

**A
F
T**

**ACTA
FACULTATIS
TECHNICAE**



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

1

ROČNÍK: XIX

ZVOLEN 2014

OBSAH

VEDECKÉ ČLÁNKY

VPLYV HUSTOTY SIETE MODELU PRI VÝPOČTE VLASTNÝCH FREKVENCÍ PÍLOVÉHO KOTÚČA INFLUENCE OF MESH DENSITY OF THE MODEL IN CALCULATION OF NATURAL FREQUENCIES OF THE CIRCULAR SAW BLADE Adam DROBA – Ján SVOREŇ – Ján MARIENČÍK.....	7
VPLYV RADIÁLNEJ STATICKEJ TUHOSŤI PNEUMATIKY NA VEĽKOSŤ JEJ KONTAKTNEJ PLOCHY A KONTAKTNÉHO TLAKU THE IMPACT OF RADIAL STATIC TYRE STIFFNESS ON THE SIZE OF ITS CONTACT AREA AND CONTACT PRESSURE Milan HELEXA.....	15
APLIKÁCIA LANOVKOVEJ NADSTAVBY AKO ADAPTÉRA PRE LESNÉ KOLESOVÉ TRAKTORY APPLICATION OF THE CABLEWAY THEN ADAPTER FOREST WHEELED TRACTORS Michaela HNILICOVÁ – Valéria MESSINGEROVÁ – Miroslav DADO – Pavel BEŇO.....	25
VPLYV KONCENTRÁCIE VODNEJ PARY V AKTÍVNO M PROSTREDÍ CO₂ LASERANA VÝSTUPNÝ VÝKON ZVÄZKU ŽIARENIA THE INFLUENCE OF WATER VAPOUR CONCENTRATION IN CO ₂ LASER ACTIVE REGION ON OUTPUT POWER OF EMITTED BEAM Rastislav IGAZ – Milada GAJTANSKA.....	35
SPEKTROFOTOMETRICKÉ STANOVENIE ŤAŽKÝCH KOVOV V PEVNÝCH ENVIRONMENTÁLNYCH VZORKÁCH SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF HEAVY METALS IN SOLIDENVIRONMENTAL SAMPLES Tomáš JEZŇÝ – Miroslav BADIDA – Radoslav RUSNÁK.....	41
ZÁVISLOSŤ ANALÝZY ŠPECIÁLNEHO OBRAZU NA INTENZITE OSVETLENIA SPECIAL PICTURE ANALYSIS DEPENDENT ON THE LIGHT INTENSITY Pavol KOLEDA – Peter KOLEDA.....	53
VÝSKUM VHODNOSTI NÁSTROJOVÝCH OCELÍ PRE VÝROBU NOŽOV NA REZANIE DREVA V HETEROGÉNNOM PROSTREDÍ RESEARCH OF SUITABILITY TOOL STEELS OF CUTTING BLADES FOR CUTTING IN A HETEROGENEOUS ENVIRONMENT Juraj KOSTÚR	61
VZNIK VYŠŠÍCH MODÁLNYCH TVAROV PRÚTA PRI JEHO NAMÁHANÍ NA VZPER A HIGHER MODAL SHAPES FORMATION AT THE BUCKLED ROD Stanislav KOTŠMÍD – Pavel BEŇO	71
VYUŽITIE CO₂ LASERA AKO NETRADIČNÉHO NÁSTROJA NA ZMENU FARBY DREVA UTILIZATION OF CO ₂ LASER AS AN UNCONVENTIONAL INSTRUMENT TO WOOD COLOUR CHANGES Ivan KUBOVSKÝ – Rastislav IGAZ	79

VYŠETROVANIE STABILITY MAZACÍCH OLEJOV PRI TVORBE PENY INVESTIGATION OF THE STABILITY OF LUBRICATING OILS IN THE FOAM FORMATION Marián KUČERA.....	89
VPLYV POSUVNEJ RÝCHLOSTI A FREKVENCIE OTÁČANIA NÁSTROJA NA KRÚTIACI MOMENT PRI VRTANÍ IMPACT OF FEED SPEED AND ROTATION SPEED OF TOOL ON TORQUE DURING DRILLING Jaroslav L'ALÍK – Ľubomír JAVOREK	97
POROVNANIE TRECÍCH CHARAKTERISTÍK V KONTAKTNEJ VRSTVE KLZNÝCH ULOŽENÍ A FRICTION CHARACTERISTICS COMPARISON AT THE CONTACT LAYER OF THE SLIDING FIT Ján MARIENČÍK – Ján TURIS – Pavel BEŇO – Adam DROBA	105
SIMULÁCIA PREMIESTŇOVANIA STROMU V PROCESE LESNEJ ŤAŽBY HARVESTEROM SIMULATION OF TREE MOTION IN THE PROCESS OF LOGGING OF HARVESTER Milan MIKLEŠ.....	113
REGULÁCIA TEPLoty MODELU TEPLOVZDUŠNEJ SUŠIARNE PROGRAMOVATEĽNÝM AUTOMATOM TEMPERATURE CONTROL OF HOT AIR OVEN MODEL BY PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER Ľubomír NAŠČÁK – Peter KOLEDA.....	127
ANALÝZA DISTRIBUČNEJ VEĽKOSTI ČASTÍC AEROSÓLOV PROCESNEJ KVAPALINY V PROCESE SÚSTRUŽENIA PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYSIS OF METALWORKING FLUID AEROSOLS DURING TURNING PROCESS Erika SUJOVÁ – Petra SEMANOVÁ – Pavol KOLEDA.....	135
SKÚMANIE STAVU TEPELNE OVPLYVNENEJ OBLASTI MATERIÁLU PO ELEKTROISKROVOM DRÔTOVOM REZANÍ EXAMINING THE STATE OF HEAT AFFECTED ZONE OF THE MATERIAL AFTER THE WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING Miroslava ŤAVODOVÁ	145
REFERÁTY	
SIMULÁCIA ŠÍRENIA ZVUKU V INTERIÉRI SIMULATION OF SOUND PROPAGATION IN INTERIOR Zdenka BECK – Petra LAZAROVÁ – Alexandra GOGA BODNÁROVÁ	155
HODNOTENIE DRSNOSTI POVLAKOV NA RAZIDLÁCH MINCÍ EVALUATION OF ROUGHNESS COATINGS FOR COINS PUCHES Tomáš HANES – Rudolf KAŠTAN – Júlia HRICOVÁ – Petra SEMANOVÁ – Juraj KOSTÚR	167
METODIKA KONCEPČNÉHO NÁVRHU UNIKÁTNEHO AUTONÓMNEHO ROBUSTNÉHO MECHATRONICKÉHO SYSTÉMU NA VRTANIE ULTRAHLBOKÝCH GEOTERMÁLNYCH VRTOV METHODOLOGY OF DESIGN CONCEPT OF THE UNIQUE AND MASSIVE MECHATRONIC SYSTEM APPLIED FOR PROVIDING AN ULTRA-DEEP GEOTHERMAL WELLS Ľudovít MEDVECKÝ – Kamil DRDOL – Peter KAMAS – Martin SOKOL.....	179
ŠTÚDIUM SÍL PRI ODVETVOVANÍ ČLÁNKOVÝM PÁSOM NOŽOV STUDY OF FORCES OF A DELIMBER WITH CHAIN BELT OF KNIFES Juraj MIKLEŠ.....	187

VEDECKÉ ČLÁNKY

VPLYV HUSTOTY SIETE MODELU PRI VÝPOČTE VLASTNÝCH FREKVENCÍÍ PÍLOVÉHO KOTÚČA

INFLUENCE OF MESH DENSITY OF THE MODEL IN CALCULATION OF NATURAL FREQUENCIES OF THE CIRCULAR SAW BLADE

Adam DROBA – Ján SVOREŇ – Ján MARIENČÍK

ABSTRACT: The paper deals with the influence of mesh density of the model of the circular saw blade with slots on the results of the natural frequencies calculated by PC software Pro/Engineer WF 4. The main parameters of model were Ø350 x 30 x 2,4/36 SK. For each model used in modal analyse was changed only one parameter – the maximum size of elements used in mesh, the others remained unchanged. Using this parameter has been achieved smoother or rougher mesh of model. In modal analyse were used three types of meshing, with maximum size of element 5, 20 and 40 mm. There were done investigation of natural frequencies and node shapes of circular saw blade and then presented a theoretical results of these values. There was done monitoring the influence of this effect on results. The results from analyses, which were achieved by FEM, were graphically compared to each other. It has been demonstrated that in this case variable density has no effect on accuracy of calculated natural frequencies, it has only effect on duration of analysis and utilization of PC. The smoother density of mesh took less time for calculation and hardware utilization then rougher.

Key words: circular saw blade, modal analyse, mesh, natural frequency, FEM

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá vplyvom hustoty siete modelu pilového kotúča s drážkami na výsledné hodnoty vlastných frekvencií vypočítané pomocou počítačového softvéru Pro/Engineer WF 4. Hlavné parametre modelu boli Ø350 x 30 x 2,4/36 SK. Pre každý model použitý v modálnej analýze sa menil iba jeden parameter – maximálna veľkosť elementu použitého pri sieťovaní, ostatné boli zachované. Pomocou tohto parametra bola dosiahnutá jemnejšia alebo hustejšia sieť modelu. V modálnej analýze boli použité tri druhy sieťovania, s maximálnou veľkosťou elementu 5, 20, 40 mm. Pomocou výpočtov boli vykonané vyšetrenia vlastných frekvencií a uzlových tvarov pilového kotúča a následne prezentované teoretické výsledky týchto sledovaných hodnôt. Boli vykonané monitorovania vplyvu tejto zmeny na výsledky. Výsledky analýz, ktoré boli dosiahnuté pomocou MKP boli navzájom graficky porovnané. Bolo preukázané, že rôzna hustota siete nemá v tomto prípade žiadny efekt na presnosť vypočítaných hodnôt vlastných frekvencií, má iba vplyv na dĺžku trvania analýzy a vyťaženie počítača. Menšia hustota siete zabrala menej času na výpočet a vyťaženie hardvéru ako väčšia.

Kľúčové slová: pilový kotúč, modálna analýza, sieť, vlastná frekvencia, MKP

1 INTRODUCTION

The oscillation of the blade is a phenomenon which gives rise to additional adverse effects. Low quality of surface, inaccurate cut and high level of noise during sawing are the main problems of cutting on circular saws. These adverse effect can be eliminated using new designs of circular saw blades, different kind of slots, etc. but it is necessary to use high rotational speed. But then could be a problem with working rotational speed which is near or identical to critical rotational speed.

Using the new PC software gives the possibilities to determinate natural frequencies very quickly during the process of designation of tool. But there is a problem with requirements on hardware. So this paper deals about the influence of mesh density on PC hardware and the time needed for obtaining results.

Using the finite element method and its application on oscillation and determination of the natural frequencies of circular saw blade was research area of many authors (Gogu 1988; Münz, 1981; Michna a Svoreň, 2007; Ekevad at al., 2009).

2 MATERIALS AND METHODS

There was used PC software Pro/Engineer WF4 student version for determination of the natural frequencies of the circular saw blade in the paper which allows performing a simulation of static modal analyses.

This software uses FEM (finite element method) for calculating the values of natural frequencies.

The tested subject was model of circular saw blade (Figure 1) which main parameters are described in Table 1. The model was created according to drawing of real circular saw blade from scientific research (Svoreň, 2011).

Table 1 Main parameters of circular saw blade

Outer diameter [mm]	350
Inner diameter [mm]	30
Number of teeth [-]	36
Thickness [mm]	2,4
Height of tooth [mm]	13
Pitch of teeth	Irregular

The model of circular saw blade has got irregular pitch, repeating after 1/6 of circle. In the body were created two kinds of slots, radial and compensation.

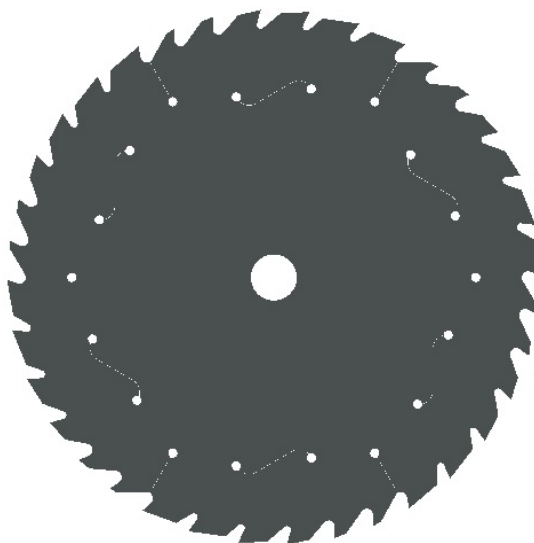


Figure 1 Model of circular saw blade used in modal analysis

2.1 Idealization

There was done the idealization of model to achieve the same or similar parameters as the real circular saw blade has. It was done on circular saw blade model in four points.

2.1.1 Material

The material of model's body was defined from library of software Pro/Engineer WF4. The chosen material was steel which main parameters are shown in Table 2.

Table 2 Main parameters of material used on model

type	isotropic
density [kg.m⁻³]	7827
Young's modulus [Pa]	2,1.10 ¹¹
Poisson's ratio [-]	0,27

2.1.2 Mass definition

The material of the body of circular saw blade was defined as steel, but it has different value of density then slices of sintered carbide. This fact implies that the weight of model (body) was different than the weight of sintered carbide slices which are made from tungsten carbide. This problem was solved so that the carbide slices were replaced by creating the points in the middle of cutting edge of each tooth and there was defined mass of 1,25 g on each point which represent the weight of carbide plate (Figure 2).



Figure 2 Definition of mass on the point created on cutting edge

2.1.3 Constrain

There were created two surface regions on body of model, which represent the frictional surface of clamping collars. These surfaces were created with diameter of 110 mm. The model was clamped using function “*constrain displacement*” defined on created surface regions. This function was defined without any possibilities of displacement and rotation, so the area is absolutely rigid as were used ideal clamping collars.



Figure 3 Model of circular saw blade clamped with function “constrain displacement”

2.1.4 Mesh type

There was done idealization on saw blade, where the model was defined as a thin shell disc with thickness of 2,4 mm. The mesh for analysis was created using shell elements. There were used three types of mesh with variable size of elements, with maximum size of 5, 20 and 40 mm (Figure 4a, b, c). The mesh with size of elements of 5 mm has got 11690 triangle elements (Figure 4a), with size of 20 mm it has got 1 181 triangle elements (Figure 4b) and mesh with maximum size of 40 mm has got 803 triangles (Figure 4c). Using this “size-parameter” were achieved three types of meshes with variable density of elements and the impact on accuracy of calculated results was observed.

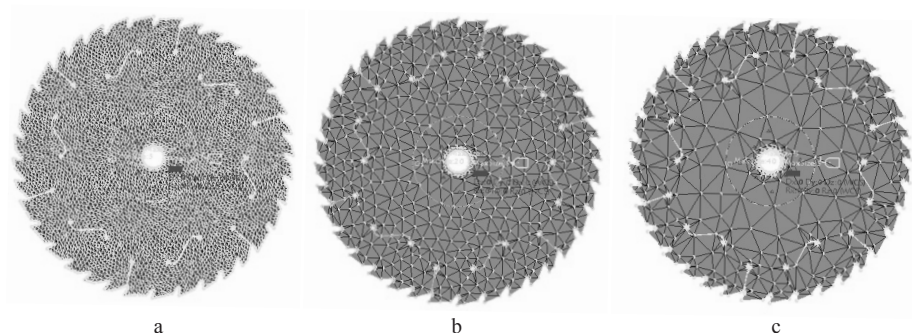


Figure 4 Density of mesh with variable size of element used in modal analysis

3 RESULTS AND DISCUSSION

There have been obtained calculated values of natural frequencies (Table 2) and graphical results of displacement (Figure 6) of circular saw blade for nodal diameter $k = 1, 2, 3, 4$ from modal analysis.

The values of nodal and anti-nodal natural frequencies are shown in table 2.

Table 2 Calculated values of the natural frequencies from modal analysis of circular saw blade with variable size of elements

k	1		2		3		4	
	nodal	anti	nodal	anti	nodal	anti	nodal	anti
size [mm]	f [Hz]							
5	135,49	135,49	157,35	157,35	224,73	236,17	347,02	347,03
20	135,53	135,53	157,44	157,44	224,93	236,36	347,32	347,33
40	135,53	135,53	157,43	157,43	224,93	236,4	347,45	347,45

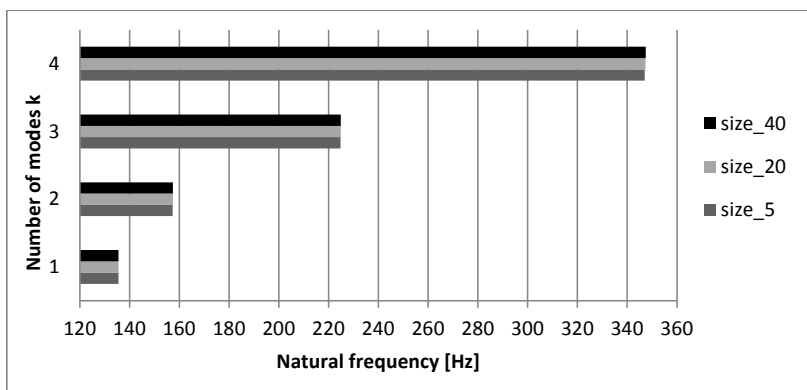


Figure 5 Comparison of calculated values of natural frequencies obtained from modal analysis for $k = 1, 2, 3, 4$

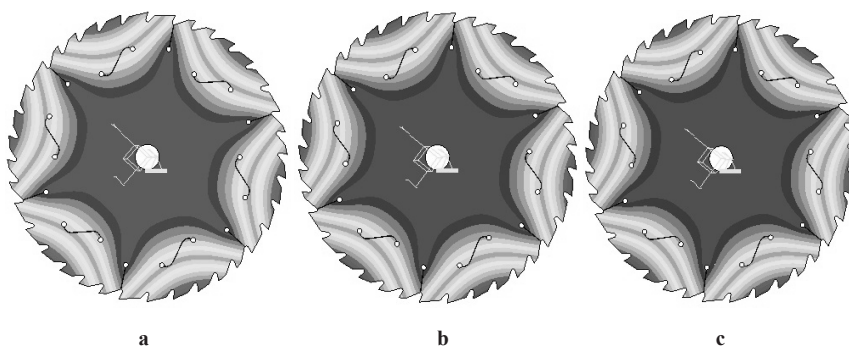


Figure 6 The results of displacement of deformed model of circular saw blade from modal analyse for $k = 3$ for 3 types of mesh

- There have been obtained natural frequencies of circular saw blade from modal analyse for $k = 1, 2, 3, 4$ by FEM (Table 1), using three types of model meshing. As shows (Figure 5) there was no effect using smoother or rougher density of mesh on accuracy of results. So in our case can be said that it is not important to use very small elements of the mesh because it has minimum effect on accuracy of results.
- Duration of modal analyse with maximum size of element 5 mm took 8 minutes and utilization of PC shown by operation system was higher than in modal analyse with maximum size of element 40 mm, when duration was only 2 minutes and utilization of PC was lower. According to these fact, smoother mesh in this case has no effect on results is only more demanding on hardware and calculation time.

4 ZÁVER

V dnešnej dobe je pre zisťovanie vlastných frekvencií telies používanie počítačových softvérov veľmi nápomocné. Problémom získania správnych výsledkov je nedostatočné zadefinovanie parametrov modelu voči reálnej súčiastke. Preto je potrebné vykonanie idealizácie modelu.

Niektoré experimentálne metódy neposkytujú predstavu o tvaroch kmitania a statických deformáciách alebo deformáciách v čase. Preto je pre výskumníkov a výrobcov dobrá voľba používanie počítačových softvérov, ktoré relatívne presne simulujú správanie sa študovaného javu, v tomto prípade výpočet vlastných frekvencií pilového kotúča a jeho deformáciu. Používanie takýchto softvérov šetrí čas, náklady na výrobu a experimentálne merania, pretože modifikácie na modely je možné vykonať relatívne rýchlo.

REFERENCES

- DROBA, A.; PAULÍNÝ, D.; SVOREŇ, J.: 2013. Porovnanie teoretických a experimentálnych hodnôt vlastných frekvencií pilového kotúča. *Acta facultatis technicae*, Zvolen. 2013. 18(1), 39 – 46. ISSN 1336-4472

Literárne odkazy:

EKEVAD, M.; CRISTOVAO, L.; GRÖNLUND, A.: 2009. *Different methods for monitoring flatness and tensioning in circular – saw blades*. In: *Proceedings 19th International Wood Machining Seminar, Nanjing, 21. – 23. October 2009, p. 121 – 131, Faculty of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, 21 037 Jiangsu, China.*

GOGU, G.:1988: *Berechnung der Eigenfrequenzen von Kreissägeblättern mit der Finite-Element-Methode*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 46(3), 91 – 100.

LEOPOLD, J.; MÜNZ, V. V.: 1992: *Dynamische und statische Untersuchungen von Kreissägeblättern mittels der Finite-Elemente-Methode*. *Holzbearbeitung*, 6, 52 – 56.

MICHNA, S., SVOREŇ, J., 2007: *Application of CAD, CAE with FEM for estimation ranges of values of critical rotational speed of Circular saw blades*. *Acta facultatis Technicae*, 9(1), 201 – 206. ISSN 1336-4472

Kontaktná adresa:

Ing. Adam Droba, doc. Ing. Ján Svoreň, CSc.
Technická univerzita vo Zvolene
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Katedra drevárskych strojov a zariadení
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,
adam.droba@tuzvo.sk, svoren@tuzvo.sk

Ing. Ján Marienčík,
Technická univerzita vo Zvolene
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Katedra mechaniky strojnictva,
Študentská 26, 960 53 Zvolen
jan.mariencik@tuzvo.sk

VPLYV RADIÁLNEJ STATICKEJ TUHOSŤI PNEUMATIKY NA VEĽKOSŤ JEJ KONTAKTNEJ PLOCHY A KONTAKTNÉHO TLAKU

THE IMPACT OF RADIAL STATIC TYRE STIFFNESS ON THE SIZE OF ITS CONTACT AREA AND CONTACT PRESSURE

Milan HELEXA

ABSTRACT: The article deals with the description of experimental results of measuring radial deformation characteristic of the selected tyre. The experimental measurements were carried out on a testing soil channel which was burdened with mechanic weights and lifted with workshop crane. Moreover, the article characterizes in detail the methodology of the carried out experiment. Furthermore it contains the measured values of parameters of the contact area with hard pad as well as other necessary calculated parameters, such as the middle contact pressure. Gained values of radial stiffness are connected to the size of the tyre contact area as well as contact pressure. The article also states the derivation of specific functional dependence and points out its possible deficiencies. The conclusion of the article assesses the overall experiment and gained results and points out its certain limits and accuracy.

Key words: tyre, tyre stiffness, contact area, contact pressure

ABSTRAKT: Článok sa venuje popisu experimentálnych výsledkov merania radiálnych deformačných charakteristík zvolenej pneumatiky. Samotné experimentálne merania boli realizované na zariadení zo skúšobného pôdneho kanála, ktoré bolo zaťažované prostredníctvom mechanických závaží a zdvíhané prostredníctvom dielenského žeriava. Článok ďalej podrobnejšie rozoberá metódu realizovaného experimentu. Uvádza namerané hodnoty parametrov kontaktnej plochy s pevnou podložkou ako aj ďalšie potrebné vypočítané parametre ako je napr. stredný kontaktný tlak. Získané hodnoty radiálnej tuhosti dáva do súvisu s veľkosťou kontaktnej plochy pneumatiky ako aj kontaktného tlaku. Uvádza tiež odvodenie príslušnej funkčnej závislosti a upozorňuje na jej možné nedostatky. Záver článku celkovo hodnotí realizovaný experiment a získané výsledky a upozorňuje na jeho určité obmedzenia a presnosť.

Kľúčové slová: pneumatika, tuhosť pneumatiky, kontaktná plocha, kontaktný tlak

1. ÚVOD

Radiálne deformačné charakteristiky pneumatík mobilnej techniky využívanej v lesníctve a poľnohospodárstve patria k dôležitým atribútom pri riešení kontaktných napätí medzi pneumatikou a pôdou. Veľkosť kontaktného tlaku je ovplyvnená predovšetkým veľkosťou kontaktnej plochy pneumatiky a jej normálovým zaťažením. Veľkosť a priebeh kontaktného tlaku pneumatiky do značnej miery ovplyvňujú ako sa táto bude správať na pôde, ako ju bude poškodzovať (napr. stláčaním alebo nadmerným preklzom) a aké jazdné a prevádzkové vlastnosti s ňou mobilný prostriedok za daných pôdných podmienok dosiahne. Výskumom deformačných vlastností pneumatík sa zaoberali v minulosti viacerí autori, ako napr. Koutný (2009), Krmela (2008) a Dočkal a kol. (1998), ktorí vo svojich prácach takisto zdôrazňujú vplyv deformačných vlastností pneumatík na ich jazdné a kontaktné parametre.

