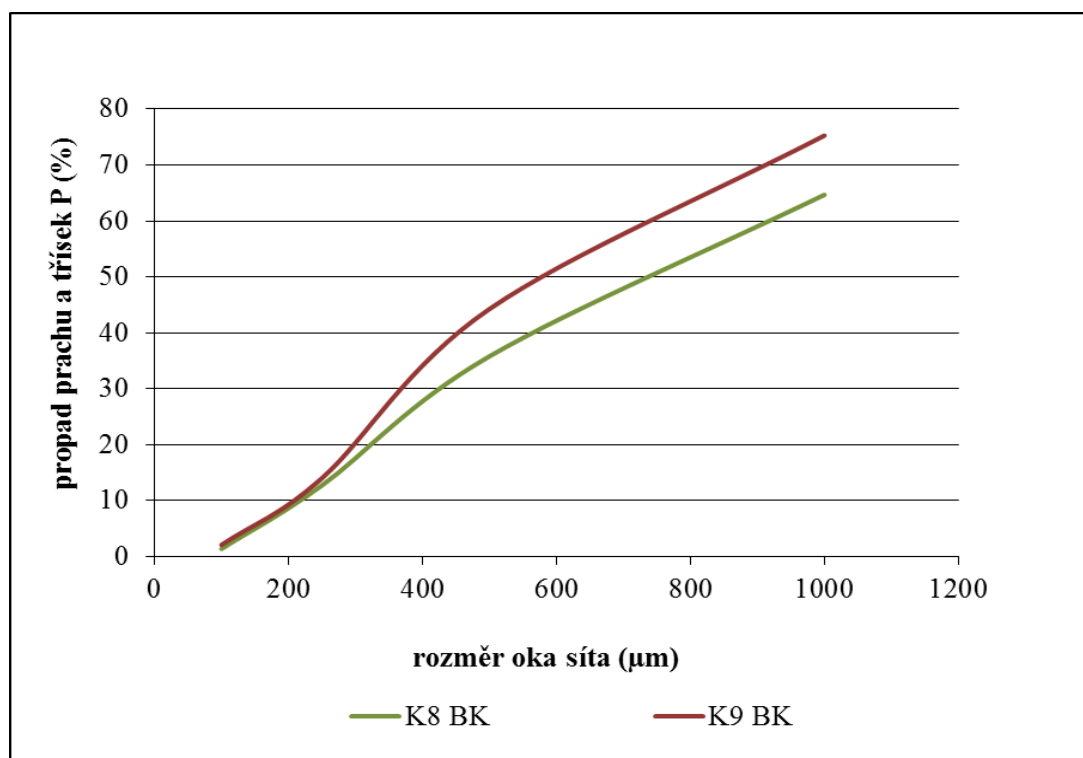
Obr. 66 Křivka propadu smrkových částic



Je vidět, že při řezání smrku pilovými kotouči K8 a K9 bylo největší zastoupení částic nad 1 mm. Částice pod 0,1 mm jsou částice polétavé a jsou nejvíce nebezpečné pro zdraví člověka. Nebezpečí hrozí taktéž z hlediska možnosti výbuchu. Jejich procentuální zastoupení u vzorku získaného při řezání smrku je poměrně malé a pohybuje se do 2 % z celého objemu.



