



VPLYV KONŠTRUKCIE PÍLOVÉHO KOTÚČA NA REZNÝ VÝKON PRI PRIEČNOM PÍLENÍ BUKOVÉHO REZIVA NA KOTÚČOVEJ SKRACOVACEJ PÍLE S RUČNÝM POSUVOM DO REZU

Richard Kminiak – Mikuláš Siklienka

Abstract

The article deals with the issue of cross-cutting of beech timber. It focuses on the impact of the construction of the blade (the number of teeth and use chip limiter) on cutting power in the process of cross-cutting.

Article is based on an experiment in which they used four saw blades with SK plates. Saw blades were uniform diameter ($D = 250$ mm) and uniform angular geometry ($\alpha = 15^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 15^\circ$). Three saw blades are characterized by a different number of teeth ($z = 24, 40$ and 60), and one saw blade with 24 teeth number was with chip limiter. In the experiment was used tangentially beech timber of absolute humidity $w_a = 12 \pm 1\%$ and a thickness of 50 mm. Beech timber was abbreviated to the circular cross-cut saw Bosch GCM 10 S professional with straight line motion of saw blade to the cut at a constant cutting speed ($v_c = 62 \text{ ms}^{-1}$) and at a constant sliding force ($F_p = 20 \text{ N}$).

The main contribution of the article is determining the most suitable number of teeth of the saw blade and the assessment of suitability for use limiter chip for cross cutting the circular cross-cut saw.

Key words: circular cross-cut saw, saw blades, number of teeth of the saw blade, chip limiter, cutting power.

ÚVOD

Kotúčová píla je jedným z najpoužívanějších drevo-deliacích strojov určených na priečne a pozdĺžne pílenie dreva (Barčík, 2009). Operácie priečného pílenia, Svoreň (2002) rozdeľuje na dva druhy: predbežné priečne rezanie s nadmierou a konečné priečne rezanie na požadované rozmery.

Základnú úlohu pri pílení zohráva rotujúci rezný nástroj – pílový kotúč, kolmý na smer vlákien dreva. Pri priečnom pílení vedľajšie rezné hrany zubov pílového kotúča prerezávajú vlákna a formujú steny reznej škáry. Hlavné rezné hrany pri zatvorenom rezaní formujú dno zubovej drážky (Siklienka a Kminiak, 2013).

Ako vyplýva z prác Krilek, Kováč a Kučera (2014) či Schajer a Wang (2002) parametre procesu delenia dreva (energetickú náročnosť, prašnosť, hlučnosť,...), parametre vznikajúceho produktu (rozmerná presnosť, kvalitu vytvoreného povrchu,...), i parametre produkovanej triesky (rozměr, granulometrické zloženie,...) sú závislé tak od fyzikálno-mechanických vlastností obrábaného materiálu ako i od tvaru, rozmerov, počtu zubov,

geometrie, ostrosti rezného nástroja a technicko-technologických podmienok realizácie procesu pílenia.

Podľa prác *Wasielewski, Orlowski a Blacharski (1999)* ci *Novák, Rousek a Kopecky (2008)*, vhodným výberom nástroja, jeho geometrie a rezných podmienok je možné znížiť náklady pri rezaní drevnej suroviny a to zvýšením porezovej kapacity stroja (píly).

Energetickú náročnosť procesu pílenia sledujeme najmä prostredníctvom rezného výkonu. Podľa normy *STN ISO 3002 – 4. (1995)* rezný výkon definujeme ako výsledok skalárneho súčinu vektoru reznej sily F_c a vektoru reznej rýchlosti v_c v tom istom okamihu, pri určitej operácii a určitých rezných podmienkach. Jednotkou výkonu je Watt = N.m.s⁻¹.

Daný článok si za svoj cieľ kladie stanovenie najvhodnejšieho počtu zubov pílového kotúča a vhodnosť použitia pílového kotúča s obmedzovačom triesky, pre priečne pílenie bukového reziva s ručným posuvom pílového kotúča do rezu.