V tomto článku sa aj my pokúsime naznačiť súvislosť medzi radiálnou deformačnou charakteristikou pneumatiky a veľkosťou jej kontaktnej plochy a kontaktného tlaku.

2. MATERIÁL A METÓDY

Za predmetnú sledovanú pneumatiku sme zvolili pneumatiku Mitas TS05 10,0/75-15,3 PR10 diagonálnej konštrukcie so šipovým dezénom. Jej základné technické parametre sú uvedené v nasledovnej tabuľke 1.

Tabuľka 1: Základné technické parametre sledovanej pneumatiky

Typ pneu.	Rozmer	PR	Dezén	Ráfik	Šírka (mm)	Priemer (mm)	Rádius (mm)	Odvalený obvod (mm)
Mitas	TS05 10,0/75 – 15,3 PR10	10	TS05	9,00 x 15,3	264	790	360	2 295

Radiálnu deformačnú charakteristiku sme zisťovali v pôdnom skúšobnom kanály jej radiálnym zaťažovaním prostredníctvom mechanických závaží. Celý prípravok bol pri meraní zdvíhaný prostredníctvom dielenského žeriava. Radiálnu deformáciu pneumatiky sme zisťovali prostredníctvom výškomera. Určitou nevýhodou pri meraní bola skutočnosť, že merací prípravok nebolo možné odľahčiť na hmotnosť nižšiu ako 480 kg, nakoľko na ňom sa nachádza namontovaný celý pohonný mechanizmus kolesa, ktorý sa využíva pri trakčných a energetických skúškach pneumatík v pôdnom skúšobnom kanály.

Zo získaných deformačných charakteristík sme následne vypočítali statickú radiálnu tuhosť sledovanej pneumatiky. Pritom sme vychádzali z metodiky, ktorú uvádza Jante (Cvekl, Dražan, 1976). Túto môžeme vyjadriť zo vzťahu nasledovného tvaru

$$E_p = \int_0^{y_{\max}} c \cdot y dy = \frac{1}{2} \cdot c \cdot y_{\max}^2 \quad [J] \quad (1)$$

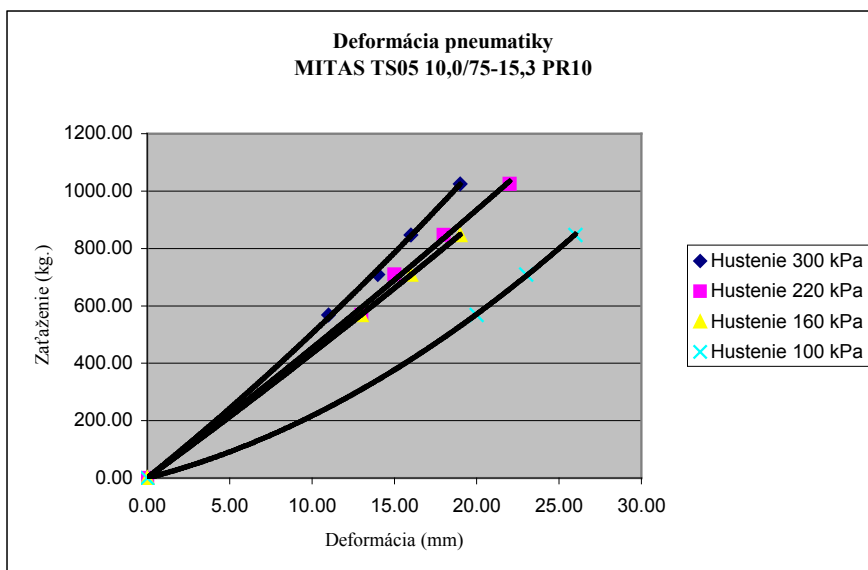
kde: c – radiálna statická tuhosť pneumatiky, $[N \cdot m^{-1}]$
 y_{max} – maximálna zvislá deformácia pneumatiky pri zodpovedajúcom zaťažení, $[m]$
 E_p – energia vynaložená na deformáciu pneumatiky, $[J]$

Získaná radiálna deformačná charakteristika pneumatiky je pre sledované tlaky hustenia 300 kPa, 220 kPa, 160 kPa a 100 kPa a radiálne zaťaženie pohybujúce sa od 567,9 kg. do 1 025,09 kg. znázornená na obrázku 1. Hodnoty výpočtu radiálnej tuhosti pneumatiky a získané namerané údaje sú znázornené v tabuľke 2.

V rámci riešenia problematiky sme odvodili nasledovný vzťah pre výpočet veľkosti kontaktnej plochy pneumatiky na veľkosti jej radiálnej statickej tuhosti

$$S_{styk} = \frac{c \cdot d_k}{2 \cdot (a_1 \cdot p + p_k)} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{d_k \cdot b \cdot (p + 5 \cdot 10^4)} \right)^2} \right] \quad [m^2] \quad (2)$$

kde: c – radiálna statická tuhosť pneumatiky, $[N \cdot m^{-1}]$
 Q – radiálne zaťaženie pneumatiky, $[N]$
 d_k – voľný priemer pneumatiky (konštrukčný parameter), $[m]$
 b – šírka kontaktnej plochy pneumatiky (šírka stopy), $[m]$
 p – tlak hustenia pneumatiky, $[Pa]$
 p_k – kontaktný tlak vyvolaný kostrou plášte'a, $[Pa]$
 a_1 – súčiniteľ závislý na konštrukcii pneumatiky, $[-]$



Obr. 1 Radiálna deformačná charakteristika sledovanej pneumatiky

Tabuľka 2: Namerané výsledky, pneumatika Mitas TS05 10,0/75-15,3 PR10

Zaťaženie (kg)	Zaťaženie (N)	Tlak (kPa)	Šírka stopy (mm)	Polomer (mm)	Stlačenie (mm)	Pot. Energia (J)	Tuhosť (N.m ⁻¹)
1025,09	10056,13	300,00	230,00	376,00	19,00	91,11	504764,54
847,14	8310,44	300,00	220,00	379,00	16,00	63,58	–
709,30	6958,23	300,00	212,00	381,00	14,00	48,16	–
567,90	5571,10	300,00	200,00	384,00	11,00	29,24	–
0,00	0,00	300,00	0,00	395,00	0,00	0,00	–
1025,09	10056,13	220,00	228,00	373,00	22,00	107,34	443553,72
847,14	8310,44	220,00	222,00	377,00	18,00	71,42	–
709,30	6958,23	220,00	221,00	380,00	15,00	49,38	–
567,90	5571,10	220,00	210,00	382,00	13,00	36,97	–
0,00	0,00	220,00	0,00	395,00	0,00	0,00	–
847,14	8310,44	160,00	221,00	376,00	19,00	76,55	424099,72
709,30	6958,23	160,00	220,00	379,00	16,00	54,03	–
567,90	5571,10	160,00	218,00	382,00	13,00	35,49	–
0,00	0,00	160,00	0,00	395,00	0,00	0,00	–
847,14	8310,44	100,00	220,00	369,00	26,00	90,07	266479,29
709,30	6958,23	100,00	218,00	372,00	23,00	66,78	–
567,90	5571,10	100,00	220,00	375,00	20,00	47,70	–
0,00	0,00	100,00	0,00	395,00	0,00	0,00	–

Relevantnosť vzťahu 2 sme overovali na základe porovnávacieho výpočtu s nameranými výsledkami statickej radiálnej tuhosti a experimentálne získanými hodnotami kontaktnej plochy a jej parametrov. V tomto zmysle je potrebné uviesť, že výpočet sa v praxi neosvedčil. Problémom tohto vzťahu je, že sme pri jeho odvodzovaní uvažovali s hodnotou stredného kontaktného tlaku rovnou s tlakom hustenia pneumatiky, čo sa ukázalo na základe vykonaných meraní ako nie celkom správne. Ďalším problémom je to, že sme pri odvodzovaní predpokladali, že kontaktná plocha pneumatiky s podložkou má obrysy obdĺžnika. To je síce u niektorých pneumatík možné, ale v prípade našej sledovanej pneumatiky sa otláčok kontaktnej plochy dosť blížil tvaru elipsy. V ďalšom texte preto uvádzame len výsledky jednoduchého výpočtu veľkosti kontaktnej plochy pneumatiky s uvedením výpočtu relatívnej odchýlky od nameraných hodnôt (tab. 3)

$$S_{styk} = \frac{c \cdot y}{p_s} \quad [m^2] \quad (3)$$

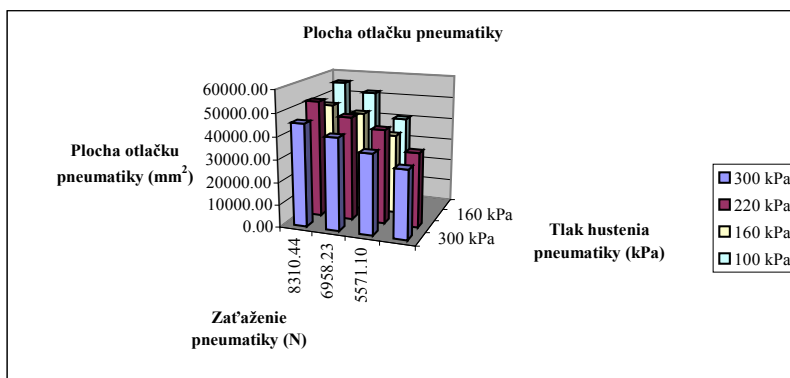
kde: y – radiálna deformácia pneumatiky, $[m]$

p_s – stredný kontaktný tlak medzi pneumatikou a podložkou, $[Pa]$

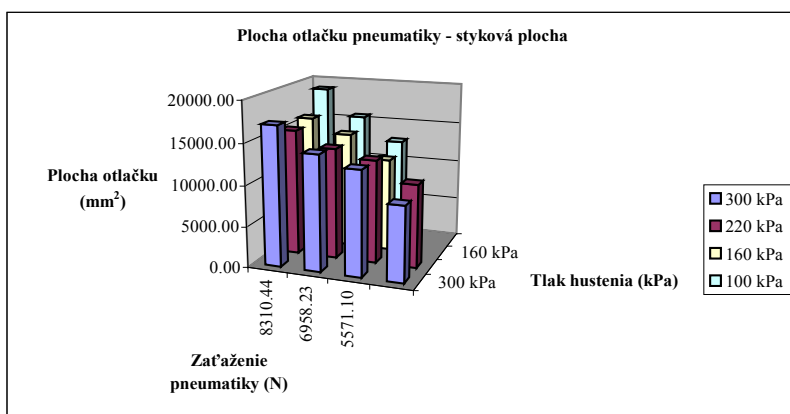
Tabuľka 3: Výsledky výpočtu veľkosti kontaktnej plochy pneumatiky

Zat'azenie (N)	Tlak hustenia (kPa)	Deformácia (m)	Stredný kontaktný tlak (Pa)	Plocha otláčky (nameraná) (mm ²)	Plocha otláčky (vypočítaná) (mm ²)	Odchýlka (%)
10056,13	300	0,019	220717,08	45561,19	43451,60	- 4,60
8310,44	300	0,016	203586,19	40820,27	39669,80	- 2,82
6958,23	300	0,014	196142,48	35475,40	36028,40	+ 1,53
5571,10	300	0,011	184106,91	30260,13	30158,60	- 0,34
0,00	300	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Tuhosť (N,m⁻¹)	504764,54	-	-	-	-	-
10056,13	220	0,022	192940,44	52120,40	50576,10	- 2,96
8310,44	220	0,018	179895,03	46196,07	44381,20	- 3,93
6958,23	220	0,015	166112,09	41888,78	40053,10	- 4,40
5571,10	220	0,013	167892,58	33182,52	34344,50	+ 3,38
0,00	220	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Tuhosť (N,m⁻¹)	443553,72	-	-	-	-	-
8310,44	160	0,019	174317,27	47674,24	46225,40	- 3,04
6958,23	160	0,016	155091,95	44865,21	43752,00	- 2,48
5571,10	160	0,013	155159,96	35905,52	35532,90	- 1,04
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Tuhosť (N,m⁻¹)	424099,72	-	-	-	-	-
8310,44	100	0,026	149048,95	55756,47	46484,40	- 16,63
6958,23	100	0,023	134636,82	51681,50	45522,60	- 11,92
5571,10	100	0,020	138136,47	40330,40	38582,00	- 4,34
0,00	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tuhosť (N,m⁻¹)	266479,29	-	-	-	-	-

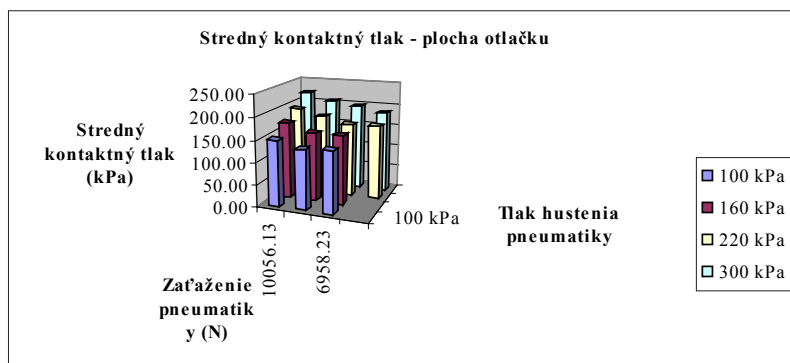
Veľkosť kontaktnej plochy pneumatiky pri danom zaťažení a tlaku hustenia sme získavali jej otláčaním na hrubý rysovací papier, pričom sme kontaktnú plochu pneumatiky predtým natreli farbou. Meranie sme realizovali na tvrdom betónovom podklade. Hodnoty stredných kontaktných tlakov sme následne vypočítali z hodnôt nameranej kontaktnej plochy a zvislého zaťaženia. Získané výsledky sú uvedené v nasledovnej tabuľke 4. Grafické vyjadrenia niektorých nameraných závislostí sú znázornené na nasledovných obrázkoch 2 až 5.



Obr. 2 Závislosť plochy otláčku pneumatiky na zvislom zaťažení a tlaku hustenia



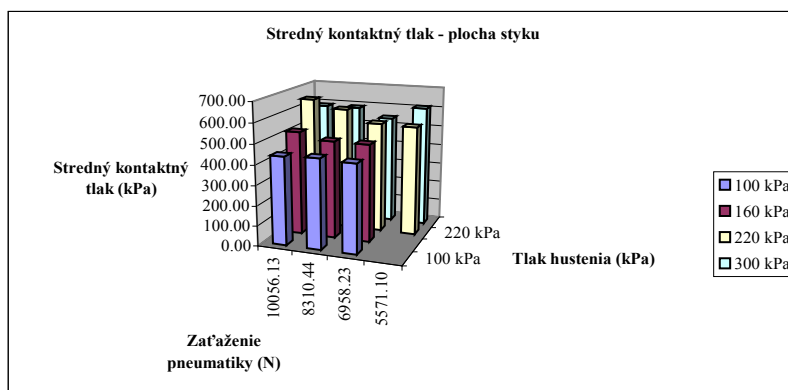
Obr. 3 Závislosť plochy styku pneumatiky na zvislom zaťažení a tlaku hustenia



Obr. 4 Závislosť stredného kontaktného tlaku pneumatiky na zaťažení a tlaku hustenia

Tabuľka 4: Meranie veľkosti kontaktnej plochy a kontaktného tlaku pneumatiky

Zaťaženie (kg)	Zaťaženie (N)	Tlak hustenia (kPa)	Šírka stopy (mm)	Dĺžka stopy (mm)	Sťahenie (deformácia) (mm)	Plocha otláčku (mm ²)	Plocha styku (mm ²)	Str. kontaktný tlak (otlačok) (Pa)	Str. kontaktný tlak (styk) (Pa)
1025,09	10056,13	300,00	230,00	245,00	19,00	45561,19	17085,25	220717,08	588585,65
847,14	8310,44	300,00	220,00	220,00	16,00	40820,27	14115,40	203586,19	588750,12
709,30	6958,23	300,00	212,00	205,00	14,00	35475,40	12775,18	196142,48	544668,10
567,90	5571,10	300,00	200,00	190,00	11,00	30260,13	9165,63	184106,91	607824,99
0,00	0,00	300,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1025,09	10056,13	220,00	228,00	260,00	22,00	52120,40	15450,52	192940,44	650860,48
847,14	8310,44	220,00	222,00	229,00	18,00	46196,07	13605,38	179895,03	610820,38
709,30	6958,23	220,00	221,00	223,00	15,00	41888,78	12634,47	166112,09	550734,06
567,90	5571,10	220,00	210,00	188,00	13,00	33182,52	10200,62	167892,58	546152,98
0,00	0,00	220,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
847,14	8310,44	160,00	221,00	243,00	19,00	47674,24	15995,35	174317,27	519553,71
709,30	6958,23	160,00	220,00	225,00	16,00	44865,21	14285,08	155091,95	487097,94
567,90	5571,10	160,00	218,00	200,00	13,00	35905,52	11465,00	155159,96	485922,29
0,00	0,00	160,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
847,14	8310,44	100,00	220,00	285,00	26,00	55756,47	18910,41	149048,95	439463,95
709,30	6958,23	100,00	218,00	256,00	23,00	51681,50	15579,77	134636,82	446619,75
567,90	5571,10	100,00	220,00	210,00	20,00	40330,40	12700,44	138136,47	438654,02
0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Obr. 5 Závislosť stredného kontaktného tlaku pneumatiky na nepoddajnej podložke na zvislom zaťažení a tlaku hustenia

3. DISKUSIA

Nami vykonané merania v zásade potvrdzujú výsledky aj iných autorov. Závislosť deformácie pneumatiky na zaťažení (obr. 1) je nelineárna popísateľná polynómom druhého stupňa (kvadratická funkcia). Uvádzané hodnoty statickej radiálnej tuhosti boli získané linearizáciou týchto funkcií podľa Janteho pre maximálne dovolené zaťaženie pri danom tlaku hustenia pneumatiky (tab. 2).

Zo závislosti plochy otlaku pneumatiky na zaťažení a tlaku hustenia (obr. 2) vyplýva, že plocha otlaku jednoznačne narastá so zvyšujúcim sa radiálnym zaťažením a znižujúcim sa tlakom hustenia pneumatiky. Maximum dosahuje pri tlaku hustenia 100 kPa a maximálnom zaťažení 847,14 kg.

Plocha styku pneumatiky s pevnou podložkou v závislosti na zaťažení a tlaku hustenia (obr. 3) sa správa v podstate rovnako ako v predchádzajúcom prípade. V tejto závislosti však môžeme postrehnúť určité odchýlky spočívajúce vo výraznom poklese plochy styku pneumatiky v závislosti na zaťažení a tlaku hustenia pri hustení na tlak 220 kPa a 160 kPa. Môže to byť spôsobené aj určitými nedokonalosťami pri realizácii merania, prípadne chybou pri vyhodnocovaní alebo malým počtom realizovaných meraní.

V závislosti stredného kontaktného tlaku pneumatiky na zaťažení a tlaku hustenia (obr. 4) môžeme sledovať, že stredný kontaktný tlak pneumatiky narastá nielen pod vplyvom zvyšujúceho sa zvislého zaťaženia ale aj pod vplyvom narastajúceho tlaku hustenia pneumatiky. Svoje maximum dosahuje pri tlaku hustenia 300 kPa a zvislom zaťažení 1 025,19 kg.

Závislosť stredného kontaktného tlaku pneumatiky na tvrdej podložke v závislosti na zaťažení a tlaku hustenia (obr. 5) má podobný priebeh ako v predchádzajúcom príklade. Opäť sa tu však prejavili určité odchýlky od očakávaného výsledku, ktoré mohli byť spôsobené už spomínanými príčinami.

V tabuľke č. 3 sme uviedli výsledky jednoduchého spätného prepočtu veľkosti kontaktnej plochy pneumatiky pri zohľadnení jej deformácie a radiálnej tuhosti. Podľa hodnôt

relatívnej chyby možno povedať, že výpočet je pomerne presný, výsledné hodnoty vypočítanej kontaktnej plochy sa pohybujú v hodnotách relatívnej chyby do 5 %, čo z praktického hľadiska môžeme považovať za prijateľné. Pomerne značné odchýlky však nastali pri tlaku hustenia 100 kPa kde sa hodnota relatívnej chyby pohybuje až na úrovni 16,63 %. Príčinu vidíme najmä v spôsobe linearizácie kvadratických priebehov deformačných charakteristík. Zvlášť pri nízkych tlakoch hustenia je nelinearita pomerne značná a aproximácia tohto priebehu lineárnou funkciou so sebou zrejme prináša aj dosť veľké odchýlky.

4. ZÁVER

Záverom by sme chceli uviesť, že samotný pôdny skúšobný kanál na ktorom sme realizovali naše merania nie je celkom vhodný pre zisťovanie deformačných charakteristík pneumatík. Na tento účel je vhodnejšie zariadenie nazývané statický adhezor, ktoré umožňuje presné merania jednotlivých deformačných charakteristík sledovanej pneumatiky. Naša katedra však daným zariadením momentálne nedisponuje. V budúcnosti by sme chceli v danej oblasti výskumu deformačných charakteristík pokračovať a uvedené merania spresniť na požadovanú úroveň.

Naše merania neprinášajú nejaké zásadné výsledky, no potvrdzujú názory, že tlak hustenia pneumatiky, ako aj výber vhodnej veľkosti pneumatiky pre konkrétny mobilný pracovný prostriedok zohrávajú dôležitú úlohu v oblasti energetickej efektivity týchto strojov. Myslíme si, že sa nám aspoň podarilo naznačiť súvislosť medzi radiálnou tuhosťou pneumatiky a veľkosťou jej kontaktnej plochy a kontaktného tlaku. Tieto vlastnosti pneumatiky je nutné preverovať ešte skôr než sa pneumatika osadí na konkrétny mechanizačný prostriedok. Na základe výsledkov tohto overovania je potom možné stanoviť vhodnosť danej pneumatiky pre konkrétny mechanizačný prostriedok, tak aby jeho práca v teréne bola čo najefektívnejšia.

SUMMARY

Radial deformation characteristics of mobile technology tyres used in forestry and agriculture belong to important attributes when solving the contact tension between the tyre and soil. The size of contact pressure is influenced mainly by the size of the contact area of the tyre and its normal load. The size and course of the contact pressure of the tyre to a large extent influence how it works on the soil, how it can be damaged (e.g. by compression or excessive slippage) and which on-road performance and operation characteristic are reached by mobile technology at a stated soil conditions. Many authors, such as Koutný (2009), Krmela (2008) and Dočkal and col. (1998) dealt with the research of deformation characteristic of tyres. In their works they underline the influence of deformation characteristic of tyres on their on-road and contact parameters.

As a subject of observation we chose the tyre Mitas TS05 10.0/75-15.3 PR10 of cross-ply construction with an arrow pattern. Its basic technical specifications are stated in the following Table no. 1.

The radial deformation characteristic of the tyre was determined in the testing soil channel by its radial burdening with mechanical weights. During measuring the whole device was lifted by a workshop crane. The radial deformation of the tyre was ascertained with an altimeter. As a certain disadvantage for measuring was the fact that the load of the measured device could not be reduced to less than 480 kg, because the whole driving mechanism of the wheel, which is used for traction and energy tests of tyres in the testing soil channel, is installed on it.

Gained radial deformation characteristic of the tyre for the monitored pressures of the tyre inflation 300 kPa, 220 kPa, 160 kPa and 100 kPa, and radial load varying from 567.9 kg to 1025.09 kg are expressed on the Figure no. 1. Values of calculated radial tyre stiffness and gained measured data are stated in the Table no. 2. Gained results are stated in the following Table no. 4. Graphical representation of certain measured dependencies is stated on the following figures 2 to 5.

At the end we would like to state that the testing soil channel where the measurements were carried out is not completely suitable for ascertaining the deformation characteristics of tyres. A device called static adhesor is more suitable for this purpose because it enables more accurate measuring of individual deformation characteristics of the respective tyre. However, our department does not have this device at the moment. We want to continue with the stated field of research in the future and make more precise measurements so that they reach the demanded standard.

Our measurements do not bring any fundamental outcomes, but they confirm the opinion that the tyre inflation pressure as well as the selection of the suitable size of tyre for specific mobile working device plays an important role in the area of energy efficiency of these devices. We believe that we succeeded in implying the relation between radial stiffness of the tyre and the size of its contact area and contact pressure. It is necessary to verify these qualities before the tyre is fixed to the specific mechanical device. Based on the results of these measurements it is possible to determine the suitability of the respective tyre for specific mechanical device so that its performance in the terrain is as efficient as possible.