Obr. 67 Histogram propadu bukových částic

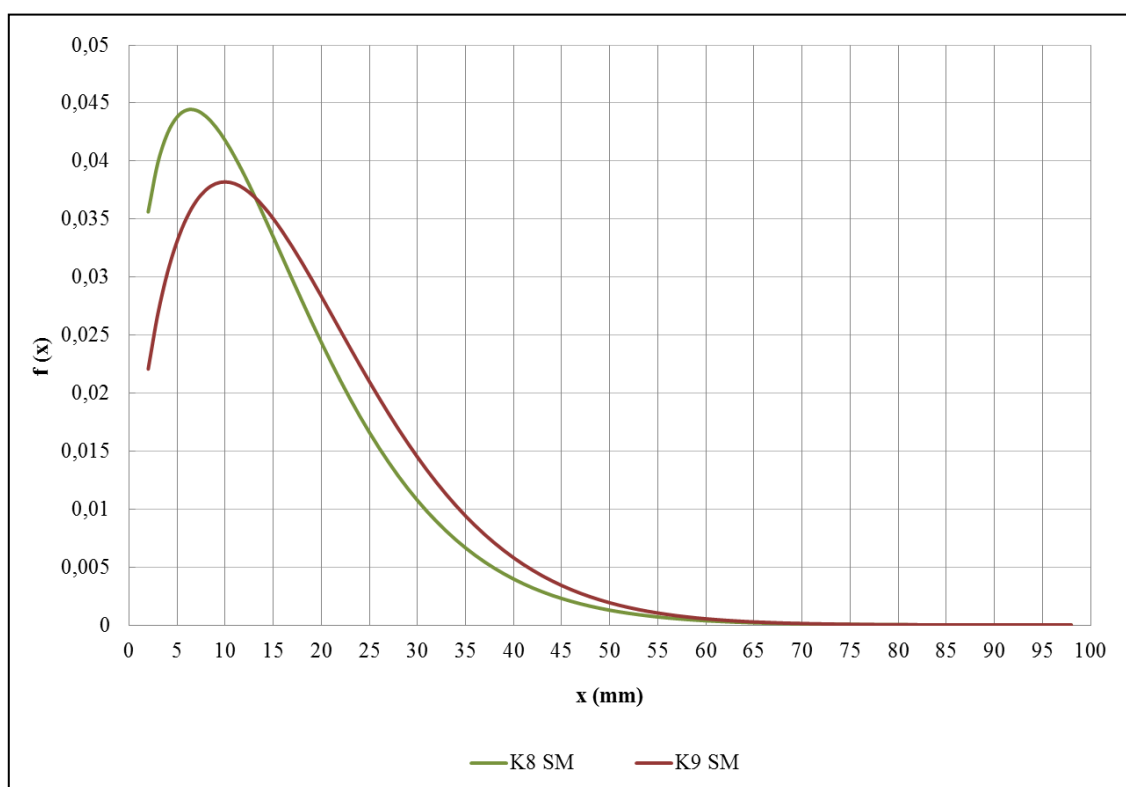


Obr. 68 Křivka propadu bukových částic

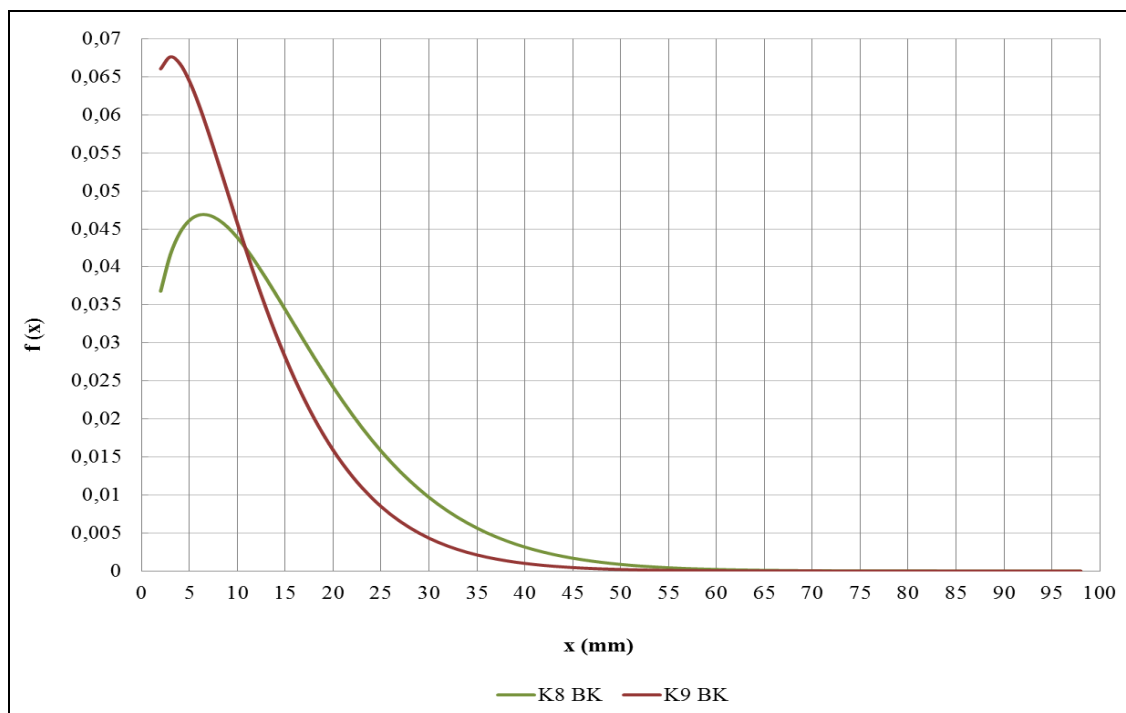


Je patrné, že při řezání buku pilovým kotoučem K8 mají jednotlivé částice dle jejich velikosti rostoucí procentuální zastoupení z celého objemu. Naopak u kotouče K9 je největší zastoupení částic v oblasti od 0,25 do 0,5 a od 0,5 do 1 mm.

Prachové částice menší než 100 μm z granulometrického rozboru byly podrobeny mikroskopické analýze podle metodiky uvedené v kapitole 3.1.4, Výsledky mikroskopické analýzy byly dále vyhodnoceny statisticky a pro pravděpodobnost výskytu jemných prachových částic byl použit poměrně univerzální dvouparametrický Weibullův model. Ten velmi dobře popisuje rozložení sypkých hmot. Náhodnou veličinou byla zvolena průměrná šířka částice.



Obr. 69 Hustota pravděpodobnosti výskytu dřevních částic při řezání smrku



Obr. 70 Hustota pravděpodobnosti výskytu dřevních částic při řezání buku



5 DISKUSE

Ze získaných výsledků je zřejmé, že konstrukce pilového kotouče má velice podstatný vliv na hodnocené parametry při obrábění dřeva pilovými kotouči.

Určitým paradoxem zásahů do provedení těla kotouče (dilatačních a odhlučňovacích drážek, apod.) je snížení samotné tuhosti disku kotouče a posun rezonančních a kritických otáček do nižších otáčkových hladin. Například rozdíl kritických otáček mezi kotoučem s plným diskem K10 ($n_{k3} = 7557 \text{ min}^{-1}$) a kotoučem s nepravidelnou roztečí zubů K8 ($n_{k3} = 4398 \text{ min}^{-1}$) činil 3159 min^{-1} . Je třeba si ale uvědomit, že plný disk pilového kotouče, je nadměrně náchylný na zvýšení teploty, přičemž zkoušky byly provedeny za takových podmínek, že k jeho ohřevu docházelo minimálně. Při vyšších teplotách, kdy se pilový kotouč v řezné spáře zahřívá jednak třením, ale také odporem vnikání břitů do materiálu spojeným s odvodem třísky ven z řezné spáry, dochází ke značné deformaci disku a věnce kotouče a tudíž kritický stav nestability se může vyskytnout i při nižších otáčkách.

Z grafů průběhu vibrací pilových kotoučů při otáčkách 2000 až cca 5000 min^{-1} jsou zřejmá místa s klidným chodem kotoučů a oblasti, kde naopak kotouče vibrují s velkými amplitudami. V pásmech, kde jsou vibrace malé, by se měla nacházet oblast optimálních otáček. Oproti tomu v oblastech vysokého kmitání, by se měly nacházet rezonanční otáčky. Experiment potvrdil význam přímého měření vibrací při chodu naprázdno a zejména při řezání, protože hodnoty rezonančních a kritických otáček zjištěné klasickými metodami (Chladného obrazce) vykazují poměrně značný rozptyl (běžně se uvádí $\pm 10\%$). Porovnáme-li hodnoty z přímého měření a hodnot zjištěných z předchozích měření ve spolupráci s TU Zvolen zjistíme, že teoretické hodnoty rezonančních otáček se mírně liší. Proto také optimální provozní otáčky testovaných kotoučů přímým měřením vibrací jsou vždy mimo oblasti rezonančních a kritických otáček a nenastává situace, kdy se doporučené provozní otáčky vyskytnou například v rezonančních oblastech. Nejvyšší amplitudy vibrací byly zaznamenány u kotouče K8, přičemž se zde projeví i negativní účinky deformace disku kotouče. U tohoto kotouče se projevilo prohýbání na jednu stranu. Pilový kotouč K8 byl firmou Stelit Trenčín nedostatečně vyrovnán a vytužen válcováním. Proto bylo nutné pro další měření tento kotouč vyrovnat a vytužit. To pro nás provedla firma Pilana. I přesto byly u kotoučů K8



a K9 patrná místa lokálního rozkmitání při zjišťování průběhu vibrací, kde hodnoty amplitudy dosahovaly přes 0,25 mm.