MATERIÁL A METODIKA

Charakteristika použitého reziva:

Pre experimentálne meranie boli použité vzorky z dreveniny buk lesný (*Fagus Silvatica* L.). Rezivo použité na výrobu vzoriek pochádzalo zo Zvolenskej kotliny, rok ťažby 2012, priemerný vek porastov 45 rokov. Parametre reziva: typ tangenciálne rezivo, hrúbka $h = 50$ mm (± 1 mm) a relatívna vlhkosť: $w_r = 12\%$ ($\pm 2\%$) (rezivo bolo sušené v teplovzdušnej sušiarňi). Z reziva boli vymanipulované skúšobné vzorky s rozmermi: hrúbka $h = 50$ mm (odpovedala hrúbke reziva), šírka $\bar{s} = 100$ mm (bola orientovaná rovnobežne s priebehom drevných vlákien) a dĺžka $l = 150$ mm (bola orientovaná kolmo na priebeh drevných vlákien). Pre potreby uchytenia vzoriek na platňu meracieho zariadenia boli na presne určených miestach vyvŕtané otvory priemeru $d = 10$ mm.

Charakteristika strojového zariadenia:

Experimentálny porez reziva bol prevedený na kotúčovej skracovacej píle BOSCH GCM 10S PROFESIONAL (Obrázok 1). Technické parametre kotúčovej skracovacej píly poskytuje Tabuľka 1

Tab. 1 Parametre kotúčovej skracovacej píly BOSCH GCM 10S PROFESIONAL

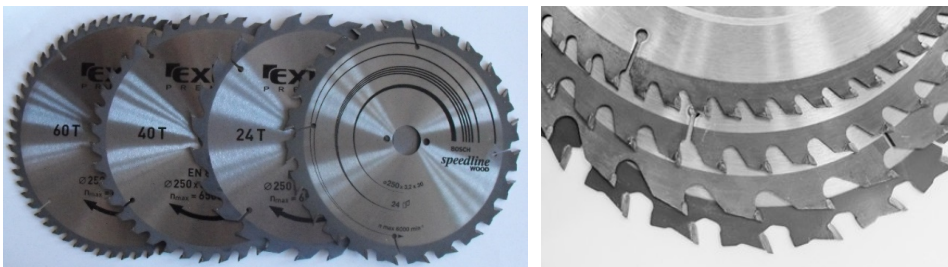
Príkon (W)	1800
Počet otáčok vo voľnobehu (min ⁻¹)	4000
Kapacita rezov pri 45° úkose (mm)	87x216
Kapacita rezov pri 45° sklone (mm)	53x305
Nastaviteľný uhol úkosu vľavo/vpravo (°)	52/62
Nastaviteľný uhol sklonu vľavo (°)	47
Celková hmotnosť (kg)	21,5
Max. priemer pílového kotúča (mm)	254
Upínací otvor - priemer (mm)	30
Celková dĺžka (mm)	780
Celková šírka (mm)	680
Celková výška (mm)	540



Obr. 1 Kotúčová skracovacia píla
BOSCH GCM 10S PROFESIONAL

Charakteristika pilových kotúčov:

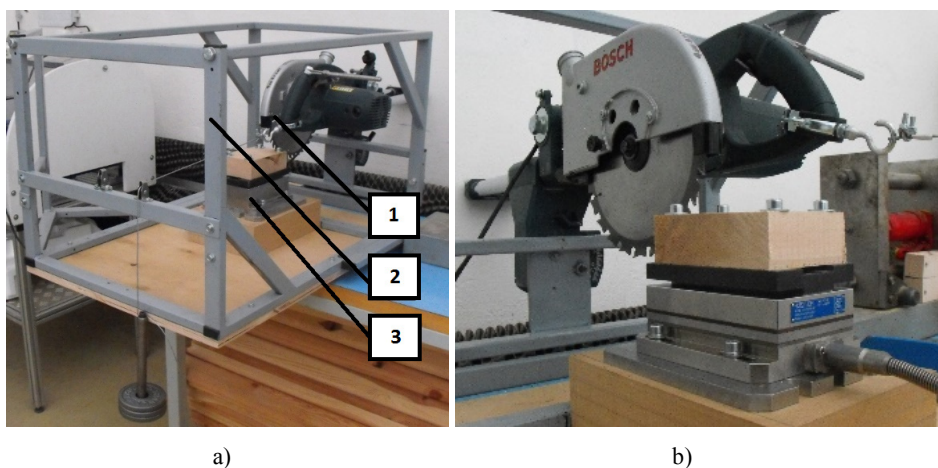
Pre experiment boli zvolené štyri pilové kotúče s SK platničkami (Obrázok 2). Pilové kotúče disponujú totožným priemerom ($D = 250 \text{ mm}$), totožnou hrúbkou nástroja ($b = 3.2 \text{ mm}$), totožnou geometriou reznej hrany (uhol chrbta $\alpha = 15^\circ$, uhlo rezného klinu $\beta = 60^\circ$, uhlo čela $\gamma = 15^\circ$, uhlom podbrúsenia bočnej hrany $\xi = 15^\circ$ a uhlom radiálneho sklonu čelných hrán $\lambda = 7^\circ$), striedavými zubmi (WZ). Tri sú značky EXTOL-PREMIUM a vyznačujú sa rozdielnym počtom zubov: $z = 24$ (Obrázok 2 – 3) / 40 (Obrázok 2- 2) / 60 (Obrázok 2-1) a jeden je značky BOSCH SPEEDLINE-WOOD s počtom zubov $z = 24$ a obmedzovačom triesky (Obrázok 2– 4).



Obr. 2 Použité pilové kotúče 1 - pilový kotúč s počtom zubov 60, 2 - pilový kotúč s počtom zubov 40, 3 - pilový kotúč s počtom zubov 24, 4 - pilový kotúč s počtom zubov 24 a obmedzovačom triesky

Charakteristika experimentu:

Nakoľko pri reálnom ručnom posuve nie je možné dodržať konštantné podmienky experimentu – konštantnú posuvnú silu, bola konštantná posuvná sila simulovaná v experimentálnom stende (Obrázok 3).



Obr. 3 Experimentálny stend a) celkový pohľad b) detail na zónu rezania (1 - kotúčová skracovacia píla, 2 - experimenty stend, 3 - piezo – elektrický dynamometer s upevnenou vzorkou)

V experimentálnom stende bol pohyb ruky simulovaný pohybom ťažného lana a samotná sila posuvu bola vyvodzovaná závažiami. Ako uvádza *Kminiak a Gaff* (2015) priemerná posuvná sila pri priečnom pílení kotúčovou skracovacou pilou s ručným posuvom pilového kotúča do rezu sa pohybuje v intervale 13-28 N. My sme pre samotný

experiment zvolili posuvnú silu $F_p = 20 \text{ N}$. Pri experimente sa priamočiarym pohybom pílového kotúča oddeľovali s pripraveného reziva 10 mm hrubé skúšobné telieska.

Pri poreze boli využívané tri základne modely priečného pílenia na kotúčovej skracovacej píle čelné rezanie (M1) (Obrázok 4/a), pozdĺžno čelné rezanie $\varphi_2 = 90^\circ$ (rezanie na pokos) (M2) (Obrázok 4/b) a pozdĺžno čelné rezanie $\varphi_2 = 45^\circ$ (M3) (Obrázok 4/c). Experiment prebiehal pri konštantnej reznej rýchlosti pílového kotúča $v_c = 62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Poznámka: φ_2 – uhol prerezávania vlákien – uhol vektorom výslednice reznej rýchlosti a smerom drevných vlákien



a)

b)

c)

Obr. 4 Použité modely delenia a) čelné rezanie (M1), b) pozdĺžno čelné rezanie $\varphi_2 = 90^\circ$ (rezanie na pokos) (M2), c) pozdĺžno čelné rezanie $\varphi_2 = 45^\circ$ (M3)