LITERATÚRA

- CVEKL, Z., DRAŽAN, F. a kol. 1976. *Teoretické základy transportních zařízení*. Praha, Bratislava: SNTL/Alfa, 1976, 320 s.
- DOČKAL, V., KOVANDA, J., HRUBEC, F.: 1998. *Pneumatiky*. Praha: ES ČVUT, 1998, 71 s. ISBN 80-01-01882-2
- KOUTNÝ, F.: 2009. *Konstrukce výrobků. Geometrie a mechanika pneumatik*. Zlín: ES UTB, 2009, 140 s. ISBN 978-80-7318-796-5
- KRMELA, J.: 2008. *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I*. Brno: Tribun EU, 2008, 102 s. ISBN 978-80-7399-365-8

Kontaktná adresa:

Ing. Milan Helexa, PhD.

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,

Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,

E-mail: helexa@pobox.sk

APLIKÁCIA LANOVKOVEJ NADSTAVBY AKO ADAPTÉRA PRE LESNÉ KOLESOVÉ TRAKTORY

APPLICATION OF THE CABLEWAY THEN ADAPTER FOREST WHEELED TRACTORS

**Michaela HNILICOVÁ – Valéria MESSINGEROVÁ – Miroslav DADO
– Pavel BEŇO**

ABSTRACT: Field conditions, high proportion of mountain forests and forest health condition requires ecological forest machinery. Skidding by cable systems is the most ecologically friendly skidding method. On the basis of the need of greater use of timber skidding by cable systems we started to work on a proposal of cable system based on transportation-circulating cable as adapters of forest wheeled tractors.

Key words: skidding, cable system, forest wheeled tractors, adapters

ABSTRAKT: Terénne podmienky, vysoký podiel horských lesov a zdravotný stav lesov si vyžaduje ekologicky vhodnú lesnú techniku. K najšetnejšiemu spôsobu sústreďovania dreva patrí sústreďovanie lanovkami. Na základe potreby rozšírenia sústreďovania dreva lanovkami sa pristúpilo k návrhu nového lanového zariadenia na báze dopravno-obežného lana ako adaptéra na lesný kolesový traktor.

Kľúčové slová: približovanie, lanovka, lesný kolesový traktor, adaptér

ÚVOD

Udržanie a zlepšenie biologickej hodnoty lesného fondu a produkčnej schopnosti lesov tak, aby lesy okrem produkcie dreva zabezpečovali aj ostatné užitočné funkcie a pôsobili ako základný faktor tvorby životného prostredia, je jedným z problémov, ktoré v súčasnosti stoja pred lesným hospodárom.

Dôležitou a zložitou fázou ťažbovo-dopravného procesu pri výrobe dreva sa považuje jeho sústreďovanie. Okrem iného je to aj preto, že pri sústreďovaní sa musí prekonať množstvo prekážok s ťažkým bremenom, čo často spôsobuje poškodenie stojaceho porastu, vznikajúceho podrastu. Zároveň narušením povrchu pôdy vlečeným drevom vzniká jej poškodenie, ktoré v spolupôsobení s geologicko-klimatickými faktormi vytvára ťažbovo-dopravnú eróziu.

Pri voľbe spôsobu dopravy dreva od pňa na odvozné miesto môže lesný hospodár v súčasnosti voliť niektorý z nemechanizovaných spôsobov (ručne, animálnou silou) alebo

mechanizovaných spôsobov (rôznymi typmi prenosných a samohybných navijakov, kolesovými a pásovými traktormi, lesníckymi kolesovými traktormi, lanovkami), prípadne ich kombináciou.

V lesnom hospodárstve Slovenska si od 70. rokov minulého storočia z hľadiska podielu sústredenej drevnej hmoty udržiava vedúcu pozíciu traktorová technológia s prevažujúcim využitím lesných kolesových traktorov (tabuľka 1). Deje sa tak aj napriek často deklarovanej vyššej úrovni škôd spôsobovaných na poraste, podraсте a pôde, v porovnaní s inými technológiami sústreďovania dreva [1, 5, 6, 8].

Napriek spomínaným negatívam si táto technológia aj naďalej udrží značný podiel na objeme sústredenej dreva, najmä kvôli jej nenáročnosti na organizáciu a nižšej nadobúdacej cene oproti ostatným technológiám, preto je nevyhnutné neustále zlepšovať technické a technologické parametre traktorov za účelom zefektívnenia práce a zníženia ich negatívneho pôsobenia na lesný ekosystém. Z týchto predpokladov vychádzala aj firma LKT s. r. o., Trstená pri vývoji lesníckeho kolesového traktora LKT 82 [10].

Skúsenosti lesníckej prevádzky, ako aj výsledky rôznych výskumných prác potvrdzujú, že z hľadiska ochrany prírodného prostredia je použitie lanoviek na sústreďovanie dreva najvýhodnejšie zo všetkých bežne používaných mechanizovaných spôsobov.

Napriek tejto skutočnosti je podiel dreva, sústredenej lanovkami na Slovensku nízky, nezodpovedajúci súčasným potrebám. Štatistické spracovanie podielu sústreďovacích prostriedkov na objeme sústredenej dreva v štátnych organizáciách je uvedené v tabuľke 1. V súčasnosti sa už uvedené štatistiky nevedú.

V minulosti sa často u nás a v iných štátoch pri dočasnom sprístupňovaní používali lanovky s dlhým dosahom (až niekoľko km). Tento systém pri súčasnom stave sprístupňovania a prevládajúcej cestnej doprave dreva, ako aj využívanie krátko-traťových lanoviek je už prekonaný, aj keď v odôvodnených prípadoch, pri súčasnej vyspelej technickej úrovni týchto prostriedkov je potrebné zvážiť, či nie je výhodnejšie než budovanie nových ciest predovšetkým v strmých a ekologicky vzácných neprístupných terénoch alebo ochranných lesoch [4].

Z tohto dôvodu sa na TU Zvolen, pristúpilo k návrhu lanovkovej nadstavby LL-200, ktorá by pre svoju činnosť využíval ako pohonnú jednotku lesný kolesový traktor LKT 82 s tým, že lanovková nadstavba by bola rýchlo montovateľná a demontovateľná pri zachovaní pôvodných prevádzkových vlastností lesného kolesového traktora.

Tabuľka 1 Podiel jednotlivých sústreďovacích prostriedkov na objeme sústredenej dreva v štátnych organizáciách [12]

Sústreďovacie prostriedky		Rok (%)			
		1990	2000	2005	2006
Kone		1,7	11,8	2,7	25,9
Navijaky prenosné a samohybné		0,6	–	–	–
Lesnícke lanovky		1,7	2,5	13,9	2,9
Traktory	pásové	2,0	–	0,1	–
	univerzálne kolesové	31,0	14,0	22,0	30,1
	lesnícke kolesové	63,0	68,5	62,2	25,0
Vývážacie súpravy		–	0,6	0,9	15,8

MATERIÁL A METODIKA

Na základe údajov v odbornej literatúre o spracováanej problematike boli stanovené požiadavky a technicko-technologické parametre nových riešení na zvýšenie efektívnosti sústreďovania dreva lanovkami využívajúcimi pre svoju činnosť dvojhubnové navijaky.

Navrhol sa prototyp lanovkovej nadstavby (LL-200), pri návrhu ktorej sa zohľadnilo predovšetkým:

- rýchlosť montáže a demontáže, pričom nesmela byť obmedzená funkcia traktora,
- použiteľnosť pri malých koncentráciách vytáženého dreva,
- možnosť približovania dreva do protisvahu a po svahu.

Vypracovalo sa posúdenie vhodnosti nasadenia lanovkovej nadstavby LL-200 v horských lesoch v prípade úmyselných alebo náhodných ťažieb menších koncentrácií ($50 \div 200 \text{ m}^3$ hmoty) na základe úspory investičných nákladov pri nasadení lanového systému, v porovnaní s potrebou výstavby lesných ciest a použitia inej technológie približovania.

Po konzultáciách s firmou LKT s. r. o., Trstená sa dospelo k záveru, že na pohon lanovkovej nadstavby sa použije nový traktor LKT 82 vybavený motorom IVECO N45. Traktor LKT 82 je predstaviteľom modernizácie v oblasti ergonomie a výkonu lesného stroja zameraného na využitie pokrokových technológií ťažby a približovania dreva.

Systém bude pracovať na princípe ľahkého obežného lana, ktoré sa poháňa lanovnicou. Vyťahovanie dreva z porastu na linku a zdvihová sila sa sprostredkuje napínaním systému lán, pomocou druhého bubna navijaka klasického konštrukčného prevedenia.

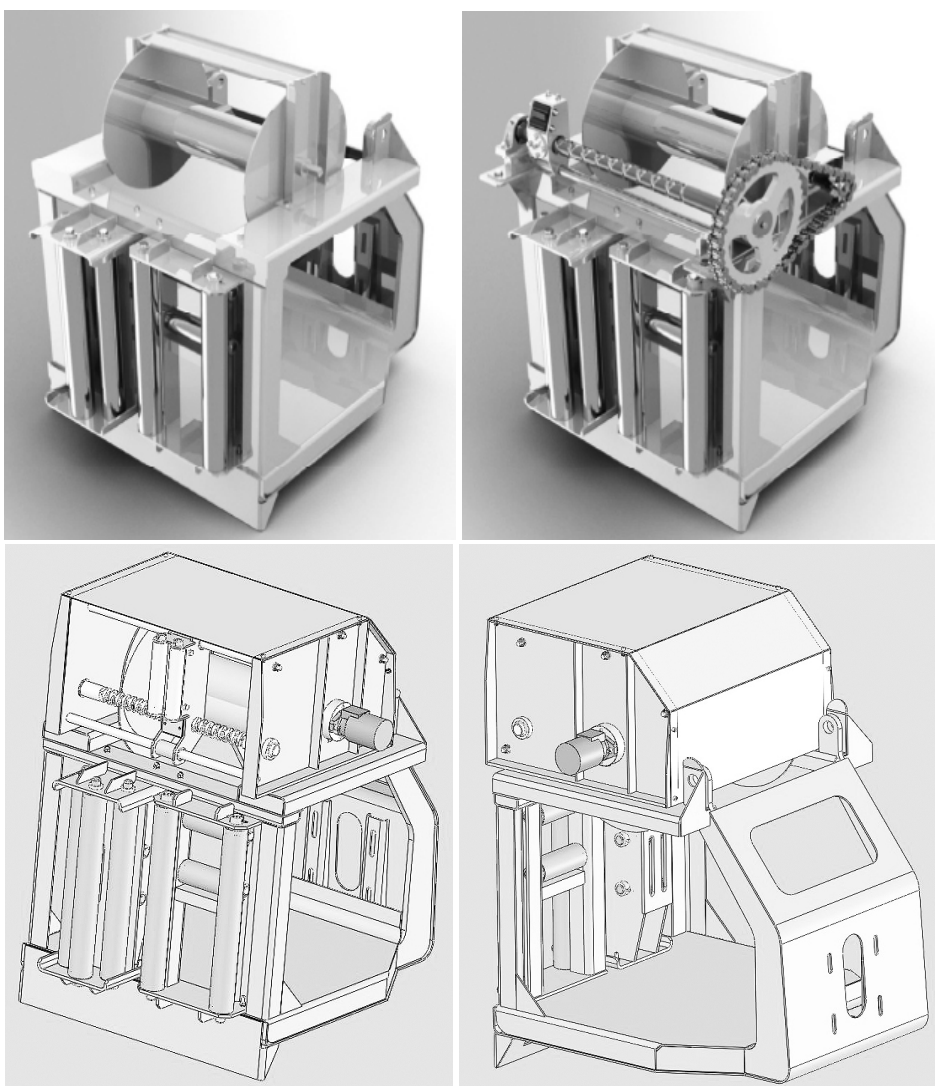
Modifikovala sa konštrukčná dokumentácia na základe výsledkov skúšok pôvodného funkčného modelu (stavebnicový lanový systém SLS), u ktorého boli zistené nedostatky.

VÝSLEDKY

Lesné kolesové traktory, používajúce sa v lesnom hospodárstve Slovenska, sú ako klasické ťahače najčastejšie vybavené navijakmi, menej často drapákom, zverným oplenom a stínacou hlavicou. Ako bazový stroj na pohon lesnej lanovky sa doteraz lesné kolesové traktory nepoužívali. Navrhnutá lanovková nadstavba (obrázok 1) je v tejto oblasti určitou zmenou, pričom ako bazový stroj sa použil lesný kolesový traktor LKT 82. V súčasnosti prebieha kompletizácia funkčného modelu spomínanej lanovkovej nadstavby (obrázok 2).

Uvedený traktor je predstaviteľom modernizácie v oblasti ergonomie a výkonu lesného stroja zameraného na využitie pokrokových technológií ťažby a približovania dreva. Je postavený na podvozku typovej rady LKT 81 a nadstavbu tvorí sklopný štít, radlica, navijak a na želanie aj hydraulická ruka podľa výberu. Všetky ovládače sú elektricky (elektro-hydraulicky) ovládané, otočné pracovisko umožňuje flexibilnú prácu a jazdu so strojom. Vysoký výkon motora, bezpečnostná kabína s nízkou hladinou hluku, servoriadenie s núdzovým ovládaním stroja, automatika pojazdu s inch-ovládaním, pneumatiky so zvýšenou nosnosťou a priereznosťou v ťažkom teréne sú zárukou vysokej úžitkovosti a komfortnej obsluhy stroja [11].

Aby bolo možné využívať lesný kolesový traktor ako bazový stroj pre pohon lanovkovej nadstavby, bolo nutné vykonať úpravu hydraulických vývodov traktora. Zároveň



Obrázok 1 3D model a konštrukčné riešenie rámu lanvkovej nadstavby LL-200

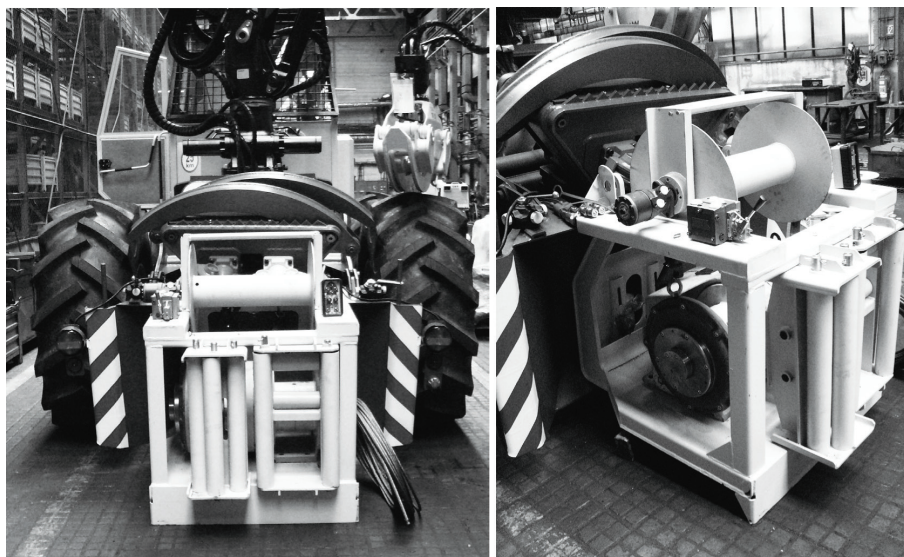
s úpravou hydraulických vývodov bola vykonaná aj montáž diaľkového ovládania upraveného dvojhubnového navijaka. Diaľkové ovládanie umožňuje okrem ovládania lanovky aj ovládanie celého bázového stroja (pojazd, riadenie a pohyb štítu). Po odpojení lanvkovej nadstavby je, pri minimálnych zásahoch v hydraulike a elektrike, lesný kolesový traktor schopný pracovať pri zachovaní pôvodných prevádzkových vlastností.

Navrhnutá modifikovaná lanovková nadstavba LL-200 je nadstavbou na LKT 82, a spĺňa nasledovné požiadavky:

- je adaptovaná na LKT 82 a je schopná približovať kmene, výrezy prípadne stromy z neprístupných terénov,
- čas potrebný na montáž a demontáž je krátky,
- umožňuje približovať drevo v smere nahor aj nadol do dĺžky svahu 200 m a viac pri minimálnej ťažnej sile 20 kN,
- umožňuje prácu aj bez nosného lana,
- ovládanie pohonu je možné z trasy lanovky – diaľkovo, ale aj núdzovo priamo z kabíny traktora,
- funkčnosť sa dá rozšíriť aj na väčšie vzdialenosti ako aj na systém s montážou nosného lana, botiek a pod.,
- po demontáži, je traktor možné nasadiť do klasického navijakového približovania, pri minimálnych zásahoch v hydraulike a elektrike.

Základné technické parametre upraveného dvojhubového navijaka:

Priemer lanáča	0,4 m
Možnosť opásania lana na lanáči max.	5 π
Maximálna ťažná sila	26 kN (34 kN)
Pracovná rýchlosť vozíka	2,5 m.s ⁻¹ (2,0 m.s ⁻¹)
Vratná rýchlosť vozíka	4 m.s ⁻¹ (3,2 m.s ⁻¹)
Vstupné otáčky navijaka	150 ÷ 2 570 ot.min ⁻¹
Celkový prevod v navijaku	12,07

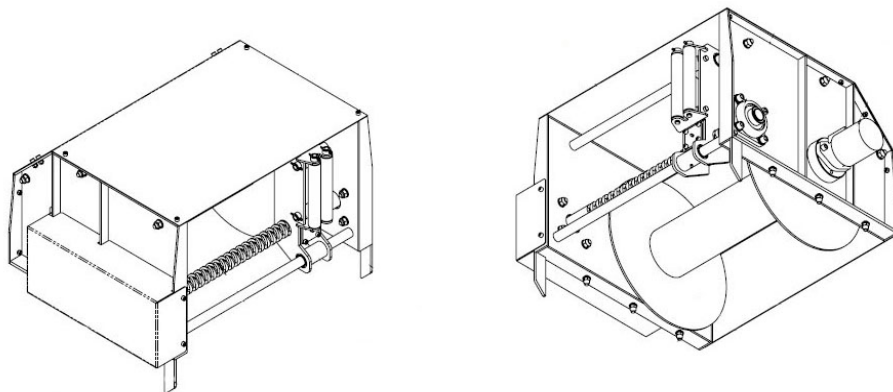


Obrázok 2 Funkčný model lanovkovej nadstavby LL-200

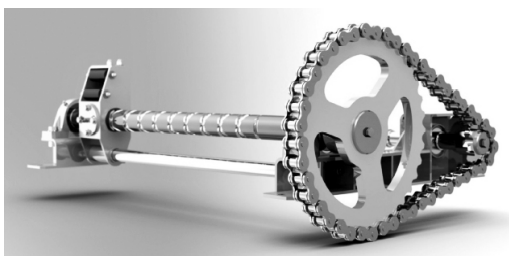
Dôležitým faktorom je rýchla montáž a demontáž lanovkovej nadstavby na štít LKT, ktorý sa pohybuje v trvaní maximálne 30 minút. Z tohto vyplýva rýchle nasadenie bázo-
vého stroja LKT, po demontáži nadstavby, do klasického traktorového približovania.

V ďalšej etape riešenia sa pristúpilo k úprave pohonu pomocného bubna (obrázok 3). Táto úprava spočívala v tom, že sa na pomocný bubon namontoval hydromotor OMR 250, ktorý zabezpečuje navíjanie a odvíjanie obežného lana na pomocný bubon. Toto riešenie odstraňuje namáhavú manipuláciu pri montáži a demontáži lanovkovej trati, ktorá spočí-
vala v ručnom navíjaní a odvíjaní pomocného lana. Ďalším konštrukčným prvkom, ktorý zjednoduší navíjanie a odvíjanie lana na pomocný bubon je zariadenie na ukladanie lana (obrázok 4).

Zmotorizovanie otáčok pomocného bubna prostredníctvom hydromotora odstránilo potrebu ručného navíjania lana na bubon. Potrebne si je tiež uvedomiť, že pri ručnom na-
víjaní obsluha súčasne ukladala lano na bubon, čo je pri dĺžke lana 500 m veľmi nepractic-
ké a namáhavé. Z tohto dôvodu sa uskutočnila inovácia ukladania lana na bubon vo forme
kompletného zautomatizovania tejto funkcie.



Obrázok 3 Konštrukčné riešenie pomocného bubna s ukladateľom lana



Obrázok 4 Ukladateľ lana

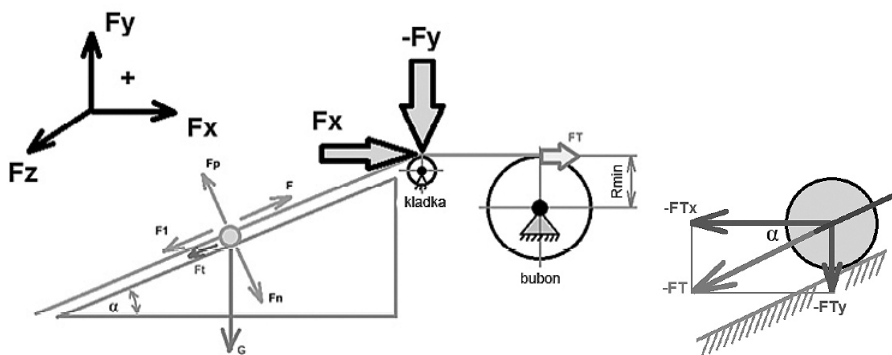
Konkrétne pre túto uvedenú funkciu ukladania je ideálne využitie konštrukcie ukladača lana s reverzným hriadeľom. Pri navíjaní lana v tomto prípade nevznikajú nároky na vynaloženie veľkej sily, nutné je len prekonať odpor porastu, po ktorom bude lano ťahané. Z pohľadu na pracovnú šírku bubna (578 mm) a požiadavku kvalitného ukladania lana je skrutkový ukladač s reverzným hriadeľom ideálnou voľbou.

Pre ukladač lana bolo nutné vykonať pevnostnú analýzu pomocou MKP. Z rozkladu sily F (uvažovaná ťažná sila lana) sa určila sila pôsobiaca v negatívnom smere Y na vodiacu kladku suportu ukladača (obrázok 5).

$$F_{Ty} = FT \cdot \sin \alpha = 3\,195\,N \quad (1)$$

kde FT je ťažná sila, $FT = 3\,383,95 \rightarrow 3\,400\,N$,

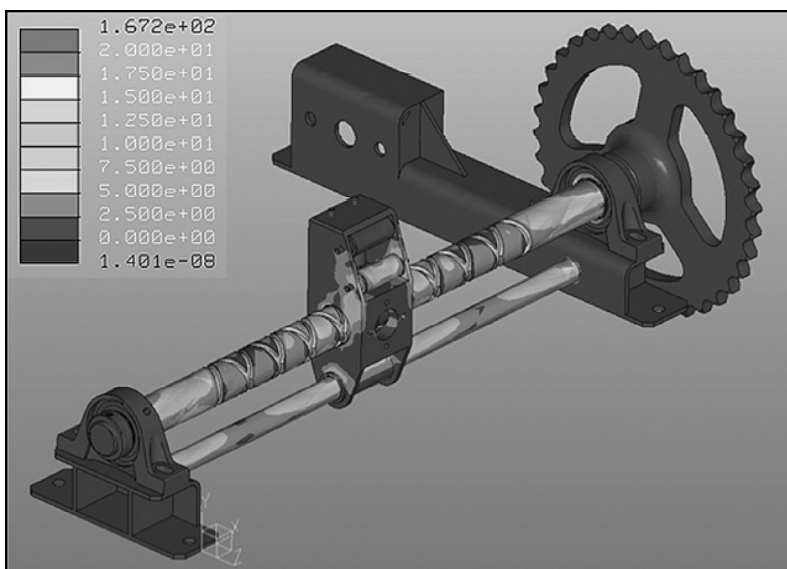
α je uhol stúpania terénu, $\alpha = 70^\circ$ (pre stúpanie terénu max. 70°).



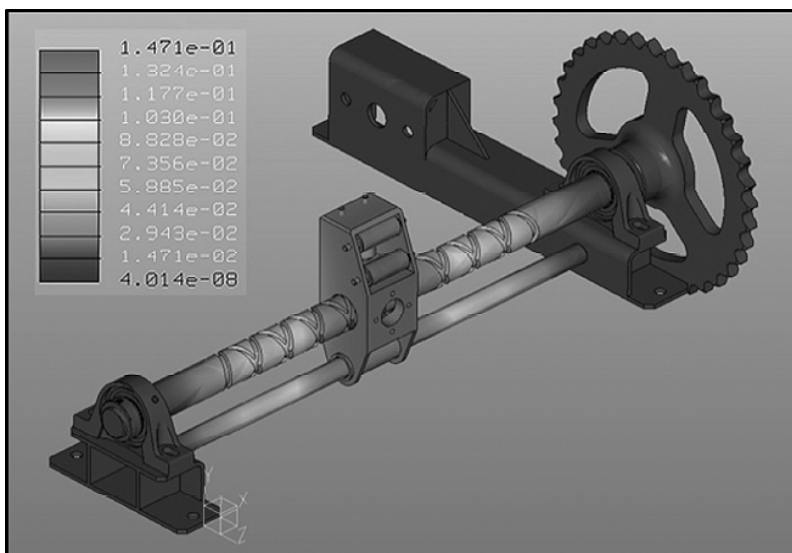
Obrázok 5 Zaťaženie kladky suportu

K celkovému zaťaženiu je pripočítaná gravitačná tiaž lana – teoreticky uvažovaná do bodu prechodu cez roľnu pre lano o dĺžke 3 m. Hmotnosť 3 m lana je 1,77 kg, potom tiaž lana $G_{lana} = 17,36\,N \rightarrow FT_y = 3\,500\,N$.