Při řezání smrku a buku docházelo k ději, kdy v okamžiku vstupu kotouče do řezaného materiálu vzrostly vibrace, následovalo zklidnění a při výstupu kotouče z materiálu se opět vibrace ustálily na hodnotě jako před řezáním. Tento děj je samozřejmě pochopitelný, neboť při vstupu a výstupu kotouče z řezaného materiálu dochází k změnám namáhání kotouče. Ustálení vibrací po vniknutí kotouče do dřeva vždy dosáhlo původní velikosti kmitání, než se započal proces obrábění. Proto také plochy pro hodnocení kvality povrchu byly vybírány cca v polovině délky vzniklého vzorku.

Je zbytečné, abychom při hodnocení kvality jednotlivých povrchů dřeva použili všechny parametry. V tabulce č. 7, která je uvedena v kapitole 4.5.2 vidíme, že nejvyšších hodnot dosahují parametry Rt a Wt , které vyjadřují celkovou výšku profilu (jsou dány součtem výšky Zp nejvyššího výstupku profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky). Nehledě k tomu, že tyto parametry mohou být do jisté míry ovlivněny anatomickou stavbou dřeva, proto je lepší vyhodnocovat povrch pomocí jiných parametrů, a to především parametry vlnitosti. Při hodnocení vlnitosti je pro nás pozitivní, že se zde ve velké míře promítá kmitání nástroje a nepromítají se do výsledku mechanicko-fyzikální vlastnosti samotné dřeviny. Nevýhodou tohoto hodnotícího parametru je kvalita upnutí a vedení obrobku při obrábění. Do parametrů S , které jsou brány z prostorového měření, zasahuje vlastní struktura obráběného povrchu. Proto je pro vyhodnocení výsledků, jak už bylo řečeno, lepší pro naše vyhodnocení využívat parametry vlnitosti přímo z jednotlivých 2D řezů.

Vyhodnocení kvality pomocí 2D parametrů vlnitosti ukazuje na nejlepší kvalitu řezné spáry při řezání kotoučem K8. Hodnoty parametrů Wa jsou při řezání smrku v optimálních otáčkách minimálně o polovinu menší než při obrábění kotouči K9 a K10. Při vyhodnocení povrchu pomocí 3D parametrů jsme nejhorší kvalitu řezné spáry u smrku i buku zjistili u kotouče K10. Parametr Sa měl při obrábění smrku hodnotu 35,7 μm , což je přibližně o 20 μm více než u kotouče K8 a K9.

Co se týče konstrukčních úprav odhlučňovacími drážkami, mají opravdu pozitivní vliv na snížení hladiny hluchnosti při řezání, kdy rozdíl mezi neupraveným kotoučem K10 a kotoučem s úpravami K9 činil 3 dB, tj. snížení akustického tlaku až o



50 %, viz obr. 57. Ještě lepšího výsledku bylo dosaženo u kotouče s nepravidelnou roztečí zubů K8. Zde byl zaznamenán pokles o 4 dB oproti hlučnosti kotouče bez úprav K10. To také znamená, že nepravidelná rozteč zubů způsobuje snížení hluku o 1 dB oproti kotouči se stejným tělem. Patřičným pozitivem byla také změna charakteru hluku z periodicky se opakujících stejných frekvencí zvuku na nepravidelně se opakující zvukové vlny, které jsou pro člověka při stejném akustickém tlaku „pocitově přijatelnější“. Dalším jevem vyskytující se na obrázku je dosti velký rozdíl mezi řezáním uvedených dřevin. Je pozorovatelné, že při řezání smrku dochází k vyšším hodnotám hlučnosti než při stejných podmínkách u buku. Tuto situaci lze vysvětlit rozdílnou strukturou dřeva. Dřevo smrku má podstatně větší rozdíly mezi jarním a letním dřevem oproti buku, který má téměř homogenní strukturu. Proto u smrku dochází v důsledku vnikání ostří břitu do rozdílných struktur materiálu k navýšení výsledné hodnoty hlučnosti.

Lze konstatovat, že hladiny hluku u všech kotoučů v celém režimu otáček převyšují povolenou hygienickou úroveň hluku o 20 dB v daném prostoru laboratoře. Bezpečná limitní hodnota je považována 85 dB podle vládního nařízení číslo 148/2006 Sb., které se zabývá „Akustikou - hluk v pracovním prostředí“. Proto je vhodné od 80 dB již používat ochranné pracovní pomůcky.

Z výsledků granulometrické analýzy vyplývá, že prototypový kotouč K8 s nepravidelnou roztečí, oproti testovanému kotouči K9, tvoří třísku převážně větších rozměrů. Zásadní a pro praxi podstatná je skutečnost, že podíl prachových částic je na nízké úrovni z celkové hmotnosti odebraného vzorku. V případě pilového kotouče K8 je toto procento u dřeviny smrku srovnatelné a u buku dokonce menší než u kotouče se stejnou roztečí zubů. Je tedy zřejmé, že z tohoto hlediska má pilový kotouč kromě snížení hluku díky nepravidelné rozteči zubů další důležitou výhodu oproti kotouči s pravidelnou roztečí. Podle získaných výsledků lze usuzovat, že na tvorbu prachu a třísek má vliv i použitá dřevina, potažmo její fyzikální a mechanické vlastnosti a i anatomická stavba.

Z experimentu je zřejmé, že tvorba velmi jemných dřevních částic pod 100 μm je výrazně malá. Přesto byla provedena mikroskopická a pravděpodobnostní analýza jemných částic ve vztahu na požadavky pracovního prostředí. Z výsledků pravděpodobnostní analýzy není přímo patrný vliv konstrukce pilových kotoučů na



hustotu pravděpodobnosti velmi jemných částic. U smrku byla nejvyšší hodnota hustoty pravděpodobnosti od 7 do 17 μm . Nejvyšší hodnota pravděpodobnosti u buku se pohybovala od 3 do 12 μm . Z těchto výsledků je možné usuzovat, že nejjemnější částice vznikaly zejména při řezání buku. Toto je dáno pravděpodobně jejich tvrdostí a strukturou.