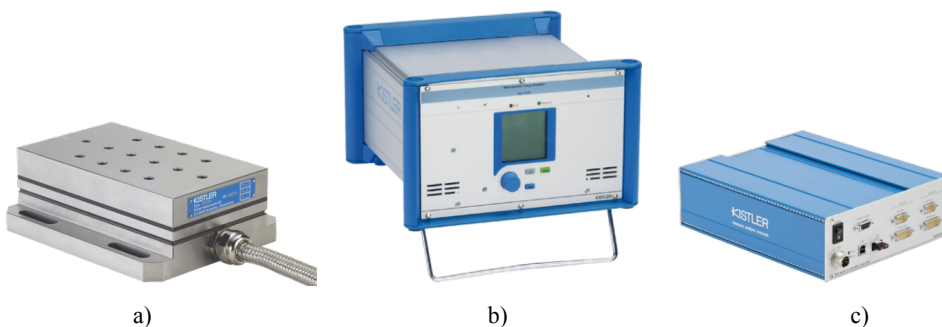
Meranie rezného výkonu:

Meranie rezného výkonu prebiehalo nepriamou metódou, a síce meraním reznej sily v snímanej rovine silových zložiek dynamometra F_y a F_z vyvodenej pílovým kotúčom na obrábanú vzorku. Meracia aparátúra pre meranie sily pozostávala z dynamometra KISTLER konkrétne: piezo – elektrický dynamometra typ 9257B (Obrázok 5/a), viackanálový zosilňovač 5070A (Obrázok 5/b), 16 bitový A/D prevodník 5687A, typ 9257B (Obrázok 5/c), firmy Kistler Instrumente AG, Winterthur Switzerland, a vyhodnocovacieho PC s príslušným softwarom KISTLER - DynoWare. Výkon potrebný na rezanie sa určí podľa vzťahu:

$$P_c = F_c * v_c \quad [\text{W}]$$

F_c – rezná sila (N),

v_c – rezná rýchlosť ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).



a)

b)

c)

Obr. 5 Bloková schéma monitorovacieho zariadenia a) piezo – elektrický dynamometer 9257B, b) viackanálový zosilňovač 5070A, c) 16 bitový A/D prevodník 5687A

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Rezný výkon bol sledovaný a vyhodnotený z pohľadu vplyvu typu pílového kotúča a modelu delenia pri konštantnej reznej rýchlosti $v_c = 63 \text{ m.s}^{-1}$ a konštantnej posuvnej sile $F_p = 20 \text{ N}$. Získané hodnoty rezného výkonu boli štatisticky vyhodnotené programom STATISTICA 7.0.

Viacfaktorová analýza rozptylu – ANOVA (Tabuľka 2), preukázala, že vplyv oboch skúmaných faktorov je štatisticky významný a štatisticky významný je aj vplyv ich interakcie. Vykonaný Fischerov F – test (Tabuľka 2), preukázal že model delenia má niekoľko násobne vyššiu štatistickú významnosť ako typ pílového kotúča.