Zaťaženie systému v mieste dotyku s oceľovým lanom bolo zvolené v najkritickejšom mieste, čiže v strede reverzného hriadeľa. Podpery sú určené pre plechovú konštrukciu s odobratím všetkých stupňov voľnosti. V mieste uloženia hriadeľa v ložiskách je povolená rotácia okolo osy X . Celkové zaťaženie G je od hmotnosti sústavy. Pre zjednodušenie sú všetky časti nastavené z materiálu oceľ s $E = 210\,GPa$. Výsledky napäťovej a priehybovej analýzy sú uvedené na obrázku 6 a obrázku 7.



Obrázok 6 Napät'ová analýza HMH (stress Von Mises) [MPa]



Obrázok 7 Priehybová analýza (displacement summary) [mm]

Z pevnostnej analýzy HMH (Huber, Mises, Hencky) – Von Mises, je maximálna hodnota napätia v sústave rovná 167,2 MPa. Toto napätie sa nachádza na reverznom hriadeľi. Na základe materiálových vlastností materiálu hriadeľa (oceľ 16 240.7), kde

$R_m = 785 \div 930 \text{ MPa}$, je možné konštatovať, že reverzný hriadeľ vyhovuje pevnostným podmienkam. Ostatné časti sústavy ukladača lana sú vo väčšine prípadov namáhané menším napätím ako 100 MPa . Priehybová analýza bola vytvorená za účelom zistenia maximálneho priehybu reverzného hriadeľa. Maximálny dovolený priehyb hriadeľa $y_D = 0,0003 \times L = 0,0003 \times 834 = 0,25 \text{ mm}$, kde L je vzdialenosť medzi ložiskami. Analýzou bol zistený maximálny priehyb na hriadeľi $0,147 \text{ mm}$, čiže $y < y_D$ a hriadeľ vyhovuje. Uvedené analýzy dokázali možnosť využitia navrhutej konštrukcie ukladača lana v reálnych prevádzkových podmienkach.

ZÁVER

Východiskom rozširovania lanových technológií sú tendencie jemnejších hospodárskych spôsobov v ťažbovej činnosti. Uplatňujú sa progresívne konštrukčné a technologické prvky, ktoré uľahčia prácu pri stavbe a prevádzke lanových zariadení. K uvedeným krokom sa pristúpilo pri modifikácii lanovej nadstavby ako nadstavby lesného kolesového traktora. Využila sa spolupráca so slovenským výrobcem lesnej ťažbovej techniky – LKT s. r. o., Trstená, ktorý sa so svojou dlhoročnou tradíciou výroby zaraďuje medzi popredných európskych výrobcov v tejto oblasti.

Navrhnutá modifikovaná lanová nadstavba spĺňa všetky stanovené lesotechnické požiadavky. Dodržali sa základné podmienky nasadenia lanovej nadstavby pre lanové približovanie dreva. Rýchlosť približovania dreva je $2,0$ až $2,5 \text{ m.s}^{-1}$, a spätná rýchlosť prázdneho lanového vozíka je $3,2$ až $4,0 \text{ m.s}^{-1}$. Čas potrebný na montáž a demontáž lanovej nadstavby je v porovnaní s tradičnými lanovými systémami pomerne krátky, čo je dôležité hlavne z hľadiska efektívnosti jeho nasadenia do prevádzky. Dôležitým faktorom je zachovanie základných funkčných vlastností bazového stroja – po demontáži nadstavby je možné lesný kolesový traktor okamžite použiť v procese klasického traktorového približovania.

Z príspevku vyplýva, že uvedená problematika sprístupňovania lesov a voľba ťažbovo-dopravných technológií pri obhospodarovaní lesov je vysoko odborná záležitosť, vyžadujúca kvalifikovaných a skúsených pracovníkov, s environmentálnym cítením. Predovšetkým nasadenie a využitie ekologicky prijateľných technológií pri približovaní dreva s dôrazom na minimálne poškodenie daného prostredia v horských lesoch je doposiaľ relatívne málo preskúmanou oblasťou, ktorej sa je potrebné v budúcnosti venovať nie len výskumne, ale aj prakticky. K tomuto prístupu smeruje aj predložený príspevok, v ktorom sa problematika neuzatvára, ale otvára ďalšiemu riešeniu.

LITERATÚRA

- [1] ADAMS, P. W. 1981. Compaction of Forest Soils, A Pacific Northwest Extension Publication, PNW 217, Oregon, USA, 1981, p. 1 – 13
- [2] HNILICA, R. 2004. Stavebnicový lanový systém SLS ako adaptácia lesníckeho kolesového traktora LKT 81 T. In *Lesnícky časopis*. LVÚ Zvolen, 50 č. 2/2004, s. 131 – 144. ISSN 0323-1046

- [3] HNILICA, R., DADO, M. 2006. Potreba vhodnej lanovky pre úmyselné a náhodilé ťažby menších koncentrácií. *VIII. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2006*. FEVT TU vo Zvolene, Zvolen, 2006, s. 63 – 68. ISBN 80-228-1596-9
- [4] KLČ, P., HNILICA, R., ŽÁČEK, J. 2008. The ecologically suitable technology of transport process for low concentrations wood harvesting. *3RD International Scientific Conference FORTECHENVI 2008*. MZLU Brno 2008, ISBN 978-80-7375-182-1, str. 228 – 235
- [5] KOREŇ, J. 1997. Účinok traktorového približovania dreva na porastovú pôdu v podmienkach CHKO Poľana, Seminár: Racionálne využívanie a obhospodarovanie CHKO – BR Poľana. 1997 Zvolen
- [6] KOREŇ, J. et al. 2000. Mechanické poranenie stromov a zhutnenie pôdy pri plne mechanizovaných prebiekach v ihličnatých porastoch do 50 rokov. *AFF Zvolen*, 2000, s. 247 – 260
- [7] LUKÁČ, T. a kol. 2001. *Lanovky v lesníctve*. Zvolen: Ústav pre výchovu a vzdelávanie pracovníkov LVH SR, 2001, 167 s. ISBN 80-88677-82-3
- [8] LUKÁČ, T. 2005. Viacoperačné stroje v lesnom hospodárstve. TU Zvolen, 2005, 137 s.
- [9] STANOVSKÝ M. a kol. 2002. Výskum a vývoj metód, techniky a technológií pestovných a ťažbových procesov pre obhospodarovanie horských lesov. *Záverečná správa VTP 2730 – 04*, LVÚ Zvolen, 2002, 146 s.
- [10] STANOVSKÝ, M., FERENČÍK, M., SLUGENĚ, J. 2006. Zhodnotenie niektorých výkonnostných parametrov LKT 82 C. In: *Trendy lesníckej, drevárskej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese. Medzinárodná vedecká konferencia k 10. výročiu vzniku FEVT Zvolen*. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen, 2006, s. 190 – 197, ISBN 80-228-1648-5
- [11] Firemná stránka LKT s. r. o., Trstená. [online] [cit. 2014-01-27]. Dostupné na internete: <<http://www.lktrstena.sk/fotogaleria/brezovica-2010>>
- [12] Firemná stránka NLCSK Zvolen. [online] [cit. 2011-10-19]. Dostupné na internete: <<http://www.nlcsk.org/images/docs/zs2007web.pdf>>
- [13] PEŠEK, P. 2013. Konštrukčný návrh ukladače lana na pomocný buben stavebnicového lanového system. Diplomová práca. FEVT, TU vo Zvolene, s. 67. FEVT-5763-11251

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia vedeckého grantového projektu APVV-0145-10 „Vývoj adaptérov pre mechanizáciu prác pri zakladaní a výchove lesa“.

Kontaktná adresa:

Ing. Michaela Hnilicová,
Katedra lesnej a mobilnej techniky, FEVT, TU vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
e-mail: michaela.hnilicova@gmail.com, tel.: +421 45 5206 582

prof. Ing. Valéria Messingerová, CSc.,
Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, LF, TU vo Zvolene, T. G. Masaryka 24,
960 53 Zvolen, e-mail: messingerova@tuzvo.sk, tel.: +421 45 5206 284.

Ing. Miroslav Dado, PhD.,
Katedra výrobných technológií a materiálov, FEVT, TU vo Zvolene, Študentská 26,
960 53 Zvolen, tel.: +421 45 5206 864, e-mail:dado@tuzvo.sk

doc. Ing. Pavel Beňo, PhD.,
Katedra mechaniky a strojnictva, FEVT, TU vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
tel.: +421 45 5206 871, e-mail:beno@tuzvo.sk

VPLYV KONCENTRÁCIE VODNEJ PARY V AKTÍVNOМ PROSTREDÍ CO₂ LASERA NA VÝSTUPNÝ VÝKON ZVÄZKU ŽIARENIA

THE INFLUENCE OF WATER VAPOUR CONCENTRATION IN CO₂ LASER ACTIVE REGION ON OUTPUT POWER OF EMITED BEAM

Rastislav IGAZ – Milada GAJTANSKA

ABSTRACT: The main purpose of submitted work was to determine the influence of water vapour contamination on several beam parameters of CO₂ laser. Measurement of selected parameters was realized with the experimental laser tube. The laser tube was specially modified to in order to enable simple exchange of contaminated gas mixture according to the experimental needs. For each concentration the laser beam output power and the Volt-Ampere characteristics of the laser tube gas discharge was measured. The data obtained during the measurement were used to specify the relation between the contaminants in laser gas mixture and the parameters of CO₂ laser.

Key words: CO₂ laser, gas mixture, contamination, concentration

ABSTRAKT: Cieľom výskumu bolo stanovenie vplyvu kontaminácie laserovej zmesi vodnou parou na parametre laserového zväzku generovaného CO₂ laserom. Meranie vybraných parametrov bolo realizované pomocou experimentálnej laserovej trubice, ktorá slúžila ako optický zosilňovač. Laserová trubica bola upravená tak, aby umožňovala jednoduchú výmenu kontaminovanej plynovej zmesi. Pre kontaminovanú zmes bolo určované zosilnenie laserového žiarenia po jednom prechode experimentálnou trubicou a voltampérová charakteristika elektrického výboja v laserovej trubici. Namerané výsledky sú použité na určenie vzájomných závislostí medzi koncentráciou kontaminantu v laserovej plynovej zmesi a parametrami lúča CO₂ lasera.

Kľúčové slová: CO₂ laser, zmes plynov, kontaminácia, koncentrácia

1 ÚVOD

CO₂ lasery patria v súčasnosti k najviac používaným technologickým laserom v priemysle. Svoje uplatnenie našli najmä v spracovateľskom odvetví. Používajú sa v procese obrábania materiálov, najmä na rezanie, zváranie, vŕtanie, gravírovanie a mnohé iné aplikácie. Ich veľkou prednosťou je univerzálnosť, pretože umožňujú opracúvať široké spektrum materiálov.

CO₂ lasery tvoria asi 40% celkového podielu na trhu s priemyselnými laserovými zariadeniami (OPTECH CONSULTING, 2009). Ich prvenstvo vyplýva z niekoľkých predností, ktoré ponúkajú. V prvom rade sú to nízke náklady na jednotku výstupného výkonu a zároveň vysoká účinnosť (v porovnaní s inými typmi), ktorá dosahuje až 30%. Ďalšou prednosťou je ich jednoduchá konštrukcia a z nej vyplývajúca jednoduchá a lacná údržba, a zároveň vysoká kvalita výstupného laserového zväzku (WEBB a kol., 2004a, 2004b, POWELL, 1998). K ďalším výhodám možno priradiť široký interval výstupných výkonov, ako aj variabilitu TEM módov generovaného laserového zväzku. Významnou prednosťou je vlnová dĺžka generovaného žiarenia, ktoré je veľmi málo absorbované atmosférou, ale je výrazne absorbované drevom, kovmi, papierom, keramikou, plastmi a inými, priemyselne spracovávanými materiálmi (DEMARIA, HENNESSEY, 2010).

Správna funkcia CO₂ laserového systému je podmienená okrem iných faktorov najmä kvalitou použitých laserových plynov, pričom pod pojmom kvalita sa rozumie hlavne ich čistota. Aktívne médium CO₂ tvorí zmes dusíka (N₂), oxidu uhličitého (CO₂) a hélia (He). Dusík zabezpečuje prenos energie z elektrického výboja na molekuly oxidu uhličitého, ktoré následne pri prechodoch medzi energetickými hladinami generujú v stimulovanej emisii laserové žiarenie. Hélium slúži ako pomocný plyn na chladenie molekúl CO₂ a odvod prebytočného tepla vznikajúceho pri generovaní žiarenia. Na čistotu plynov sú v súčasnej dobe kladené veľmi vysoké nároky (LINDE GAS, 2005). Minimálna čistota laserových plynov pre CO₂ lasery, akceptovaná väčšinou výrobcov laserov je pre hélium, dusík aj oxid uhličitý 99,996%, teda s objemovým podielom nečistôt menším ako 5 ppm (1 ppm = 0,0001%).

Predmetom prezentovaného výskumu bolo stanovenie vplyvu kontaminácie laserovej zmesi vodnou parou. Vodná para bola zvolená ako kontaminant, ktorý významným spôsobom ovplyvňuje výkonové parametre CO₂ laserových systémov a v praxi spôsobuje užívateľom nemalé problémy.

2 METODIKA EXPERIMENTU

Ako najvhodnejšia metodika výskumu vplyvu obsahu kontaminantu – vodnej pary, na výkonové parametre generovaného zväzku žiarenia bola zvolená metóda využívajúca dve, na experiment prispôbené laserové trubice – trubicu zdrojovú (referenčnú) a trubicu zosilňovaciu (optický zosilňovač). Toto usporiadanie zabezpečuje, že experimentálny zväzok laserového žiarenia má stabilné parametre, ktoré zostávajú konštantné počas celého experimentu. Referenčná laserová trubica nie je ovplyvňovaná zmenou množstva kontaminantu a zabezpečuje stabilné okrajové podmienky počas experimentu.

Skúmaný kontaminant je kontrolovane dávkovaný len do experimentálnej trubice, ktorá má funkciu optického zosilňovača. Na začiatku experimentu je do trubice privádzaná čistá laserová zmes, ktorá je postupne v priebehu experimentu kontaminovaná zvyšujúcou sa koncentráciou vodnej pary. Aktuálne zloženie laserovej zmesi v zosilňovacej trubici je priebežne vyhodnocované s využitím kvadrupólového hmotnostného analyzátoru. Takto je možné priebežne sledovať koncentráciu kontaminantu aj jeho vplyv na výkonové parametre laserového systému.

Na stanovenie vplyvu koncentrácie kontaminantu na zosilnenie žiarenia pri prechode zosilňovacou trubicou bola použitá metóda použitá pri výskume zosilnenia slabých signálov

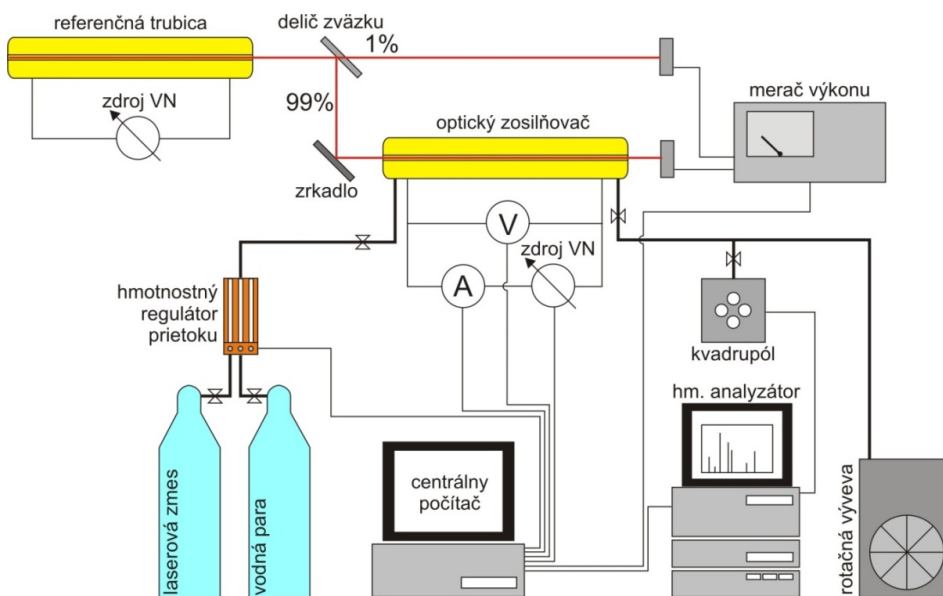
v trubici CO₂ lasera (DESAULTES a kol., 2003). Ide o metódu určovania zosilnenia žiarenia pri jednom prechode laserového zväzku optickou dutinou zosilňovača. Laserový zväzok so známym výkonom P_{in} vstupuje do optického zosilňovača a po jedinom prechode aktívnym médiom vystupuje z dutiny zosilňovača. Následne dopadá na detektor merača výkonu, ktorým je zameraný výstupný výkon P_{out} . Z nameraných hodnôt výkonu je možné vypočítať zosilnenie G_0 aktívneho média podľa vzťahu (1):

$$G_0 = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

Experimentálne získané výsledky zosilnenia slúžia ako porovnávacie kritérium na určenie vplyvu koncentrácie kontaminantu na sledované parametre laserového zväzku. Pre zovšeobecnenie výsledkov výskumu bolo zosilnenie prepočítané na relatívnu úroveň.

2.1 Experimentálna zostava

Usporiadanie experimentálnej zostavy umožňuje presný záznam sledovaných veličín v reálnom čase spolu s aktuálnou koncentráciou kontaminantu v laserovej zmesi. Jednotlivé prvky experimentálnej aparatury sú znázornené na Obr. 1.



Obr. 1 Bloková schéma experimentálnej aparatury

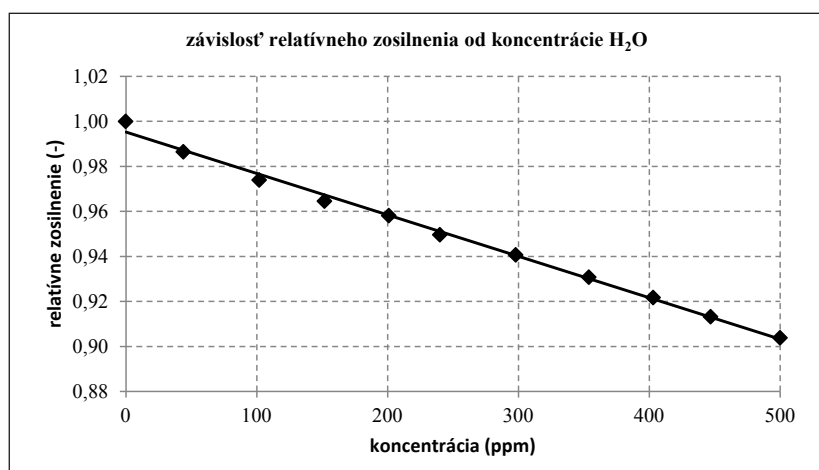
Laserové žiarenie je generované v referenčnej zdrojovej trubici. Po výstupe z trubice je zväzok laserového žiarenia rozdelený deličom do dvoch vetiev. Malá časť (1%) pôvodného zväzku dopadá ako referenčný zväzok na detektor merača výkonu. Zvyšná časť laserového zväzku (99%) je vedená do optického zosilňovača. Zosilňovačom je trubica CO₂

lasera, ktorá bola pôvodne skonštruovaná ako zatavená. Pre potreby experimentu bola trubica upravená na trubicu s pomaly prúdiacim plynom. Ako aktívne médium je do zosilňovacej trubice privádzaná zmes čistého laserového plynu (výrobcom namiešaná zmes so známym zložením a čistotu plynov) a kontaminantu (vodnej pary). Koncentrácia vodnej pary v zmesi sa mení podľa požiadaviek experimentu hmotnostným prietokomerom a vyhodnocuje sa priebežne v kvadrupólovom hmotnostnom analyzátore. Koncové zrkadlá trubice boli nahradené 100% priepustnými optickými okienkami vyrobenými zo selenidu zinočnatého (ZnSe). Experimentálny laserový zväzok prechádza trubicou (optickým zosilňovačom) a po výstupe dopadá na druhý detektor merača výkonu. Zaznamenávaný je tiež priebeh volt-ampérovej charakteristiky elektrického výboja v optickom zosilňovači.

3 VÝSLEDKY

Zosilnenie výkonu v závislosti od koncentrácie kontaminantu bolo experimentálne skúmané pri konštantnej hodnote budiaceho prúdu na úrovni 30 mA. Tento prúd bol zvolený, pretože predstavuje výrobcom odporúčaný pracovný bod použitého CO₂ lasera.

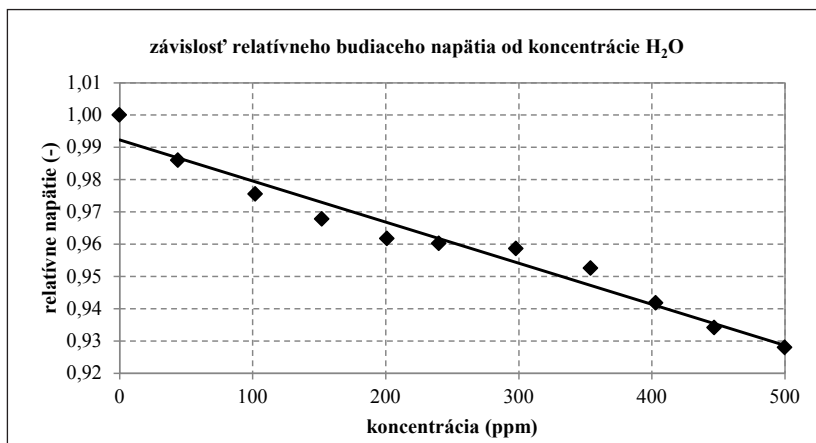
Experimentálne získaná grafická závislosť relatívneho zosilnenia od koncentrácie vodnej pary v laserovej zmesi aktívneho prostredia je znázornená na obr. 2. Z experimentálne stanovenej závislosti zosilnenia od koncentrácie vodnej pary je zrejмый negatívny vplyv prítomnosti vodnej pary v laserovej zmesi plynov. Vodná para už pri veľmi malých koncentráciách spôsobuje významný pokles zosilnenia. K poklesu zosilnenia o 5% dochádza pri koncentrácii kontaminantu na úrovni asi 250 ppm (0,025%) a pokles zosilnenia o 10% nastáva už pri koncentrácii okolo 500 ppm, čo predstavuje 0,05% obsah vodnej pary v laserovej zmesi. Trend poklesu zosilnenia je v intervale skúmaných koncentrácií lineárne závislý od koncentrácie kontaminantu. Získané hodnoty je možné preložiť lineárnou trendovou čiarou s koeficientom regresie $R^2 = 0,996$. Pokles zosilnenia (výstupného výkonu) je veľmi výrazný už pri malých koncentráciách vodnej pary. Výsledky výskumu



Obr. 2 Závislosť relatívneho zosilnenia od koncentrácie vodnej pary

potvrdzujú, že prítomnosť vodnej pary v plynovom okruhu CO₂ lasera je nežiaduca a spôsobuje pokles výkonu už pri veľmi malých koncentráciách.

Na Obr. 3 je znázornený vplyv koncentrácie vodnej pary na napätie medzi elektródami pri konštantnom prúde 30 mA.



Obr. 3 Závislosť budiaceho napätia od koncentrácie vodnej pary

Z experimentálne stanovenej závislosti budiaceho napätia od koncentrácie vodnej pary pri konštantnom prúde je zreteľný pokles napätia so zvyšovaním koncentrácie vodnej pary (obr. 3). Experimentálne získané dáta je možné preložiť lineárnou trendovou čiarou s koeficientom korelácie $R^2 = 0,962$. Pokles budiaceho napätia pravdepodobne súvisí so zvyšovaním vodivosti plynovej zmesi v dôsledku prítomnosti vodnej pary. Pri väčších koncentráciách je možné zrakom registrovať tvorbu prúdových vlákien, tzv. „retiazkovanie“, ktoré je zapríčinené prechodom elektrického výboja cez molekuly vodnej pary. Tento jav výrazne znižuje efektívnosť budenia molekúl dusíka a zapríčiňuje pokles podielu excitovaných častíc aktívneho média lasera.