Během řezání se na filtru pro zachytávání jemných částic, který byl umístěn za cyklónovým odlučovačem, zachytilo vždy velmi malé množství prachu (0,003 – 0,006 g). Po mikroskopické a pravděpodobnostní analýze jednoho vybraného filtru bylo zjištěno, že tyto částice jsou, pro určení hustoty pravděpodobnosti výskytu částic velmi jemného prachu, statisticky nevýznamné. Jinak řečeno při řezání kotoučovými pilami nevzniká pro člověka vážné nebezpečí z velmi jemných prachových částic. Přesto je velice důležité této problematice věnovat značnou pozornost, protože přece jenom jemný prach při řezání vzniká a dokonce i z některých druhů dřevin může způsobovat různé druhy onemocnění (např. alergické reakce, poškození sliznic apod.). Proto doporučuji, aby na problematiku ohledně odsávacích zařízení byl kladen velký důraz. Při špatně zvolené technologii odsávacího zařízení by se mohlo do pracovního prostředí uvolňovat větší množství nebezpečného jemného prachu, který se hůře usazuje a zůstává dlouhou dobu ve vznosu. S takovými případy se běžně v dřevařských provozech setkáváme, proto je vhodné přinejmenším časté větrání či použití zvlhčovačů vzduchu, které dokážou snížení prašnosti až o 75 %. V pracovním prostředí je též nutné sledovat množství prachu v ovzduší, které je dle nařízení vlády č. 361/2007 Sb. regulováno tzv. přípustnými expozičními limity.

Navržená metoda přímého sledování průběhu vibrací pilového kotouče dvěma fázově posunutými snímači nám poskytuje podrobnější informace o nestabilních stavech pilového kotouče, které jsou vyvolány přirozenými procesy při jeho rotaci. Cenou informací z amplitudově frekvenční analýzy je zjištění frekvence dozadu postupující vlny f_z s možností přibližného určení součinitele odstředivé síly λ a výpočtu rezonančních a kritických otáček. Toto vyžaduje snímače a softwarové vybavení, jenž umožňuje měření s vysokou vzorkovací frekvencí až 1200 Hz, kde je možné sledovat otáčející se pilový kotouč s podrobným záznamem při pracovních otáčkách. Metoda je ovšem poměrně citlivá na vybudení kmitání kotouče, např. od dynamické nevyváženosti kotouče, vlivu vlastního upnutí, změnu setrvačnosti pohonu a v neposlední řadě kmitání



stroje. Toto jsou poměrně malé budící síly ve vztahu k samotnému řezání. Zpozorujeme-li, že se pilový kotouč už při tak malých budících silách dosti vibruje, co teprve udělá při řezání. Samozřejmě dojde k vybočení pily z roviny řezu a v krajním případě může nastat i destrukce pilového kotouče s plynoucími následky. Nespornou výhodou metody přímého sledování průběhu vibrací pilového kotouče dvěma fázově posunutými snímači je její aplikace jako provozní bezdemontážní diagnostiky kotoučových pil. Snadnou přemístitelností polohy snímačů je možné diagnostikovat nejen vlastní pilový kotouč, ale také vřeteno, příruby či vůle v ložiskách a posouzení vlivu nepřesností těchto částí stroje na celý výsledek řezného procesu.



6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této disertační práce bylo ověření konstrukčních úprav prototypového pilového kotouče s nepravidelnou roztečí zubů pro podélné řezání dřeva v závislosti na hodnotících provozních kritériích. Aby bylo možné naplnit tento cíl, bylo nezbytné nejprve stručně popsat technologickou operaci řezání, problematiku kmitání pilových kotoučů a uvést vhodné metody pro hodnocení kvality obráběného povrchu, hlučnosti a prašnosti.

Vliv odhlučňovacích drážek a rozdílné rozteče zubů na vibrace se projevil negativně. To dokazuje velikost vypočtených kritických otáček, kde kotouč s plným diskem má tuto oblast otáček podstatně ve vyšších hodnotách. Toto tvrzení je platné pouze do doby, než do celé záležitosti vstoupí tepelné namáhání disku kotouče.

Pilový kotouč K8 se v rámci experimentu projevil jedním negativem. Prohýbal se ve vysokých otáčkách k jedné straně při chodu na prázdno. Příčinou může být právě rozdílná rozteč zubů, nestejněměrná tloušťka disku kotouče, případně nerovnoměrná úprava pnutí kotouče, či vzájemná kombinace uvedených příčin. Charakteristiky průběhů vibrací při řezání dřeva buku a smrku již byly u testovaných kotoučů stejné.

Odhlučňovací drážky mají ovšem poměrně významný vliv na snížení hladiny hluku. V našem případě byla hlučnost snížena o 3 dB. To se může při prvním pohledu zdát málo, ale pokud se na to podíváme z pohledu akustického tlaku, zjistíme, že dojde ke snížení tlaku působícího na ušní bubínek o 50 %. Tím se také prokázalo v odborné literatuře uváděný pozitivní vliv drážek na hlučnost.

Nepravidelná rozteč zubů kotouče K8 při porovnání s kotoučem K9 se již neprojevila v takové míře, jakou bychom očekávali. Snížení hlučnosti bylo pouze o 1 dB. Patřičným pozitivem ale byla změna charakteru hluku. Zvuk ve stejné frekvenci se důsledkem této úpravy změnil na nepravidelně se opakující zvukové vlny, které jsou pro člověka při stejném akustickém tlaku „pocitově přijatelnější“ než pravidelně se opakující vysoké frekvence, které obvykle zapříčiňují tzv. pískání kotouče.

Hodnocení kvality obráběných povrchů bylo prováděno bezkontaktní topografickou metodou, kde byly získány 3D a 2D výsledky struktury povrchu. Jednotlivá měření nám dokazují, že nejlepší kvality řezné spáry dosáhl kotouč K8 (s



nepravidelnou roztečí zubů). U tohoto kotouče nejsou okem pozorovatelné ani významné rýhy od zubů na obrobené ploše. Nejhorších výsledků dosáhl kotouč K10, který má pouze jedinou konstrukční úpravu, a to válcování. Choval se v řezu poměrně nestandardně. Rozložení napětí v disku, není u tohoto kotouče eliminováno dilatačními drážkami, a v důsledku zahřívání při obrábění může pak dojít k vyšším axiálním kmitům věnce kotouče a ke zhoršení výsledné kvality řezné spáry.