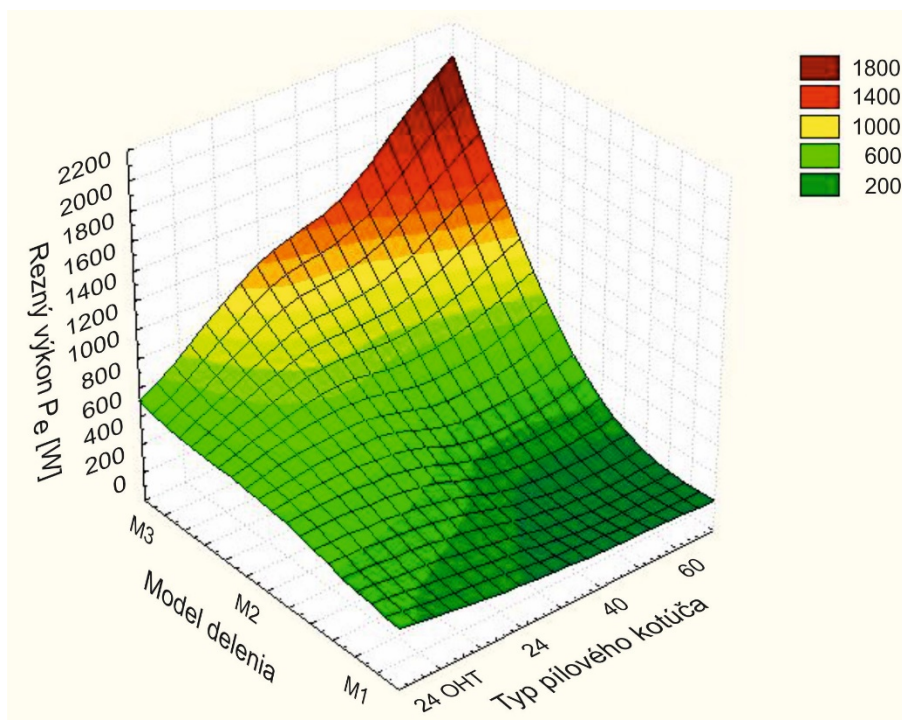
Tab. 2 Sumárne výsledky viacfaktorovej analýzy rozptylu vplyvu typu pílového kotúča a modelu rezania na rezný výkon

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	20438589,08	1,00	20438589,08	146039,36	0,000
Typ pílového kotúča	479524,36	3,00	159841,45	1142,11	0,000
Model delenia	13078275,92	2,00	6539137,96	46723,95	0,000
Typ pílového kotúča*Model delenia	3127880,91	6,00	521313,48	3724,93	0,000
Error	10076,59	72,00	139,95		

Základné štatistické charakteristiky pre vplyv typu pílového kotúča na rezný výkon pri rôznych modeloch delenia poskytuje Tabuľka 3 a graficky Obrázok 6.

Tab. 3 Základné štatistické charakteristiky pre vplyv typu pílového kotúča na rezný výkon pri rôznych modeloch delenia

Typ pílového kotúča	Model delenia	Rezný výkon Pc Mean	Rezný výkon Pc Std.Err.	Rezný výkon Pc -95,00%	Rezný výkon Pc +95,00%	N
24-OHT	M1	179,99	4,47	171,08	188,90	30
24-OHT	M2	494,90	4,47	485,98	503,81	30
24-OHT	M3	586,94	4,47	578,03	595,86	30
24	M1	106,91	4,47	98,00	115,82	30
24	M2	514,37	4,47	505,46	523,29	30
24	M3	1029,22	4,47	1020,31	1038,14	30
40	M1	54,42	4,47	45,51	63,33	30
40	M2	188,46	4,47	179,54	197,37	30
40	M3	1007,85	4,47	998,94	1016,77	30
60	M1	29,44	4,47	20,52	38,35	30
60	M2	230,76	4,47	221,85	239,68	30
60	M3	1495,98	4,47	1487,07	1504,90	30



Obr. 6 Vplyv typu pilového kotúča na rezný výkon pri rôznych modeloch delenia

Vplyv typu pilového kotúča:

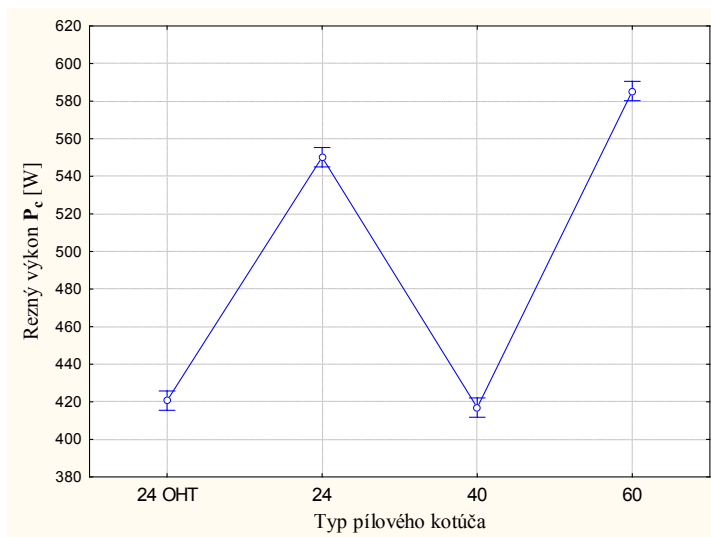
Nami dosiahnuté výsledky nepotvrdili tvrdenia *Prokeša (1982)*, či *Pernicu (1999)*, že s nárastom počtu zubov PK dochádza k poklesu reznej sily potrebnej na oddelenie zrezávanej vrstvy dreva a tým pokles rezného výkonu (ako dôsledok poklesu nominálnej hrúbka triesky).

Ako dokumentuje graf na Obrázku 6 a graf na Obrázku 7 v prípade zvýšenia počtu zubov z 24 na 40 dochádza k zníženiu rezného výkonu no ďalšie zvyšovanie počtu zubov z 40 na 60 zvýši hodnotu rezného výkonu nad úroveň pri počte zubov 24. Daný jav má podstatu v základnom špecifiku daného experimentu a to, že na rozdiel od iných autorov ktorý postavili svoje experimenty na konštantnej posuvnej rýchlosti v_f , my pracujeme s konštantnou posuvnou silou F_p , čo podľa nášho názoru vierohodnejšie vystihuje podstatu ručného posuvu pilového kotúča do rezu.

Pri konštantnej posuvnej sile je aktuálny posuv na zub a následne nominálna hrúbka triesky závislá na aktuálnom reznom odpore rezaného materiálu a výslednej reznej sile (vektorovom súčte reznej sily a posuvnej sily). Danú skutočnosť sme si overili aj experimentami na iných hospodársky významných drevinách. Zároveň sa tu prejaví aj vplyv rozkladu výslednej reznej sily na viacero rezných klinov, viac zubov pilového kotúča sa rovná viac zubov aktuálne v reze.

Zo získaných výsledkov je možné vyvodiť záver, že pre danú kombináciu materiálových vplyvov ako aj vstupných premenách procesu je najvhodnejšie použiť pilový kotúč s počtom zubov 40. Z pohľadu posúdenia vhodnosti použitia pilového kotúča s obmedzovačom triesky bolo preukázané, že pilový kotúč s počtom zubov 24 a obmedzovačom triesky dosahuje hodnoty rezného výkonu na úrovni pilového kotúča bez

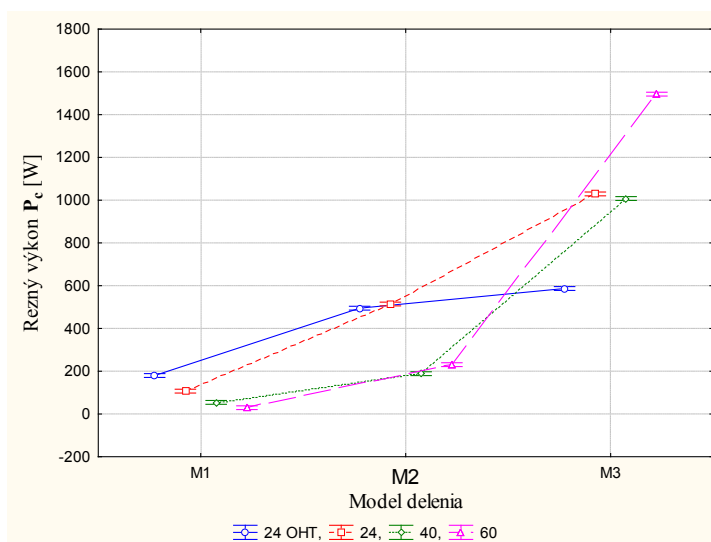
obmedzovača triesky a s počtom zubov 40. Z daného pohľadu je použitie obmedzovača triesky mimoriadne vhodné a prináša so sebou navyše efekt eliminácie možných rizík pri prípadnom preťažovaní pílového kotúča. Z orientačného porovnania vypočítanej nominálnej hrúbky triesky (na základe priemerného času rezu) vyplýva, že nominálna hrúbka triesky je pri oboch pílových kotúčoch totožná.