4 DISKUSIA

Vodná para je vo všeobecnosti považovaná za jeden z najškodlivejších kontaminantov prítomných v laserovej zmesi (BRUCK, 1988). Škodlivosť vody vyplýva z viacerých javov, v ktorých sa v laserovom rezonátore uplatňuje. Voda je schopná znižovať populáciu molekúl CO₂ na vzbudených energetických hladinách (010) a (100), čím znižuje efektívnosť budenia. Molekuly vody majú silný vplyv na elektrické charakteristiky výboja v optickej dutine. Prítomnosť molekúl vody v zmesi vedie ku generovaniu záporných vodíkových iónov H⁻ a k destabilizácii elektrického výboja. Vodná para v dôsledku prítomnosti iónov zvyšuje vodivosť plynovej zmesi. Elektrický výboj prechádza vzniknutými iónmi (vzniká tzv. retiazkovanie) a účinnosť budenia molekúl N₂ sa prudko znižuje. Vo výboji je pri väčších koncentráciách H₂O možné pozorovať vytváranie prúdových vlákien a výboj je pozorovateľne nehomogénny. Následkom je pokles výkonu a zníženie kvality laserového lúča (SHUAIBOV, SHEVERA, 1997).

Na druhú stranu molekuly vodnej pary majú v malých množstvách pozitívny vplyv na výkon lasera. V procese rekombinácie zohrávajú úlohu katalyzátora, čím potláčajú disociáciu molekúl CO₂ a podporujú ich rekombináciu (KARUBE, YAMAKA, 1970).

5 ZÁVER

Experimentálne získaná závislosť poklesu zosilnenia potvrdzuje, že kontaminácia laserovej zmesi vodnou parou spôsobuje významný pokles výstupného výkonu zariadenia, čo v konečnom dôsledku vždy spôsobuje časové a finančné straty. Preto je v praxi požadovaná dokonalá tesnosť všetkých súčastí vákuového systému laserového zariadenia. Tesnosť je kritický a nevyhnutný parameter pre správnu a dlhodobú činnosť zariadenia. Najčastejšou príčinou kontaminácie laserového systému sú netesnosti, ktoré sa vytvárajú v plynovom okruhu laserového systému. V prípade vodnej pary je riziko kontaminácie zvýšené v dôsledku toho, že voda sa bežne využíva ako chladiace médium na chladenie aktívneho prostredia CO₂ laserov. Voda je teda neoddeliteľnou súčasťou systému. V prípade starších systémov je riziko zvýšené, pretože v skle optického rezonátora môže v dôsledku elektrického výboja postupne dôjsť k tvorbe mikroskopických trhlín, ktoré môžu byť zdrojom kontaminácie vodnou parou a je veľmi ťažné ich odhaliť.

LITERATÚRA

- BRUCK, G. 1988. Influence of Gaseous Impurities in the CO₂ Lasers Cavity. *Proceedings of the 7th International Congress on Applications of Lasers and Electrooptics ICALEO'88*.
- DEMARIA, A. – HENNESSEY, T. 2010. *The CO₂ laser: The workhorse of the laser material processing industry*. [online]. [cit. 2012.06.10.] Dostupné na internete: <<http://spie.org/x38563.xml>>.
- DESAULTES, G. L. – DANIELS, D. – BAGFORD, J. O. – LANDER, M. 2003. High power large bore CO₂ laser small signal gain coefficient and saturation intensity measurements. In: *Journal of Optics: Pure and Applied Optics*. Vol. 5 (2003), p. 96 – 101.
- KARUBE, N., YAMAKA, E. 1970. Mass spectrometric studies of a sealed CO₂ laser. In: *J. Appl. Phys.* Vol. 41, pp 2031 – 2042.
- LINDE GAS. 2005. *Plyny pre laser*. [online]. [cit. 2012.06.10.] Dostupné na internete: <www.linde.com/international/web/lg/sk/like35lgsk.nsf/docbyalias/ind_mv_laser2>.
- OPTECH CONSULTING, 2009. *Laser materials processing – Marked data*. [online]. [cit. 2012.06.10.] Dostupné na internete: <<http://www.optech-consulting.com/html/laserprocessingmarkets.html>>.
- POWELL, J. 1998. *CO₂ Laser Cutting. 2nd edition*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- SHUAIBOV, A. K. – SHEVERA, I. V. 1997. Spectroscopic study of corona-discharge plasma in inert gas mixtures with impurities of water vapor and air. In: *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 64, No. 2, pp. 258 – 264.
- WEBB, C. – JONES, J. 2004. *Handbook of laser technology and applications. Vol. 1: Principles*. Bodmin: MPG Books. 301 s. ISBN 0-7503-0960-1.
- WEBB, C. – JONES, J. 2004. *Handbook of laser technology and applications. Vol. 2: Laser design and laser systems* Bodmin: MPG Books. 860 s. ISBN 0-7503-0963-6.

Kontaktná adresa:

Ing. Rastislav Igaz, PhD., doc. RNDr. Milada Gajtanska, CSc.

KFEAM DF TUZVO, Masaryka 24, 960 53 Zvolen, igaz@tuzvo.sk, gajtanska@tuzvo.sk

SPEKTROFOTOMETRICKÉ STANOVENIE ŤAŽKÝCH KOVOV V PEVNÝCH ENVIRONMENTÁLNYCH VZORKÁCH

SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF HEAVY METALS IN SOLID ENVIRONMENTAL SAMPLES

Tomáš JEZŇÝ – Miroslav BADIDA – Radoslav RUSNÁK

ABSTRACT: The goal was to explain and highlight the severe health risks of heavy metals in the environment, their possible movement cycle in the environment and effects on humans. Opportunities for identification of heavy metals were proposed spectrophotometric methods of analysis of samples with emphasis on spectral methods inductively coupled plasma. For the specific purpose of observing the properties of heavy metals were identified a site in areas loaded metallurgical industry in the metropolis of Eastern Slovakia.

Keywords: heavy metals, environmental, spectrophotometric methods

ABSTRAKT: Cieľom práce bolo priblížiť a poukázať na závažne riziká ťažkých kovov v životnom prostredí, ich možným pohybovým cyklom v prostredí a vplyvoch na človeka. Za možnosti identifikácia ťažkých kovov boli navrhnuté metódy spektrofotometrickej analýzy vzoriek s dôrazom na spektrálne metódy indukčne viazanou plazmou. Pre konkrétne účely pozorovania vlastností ťažkých kovov boli vytipované lokality v oblastiach zaťažených hutníckym priemyslom v metropole východného Slovenska.

Kľúčové slová: ťažké kovy, životné prostredie, spektrofotometrické metódy

1 ÚVOD

Vývoj ľudskej spoločnosti je spojený s technológiou získavania a spracovania surovín najmä metalických rúd, ropy a uhlia. Je prirodzené, že dobývaním, spracovávaním a čistením týchto surovín od hlušinných prímiesí, im táto antropogénna činnosť dáva nielen novú formu, ale spôsobuje aj ich intenzívne rozširovanie v životnom prostredí.

Aktuálnosť problematiky ťažkých kovov je v tom, že pre ťažké kovy v princípe neexistujú mechanizmy samočistenia.

Ťažké kovy sa len premiestňujú z jedného prírodného rezervoára do druhého, pri vzájomnom pôsobení s rôznymi kategóriami rôznych živých organizmov, a všade ostávajú zreteľné neželateľné dôsledky tohto vzájomného pôsobenia.

Vzrastajúci počet vedeckých prác poukázal na environmentálny význam a k ich štúdiu prispel i vývoj analytickej techniky, ktorý umožnil merať ich koncentrácie presnejšie a aj v stopových množstvách.

Ťažké kovy sú dôležité z niekoľkých dôvodov:

- niektoré sú fyziologicky dôležité pre jednotlivé súčasti reťazca fauny a flóry, a tak majú priamu súvislosť s ľudským zdravím a poľnohospodárskou produkciou,
- mnohé sú významné ako zdroje znečistenia ekosystémov v priamej súvislosti rozloženia na celom svete,
- často sa používajú priemyselne, najmä v technologicky procesoch výroby kde ich náhrada je ekonomicky neefektívna alebo neexistuje.

Hoci v mnohých prípadoch nie sú koncentrácie ťažkých kovov také vysoké, aby zapríčinili akútne toxické problémy, zvýšené koncentrácie v potravinovom reťazci môžu spôsobovať významné zdravotné následky za dlhé časové obdobie. Kovy, ktoré sa akumulujú v ľudskom tele, ako Cd, Pb, a Hg, sú zvlášť dôležité. Existujú správy o úmrtiach a chorobách týkajúce sa otravy Cd, Hg a ďalšími kovmi. Zvýšenie úrovne Pb v krvi dojčiat sa stáva bežným javom (Đurža, 2003).

2 VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA ŤAŽKÝCH KOVŮ

Za ťažké kovy sú považované kovy, ktorých hustota je väčšia než $4\,500\text{ kg m}^{-3}$. Označenie ťažké kovy sa používa na označenie 37 prvkov periodickej sústavy, ktoré majú atómovú hmotnosť vyššiu ako $4,5\text{ g.cm}^{-3}$ s výnimkou prvkov Ti a Se. Hoci je tento pojem úzko definovaný, je spájaný s tými prvkami, ktoré spôsobujú nežiaduce toxické účinky a zapríčiňujú kontamináciu životného prostredia. Z geologicko-chemického hľadiska sú rozdelené ťažké kovy do troch skupín (Baudo, 1987):

- kovy v prirodzenom prírodnom – rýdzom stave alebo ako ľahko redukovateľné zlúčeniny (Pb, Ru, Rh, Os, Ir, Pt, Au, Ag),
- rozptýlené ako nerozpustné alebo zmiešané oxidy ťažkých kovov (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Hf, Ta, W),
- bežne asociované so sírou ako sulfidy (Mo, Fe, Co, Ni, Ag, Zn, Ga, Ge, As, Sc, Cd, In, Sn, Sb, Te, Ru, Hg, Tl, Pb, Bi).

Vedecké skupiny sa prikláňajú za správnejšie kritéria a zaradenia kovy medzi skupinu ťažkých kovov podľa protónového čísla s hodnotou väčšou ako 20. Používanie termínu ťažké kovy nie je jednoznačne prijaté.

Ťažké kovy možno z hľadiska vplyvu na metabolizmus človeka rozdeliť na:

- Esenciálne – Fe, Cu, Zn, Mn, Co, Mo. Tieto kovy prvky sú v malých dávkach nevyhnutné pre správnu funkciu organizmu – sú súčasťou molekuly enzýmu, alebo fungujú ako aktivátory enzýmov.
- Toxické:
 - prvky silne toxické: As, Cd, Hg, Pb, Cr, Th a Ni
 - prvky potenciálne toxické: Co, Cu, Fe, Mn, Se a Zn
 - prvky menej toxické : Sb, Sn, V

Toxické kovy sa viažu na funkčne skupiny -SH, -COOH a -NH₂ skupiny biomolekúl, menia ich štruktúru i funkciu, a pôsobia tak ako enzymatické jedy.

Esenciálne prvky sú pre živé organizmy potrebné len do istého obsahu a stávajú sa toxickými, ak ich koncentrácia presiahne 40 až 200-krát hranicu esenciálnej koncentrácie. Toxicita ťažkých kovov súvisí s ich priechodnosťou bunkovými membránami, ich rozpustnosťou, priechodnosťou lipidmi, proteínmi, ich schopnosťou viazať sa na bielkoviny, a tým schopnosťou kumulácie v niektorých tkanivách. Mnohé kovy sa viažu na proteíny, najmä -SH skupinu a obmedzujú ich funkciu – inhibujú enzymatické reakcie.

Pri bioakumulácii sa môžu kovy meniť na toxickejšie zlúčeniny. Mnohé kovy majú pri spolupôsobení synergický účinok (Cd + Zn, Ni + Zn) (Ďurža, 2003).

2.1 Pohyb ťažkých kovov v životnom prostredí

Koncentrácia a mobilita ťažkých kovov v životnom prostredí sa v posledných 100 rokoch radikálne zvyšuje. Aj napriek tomu, že ich negatívne účinky na ľudské zdravie sú známe už po dlhé roky, stále sú masovo využívané v priemysle a poľnohospodárstve (insekticidy, fosfátové hnojivá, fungicidy).

Ťažké kovy, hlavne olovo a kadmium, majú schopnosť akumulácie v rôznych orgánoch a závažne ovplyvňovať zdravie jedinca, a to i pri veľmi nízkych koncentráciách. Ich akútna, chronická alebo subchronická toxicita môže viesť k neurotoxickým, karcinogénnym, mutagénnym či teratogénnym efektom.

Pre prípad emisií ťažkých kovov boli určené nasledujúce hlavné zdroje:

- výroba energie spaľovaním fosílnych palív,
- primárna výroba železa a ocelí,
- sekundárna výroba železa a ocelí,
- primárna výroba neželezných kovov,
- sekundárna výroba neželezných kovov,
- chemický priemysel (výroba chlóru a alkálií elektrolytickým procesom s ortuťovými, elektródami),
- výroba skla,
- ťažba uhlia a nerastov,
- aglomerácia rúd,
- spaľovanie odpadov (Ďurža, 2003).

2.1.1 Faktory migrácie ťažkých kovov

Migrácia prvkov (obrázok 2) je podnietená vnútorným, tak i vonkajším faktorom migrácie. Medzi vnútorné faktory migrácie patria prakticky konštantné vlastnosti prvkov, ako sú ich parametre – gravitačné, chemické, elektrické, rádioaktívne a odolnosť väzieb zlúčenín, ktoré vytvárajú.

Vonkajšie faktory migrácie sú omnoho premenlivejšie a majú pre geochemickú prospekciu mimoriadny význam. Ich podrobná analýza zasahuje do fyzikálnej chémie (Mendelu).

Migračná schopnosť P_x každého prvku môže byť kvantitatívne stanovená ako množstvo prvku, ktoré za určitú časovú jednotku Δt , prešlo v určitom prírodnom systéme

s celkovým obsahom prvku Bx do pohyblivého stavu (ΔBx). Rovnica migračnej schopnosti pre hypergéenne prostredie má tvar:

$$Px = 1 \times \Delta Bx \times dx \quad (1)$$

Migrácia, rozptyl a koncentrácia každého prvku prebiehajú v zložitých systémoch fyzikálno-chemických a termodynamických parametrov, v nepretržitých interakciách s ďalšími prvkami a zlúčeninami, v prípade exogénnych procesov i za aktívneho pôsobenia biosféry. Prejavujú sa ako rada súčasných i postupne po sebe idúcich reakcií, na ktorých sa podieľa rada zlúčenín buď priamo, alebo ako katalyzátory.

Hlavné procesy, sprevádzajúce prenos látok, môžu byť zhrnuté k oxidačno-redukčným javom, hydratácií, hydrolýze, ku tvorbe komplexných iónov, vzniku koloidných systémov a suspenzií, rozpúšťaniu, zrážaniu, sorpcii, desorpcii, kryštalizácií a rôznym druhom premeny nerastov, vrátane ich rozpadu a rozkladu.



Obrázok 1 Pohyb ťažkých kovov v životnom prostredí

3 SPEKTRÁLNE METÓDY V ANALÝZE ŤAŽKÝCH KOVOV V ENVIRONMENTÁLNYCH VZORKÁCH

Na stanovenie celkového obsahu prvkov v tuhých environmentálnych vzorkách akými sú vzorky spadov a pôd možno použiť metódy atómovej spektrometrie na analýzu roztokov po rozklade vzoriek alebo priame (bezrozkladové) spektrálne metódy.

Pri použití metódy na stanovenie obsahov prvkov v roztoku je potrebné pred analýzou niekoľko miligramové množstvo vzorky rozložiť, čo skrýva niektoré nevýhody:

1. možnosť kontaminácie vzorky počas prípravy,
2. možnosť úniku prchavých prvkov počas rozkladu,
3. limitujúce množstvo vzorky potrebné k analýze.

Pri využití týchto metód sa najväčší dôraz kladie na výber vhodných činidiel a spôsobu rozkladu častíc. Kyseliny HCl, HNO₃, HClO₄, HF a H₂O₂, resp. ich zmesi v rôznom pomere sú najbežnejšími používanými rozkladnými činidlami.

Pre zabezpečenie totálneho rozkladu vzorky s minimálnym množstvom rozkladného činidla sa často využívajú špeciálne upravené zatvorené rozkladné nádoby a samotný rozklad je uskutočnený za zvýšeného tlaku, pričom je možné aplikovať klasický alebo mikrovlnným ohrevom podporovaný rozklad.

Naopak metódy priamej analýzy vzoriek získavajú na popularite vďaka zjednodušeniu a urýchleniu analýz, zvýšeniu analytickej výkonnosti a širokej aplikovateľnosti. Sú charakteristické minimálnymi nárokmi na úpravu vzorky a majú oproti predchádzajúcim metódam niektoré svoje špecifické výhody:

- zníženie rizika kontaminácie vzoriek po rozklade,
- zníženie rizika straty prvku,
- obmedzenie problémov stanovenia stopových obsahov prvkov po veľkom zriedení,
- zníženie finančných nákladov nutných na rozklad,
- časová nenáročnosť analýz.

K niektorým nevýhodám týchto metód patrí:

- nehomogenita vzoriek v súvislosti s veľkosťou návažku,
- vplyv matrix efektu u niektorých metód,
- problémy s kalibráciou a dostupnosťou certifikovaných referenčných materiálov.

Spektrálnou metódou je možné vykonať kvantitatívnu a kvalitatívnu analýzu. Pri kvalitatívnej prvkovej analýze sa dokazuje z akých prvkov, iónov alebo zlúčenín sa analyzovaná látka skladá. Pri kvantitatívnej analýze sa stanovuje množstvo jednotlivých zložiek v analyzovanej látke (Mendelu).

3.1 Spektrofotometria

Pri prechode optického žiarenia látkou dochádza v dôsledku absorpcie k postupnému znižovaniu jeho intenzity. Veličina charakterizujúca mieru absorpcie v látke sa nazýva absorbancia a je definovaná vzťahom:

$$A = \log I_0 / I \quad (2)$$

kde I je intenzita predchádzajúceho žiarenia a I_0 je intenzita dopadajúceho žiarenia. Absorbancia súčasne závisí na hrúbke vrstvy d , v ktorej sa žiarenie zoslabuje a na súčiniteli absorpcie α (zoslabení), ktoré nezávisí na intenzite. Potom platí:

$$A = \alpha \times d \quad (3)$$

Častým typom vzoriek sú silne zriedené roztoky jedného druhu molekúl v neabsorbovanom rozpúšťadle. Hustota absorbujúcich molekúl je daná molárnou koncentráciou roztoku c [mol m⁻³] a následne potom závisí hodnota súčiniteľa absorpcie na koncentracii. Závislosť absorpčného koeficientu na koncentracii opisuje Beerov zákon:

$$\alpha = \varepsilon \times c \quad (4)$$

kde ε je molárny absorpčný (extinkčný) koeficient, teda konštanta charakterizujúca absorbujúcu látku, ktorá je funkciou vlnovej dĺžky prechádzajúcou monochromatickým žiarením.

Zlúčením týchto vzťahov získame tzv. Lambertov-Beerov zákon v tvare:

$$A = \varepsilon \times c \times d \quad (5)$$

Absorpčné spektrum je teda závislosť koeficientu absorpcie na vlnovej dĺžke a charakterizuje vlastnosti prostredia. Najrozšírenejšou metódou stanovenia absorpčných spektier vzorky je meranie priepustnosti žiarenia T .

Prístroj na meranie absorpčných spektier žiarenia prechádzajúceho prostredím sa nazýva absorpčný spektrofotometer. Zaznamenáva pomer intenzity žiarenia absorbovaného meranou vzorkou k intenzite referenčného (etalónového žiarenia) v závislosti na vlnovej dĺžke žiarenia dopadajúceho na vzorku. Zvyčajne sa zaznamenávajú relatívne hodnoty intenzity v rozmedzí 0 – 100 % alebo priamo hodnoty absorbancie (Navrátil, 2005).

Optická časť obsahuje zdroj žiarenia (žiarovka pre viditeľnú oblasť, vodíková výbojka pre ultrafialovú oblasť), monochromátor (hranol alebo mriežka), detektor (fotočlánok, fotonásobič) a optické prvky.

Elektromechanická časť zahŕňa pohon ladenia monochromátorom, meradlo signálu detektoru a výstupné zariadenie (počítač). Polychromatické žiarenie zdroja sa hranolom alebo mriežkou monochromátora rozloží na spektrálne zložky a požadované žiarenie sa izoluje štrbinou, pričom šírka určuje spektrálnu čistotu žiarenia. Neabsorbované žiarenie dopadá na detektor. Moderné registračné spektrofotometre zakreslia absorpčné spektrum za niekoľko minút. Ako detektor sa používa PDA (PhotodiodeArrayDetectors), čo je integrovaný obvod obsahujúci radu fotodiód, ktorý je schopný zamieriť celé spektrum naraz.

Spektrofotometria je optická absorpčná metóda, pri ktorej sa využíva monochromatické žiarenie UV a viditeľného spektra, získané pomocou hranolového alebo mriežkového monochromátora (Mrňa, 2004).

Výhody spektrofotometrie sú:

- používaní dokonalejšieho monochromatického žiarenia,
- možnostiach merania v UV oblasti spektra,
- možnosti výberu ľubovoľnej vlnovej dĺžky z viditeľnej a UV oblasti spektra,
- možnostiach zmerania absorpčných kriviek pri rôznych vlnových dĺžkach.

Prehľad spôsobov vyjadrovania absorpčných spektier je uvedený v tab. 7, ide o funkčnú závislosť niektorej z veličín charakterizujúcej absorpciu žiarenia od vlnovej dĺžky alebo vlnopočtu predchádzajúceho žiarenia. Najčastejšie sa používa absorbančná krivka $A = f(\lambda)$, v ktorej vyhodnocujeme prítomnosť maxím a ich intenzitu, miním, inflexných a izosbestických bodov. Okrem polohy absorpčného maxima charakterizovaného jeho vlnovou dĺžkou je maximum charakterizované aj intenzitou, teda výškou maxima vyjadrenou molárnym absorpčným koeficientom (Navrátil, 2005).

Tabuľka 1 Druhy kriviek spektrofotometrie

Druh krivky	Funkčná závislosť
Transmitačná krivka	$T \% = f(\lambda)$
Absorptančná krivka	$\alpha \% = f(\lambda)$
Absorbančná krivka	$A = f(\lambda)$
Diferenčný absorpčný koeficient	$A - A_0 = f(\lambda)$
Krivka molárneho absorpčného koeficientu	$\varepsilon = f(\lambda)$
Typická krivka farebnosti	$\log \varepsilon = f(\lambda)$

3.1.1 Postup zvolenej jednokrakovej extrakčnej metódy

Na realizáciu jednokrakovej extrakcie bolo navážených 5 g z každej odobranej vzorky pôd, s predpokladaným zaťažením ťažkými kovmi. Navážené množstvo pôd bolo odsypaných do pripravených extrakčných nádob. Do extrakčnej nádoby s pôdou bolo pridaných 50 cm³ extrakčného činidla 2M HNO₃. Po uzavretí extračných nádob došlo k pretrepaniu pripravených roztokov kde pri 240 otáčkach za minútu počas doby 6 hodín došlo k dôkladnému vytrepávaniu vzoriek. Extrakčné činidlo 2M HNO₃ sa aplikuje s cieľom izolovať maximálne potenciálne mobilizovateľné frakcie, t.j. formy mobilné, mobilizovateľné ako aj také, ktoré budú pohyblivé pri extrémnych zmenách ekologických podmienok (všetky uvoľniteľné formy).

Po ukončení doby vytrepávania bol obsah extrakčných nádob preliaty a filtrovaný. Pri meraní boli použité environmentálne vzorky zo všetkých zvolených odberových lokalít (P1, P2, P3, P4) a pri každej vzorke sa uskutočnili dve paralelné merania.

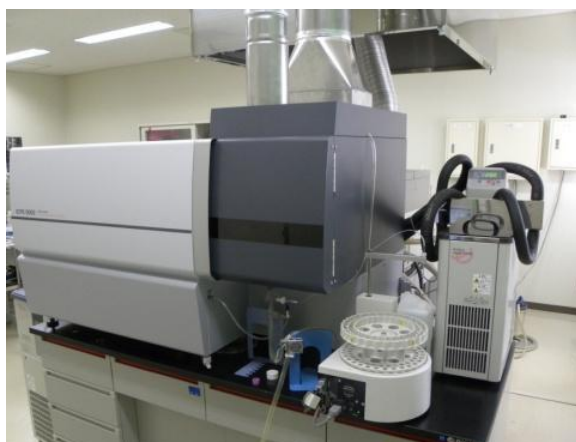
3.1.2 Stanovenie vybraných prvkov metódou ICP – OES

Odber environmentálnych vzoriek pôd bol realizovaný na štyroch odberových miestach v okolí mestskej časti Myslava – Košice nachádzajúcej sa 12 km od hutníckeho kombinátu.

Po uskutočnení jednokrakovej extrakcie sa koncentrácie vybraných rizikových prvkov (Cu, Ni, Pb, Zn) stanovili optickou emisnou spektrometriou realizovanou prostredníctvom prístroja ICPE 9000 (obrázok 2). Analytické podmienky merania sú uvedené v tab. 2.