Experimentem bylo potvrzeno, že konstrukce pilového kotouče má vliv na tvorbu dřevního prachu a třísek. Z výsledků vyplývá, že z hlediska tvorby velikosti částic je nejlepším řešením pilový kotouč K8 s nepravidelnou roztečí zubů. Tento kotouč, oproti dalšímu testovanému kotouči, vytvářel dřevní částice především větších rozměrů.

Dále byly potvrzeny výsledky odborných studií, že při řezání pilovými kotouči se vytváří poměrně malé množství velmi jemných polétavých částic. Při následné mikroskopické a pravděpodobnosti analýze nebyl zjištěn vliv konstrukce pilového kotouče na hustotu pravděpodobnosti výskytu velmi jemných částic. Z mikroskopické a pravděpodobnostní analýzy, stejně jako z granulometrické analýzy, vyplývá, že nejjemnější částice se tvoří zejména při řezání buku.

Závěry pro praxi - je možné konstatovat, že konstrukční úpravy těla kotouče, především laserové vypalování drážek do těla pilového kotouče má podstatný vliv na stabilitu disku kotouče při řezání. Takovéto kotouče zaručují dále zlepšení komfortu pro obsluhu z pohledu hlučnosti a dosahují lepší kvality obrobeného povrchu. Nepravidelná rozteč zubů tyto uvedené parametry dále zlepšuje a navíc vytváří menší procento velmi malých dřevních částic za současné produkce částic větších.

Experimentem byla ověřena nová metoda zjišťování rezonančních a kritických otáček pomocí dvou snímačů vůči sobě fázově posunutých. Pomocí ní získáme podrobnější informace o nestabilních stavech pilového kotouče, které jsou vyvolány přirozenými procesy při jeho rotaci a jsme schopni sledovat podrobný průběh vlnění kotouče. Nespornou výhodou metody přímého sledování průběhu vibrací pilového kotouče dvěma fázově posunutými snímači je její aplikace jako provozní bezdemontážní diagnostiky kotoučových pil. Na druhé straně nevýhodou této metody je, že kotouč je buzen pouze provozními kmity hřídele a dalšími silami od kmitání celého stroje. Podstatně také záleží na tuhosti pilového kotouče, jeho upnutí, atd. Pro tyto



případy bude nutné do budoucna přístrojové vybavení doplnit elektromagnetickým budičem, který bude schopen zkoušený kotouč dostatečně vybudit a navodit stav rezonancí pro jednotlivé uzlové průměry.



7 SHRNUTÍ

V této disertační práci je uvedena základní problematika procesu obrábění pilovými kotouči s vazbou na vibrace, hlučnost, hodnocení kvality obrobeného povrchu a prašnost. Vše je shrnuto v literárním přehledu.

Další části rozebírají metodiku experimentů, pojednávají o použitých strojích, přístrojích a materiálech. Při provádění experimentů byly použity tři prototypy pilových kotoučů a dvě dřeviny reprezentující z pohledu dřevozpracujícího průmyslu České republiky nejvýznamnější druhy, buk a smrk.

Hodnoceny jsou konstrukční úpravy těla pilového kotouče, zejména laserem vypálené drážky do těla a jejich vliv na hodnocené parametry při řezání. Novinkou v konstrukčních úpravách je rozdílná rozteč zubů, jejichž vliv byl hodnocen v oblasti vibrací, hlučnosti, vlnitosti povrchu a prašnosti při řezání.

Lze konstatovat, že odhlučňovací a dilatační drážky mají příznivý vliv na snížení hlučnosti kotouče, ale poměrně negativní vliv na nestabilitu kotouče, projevující se zvýšenými hodnotami vibrací. Narušením disku kotouče odhlučňovacími a dilatačními drážkami klesá tuhost disku kotouče. Odhlučňovací drážky mají poměrně významný vliv na snížení hladiny hluku. V našem případě byla hlučnost snížena o 3 dB. Nepravidelná rozteč zubů se již neprojevila v takové míře. Snížení hlučnosti bylo nepatrné okolo 1 dB v porovnání s kotoučem s pravidelnou roztečí zubů.

Hodnocení kvality obráběných povrchů bylo prováděno bezkontaktní topografickou metodou. Byly získány 3D a 2D výsledky struktury povrchu. Měření nám dokazují, že nejlepší kvality řezné spáry dosáhl pilový kotouč K8. Nejhorších výsledků dosáhl pilový kotouč K10, který má pouze konstrukční úpravu válcování disku kotouče.

Experimentem bylo potvrzeno, že konstrukce pilového kotouče má vliv na tvorbu tvaru dřevního odpadu. Z výsledků vyplývá, že z hlediska tvorby velikosti částic je nejlepším pilový kotouč K8 s nepravidelnou roztečí zubů. Tento kotouč, oproti K9 vytvářel dřevní částice především hrubších rozměrů.

Experimentem byla navržena a ověřena nová metoda zjišťování rezonančních a kritických otáček pomocí dvou snímačů vůči sobě fázově posunutých. Pomocí ní



získáme podrobné informace o nestabilních stavech pilového kotouče, které jsou vyvolány přirozenými procesy při jeho rotaci. Metoda umožňuje sledovat podrobný průběh vlnění kotouče. Nespornou výhodou metody přímého sledování průběhu vibrací dvěma fázově posunutými snímači bude její aplikace v provozní bezdemontážní diagnostice kotoučových pil.



8 SUMMARY

In this thesis, there is presented the basic problems of machining saw blades with relation to vibration, noise, quality assessment of the machined surface and dust. Everything is summarized in the literature review.

The following sections discuss the methodology of experiments; they deal with the used machines, devices and materials. When conducting experiments there were used three prototypes of saw blades and two trees representing wood processing industry from Czech Republic the perspective of most important species, beech and spruce.

The construction adjustments of the blade body are evaluated, especially laser-burned grooves into the body and their influence on the parameters evaluated during cutting. An innovation in design modifications is a different pitch, whose influence was evaluated in vibration, waviness and dust during cutting.

Conclusion we can enunciate that shrinkage joints have positive impact on noisiness decreasing, but negative impact on saw blade stability enhancing the vibration. Disruption of saw blade by shrinkage joint decreases disc stiffness. Shrinkage joints have significant effect on decreasing of noise level. In our case the noisiness has been decreased by 3 dB. Irregular teeth distance (jagged circular saw blades) has not as much affect the noisiness decreasing. The noisiness decreasing was only about 1dB compare to circular saw blades with regular teeth distance.