Obr. 7 Vplyv typu pílového kotúča na rezný výkon

Vplyv modelu delenia:

Vplyv modelu delenia na energetickú náročnosť procesu priečného pílenia bukového reziva pre rôzne typy pílových kotúčov vyjadruje graf na Obrázku 8.



Obr. 8 Vplyv modelu delenia na rezný výkon (M1 - čelné rezanie, M2 - pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 90^\circ$ (tzv. rezanie na pokos), M3 - pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 45^\circ$ (tzv. rezanie pod 45° uhlom)

Energetická náročnosť procesu priečného rezania bukového reziva stúpa v rade čelné rezanie (M1), pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 90^\circ$ (tzv. rezanie na pokos) (M2) a pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 45^\circ$ (tzv. rezanie pod 45° uhlom).

Pri modeli čelného rezania (M1) dochádza k prerezávaniu elementov dreva kolmo na smer pohybu pilového kotúča a zároveň dráha kotúča je najkratšia - rovná šírke vzorky.

Nárast rezného výkonu zaznamenaný pri modeli pozdĺžno čelného rezania pri $\varphi_2 = 90^\circ$ (M2) na základe doterajších poznatkov pripisujeme dvom momentom. Prvým je samotná orientácia PK voči materiálu, čo má za následok predĺženie dráhy, ktorú je potrebné prekonať na rozrezanie – to spôsobí napr. vyššiu stratu energie v dôsledku väčšej trecej plochy tela PK s rezaným materiálom (pri čelnom pílení prejde PK dráhu rovnú šírke vzorky 15 cm a pri pozdĺžno – čelnom rezaní prejde PK dráhu potrebnú pre prerezanie vzorky rovnú 21 cm). Ďalším momentom, je orientácia samotných drevných vlákien (elementov), kde dochádza k prerezávaniu elementov pod iným ako 90° uhlom, čo má za následok predĺženie dráhy, ktorú je potrebné prekonať na rozrezanie elementov, a síce zväčšenie radiálneho prierezu týchto elementov (z ideálneho kruhového prierezu drevných elementov sa stáva zväčšený elipsovité prierez). K obdobným záverom došli vo svojej prácach aj *Ogasawara a Noda 1984*.

Posledný zo skúmaných modelov pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 45^\circ$ zaznamenal najväčší nárast rezného výkonu v dôsledku už spomínaného prerezávania drevných elementov pod iným ako 90° uhlom, ale hlavne kvôli nárastu reznej výšky experimentálnej vzorky oproti predošlým modelom delenia o rovné 2 cm (29%) čo spôsobí zvýšenie počtu zubov PK v reze. Naše zistenia potvrdzujú závery autorov *Schajer a Wang (2002)* či *Mikleš, Kováč a Krilek, 2010*, ktorý popisujú, že zvýšenie reznej výšky materiálu má za následok nárast rezného výkonu a sily potrebnej na oddelenie triesky.

ZÁVER

Ako preukázal v článku odpublikovaný experiment, proces priečného rezania riadiaci sa konštantnou posuvnou silou má svoje špecifiká a neplatia v ňom úplne všetky zákonitosti odvodené na základe experimentov postavených na konštantnej posuvnej rýchlosti.

Výsledky nepotvrdili základnú hypotézu, že s nárastom počtu zubov PK dochádza k poklesu reznej sily potrebnej na oddelenie zrezávanej vrstvy dreva a tým pokles rezného výkonu.