Merací prístroj ICPE 9000

ICP optický emisný spektrometer ICPE 9000 je analytický prístroj používaný v širokej škále odborov, vysoká úroveň schopnosti detekcie, 5–6 číslicové rozsahy koncentrácie analýzy, okrem štandardných vysoko presných elementárnych analýz pre výskum a vývoj, sa využíva aj v aplikačných fázach vyžadujúcich vysoko presné analytické hodnotenie, vrátane elementárnej analýzy dôležitých hlavných prvkov pre riadenie výroby, činnosti, Echelle optika s CCD detektorom, ICPE, meranie rozsahu vlnových dĺžok: 167 nm až 800 nm zvýšená veľkosť pixelu a spektrometra, poskytuje vysokorýchlostné meranie pri zachovaní presného rozlíšenia (Mrňa, 2004).



Obrázok 2 spektrometer ICPE – 9000

Tabuľka 2 Špecifikácie emisného spektrometra ICPE – 9000

Plazmový svetelný zdroj		Softvér	
Jednotkový horák	Axiálne pozorovanie alebo Axiálne / radiálne pozorovanie	Automatický výber vlnovej dĺžky	
Vzorky zahmlievajúca komora	Cyklónová komora	Automatické vygenerovanie prítomných elementárnych informácií	
Plazmový horák	mini horák (štandardné príslušenstvo) alebo je možné využiť konvenčný horák	Kvalitatívna analýza	
Zhmľovač	Koaxiálny typ	Kvantitatívna analýza	
Spektrometrická jednotka		Presnosť kontroly (voliteľná)	
Optický systém	Echelle spektrometer	Vysokofrekvenčný generátor	
Vlnová dĺžka	167 nm do 800 nm	Oscilátor vzorky	Kryštálový oscilátor
Detektor	CCD	Maximálny frekvenčný výkon	1,6 kW
Rozlíšenie	$\leq 0,005 \text{ nm} - 200 \text{ nm}$	Stabilita výstupu	$V \pm 0,3 \%$
Vákuová ultrafialová oblasť kompatibility	Vákuový spektrometer	Vysokofrekvenčný obvody prvok	Tranzistorová jednotka
Spektrometrická teplota	S termálnym ovládaním	Zapaľovacia metóda	Plne automatická
		Spôsob zaťaženia	automatické

Tabuľka 2 Analytické podmienky pre analýzu metódou ICPE – 9000

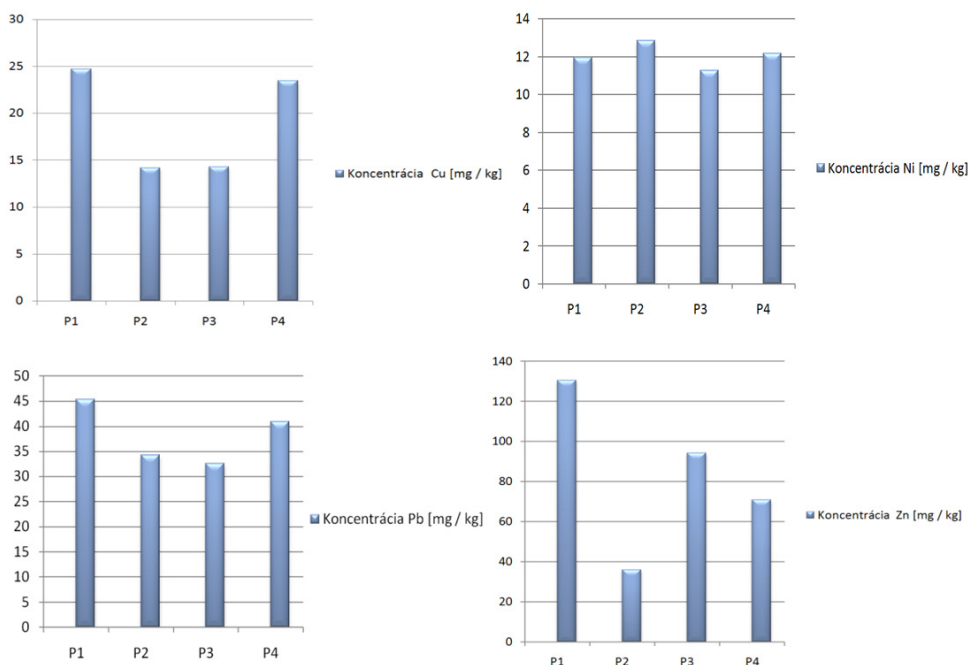
Parametre		Hodnoty
Tlak plynu argónu		460 KPa
Vysokofrekvenčný výkon		1,20 kW
Plazma		10,00
Nosič		0,70
Smer		axiálny
Spektrálna teplota		38 °C
CCD teplota		-15,19 °C
Podtlak		6,1 Pa
Rotačná rýchlosť		20
Vlnová dĺžka	Cu	324,754 nm
	Ni	221,647 nm
	Pb	220,353 nm
	Zn	213,856 nm

3.1.3 Vyhodnotenie výsledkov jednokrokových extrakcií

Metódou emisnej spektrometrie ICP – OES aplikovanej prostredníctvom optického emisného spektrometra ICPE 9000 boli získané hodnoty koncentrácií vybraných ťažkých kovov v environmentálnych vzorkách pôd a výsledky sú zaznamenané v tab. 4 a v grafoch (obrázok 3). Uskutočnené meranie hodnôt koncentrácií vybraných prvkov Cu, Ni, Pb, Zn pomocou prístroja (optického emisného spektrometra ICPE 9000) bolo v poriadku, čomu zodpovedajú aj hodnoty relatívnych smerodajných odchýlok RSD, ktoré sa pohybovali v hraniciach akceptovateľnosti 5%.

Tabuľka 4 Výsledné hodnoty koncentrácií vybraných ťažkých kovov

Číslo vzorky pôdy	Koncentrácia [mg / kg]			
	Cu	Ni	Pb	Zn
P1	24,695	11,9575	45,415	130,45
P2	14,17	12,8575	34,265	86,025
P3	14,295	11,2825	32,665	94,2
P4	23,47	12,1575	40,94	70,95



Obrázok 3 koncentrácií vybraných ťažkých kovov (mg/kg)

4 DISKUSIA

Uskutočnené meranie hodnôt koncentrácií vybraných prvkov Cu, Ni, Pb, Zn pomocou optického emisného spektrometra ICPE 9000 bolo v poriadku, čomu zodpovedajú aj hodnoty relatívnych smerodajných odchýlok RSD, ktoré sa pohybovali v hraniciach akceptovateľnosti 5%. Na základe stanovených hodnôt podľa Vyhlášky 59/2013 Z.z. Vyhláška Ministerstva pôdohospodárstva a rozvoja vidieka Slovenskej republiky nedošlo k výraznému prekročeniu koncentrácií pri žiadnom z pozorovaných prvkov Cu, Ni, Pb, Zn v jednotlivých vzorkách P1, P2, P3, P4 a to i z dôvodu nezanedbávania snahy o znižovanie možných množstiev emisií škodlivých látok či produkcií odpadov a monitorovania zložiek životného prostredia, najmä v oblastiach kde je možné riziko zvýšenia zaťaženia rizikovými látkami.

5 ZÁVER

Univerzálny emisný spektrometer ICPE-9000 je analytickým prístrojom používaným v širokej škále odborov. Okrem štandardných vysoko presných elementárnych analýz pre výskum a vývoj, sa využíva aj v aplikačných fázach vyžadujúcich vysoko presné analytické hodnotenie, vrátane elementárnej analýzy dôležitých hlavných prvkov pre riadenie výroby, činnosti.

LITERATÚRA

- ĎURŽA, O.: 2003. Využitie pôdnej magnetometrie v environmentálnej geochemii ťažkých kovov, *Acta geologicauniversitatiscomeniana*. Bratislava. Univerzita Komenského v Bratislave, 2003, 58, č. s. 29 – 55. ISSN 1338-6034
- MENDELU. Účinky ťažkých kovov na ľudský organizmus. [online]. [cit.2013-02-19]. http://web2.mendelu.cz/af_239_nanotech/data/pub/mjrd.pdf
- MRŇA, F.: *Užitá geochemie*. 1. vyd. Brno: Tisk Brno, 1991. 420 s. ISBN 80-200-0357-6
- HEIN, H. KUNZE, W.: 2004. Umwelt analytik mit Spektrometrieund Chromatographie.: WILEY-VCH 2004, ISBN 978-352-73078-7
- NAVRÁTIL, L., ROSINA, J.: 2005. *Medicínska biofyzika*. 1. vyd. Praha: GradaPublishing, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4
- BESEDA, I., SCHWARZ, M., BADIDOVÁ, D.: 2009. Toxikológia a ekotoxikológia. Košice: TU v Košiciach Strojnícka fakulta, 2009. 216 s. ISBN 978-80-553-0227-0
- KRÁLIKOVÁ, R., BADIDA, M., HALÁSZ, J.: 2007. Technika ochrany životného prostredia. Košice: Elfa, s. r. o, 2007. 302 s. ISBN 978-80-8086-062-2
- KHUN, M., ĎURŽA, O., MIDLIČKA, J., DLAPA, P.: 2008. Environmentálna geochemia. Bratislava: Geografika, 2008. 278 s. ISBN 978-80-89317-03-5
- FARGAŠOVÁ, A.: 2008. Environmentálna toxikológia a všeobecná ekotoxikológia. Bratislava: Orman, 2008. 350 s. ISBN978-80-969675-6-8

POĎAKOVANIE:

Príspevok vznikol na základe riešenia projektu KEGA č. 049 TUKE-4/2012 Využitie výsledkov vedecko-výskumnej činnosti pri výučbe predmetov „Základy environmentalistiky“ a „Environmentálne inžinierstvo“ pomocou multimediálnych technológií,

Kontaktná adresa:

Ing. Tomáš Jezný
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta,
Katedra environmentalistiky, Park Komenského č. 5, 042 00 Košice,
e-mail: tomas.jezny@tuke.sk

Dr. h. c. prof. Ing. Miroslav Badida, PhD.
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta,
Katedra environmentalistiky, Park Komenského č. 5, 042 00 Košice,
e-mail: miroslav.badida@tuke.sk

RNDr. Radoslav Rusnák, PhD.
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta,
Katedra environmentalistiky, Park Komenského č. 5, 042 00 Košice
e-mail: radoslav.rusnak@tuke.sk

ZÁVISLOSŤ ANALÝZY ŠPECIÁLNEHO OBRAZU NA INTENZITE OSVETLENIA

SPECIAL PICTURE ANALYSIS DEPENDENT ON THE LIGHT INTENSITY

Pavol KOLEDA – Peter KOLEDA

ABSTRACT: Measuring of body dimensions by optical methods allows measuring and detecting variable parameters of analysed particles. Such a measuring is influenced by the lightning of sensed scene. Besides the appropriate selection of additional lighting, the measuring is influenced by natural light – sunlight. Knowledge of the dependence of analysed picture and detectable information on the light intensity can simplify and accelerate the analysis process.

Key words: Lighting, bodies dimensions measuring, picture analysis

ABSTRAKT: Meranie rozmerov telies pomocou optických metód umožňuje meranie a zisťovanie rôznych parametrov analyzovaných častíc a javov. Veľký vplyv na takéto meranie má osvetlenie snímanej scény. Okrem vhodného výberu prídavného osvetlenia vplýva na meranie aj prírodné svetlo – slnečný svit. Poznanie závislosti kvality analyzovaného obrazu a detekovateľných informácií na intenzite osvetlenia môže zjednodušiť a zrýchliť samotný proces analýzy.

Kľúčové slová: Osvetlenie, meranie rozmerov telies, analýza obrazu

1 ÚVOD

Analýza digitálneho obrazu je v dnešnej dobe potrebná v každom odbore hospodárstva. Sú na nej založené rôzne meracie a vyhodnocovacie systémy, či už pri výrobe, skladovaní, distribúcii, ako aj pri vývoji a výskume rôznych javov a veličín. Súčasná spoločnosť kladie vysoké požiadavky na kvalitu produktov výrobného priemyslu, kam patrí aj obrábanie kovov a dreva. Kvalitatívne parametre ovplyvňuje okrem iných aj obrábací nástroj a jeho rezná hrana, ktorá sa pri obrábaní opotrebuje (zaoblenie, zmena tvaru, excentricita, zväčšený oter). Najrozšírenejšie metódy na hodnotenie opotrebovania rezného klina sú rozdelené na priame (meranie zmeny geometrie nástroja) a nepriame (meranie reznej sily, rýchlosti,...). Obidve tieto skupiny sú naviazané na rezný nástroj, či už z pohľadu síl a výkonov potrebných na obrábanie alebo z pohľadu priamej zmeny geometrie rezného nástroja (Prokeš, 1982).

Údaje o kvalite obrábacieho procesu je možné získať analýzou triesky a frakčných častíc, ktorou sa stanovuje aj ich koncentrácia v prostredí, pretože majú nepriaznivý vplyv na ľudský organizmus (Irša, 2006).

2 MATERIÁL A METÓDY

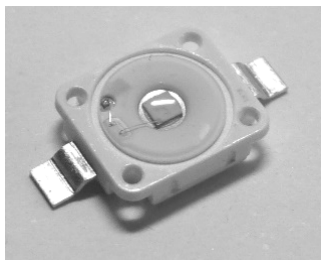
Osvetlenie meracieho pracoviska pôsobí na kvalitu analyzovaného obrazu, pričom do procesu merania vstupuje svetlo z viacerých zdrojov. Najčastejšie je meranie ovplyvnené slnečným svetlom. Slnko počas dňa putuje po oblohe, čím sa mení smer a veľkosť slnečného žiarenia dopadajúceho buď do miestnosti s meracím pracoviskom, prípadne priamo naň. Toto žiarenie má bodový charakter a teda slnečné svetlo vytvára tieň v jednom smere, čo nie je veľmi vhodné pre meranie rozmerových charakteristík objektov.

S optimalizáciou priestorového rozloženia jasov úzko súvisí smerovosť a tienivosť osvetlenia. Pre viditeľnosť trojrozmerných detailov je dôležitý smer svetelného toku, pretože tvorí tieň, ktoré sú potrebné na priestorovú orientáciu, najmä pri práci s malými predmetmi. Osvetlenie nemá byť príliš smerované lebo vytvorí ostré tieň, ale ani príliš difúzne (rozptýlené), pretože úplne stratí modelovací účinok, čo by viedlo k veľmi jednotvárnemu svetelnému prostrediu (Dado, Hnilica 2006).

Ďalším zdrojom osvetlenia je samotné osvetlenie miestnosti, v ktorej sa meracie pracovisko nachádza. Takéto osvetlenie tiež nie je vhodné, nakoľko pozostáva z výbojkových trubíc, ktorých svetlo má blikajúci charakter. Ľudským okom je blikanie takmer nepostrehnuteľné, ale kamera alebo fotoaparát takéto blikanie registruje a spôsobuje jasové pruhy v obraze.

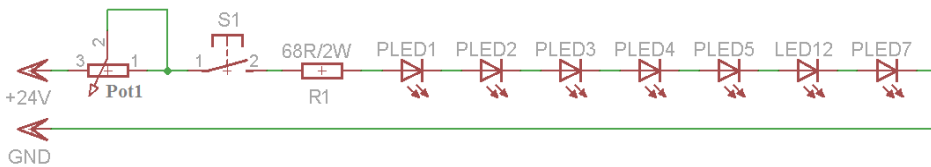
2.1 Osvetlenie snímanej scény

Dostatočné a stále osvetlenie meracej scény bolo zabezpečené pomocou LED diód LCW W5AM-JZKY-4R9T-Z (obr. 1).



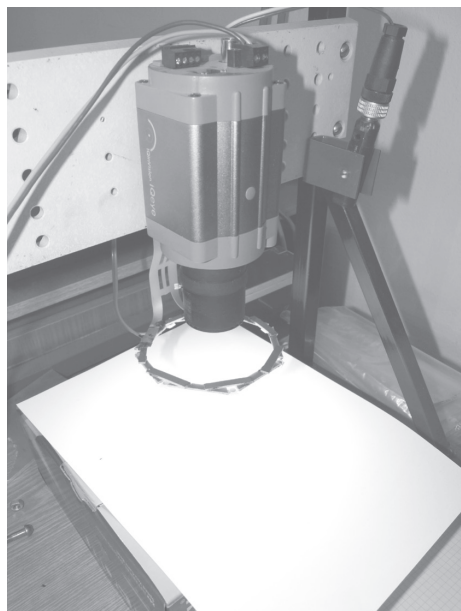
Obrázok 1 LED dióda

Použitie diódy sú vysokosvietivé s uhlom rozptylu svetla 170° . Diódy sú zapojené do série spolu s potenciometrom, ktorým je možné regulovať elektrický prúd prechádzajúci diódami, a teda aj ich jas (obr. 2).



Obrázok 2 Zapojenie LED diód

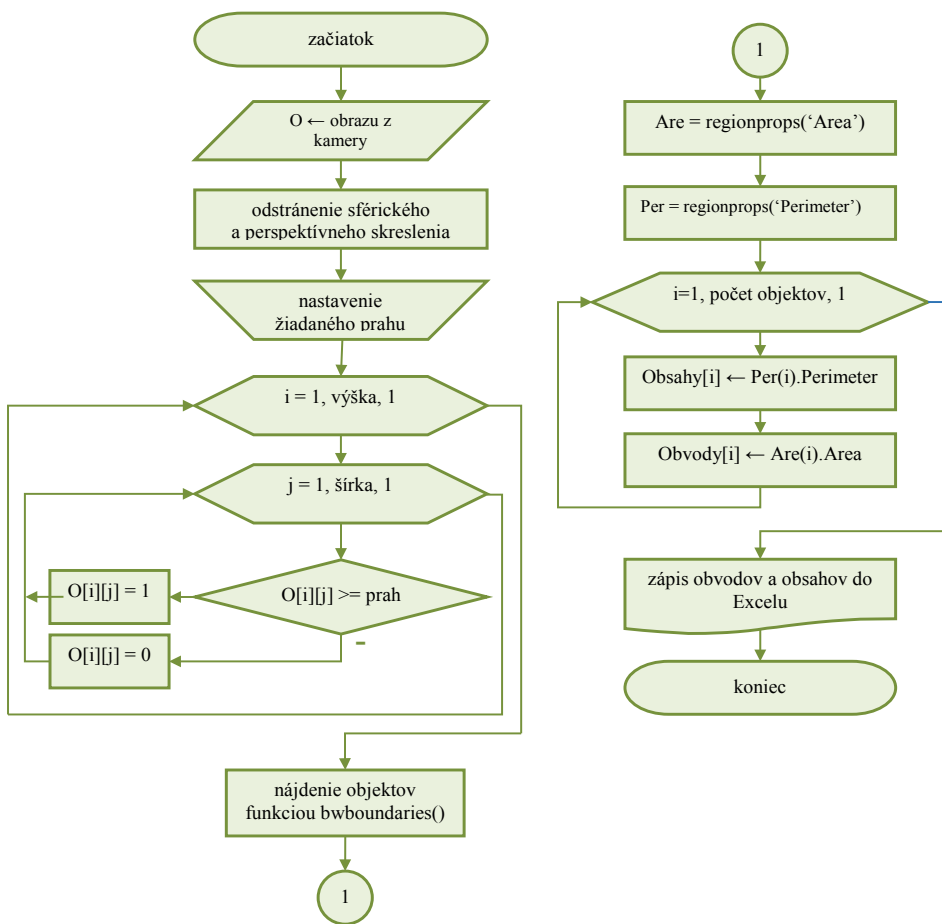
Pre elimináciu tieňov je sedem diód rovnomerne rozmiestnených do kruhu okolo snímajúcej kamery (obr. 3).



Obrázok 3 Osvetlenie meracej scény

2.2 Analýza obrazu

Zosnímané obrázky sú analyzované v navrhnutom a vytvorenom programe, ktorý pracuje podľa algoritmu na obr. 4. Tento algoritmus je implementovaný v aplikácii vytvorenej pomocou softvérových nástrojov programu Matlab (Mathworks, 2013).



Obrázok 4 Vývojový diagram spracovania snímky

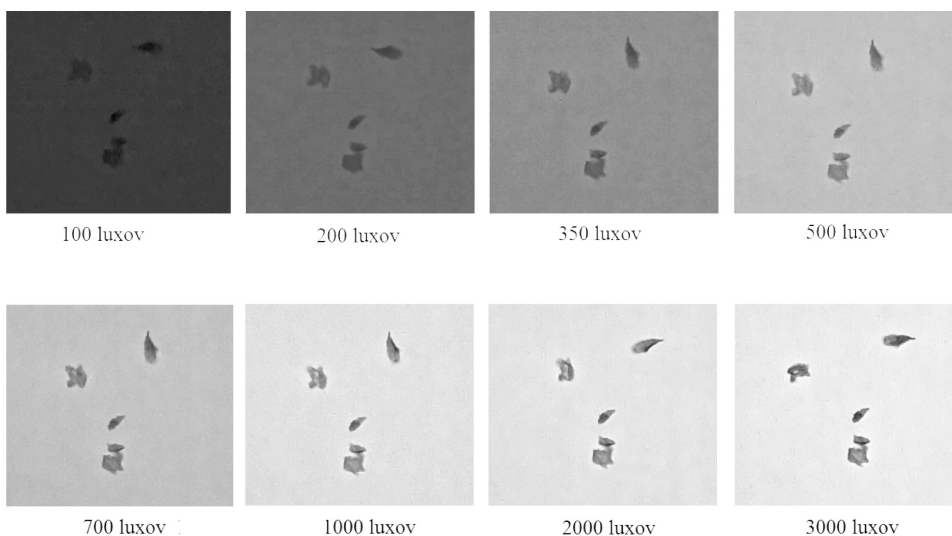


Obrázok 5 Environment-meter TEK 1360

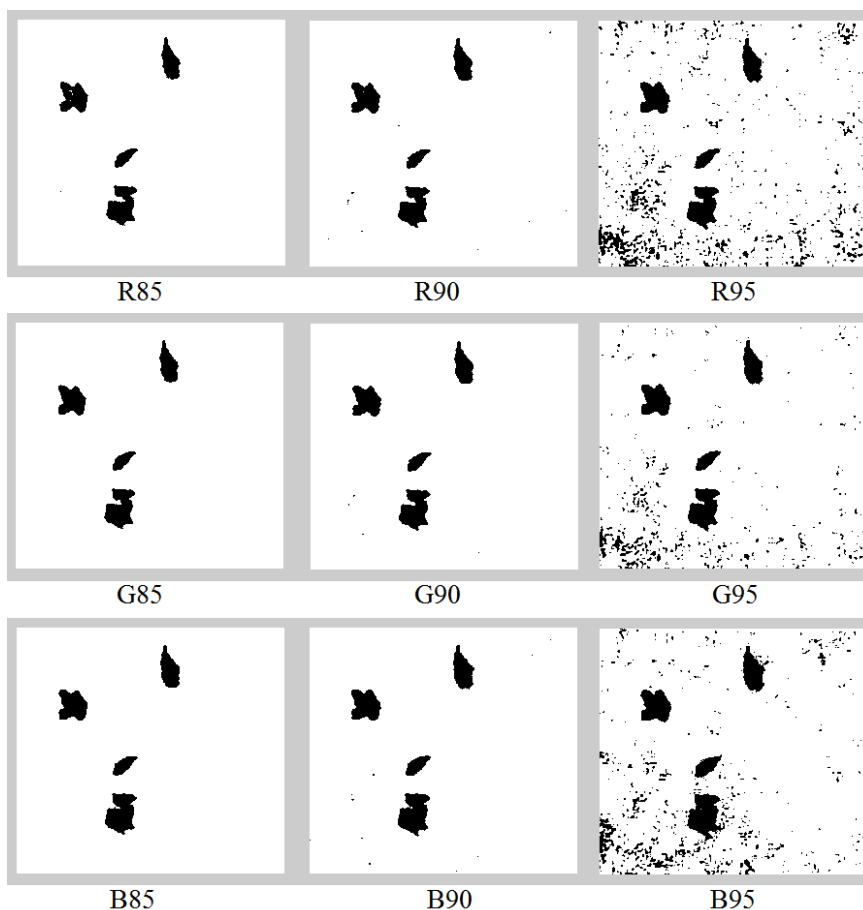
Počas expetimentu boli drevné častice snímané pri rôznej intenzite osvetlenia, ktorá bola meraná environment-metrom TEK 1360 (obr. 5). Osvetlenie miesta úlohy má byť čo najrovnomernejšie, pričom na hodnotu tohto ukazovateľa v priemyselných halách má vplyv aj výška umiestnenia svietidiel a ich orientácia v miestnosti (Hnilica, 2009). Zosnímané obrazy boli vyhodnotené v navrhnutom programe a výsledky boli porovnané pre určenie optimálneho osvetlenia pre snímanie častíc.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na obr. 6 sú znázornené rozdiely v získaných snímkach častíc pri rôznej intenzite osvetlenia. Je zrejmé, že v závislosti na intenzite osvetlenia je potrebné meniť aj úroveň prahovania v algoritme analýzy. Pri nízkej intenzite osvetlenia nie je takmer vôbec možné rozoznať snímané častice v obraze.