The shaped surface quality assessment was done as non-contact topography method. Were obtained 3D and 2D surface structure results. Individual measurements demonstrate that the best surface quality was achieved with circular saw blade K8. The worst results were obtained using K10 circular blade, which has only one design modification i.e. rolling.

The experiment shows that the saw blade design affects the formation of wood dust and chips. Furthermore, it was found that the coarsest fractions arise when cutting with saw blade K8, with irregular distance of teeth compared to K9.

The experiment designed and tested a new method of detection of resonance and critical speed using two sensors, phase-shifted to one another. Using it one gets detailed



information on unstable states of the blade, which are caused by natural processes during its rotation. The method allows monitoring the detailed course of discs waving. The indisputable advantage of the method of direct observation of vibration using two phase-shifted sensors will be its application in non-invasive diagnosis of operating circular saws.



9 SEZNAM SKRATEK

D	průměr pilového kotouče [mm]
$\varphi_{stř}$	střední úhel řezu [°]
R	poloměr nástroje [mm]
α	úhel hřbetu [°]
β	úhel břitu [°]
γ	úhel čela [°]
δ	úhel řezu [°]
d_u	průměr příruby [mm]
f_{st}	statická rezonanční frekvence
n	otáčky nástroje [min^{-1}]
F_c	řezná síla [N]
F_f	posuvná síla [N]
b	šířka řezné spáry, šířka řezné hrany zubu [m]
h	výška zubu
h_m	střední tloušťka třísky [m]
ψ_1	vstupní úhel [°]
ψ_2	výstupní úhel [°]
A_{csp}	měrná řezná práce [Pa]
P_c	řezný výkon [W]
v_c	řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
h_m	střední tloušťka třísky [m]
f_z	posuv na zub [m]
v_f	posuvová rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
s_1	vychýlení zubu [mm]
z	počet zubů
y	hloubka vlnek [mm]
e	tloušťka odebírané vrstvy (třísky) [mm]
a	tloušťka těla kotouče [mm]
t	rozteč zubů [mm]
P	parametr vypočítaný ze základního profilu [μm]



R	parametr vypočítaný z profilu drsnosti [μm]
W	parametr vypočítaný z profilu vlnitosti [μm]
S	parametr vypočítaný z prostorového měření [μm]
p	výstupek profilu [μm]
v	prohlubeň profilu [μm]
l	základní délka [μm]
ln	vyhodnocovaná délka [μm]
L	délka snímání [μm]
Z(x)	hodnota souřadnice Z na ose x [μm]
Zp	výška výstupku profilu [μm]
Zv	hloubka prohlubně profilu [μm]
Zt	výška prvku profilu [μm]
Xs	šířka prvku profilu [μm]



10 SEZNAM TABULEK

Tab.1	Základními parametry plochy Sa, SaW a profilu Wa	47
Tab.2	Pracovní označení pilových kotoučů	55
Tab.3	Parametry pilových kotoučů	55
Tab.4	Statická házivost pilových kotoučů	63
Tab.5	Statické úhlové frekvence pilového kotouče dle metody chladného obrazce	66
Tab.6	Jednotlivé frekvence pilového kotouče dle klasické metody	69
Tab.7	Hodnoty parametrů popisující kvalitu povrchu	78



11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 71	Pilový kotouč z nástrojové oceli	14
Obr. 72	Moderní pilový kotouč s SK plátky	15
Obr. 73	Způsob výměnných destiček firmy Böhler&Miller	16
Obr. 74	Způsob výměnných destiček firmy Felde	16
Obr. 75	Označení tvarů zubů	17
Obr. 76	Řezný pilový kotouč Exact typ CERMET	18
Obr. 77	Diamantový pilový kotouč	18
Obr. 78	Otupení řezných materiálů v závislosti na běžných metrech řezu v čerstvém kmeni	19
Obr. 79	Oblasti aplikace nejpoužívanějších materiálů pro řezné nástroje	19
Obr. 80	Schéma řezání	20
Obr. 81	Vliv rozvodu zubů na hloubku rýh	21
Obr. 82	Indikace tloušťky třísky odřezávané pilovým kotoučem	21
Obr. 83	Tvary středově symetrických kmitů pilového kotouče $c=0, 1, 2$	23
Obr. 84	Tvary středově nesymetrických kmitů pilového kotouče $k = 1$ a 2 ..	24
Obr. 85	Složené tvary kmitů pilového kotouče	25
Obr. 86	Modelované tvary středově nesymetrických kmitů pilového kotouče $k = 1, 2, 3$	25
Obr. 87	Aparatura pro zjišťování statických rezonančních kmitočtů	27
Obr. 88	Chladného obrazec ($k=3$)	28
Obr. 89	Průhyb disku kotouče	29
Obr. 90	Měřicí aparatura pro měření frekvence dozadu postupující vlny rotujících pilových kotoučů	32
Obr. 91	Lissajousův obrazec	33
Obr. 92	Podmínka stojaté vlny a dosažení kritických otáček	34
Obr. 93	Princip metody přímého měření	35
Obr. 94	Průběh vibrací v závislosti na otáčkách	36
Obr. 95	Posun statické frekvence a kritických otáček pilového kotouče v důsledku předpětí válcováním	37
Obr. 96	Radiální drážka v tělese pilového kotouče	38



Obr. 97	Odhlučňovací drážky a otvory v těle kotouče	38
Obr. 98	Zkušební stend	50
Obr. 99	Schéma zkušebního stendu	51
Obr. 100	Snímač vibrací EPRO PR 6423/000-001d	51
Obr. 101	Hlukoměr Chauvin Arnoux C.A 834 v sestavě se zkušebním Stendem	52
Obr. 102	Talysurf CLI 1000	53
Obr. 103	Odsávací zařízení se sodnou pro izokinetické odběry	53
Obr. 104	Schéma zapojení soustavy pro izokinetické měření	54
Obr. 105	Retsch AS 200 digit spolu se schématem síťování	54
Obr. 106	Tvar zubu TFZ pilového kotouče K6	56
Obr. 107	Pilový kotouč K6	56
Obr. 108	Tvar zubu prototypových pilových kotoučů K8, K9 a K10	57
Obr. 109	Pilový kotouč K8	57
Obr. 110	Pilový kotouč K9	58
Obr. 111	Pilový kotouč K10	58
Obr. 112	Foto dřeva smrku	59
Obr. 113	Foto dřeva buku	60
Obr. 114	Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K8 ...	61
Obr. 115	Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K9 ...	62
Obr. 116	Rezonanční, kritické a doporučené otáčkové pásma kotouče K10 ..	62
Obr. 117	Záznam statické házivosti pilového kotouče K9	63
Obr. 118	Průběh vibrací kotouče K8	64
Obr. 119	Průběh vibrací kotouče K9	64
Obr. 120	Průběh vibrací kotouče K10	65
Obr. 121	Vlastní frekvence kmitání kotouče	
Obr. 122	Průběh amplitud vibrací na věnci kotouče s fázovým posunem 90°	67
Obr. 123	Průběh amplitud vibrací při 3 300 ot.min ⁻¹ s fázovým posunem snímačů 90°	67
Obr. 124	Průběh amplitud vibrací při 3 720 ot.min ⁻¹ s fázovým posunem snímačů 90°	68
Obr. 125	Amplitudově frekvenční spektrum kmitů kotouče při 3720 ot.min ⁻¹	69
Obr. 126	Hlučnost pilových kotoučů při jmenovitých otáčkách	71