Článok poukazuje na fakt, že pri posuve s konštantnou posuvnou rýchlosťou je energetická náročnosť procesu priamo závislá na interakcii materiálu (jeho lokálnych vlastností ako je napr. hustota, orientácia vlákien a pod) a nástroja (počte aktívne režúcich zubov PK, použitie obmedzovača triesky a pod.) s tou komplikáciou že daná interakcia nastavuje aj samotnú nominálnu hrúbku triesky, čím sa analýza daného procesu značne komplikuje.

Z článku vyplýva že použitie obmedzovača triesky má na energetickú náročnosť procesu pozitívny vplyv. Ďalej bolo preukázane, že pre rezanie bukového reziva hrúbky 50 mm je najefektívnejšie použiť pilový kotúč s počtom zubov 40.

Experiment preukázal že energetická náročnosť procesu je závislá na danom modeli delenia a stúpa v rade čelné rezanie (M1), pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 90^\circ$ (tzv. rezanie na pokos) (M2) a pozdĺžno čelné rezanie pri $\varphi_2 = 45^\circ$ (tzv. rezanie pod 45° uhlom).

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Grantom VEGA č. 1/0725/16 "Predikcia kvality vytvoreného povrchu pri frézovaní rastlého dreva stopkovými žiletkovými frézami na CNC obrábacích frézach."

LITERATÚRA

BARCÍK, Š. (2009): Technika pre výrobu nábytku. Vydanie I. Zvolen. Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 263 s. ISBN 978-80-228-2055-4

KRILEK, J., KOVAČ, J., KUČERA, M. (2014): Wood crosscutting process analysis for curcular saws. In *BioResources* 9(1): 1417-1429. ISSN: 1930-2126.

KMINIAK, R., GAFF, M. (2015): Roughness of surface created by transversalsawing of spruce, beech and oak wood. In: *Bioresources* 10(2). DOI: 10.15376/bio.10.2.2873-2887

MIKLEŠ, M., KOVÁČ, J., KRILEK, J. (2010): Výskum rezných podmienok priečného pílenia dreva. Vedecká štúdia. Vydanie I. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2010. 69 s. ISBN 978-80-228-2147-6

NOVAK V., ROUSEK M., KOPECKY Z. (2011): Assessment of Wood Surface Quality Obtained During High Speed Milling by Use of Non-Contact Method. In: *DRVNA INDUSTRIJA* Volume 62, Issue 2, 2011. p. 103-115. ISSN 0012-6772

OGASAWARA, K., NODA. S. (1984): Chip Flow in Circular Sawing I. Effect of saw velocity and feed-per-tooth on chip flow. *Journal of the Japan Wood Research Society*, Vol. 30 (1): p. 38 – 46.

PERNICA, J. (1999). Vliv základních rozmeru pilových kotouču na rezný výkon. 2. Medzinárodná vedecká konferencia, 8. – 9. Október 1999, Nitra, s. 107 – 111.

PROKEŠ, S. (1982): Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva. Praha: SNTL–Nakladatelství technické literatury, 1982, 584s. ISBN 04-833-82.

SIKLIENKA, M., KMINIAK, R. (2013): Basics of woodworking. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2013. 140s. ISBN 978-80-228-2491-0.

SCHAJER G. S., WANG S. A. (2002): Effect of workpiece interaction on circular saw cutting stability II. *Holz als Roh und Werkstoff* 60: 48-54.

SVOREŇ, J. 2002: Drevárske stroje. Časť I. Vydanie I. – október 2002. Technická univerzita vo Zvolene, 169 s. ISBN 80-228-1188-2.

WASIELEWSKI R., ORLOWSKI K., BLACHARSKI W. 1999. Frame sawing machines – kinematics and cutting force, *Proceedings of the International Wood Machining Seminar. IWMS 14*. Technical University in Zvolen, 2002, p. 819 – 825.

STN ISO 3002/4 (22 0011) „Rezné nástroje – Základné veličiny pri rezaní a brúsení časť 4. Sily, práca, výkon“