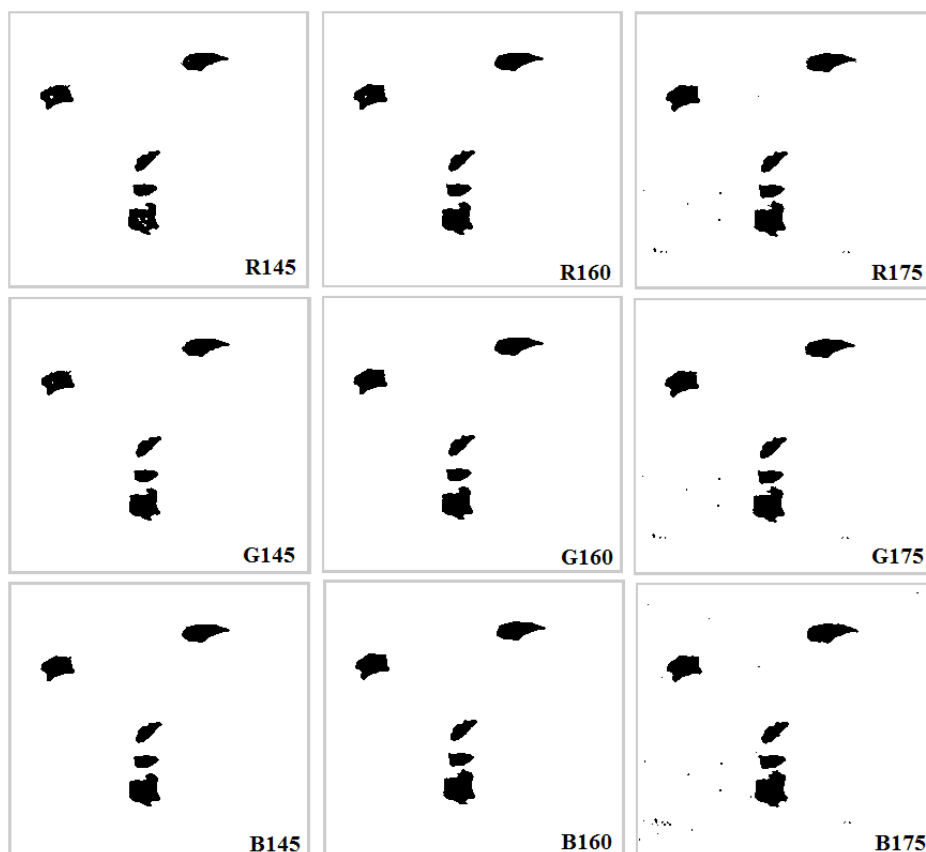


Obrázok 6 Častice zosnímané pri rôznej intenzite osvetlenia



Obrázok 7 Rôzne prahy obrazu snímaného pri osvetlení 500 luxov

Na obr. 7 sú znázornené prahované obrázky s časticami pri intenzite osvetlenia 500 luxov vo farebných zložkách R, G a B, na obr. 8 sú prahované obrázky pri intenzite osvetlenia 3 000 luxov v rovnakých farebných zložkách. Z porovnania obrázkov 7 a 8 je zrejmé, že pri nízkej intenzite osvetlenia (obr. 7) je potrebné voliť nižšiu prahovú hodnotu pre binarizáciu obrazu. Takýto obraz je tiež vo veľkej miere náchylný na vznikanie silného šumu pri vyšších prahových hodnotách. Pri zmene intenzity osvetlenia z 90 na 95 luxov sa v každej farebnej zložke R, G, B objavil v analyzovaných snímkach silný šum, ktorý vnáša veľkú neistotu do zistených rozmerových informácií o časticách v snímke. Naproti tomu pri intenzite osvetlenia 3 000 luxov (obr. 8) hodnota prahu 160 nevykazuje skreslenie snímky v žiadnej farebnej zložke a môže sa pohybovať v intervale ± 10 luxov okolo tejto optimálnej hodnoty.



Obrázok 8 Rôzne prahy obrazu snímaného pri osvetlení 3 000 luxov

4 ZÁVER

Z experimentálne získaných údajov je možné stanoviť optimálnu intenzitu osvetlenia snímanej scény (3 000 luxov) a tiež prahovaciu hodnotu (160), pri ktorej získaná snímka nie je skreslená. Pri vyššej intenzite osvetlenia môže tiež prahovacia hodnota kolísať v úzkom intervale okolo optimálnej, pričom sa to takmer neprejaví na kvalite analyzovaných snímok. Rozmerové informácie zistené analýzou obrazu pri vhodnom osvetlení majú zároveň vyššiu validitu.

LITERATÚRA

DADO, M., HNILICA, R. 2008. Vplyv osvetlenia na bezpečnosť pri práci na drevoobrábачích strojoch. In *Aktuálne otázky bezpečnosti práce : XXI. medzinárodná konferencia*. – Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2008. ISBN 978-80-553-0099-3, s. 141 – 147.

- HNILICA, R. 2007. Návrh a hodnotenie vhodnosti osvetlenia v pracovnom prostredí podľa platných noriem. In *Humánne riziká v priemysle spracovania dreva : kolokvium ku grantovej úlohe VEGA 1/3445/06*. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2007. ISBN 978-80-228-1829-2, s. 23 – 29.
- IRŠA, A.: Zákerný prach. In: *Rezbárstvo : Elektronický časopis o remesle, umení a ľuďoch*. A-studio Andrej Irša, 2006. ISSN 1338-3728. http://www.rezbarstvo.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=119&Itemid=1 (2013-01-20).
- Mathworks, Inc.: *The Language of Technical Computing*. Online príručka. <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (2013-12-05).
- PROKEŠ, S.: *Obrábění dřeva a nových hmot ze dřeva*. Praha : SNTL/ALFA, 1982. s. 369 – 371.

Kontaktná adresa:

Ing. Pavol Koleda, PhD.,

Ing. Peter Koleda, PhD.

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky

Študentská 26, 960 53 Zvolen, Slovenská republika

Tel: +421 455 206 570

E-mail: pavol.koleda@tuzvo.sk

VÝSKUM VHODNOSTI NÁSTROJOVÝCH OCELÍ PRE VÝROBU NOŽOV NA REZANIE DREVA V HETEROGÉNOM PROSTREDÍ

RESEARCH OF SUITABILITY TOOL STEELS OF CUTTING BLADES FOR CUTTING IN A HETEROGENEOUS ENVIRONMENT

Juraj KOSTÚR

ABSTRACT: This article is focused on two types of cutting blades. First type of material is mainly used for manufacture of veneer blades, but it can be used for another purposes too. Second type of material is common type of tool steel, used for cutting tools. Article also deals with properties of this materials, and potential in different type of usage.

Key words: material, blade, properties, cutting

ABSTRAKT: Tento článok sa zaoberá hodnotením vlastností dvoch typov rezných nástrojov. Prvý typ materiálu sa využíva hlavne na výrobu dýhovacích nožov, ale môže byť použitý aj na iné účely. Druhý typ materiálu je bežnou nástrojovou oceľou pre rezné nástroje. Článok sa tiež zaoberá vlastnosťami týchto materiálov a možným použitím na iné účely.

Kľúčové slová: materiál, nôž, vlastnosti, rezanie

ÚVOD

V súčasnosti je znižovanie materiálovej a energetickej náročnosti významná úloha, ktorou sa zodpovední pracovníci zaoberajú vo všetkých oblastiach výrobných činností aj spoločenského života. Tento trend vyplýva zo snahy znížiť ekonomické zaťaženie, ale aj zaťaženie životného prostredia. Zabezpečiť lepšie využitie a hospodárenie s materiálmi vstupujúcimi do procesov sa darí len vtedy, ak detailnejšie poznáme ich vlastnosti a vieme ich vhodne navrhnuť pre oblasť použitia.

1. CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNYCH MATERIÁLOV

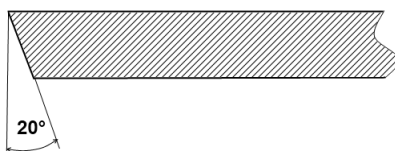
Z hľadiska vhodnosti využitia materiálov na konštrukčné účely, alebo na výrobu nástrojov, je potrebné robiť cieleň výskum. Cieľom výskumu, ktorý je popísaný v príspevku,

bolo na základe analýzy vybrať nástrojové materiály, ktoré by vyhovovali pre účely výroby špecifických rezných nástrojov pre prácu v heterogénnom prostredí a následne vyhodnotiť opotrebenie nástrojov po simulácii zaťaženia na stende.

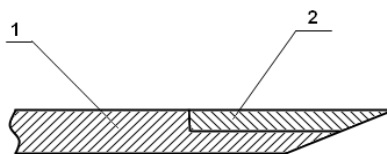
Odolnosť proti opotrebeniu nástrojov sa v súčasnosti zvyšuje modernými povlakmi na rezných častiach nástrojov. Tieto sa aplikujú metódami PVD, CVD (Kaštan, 2012). PVD procesy sa používajú aj na povlakovanie rezných doštičiek zo spekaných karbidov, ale aj na legované nástrojové ocele, čo však závisí od podmienok ich tepelného spracovania (Hanes, 2012). Hoci takto upravené nástroje pre obrábacie operácie už v praxi prinášajú úspory v podobe zvýšenia životnosti, v prípade skúmaných nástrojov neboli tieto technológie použité z dôvodu technologickej náročnosti a nákladov na povlakovanie.

1.1 Tvar a materiály nástrojov použitých v experimente

Pre výrobu experimentálnych nástrojov boli vybrané dva druhy nástrojových ocelí. Jeden nástroj bol vyrobený ako monolitný, z ocele tr. 19 452, jeho tvar je na obrázku 1, druhý bol vyrobený z dýchovacieho noža. Dýchovací nôž bol vyrobený ako nástroj s navareným rezným klinom (časť 2 na obrázku 2) na telese nástroja z ocele tr. 11 (časť 1 na obrázku 2) Na oboch nástrojoch bola vyrobená rovnaká geometria reznej časti (podľa obrázku 1).



Obrázok 1 Geometria skúmaných nožov



Obrázok 2 Tvar dýchovacieho noža pred úpravou geometrie
časť 1 – ocel' tr. 11, časť 2 – návarový kov legovaný wolfrámom

Na rezných klinoch nástrojov bola vytvorená nasledovná geometria:

- uhol chrbta $\alpha = 20^\circ$,
- uhol rezného klina $\beta = 70^\circ$,
- uhol čela $\gamma = 0^\circ$.

Táto geometria bola zvolená z dôvodu jednoduchosti a kvôli zníženiu nárokov na výrobu. Takáto konštrukcia zaručuje dostatočnú pevnosť a zároveň aj kvalitu rezu vzhľadom

na to, že pri štandardnom používaní niektorých typov nástrojov nie je kvalita obrobeného povrchu podstatným faktorom (Ľavodová – Náprstková, 2012).

Uhly boli volené podľa platných charakteristík a predpokladov správania sa obrábaného materiálu. Uhol chrbta zabraňuje treniu chrbta nástroja o obrobenú plochu, čím znižuje zahrievanie a opotrebenie a zvyšuje trvanlivosť reznej hrany. Jeho prílišná veľkosť však zmenší uhol rezného klina. Pri obrábaní mäkkých materiálov dosahuje veľkosť uhla chrbta až 20°. Uhol čela – jeho veľkosť ovplyvňuje spôsob tvorenia triesky aj namáhanie reznej hrany. Čím je väčší, tým ľahšie sa trieska oddeľuje od materiálu. Jeho zväčšovanie však znižuje uhol rezného klina. Pri pozitívnom uhle sa najviac namáha rezný klin v blízkosti reznej hrany. Pri negatívnom uhle je najväčšie namáhanie prenesené na plochu čela. Čím je uhol rezného klina menší, tým rezný klin lepšie vniká do materiálu, ale zároveň má menšiu tuhosť a pevnosť, t. j. narastá riziko chvenia a zlomenia rezného klina (Lisičan, 1996).

1.2 Nástrojové ocele na dýchovacie nože

Ako prvý polotovár na výrobu experimentálnych nožov bol použitý výrez dýchovacieho noža. Dýchovacie nože sú používané v zostave nástrojov na výrobu dých, spolu s protinožmi, prítlačnými lištami, atď. Hlavnými požiadavkami na dýchovacie nože sú tvrdosť 58 až 60 HRC, a uhol rezného klina cca 20°. Oceľ uvedenej tvrdosti zaručuje odolnosť proti opotrebeniu, stálosť rozmerov rezného klina aj požadovanú húževnatosť. Tieto vlastnosti dosahujú napríklad ocele tr. 19 132, 19 559, 19 732 (Kováč – Krilek – Mikleš, 2011). Okrem monolitných sa vyrábajú aj nástroje s návarom ako je uvedené vyššie.

1.3 Nástrojová oceľ 19 452

Druhý materiál vybraný na výrobu experimentálneho nástroja bola oceľ tr. 19 452. Oceľ je nízkolegovaná prvkami Si, Cr. Používa sa na výrobu rezných nástrojov pre obrábanie dreva a kovových materiálov nízkej pevnosti, tiež na strižné nástroje, nástroje pre tvárnenie za tepla aj za studena, tiež na výrobu zápustiek.

Nástroj v našom experimente je monolitný vyrobený z polotovaru – hrubého plechu, ktorý bol v stave žihanom na mätko. Po vyrobení reznej časti nástroja bol celý tepelne spracovaný, kalený a nízkoteplotne popustený. Teploty kalenia a popúšťania boli zvolené podľa materiálového listu STN 41 9452. Tepelným spracovaním sme získali požadované vlastnosti nástroja pred experimentálnym zaťažením.

2. SIMULÁCIA PRACOVNÉHO ZAŤAŽENIA

Experimentálne rezné nástroje boli namontované na merací stend, kde boli na určenú dobu vystavené cyklickému zaťaženiu simulujúcemu prevádzkové podmienky. Štvorica nožov z opísaných materiálov bola v radiálnej polohe pravidelne rozmiestnená po obvode upínacieho kotúča, ktorý bol upevnený na vretene poháňanom elektromotorom, rotujúce nože odoberali triesku z drevených hranolov, upevnených v pomocnom pojazdovom mechanizme stendu.

Simulácia pozostávala v prvej fáze z postupného odoberania triesky z tvrdej dreveniny (buk), následne z mäkkej dreveniny (smrek), v ďalšej fáze bol postup podobný, avšak pod hranolom bola umiestnená aj pôda, čím bolo vytvorené heterogénne prostredie, v ktorom bola prevádzka nožov simulovaná a skúmalo sa opotrebenie.

Snímače na skúšobnom stende zaznamenávali otáčky vretena, krútiaci moment potrebný na rezanie a pre kontrolu stálosti posuvu aj silu potrebnú na posuv hranola do záberu kotúča. Zariadenie bolo udržiavané v konštantných otáčkach $2\,000\text{ min}^{-1}$, čím bola dosiahnutá rezná rýchlosť $39,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z uvedených parametrov spolu s ostatnými parametrami rezania je možné určiť reálny výkon potrebný na rezanie pričom jeho nárast je možné použiť ako jedno z kritérií opotrebenia rezného nástroja.

3. POROVNANIE VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLOV

Na jednotlivých typoch nožov použitých v experimente boli hodnotené základné materiálové vlastnosti nasledovnými metódami:

- a) Meranie tvrdosti
- b) Spektrálna analýza – chemické zloženie ocelí
- c) Hodnotenie mikroštruktúry

3.1 Meranie tvrdosti

Tvrdosť bola meraná na telese a na reznom kline nástrojov metódou HRC. Rockwellova metóda je daná normou STN EN ISO 6508.

U vzorky nástroja z dýhovacieho noža boli namerané hodnoty tvrdosti pre návar v rozmedzí 53 – 58 HRC. Na telese nástroja bola nameraná tvrdosť v rozmedzí 56 – 66 HRB, tvrdosť bola meraná metódou HRB, pretože oceľ tr. 11 je hrubozrnná, heterogénna, mäkkšia a teda nie vhodná pre metódu HRC. Rezný klin je tvrdý, zaručuje odolnosť voči opotrebeniu, teleso je mäkké, húževnaté, má odolnosť proti krehkému porušeniu.

U vzorky monolitného nástroja z ocele tr. 19, boli namerané hodnoty tvrdosti 54 – 60 HRC, teda vhodné na konštrukciu rezných nástrojov.

3.2 Spektrálna analýza

Pod pojmom chemická analýza sa rozumie kvalitatívne a kvantitatívne určenie chemického zloženia vzorky. Štandardne používané metódy poskytujú informácie o elementárnom, prípadne aj molekulovom zložení vzorky a môžu určiť aj zastúpenie jednotlivých zložiek.

Chemické zloženie bolo v našom prípade zisťované emisnou spektrometriou s využitím iskry ako donora energie. Bolo zistené nasledovné chemické zloženie materiálov.

Tabuľka 1 zobrazuje spriemerované namerané hodnoty chemického zloženia návarového noža, pričom riadok č. 1. zobrazuje hodnoty navareného materiálu rezného klina noža a riadok č. 2. zobrazuje spriemerované hodnoty materiálu tela noža.

V tabuľke 2 je uvedené zistené chemické zloženie monolitného noža tr. 19 452.

Tabuľka 1 Chemické zloženie materiálu dýchovacieho noža

č. m.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Co [%]	Cu [%]	V [%]	W [%]	Pb [%]	Zr [%]	Fe [%]
1.	1,35	0,3	0,35	0,35	0,02	0,2	0,04	0,03	0,18	0,26	1,43	0,02	0,03	95,5
2	0,04	0,22	0,395	0,09	0,00	0,1	0,04	0,02	0,21	0,00	0,04	0,02	0,00	98,8

Tabuľka 2 Chemické zloženie nástrojového materiálu oceľ tr. 19 452

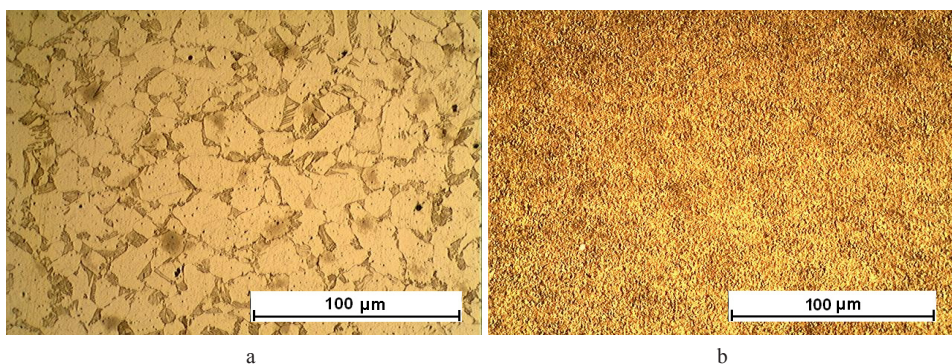
č. m.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Al [%]	Cu [%]	V [%]	W [%]	Pb [%]	Zr [%]	Fe [%]
1.	0,59	1,67	0,846	1,01	0,03	0,1	0,04	0,04	0,01	0,03	0,02	0,00	95,6

Pri porovnaní oboch tabuliek sú zjavné rozdiely v chemickom zložení daných materiálov, pričom z obsahu legujúcich prvkov sa dajú predpokladať aj rozdiely v reakciách ocelí na zaťaženie.

3.3 Analýza štruktúry ocelí experimentálnych nožov

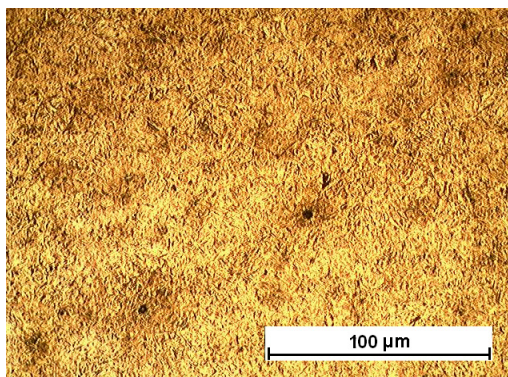
Svetelná (optická) mikroskopia je základnou metódou štúdia štruktúry kovov, umožňuje pozorovať a hodnotiť štruktúrne útvary s rozmerom v rovinnom reze rádovo 10^3 až 10^6 nm (zv. 100 až 2 000-krát). Je však súčasne potrebné si uvedomiť, že štruktúrne zložky majú v materiáli trojrozmerné usporiadanie. Popis štruktúry materiálov pri použití svetelnej mikroskopie je limitovaný jej rozlišovacou schopnosťou. Ostáva však základnou metódou získania prvých základných informácií o skúmanom materiáli či už z hľadiska štúdie vývojových materiálov, alebo na zistenie príčin porušenia materiálov.

Mikroštruktúra monolitného noža znázornená na obrázku 3a, je feriticko-perlitická s malým množstvom nekovových inklúzií, čo nasvedčuje húževnatým vlastnostiam potrebným pre odolávanie rázom a správne vedenie noža. Návarový kov na obrázku 3b má jemnú, štruktúru, v matici rozptýlené jemné karbidy, ktoré zaručujú vysokú tvrdosť rezného klina.



Obrázok 3 Mikroštruktúra materiálu dýchovacieho noža
a – teleso noža, b – návarový kov

Mikroštruktúra monolitného noža je na obrázku 4. Zodpovedá stavu po kalení a nízkoteplotnom popúšťaní je tvorená jemnou martenzitickou štruktúrou. Táto štruktúra poskytuje vhodnú tvrdosť a požadovanú odolnosť proti krehkému porušeniu pri špecifickom použití, rezaní v heterogénnom prostredí. Na obrázku mikroštruktúry sú tiež prítomné aj nekovové inklúzie, ktoré by mohli znamenať rizikový faktor z dôvodu oslabenia materiálu ako zárodok trhlín. Šírenie trhliny by mohlo následne viesť k deštrukcii noža počas pracovného procesu. Pri experimentálnom zaťažení nedošlo k porušeniu nožov, len k opotrebeniu rezných klinov.



Obrázok 4 Mikroštruktúra monolitného noža

4. METÓDY HODNOTENIA OPOTREBENIA NÁSTROJOV

Meranie veľkosti miery opotrebenia je vykonávané za účelom získania poznatkov o veľkosti opotrebenia rezných klinov pred pracovným zaťažením a po ňom. Stav a veľkosť miery opotrebenia je možné merať na vzorkách po ich nafotografovaní pod mikroskopom. Opotrebenie môže byť merané pomocou softvérového vybavenia mikroskopu, za pomoci vybraných metód merania.

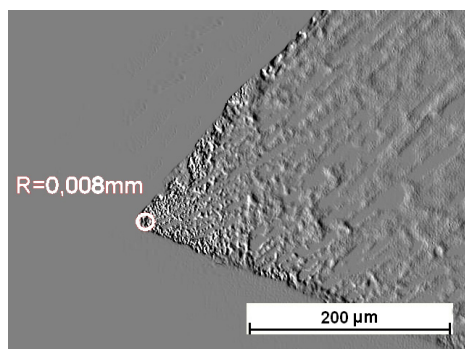
Hlavnými metódami používanými pre hodnotenie opotrebenia pomocou softvéru sú meranie opotrebenia polomerom kružnice r_v vpísanej do profilu reznej hrany, ďalej meranie opotrebenia vyjadrené polomerom kružnice r_o opísanej z ideálnej reznej hrany a dotýkajúcej sa najbližšieho bodu skutočnej reznej hrany a metóda merania vzdialenosti hrotu ideálnej reznej hrany od najbližšieho bodu reálnej reznej hrany (Kováč-Krilek-Kalincová, 2011).

Ďalšími metódami využívanými na hodnotenie otupenia nástroja sú mechanické metódy priame aj nepriame, ako sú váhová metóda, metóda pričného rezu, prúžková metóda, atď.

Pre hodnotenie opotrebenia rezného klina vytvoreného na vzorke je možné informatívne použiť aj vyššie spomenutú metódu nárastu výkonu potrebného na rezanie, avšak tou sa v tomto článku nebudeme zaoberať.

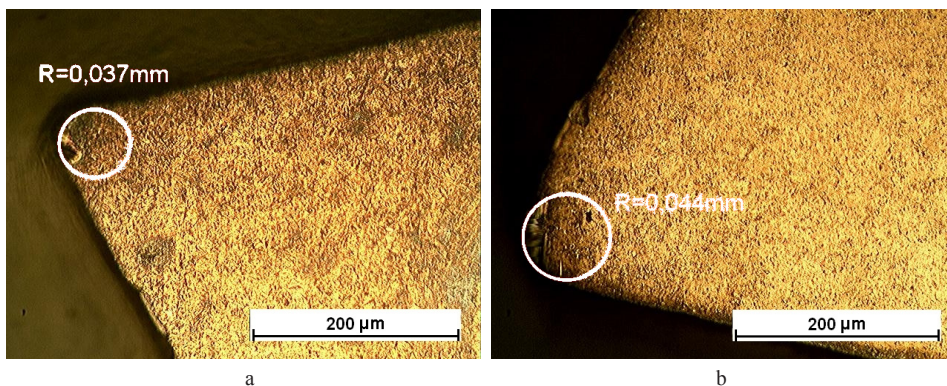
4.1 Hodnotenie opotrebenia

Pre určenie veľkosti opotrebenia bola použitá metóda vpísanej kružnice. Na obrázku 5 je zdokumentovaný naoštrený rezný klin nástroja s určenou geometriou. Obrázok bol v grafickom softvéri upravený do podoby v ktorej je lepšie rozoznateľný obrys rezného klina následne bola do rezného klina vpísaná kružnica, ktorej polomer nám určuje počiatočnú hodnotu danej veličiny.