Obr. 127	Hlučnost pilových kotoučů při řezání Smrku a Buku	72
Obr. 128	Průběh vibrací při řezání Smrku a Buku kotoučem K8 v optimálních otáčkách	73
Obr. 129	Průběh vibrací při řezání Smrku a Buku kotoučem K9 v optimálních otáčkách	74
Obr. 130	Průběh vibrací při řezání Smrku a Buku kotoučem K10 v optimálních otáčkách	74
Obr. 131	3D modely plochy získané pilovými kotouči při řezání smrku v optimálních otáčkách	76
Obr. 132	2D profily vlnitosti povrchu vzniklé řezáním smrku pilovými kotouči v optimálních otáčkách	76
Obr. 133	3D modely plochy získané pilovými kotouči při řezání buku v optimálních otáčkách	77
Obr. 134	2D profily vlnitosti povrchu vzniklé řezáním buku pilovými kotouči v optimálních otáčkách	77
Obr. 135	Histogram propadu smrkových částic	79
Obr. 136	Křivka propadu smrkových částic	79
Obr. 137	Histogram propadu bukových částic	80
Obr. 138	Křivka propadu bukových částic	80
Obr. 139	Hustota pravděpodobnosti výskytu dřevních částic při řezání smrk	81
Obr. 140	Hustota pravděpodobnosti výskytu dřevních částic při řezání buku	82



12 LITERATURA

- [1] **BERGER S**, 2001, Congrès Français de Mécanique 2001
- [2] **BOHDÁLEK. V.**, Vliv konstrukce na vybrané provozní parametry pilového kotouče, Brno 2010, Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně
- [3] **DZURENDA L. (2007)**: Sypká dřevná hmota, vzduchotechnická doprava a odlučovanie. TU Zvolen 2007.
- [4] **DZURENDA, L., ORLOWSKI, K., WASILEWSKI, R.**, 2005: Granulometric analysis and separation options of dry sawdust exhausted from narrow-kerf frame sawing machines. In: *Drvna industria* 2/05, p. 55-60. Zagreb.
- [5] **HLÁSKOVÁ L., KOPECKÝ Z., VESELÝ P., SVOBODA E., KOWALSKI M.**, Rezonanční stavy pilových kotoučů s nepravidelnou roztečí zubů a kvalita řezu. In *DZURENDA, L. -- BANSKI, A. VIII. MVK Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2012*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012, s. 125--130. ISBN 978-80-228-2385-2.
- [6] **JANÍČEK, F.**, 2000. Strojnictví – stroje a zařízení pro zpracování dřeva. 2. vyd. Praha, Sobotáles, 380 s. ISBN 80-85920-69-7.
- [7] **JAVOREK L.**, 2006, Nástroje I. TU Zvolen, 2006. ISBN 978-80-228-1714-1
- [8] **KOPECKÝ Z.**, 2007, Vybrané aspekty vysokorychlostního obrábění dřeva, MZLU v Brně
- [9] **KOPECKÝ Z., EMIL S., MAZAL P.**, 2007, Circular sawblade vibrations and the kerf surface quality. *Forestry and Wood Technology*. ISSN 0208-5704.
- [10] **KOPECKÝ Z., SVOREŇ, J., PERŠIN M., ROUSEK M., KLEPÁRNÍK J.**, 2007, Circular saw blades vibrations effect on parameters of a cutting process. In *Woodworking Technique*.
- [11] **KOPECKÝ, Z., MAZAL P.** Microscopic and stochastic analysis of wood dust. In: *Annals of Warsaw Agricultural University - SGGW-AR. Forestry and wood technology*. 2005, s. 354-357. sv. 56. ISSN 0208-5704.
- [12] **KOPECKÝ, Z., ROUSEK, M., NOVÁK, V.**, 2008 *Hodnocení kvality obrobeneho povrchu dřeva pomocí počítačových metod*. In: *DZURENDA, L. Vplyv techniky na kvalitu deleného a obrábaného dreva*. 1. vyd. Vedecká štúdie



- 2/2008/B. Technická univerzita vo Zvolene: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2008. s. 55--91. ISBN 978-80-228-1923-7.
- [13] **KOPECKÝ, Z., ROUSEK, M.**, Dustiness in high-speed Milling. *Wood Research*. 2007. sv. Vol.52, č. No. 2, s. 65--76. ISSN 1336-4561.
- [14] **KOPECKÝ, Z., ROUSEK, M., VESELÝ, P., KAROLCZAK, P.**, *Wpływ zmian w konstrukcji pil tarczowych na ich częstotliwości rezonansowe*. In: *Obróbka skrawaniem - współczesne problemy*. 1. vyd. 4. Lodž: Politechnika Lodzka, 2010. s. 481--488. ISBN 83-920269-3-4.
- [15] **KOPECKÝ, Z., ROUSEK, M., VESELÝ, P., KAROLCZAK, P., SVOREŇ, J.**, Vliv nepravidelné rozteče zubů na hlučnost pilového kotouče. In *DZURENDA, L. -- BANSKI, A. VIII. MVK Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2012*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012, s. 155--159. ISBN
- [16] **KOPECKÝ Z., VESELÝ P., ROUSEK M., KAROLCZAK P.** (2011): Wpływ konstrukcji pil tarczowych na poziom generowanego przez nie nateżenia dźwięku. In: *Obróbka skrawaniem - Nauka a przemysl. No. 5. Politechnika Opolska: Wydawnictwo Sutoris Wroclaw*, 2011. s. 395--400. ISBN 978-83-61101-10-9.
- [17] **KOS, A., LUČIĆ, B. R., HORVAT, D., ŠEGA, K., BEŠLIĆ, I.**, 2002: Influential factors on indoor air dustiness in woodworking companies. In: *Drvna industrija* 3/02, p. 131-140. Zagreb.
- [18] **KOTĚŠOVEC V.**, 1992, Patentový spis, Způsob vytužování pilových kotoučů a zařízení k jeho provádění
- [19] **LISIČAN, J.**, 1996: Teória a technika spracovania dreva. Matcentrum. Zvolen.
- [20] **PROKEŠ S., BĚLOHOUBEK A.**, 1976, Možnosti snížení hlučnosti v dřevařském průmyslu. 1. vyd. Praha: VVÚD
- [21] **PROKEŠ S.**, 1965, Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva, Praha, Státní nakladatelství technické literatury
- [22] **SIKLIENKA M., SVOREŇ J.**, 1997, Frekvencie vlastných tvarov kmitov pilových kotúčov při statickom kmitaní. TU Zvolen. [Vědecká studie]
- [23] **STACHIEV Y.M.**, 1989, Rabotosposobnost' ploskich kruglych pil. Moskva: Lesnaja promyšlenost



- [24] LISIČAN J., 1976, Drevárské stroje a obrábanie 1. časť, Zvolen, KULT.82/72-517/72, 85-984-76.
- [25] NOVÁK, Z., 2007. Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd., 17 s.
- [26] OČKAJOVÁ, A., BELJAKOVÁ, A., 2004: Dimensional analysis of wood dust particles. In: Trieskové a beztrieskové obrábanie Dřeva '04. Starý Smokovec-Tatry, 163 – 168.
- [27] OČKAJOVÁ, A., LUČIČ B. R., ČAVLOVIČ, A., TEREŇOVÁ, J.: *Reduction of dustiness in sawing wood by universal circular saw*. In.: Drvna industrija, Journal of Wood Technology, Volume 57, Number 3/06. ISSN 0012-6772, pp. 119-126
- [28] ORLOWSKI K. A., 2005, Identification of critical speeds of clamped circular saws / 2005 Polsko
- [29] ORLOWSKI K. A., 2005, Identification of critical speeds of clamped circular saws, Identification of critical speeds of clamped circular saws
- [30] ORLOWSKI K. A., SANDAK J., 2004, MEASUREMENT OF THE CRITICAL ROTATIONAL SPEED OF CIRCULAR SAW
- [31] PROKEŠ, S. (1985): Snižování hluku v dřevozpracujícím průmyslu. SNTL Praha 1985. 128 s.
- [32] PROKEŠ S., 1980, Údržba a ostření dřevoobráběcích nástrojů, Státní nakladatelství technické literatury Praha
- [33] PROVAZNÍK K. a kol., 1996, Manuál prevence v lékařské praxi, III prevence nepříznivého působení vlivů obytného prostředí na zdraví obyvatel. Praha: Redakční skupina.
- [34] STACHIEV Y.M., 2003, Research on circular saw disc problem: several of results, Holz als Roh- und Werkstoff 61
- [35] VESELÝ P., KOPECKÝ Z., HEJMAL Z., POKORNÝ P., Diagnostics of Circular Sawblade Vibration by Displacement Sensors. *Drvna Industrija*. 2012. sv. 63, č. 2, s. 81--86. ISSN 0012-6772. URL: <http://drvnaindustrija.sumfak.hr/>
- [36] ŽIDKOVÁ Z., 2005, Projekt podpory zdraví MZČR pro rok 2005, Zdravotní ústav se sídlem v Brně



Internetové zdroje

- [37] Pilana [online] citováno 26.3.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.pilana.cz/>
- [38] Tumlikovo [online] citováno 26.4.2014. Dostupné na World Wide Web: http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/rychlomezne_oci-hss/
- [39] Fachshop [online] citováno 20.4.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fachshop.cz/cmt-c281-pilovy-kotouc-na-lamino-a-dtd--250-x-30-z80-detail-GA20000101.aspx>
- [40] Interknife [online] citováno 23.4.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.interknife.com/de/holz-sperrholzindustrie.php?z=1>
- [41] Wikipedia [online] citováno 1.5.2014. Dostupné na World Wide Web: http://cs.wikipedia.org/wiki/Slinutý_karbid
- [42] Bld [online] citováno 2.5.2014. Dostupné na World Wide Web: www.bld.cz/zbozi/4170/Rezny-kotouc-Exact-typ-CERMET.htm
- [43] Repero [online] citováno 1.5.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.reparo.cz/gallery/gallery.php?lang=cz&room=20&corner=0&image=6&mode=single>
- [44] Repero, *Funkce otupení v závislosti na běžných metrech řezu* [online] citováno 1.5.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.reparo.cz/clanek.html>
- [45] HUMÁR A., *Materiály pro řezné nástroje*. Syllabus [online] citováno 28.4.2014. Dostupné na World Wide Web: http://ustfme.vutbr.cz/obrabeni/opory-syve/mat_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [46] Hobbyhorazdovice [online] citováno 20.8.2014. Dostupné na World Wide Web: <http://www.hobbyhorazdovice.cz/pilovy-zaci-nuz-s-vidiovymi-zuby-pro-krovinorezy-hecht-600640/d-1090/>
- [47] Tfdesign *Obrazový lexikon* [online] citováno 20.6.2014. Dostupné na World Wide Web: http://www.tfdesign.cz/docs_cs/konstrukce/drevo/textury/hires/smrk.jpg
- [48] Tfdesign *Obrazový lexikon* [online] citováno 20.6.2014. Dostupné na World Wide Web: http://www.tfdesign.cz/docs_cs/konstrukce/drevo/textury/hires/buk.jpg



- [49] VAVRČÍK, H., Anatomická stavba dřeva, povrchu [online] citováno 15.4.2011. Dostupné na World Wide Web: http://wood.mendelu.cz/nod/e107_cz/nod_plugins/projects/stavba_dreva/index.html
- [50] HOLLEROVÁ, J. Prašnost na pracovišti. In: Státní zdravotní ústav [online]. citováno 25.4.2008. Dostupné na World Wide Web: <http://www.szu.cz/tema/pracovniprostredi/>



13 PŘÍLOHY