Obrázok 5 Naoštrený nôž – zväčšenie 200x

Na obrázku 6 a), b) sú zdokumentované rezné klíny nástrojov po čiastočnom otupení. Stav rezných klínov bol pozorovaný pomocou optického mikroskopu a spracované pomocou príslušného softvérového vybavenia, kde bola do rezného klina vpísaná kružnica, ktorej polomer určuje mieru opotrebenia oproti naoštrenému nástroju. Z obrázkov je zjavné, že u oboch nástrojov došlo k opotrebeniu, ktoré však v tejto fáze ešte neprekračuje kritické opotrebenie. Tiež je možné pozorovať, že nôž s navareným rezným klinom vykazuje 1,19 krát vyššie opotrebenie ako monolitný nástroj. Pri posudzovaní ďalšieho vývoja otupenia je vhodné pokračovať v ďalšom výskume.



Obrázok 6 Vpísaná kružnica v hrote nástroja – zväčšenie 200x
a) monolitný nôž, b) nôž s navaranou reznou časťou

5. ROZBOR VÝSLEDKOV A DISKUSIA

Výsledkom experimentu je zistenie správania sa materiálov nástrojov pri špecifickom zaťažení. Vhodnosť materiálu nožov bola overená meraním tvrdosti. Meraním opotrebenia metódou vpísanej kružnice sa zistilo vyššie opotrebenie nástroja z dýhovacieho noža. Spektrálnou analýzou materiálu nožov bola zistená prítomnosť prvkov. Monolitný nôž z ocele tr. 19 má vyšší obsah Cr a iných karbidotvorných prvkov, čo zaručuje vyššiu tvrdosť a odolnosť voči opotrebeniu oproti návarovému materiálu rezného klina dýhovacieho noža. Tieto poznatky potvrdzujú, že pri použití rôznych materiálov dochádza k značným rozdielom v opotrebení.

V našom experimente vyššiu vhodnosť na rezanie znečisteného dreva vykazoval monolitný nôž z ocele tr. 19 452, avšak z hľadiska šetrenia kvalitných a teda aj drahších materiálov by bolo vhodné využívať kombinované nástroje, ako bol v našom experimente nôž s návarom.

ZÁVER

Z opisu experimentu a údajov uvedených v tomto článku je zrejmé, že skúmanie vhodnosti použitia jednotlivých materiálov na konkrétne oblasti využitia je perspektívnou oblasťou, aj vzhľadom na fakt, že pri návrhu materiálu špeciálnych nástrojov sa často len preberajú bežne používané materiály bez overenia vhodnosti na dané použitie.

Výskumom ktorý sme vykonali bolo pri skúmaných materiáloch zistené, že pre použitie pri opracovaní veľmi znečisteného dreva sú pri danej geometrii vhodné oba druhy nástrojov. Z hľadiska opotrebenia a náročnosti výroby sa ako vhodnejší javí monolitný nástroj z ocele triedy 19 452. Nástroj vyrobený s naváranou reznou časťou je vhodnejší z hľadiska nižšieho opotrebenia čela, aj nižšej obstarávacej ceny, keďže sa teleso noža nevyrába z nástrojovej, ale bežnej konštrukčnej ocele. Z hľadiska materiálových vlastností, ktoré reprezentuje tvrdosť materiálov nožov a zistené opotrebenie, možno považovať obidva materiály za vhodné na toto použitie.

LITERATÚRA

- HANES, T. 2012. Prehľad technológií povlakovania a povlakov vhodných pre nástroje na razenie mincí. In *24. dny tepelného spracovania s mezinárodnou účasťou*. Jihlava : Asociace pro tepelné zpracování kovů, 2012. ISBN 978-80-904462-5-0. s. 345 – 352.
- KAŠTAN, R. 2012. Vákuové tepelné spracovanie ocele (W.-Nr.: 1.2721, W.-Nr.: 1.2550) pre tvárnenie za studena v prúde dusíka. In *24. dny tepelného spracovania s mezinárodnou účasťou*. Jihlava : Asociace pro tepelné zpracování kovů, 2012. ISBN 978-80-904462-5-0. s. 57 – 63.
- KOVÁČ, J. – KRILEK, J. – KALINCOVÁ, D. 2011. The method analysis of saw blades wearing measurement. In *Výrobné inžinierstvo = Manufacturing engineering*. – Prešov : Fakulta výrobných technológií, 2011. – ISSN 1335-7972. – Roč. 10, č. 1 (2011), s. 74 – 77.

- KOVÁČ, J. – KRILEK, J. – MIKLEŠ, M. 2011. Energy consumption of a chipper coupled to a universal wheel skidder in the process of chipping wood. In *Journal of forest science*. ISSN 1212-4834, 2011, vol. 57, no. 1, p. 34 – 40.
- LISIČAN, J. a kol. 1996. *Teória a technika spracovania dreva*. Zvolen: MATCENTRUM, 1996. 626 s. ISBN 80-967315-6-4.
- STN EN ISO 6508:2006 Kovové materiály – Rockwellova skúška tvrdosti.
- STN 41 9452:1968 Nástrojová nízkolegovaná Si-Cr oceľ pre prácu za studena.
- ŤAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N. 2012. Hodnocení kvality povrchu materiálu po řezání AWJ. In *Strojírenská technologie : časopis pro vědu, výzkum a výrobu*. – ISSN 1211-4162. – (2012), roč. 17, s. 186 – 192.

Kontaktná adresa:

Ing. Juraj Kostúr,

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,

Technická univerzita vo Zvolene,

Študentská 26, 960 53 Zvolen (kosturj@zoznam.sk)

VZNIK VYŠŠÍCH MODÁLNYCH TVAROV PRÚTA PRI JEHO NAMÁHANÍ NA VZPER

A HIGHER MODAL SHAPES FORMATION AT THE BUCKLED ROD

Stanislav KOTŠMÍD – Pavel BEŇO

ABSTRACT: A buckling rod dimensioning is based on the first modal shape formation which is appeared in the lowest value of the critical buckling force. The contribution gives the conditions for the other modal shapes formation at the same load character, where the possibilities of their appearing in practice are shown. It describes four the most used rod fittings and for each one it shows the first five modal shapes. The rods behaviour under the set conditions is verified by CREO Simulate software.

Key words: modal shapes, boundary conditions, buckling

ABSTRAKT: Dimenzovanie prútov na vzper je v praxi založené na vzniku prvého modálneho tvaru, ktorý vzniká pri najnižšej hodnote kritickej vzpernej sily. Príspevok udáva podmienky pre vznik ďalších modálnych tvarov pri nezmenenom charaktere zaťažujúcej sily, pričom sa venuje možnostiam ich dosiahnutia v praxi. V skratke opisuje štyri najpoužívanejšie uchytenia prútov a pre každé zobrazuje prvých päť modálnych tvarov. Správanie sa prútov pod vplyvom nastavených podmienok overuje v softvéri CREO Simulate.

Kľúčové slová: modálne tvary, okrajové podmienky, vzper

ÚVOD

K strate stability pružných telies dochádza najčastejšie pri dlhých tenkých prútoch, tenkostenných konštrukciách a všade tam, kde aspoň jeden rozmer telesa je voči ostatným veľmi malý (Bodnár, 2009). Pre výpočet sily, ktorá spôsobuje stratu stability prútov, je možné použiť viacero vzťahov, či už analytických, numerických, alebo normovaných. V prípade analytických vzťahov sa stretávame so vzťahom pre určenie kritickej vzpernej sily podľa Eulera, ktorý je odvodený z približnej diferenciálnej rovnice priehybovej čiary. Podľa tohto vzťahu je možné určiť kritickú vzpernú silu pre rôzne uchytenia a modálne tvary.

Ako je známe z rôznych publikácií, pri splnení okrajových podmienok približnej diferenciálnej rovnice priehybovej čiary, prút môže nadobudnúť pre jeden spôsob uchytenia viacero tvarov, pre ktoré platia aj vlastné hodnoty kritickej vzpernej sily. V praktických výpočtoch sa uvažuje len s najmenšou hodnotou kritickej vzpernej sily, a teda len s prvým modálnym tvarom. Čo sa týka prípadu pomalej aplikácie zaťaženia, pravdepodobnosť vzniku vyšších modálnych tvarov je iba teoretická (Trebúňa, 2000). Ich existencia je možná iba v prípade prídavných podpier, alebo pri aplikácii zaťaženia vyššou rýchlosťou (Grieve, 2004), či pôsobením pulzujúceho zaťaženia (Lindberg, 2003).

V predloženom príspevku načrtneme výpočet kritickej vzpernej sily pre štyri najpoužívanejšie spôsoby uchytenia prúta, pričom sa zameriame aj na zobrazenie prvých päť modálnych tvarov. Pre každý zobrazený modálny tvar stanovíme podmienky pre jeho vznik, pokiaľ to bude možné a pokiaľ takéto podmienky existujú. Správnosť našich tvrdení budeme overovať v simulačnom softvéri CREO Simulate.

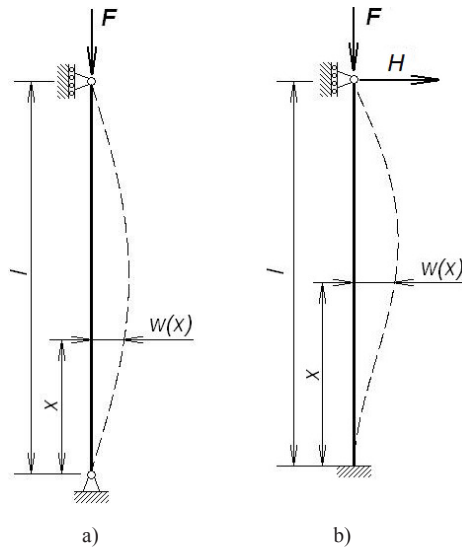
1. MATERIÁL A METÓDY

Pre výpočet kritickej vzpernej sily pomocou Eulerovho vzťahu (1) pre priamy centric-ky zaťažený prút musia byť splnené podmienky v podobe homogénneho izotropného materiálu a platnosti Hookeovho zákona (Hájek, 1988). V prípade dosiahnutia kritickej hodnoty sily F prejde prút do indiferentnej polohy a zaujme nový zdeformovaný tvar. Odvodenie vzťahov pre výpočet kritickej vzpernej sily je podrobne rozpracované vo viacerých literárnych prameňoch. Nám postačí výsledný vzťah pre hodnotu kritickej vzpernej sily

$$F_{krit} = \frac{\kappa^2 \pi^2 E J_{min}}{l^2} \quad (N) \quad (1)$$

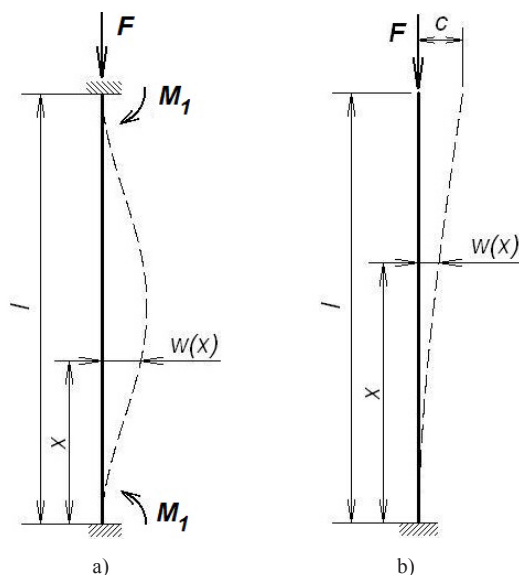
- κ – koeficient určujúci tvar priehybovej čiary (–)
 E – modul pružnosti v ťahu/tlaku (Pa)
 J_{min} – minimálny kvadratický moment prierezu (m^4)
 l – dĺžka prúta (m)

Ďalej budeme v texte pracovať len s koeficientom κ . Tento nadobúda rôzne hodnoty v závislosti od uchytenia prúta a jeho modálneho tvaru. V príspevku budeme pracovať so štyrmi najpoužívanejšími spôsobmi uchytenia prúta. Obr. 1 znázorňuje uchytenie pomocou kĺbov na oboch koncoch (Obr. 1a) a uchytenie pomocou votknutia a kĺbu (Obr. 1b).



Obrázok 1 Uchytenie prúta
a) „kĺb – kĺb“ b) „votknutie – kĺb“

Obr. 2 znázorňuje uchytenie pomocou obojstranného votknutia (Obr. 2a) a pomocou votknutia a voľného konca (Obr. 2b).



Obrázok 2 Uchytenie prúta
a) „votknutie – votknutie“ b) „votknutie – voľný koniec“

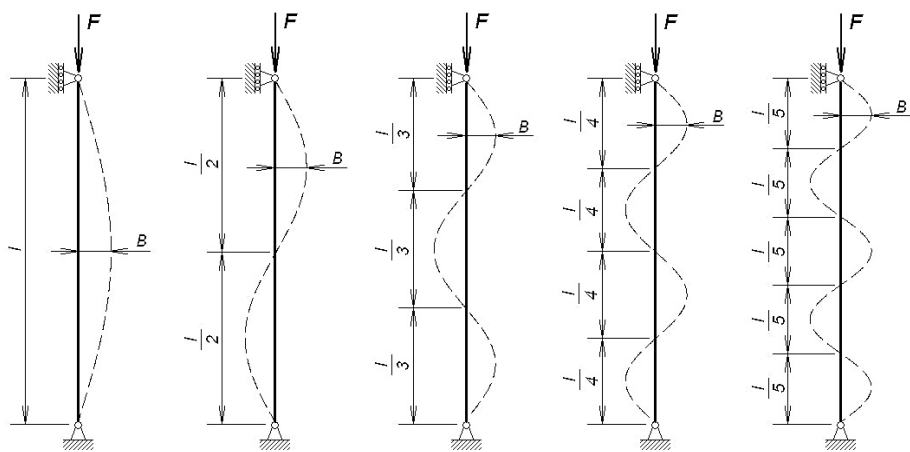
Jednotlivé koeficienty k pre uvedené spôsoby uchytenia prútov sú výsledkom riešenia príslušných diferenciálnych rovníc a sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1 Hodnoty koeficienta k pre uvedené spôsoby uchytenia a modálne tvary

	1. tvar	2. tvar	3. tvar	4. tvar	5. tvar
„kĺb – kĺb“	1	2	3	4	5
„votknutie – kĺb“	1,43	2,46	3,47	4,48	5,48
„votknutie – votknutie“	2	4	6	8	10
„votknutie – voľ. koniec“	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5

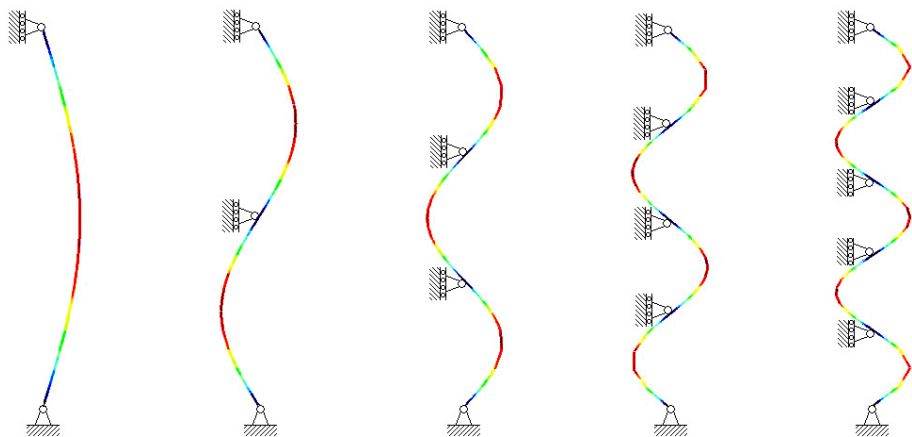
2. VÝSLEDKY

Pre jednotlivé tvary riešenia diferenciálnych rovníc a použité koeficienty k dostávame jednotlivé modálne tvary prúta. Prvých päť modálnych tvarov pre uchytenie „kĺb – kĺb“ je znázornených na Obr. 3.



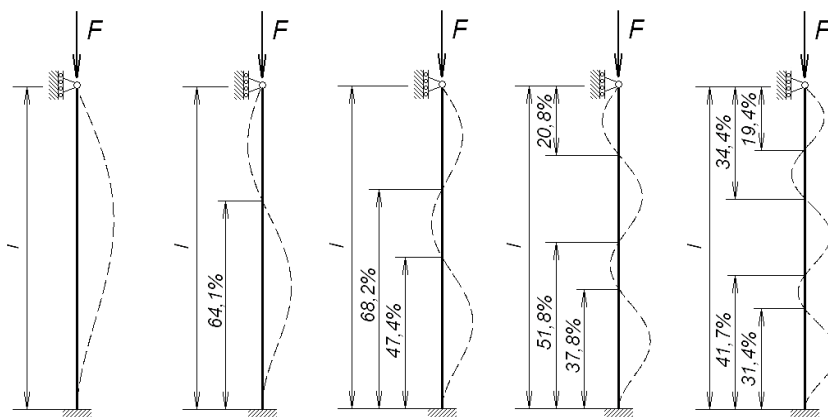
Obrázok 3 Modálne tvary prúta pre uchytenie „kĺb – kĺb“

Tieto tvary sa pri pomalom nábehu sily F dosiahnu pridaním kĺbových podpier do miest priesečníkov priehybovej čiary prúta a osi x , čo sa potvrdilo aj deformačnou analýzou (Obr. 4).



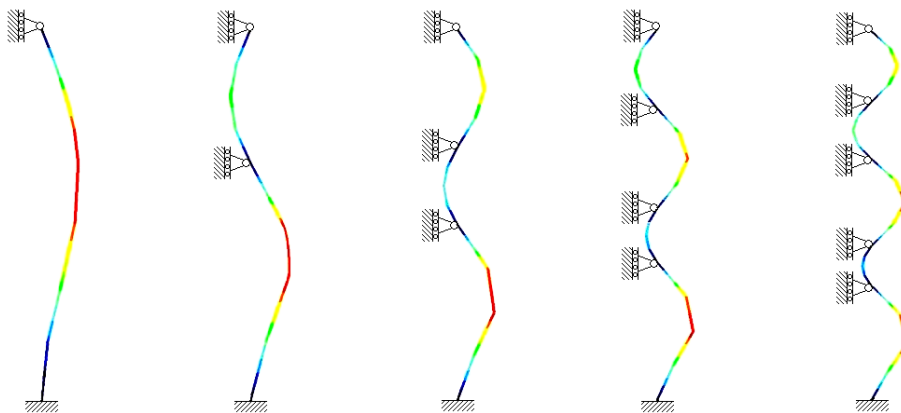
Obrázok 4 Deformačná analýza prúta pre uchytenie „kĺb – kĺb“

Prvých päť modálnych tvarov pre uchytenie „votknutie – kĺb“ znázorňuje Obr. 5.



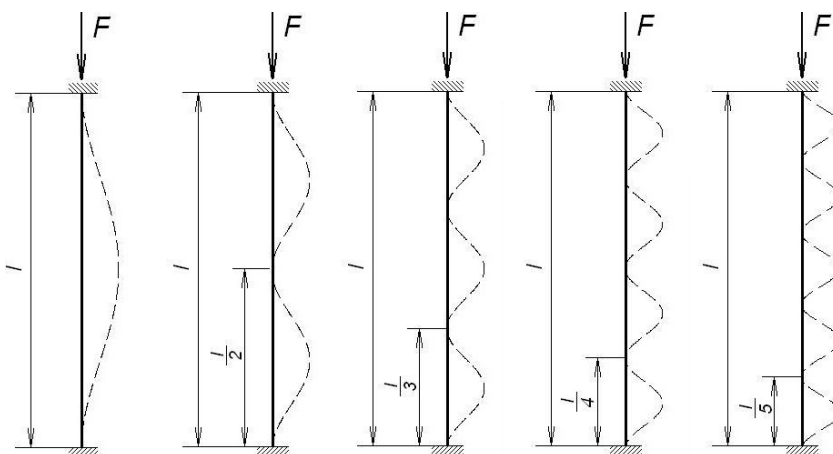
Obrázok 5 Modálne tvary prúta pre uchytenie „votknutie – kĺb“

Analogicky ako v predchádzajúcom prípade, po pridaní kĺbových podpier do miest priesečníkov prichybovej čiary a osi x sa dosiahnu vyššie zobrazené modálne tvary (Obr. 6).

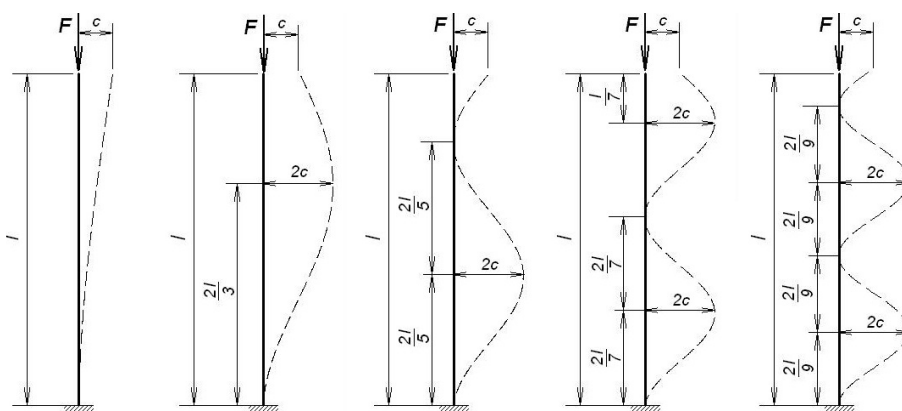


Obrázok 6 Deformačná analýza prúta pre uchytenie „votknutie – kĺb“

Prvých päť modálnych tvarov pre uchytenie „votknutie – votknutie“ a uchytenie „votknutie – voľný koniec“ je znázornených na Obr. 7 a Obr. 8. Pri týchto prípadoch sa nám nepodarilo nájsť vhodné uloženie pre vznik vyšších modálnych tvarov.



Obrázok 7 Modálne tvary prúta pre uchytenie „votknutie – votknutie“



Obrázok 8 Modálne tvary prúta pre uchytenie „votknutie – voľný koniec“

3. DISKUSIA

Ako uvádza Jones (2006), vyššie modálne tvary sú možné v tých prípadoch, keď sa vhodne zvolenými väzbami zabráni v pôvodnej deformácii. Ako sme sa mohli presvedčiť, v prípade uchytenia „kĺb – kĺb“ postačuje zaviesť do systému podpery. Podľa Obr. 3 v miestach priesečníka prihybovej čiary prúta s osou x je nulový prihyb, pričom sklon prihybovej čiary je nenulový. Túto podmienku spĺňa kĺbová podpera. Aby sa mohol prút deformovať pozdĺž osi x , tieto podpery musia mať umožnený axiálny posuv. Podľa toho ktorú hodnotu kritickej vzpernej sily uvažujeme, zavádzame spomínanú kĺbovú podperu

na príslušné miesto podľa Obr. 4, kde bola celá situácia overená softvérom CREO Simulate. Pre druhý modálny tvar a jeho kritickú vzpernú silu zavádzame podperu v $\frac{1}{2}$ dĺžky prúta. Analogicky pre tretí modálny tvar zavádzame podperu do každej tretiny dĺžky. Tento systém podpier sa môže často vyskytovať pri priehradových konštrukciách.

V prípade uchytenia „votknutie – kĺb“ sú vyššie modálne tvary znázornené na Obr. 5. Pri tomto type uchytenia si znovu môžeme všimnúť, že v priesečníku priehybovej čiary prúta a osi x je priehyb nulový a sklon priehybovej čiary nadobúda nenulové hodnoty, čo znovu vyhovuje pre kĺbovú podperu s možnosťou posuvu v osi x , čo bolo znovu overené prostredníctvom softvéru CREO Simulate (Obr. 6). Ich zavedenie do systému sa podľa vypočítaných príkladov riadi pravidlom umiestnenia tak, ako je to naznačené na Obr. 5. Pri druhom modálnom tvare je podpera zavedená približne v 64 % dĺžky prúta meraných od miesta votknutia. Obdobne sú uvedené hodnoty umiestnenia aj pre ostatné skúmané modálne tvary. Je zrejmé, že takto presne rozčlenené kĺbové uchytenia asi v praxi nastanú len zriedka. V prípade iného usporiadania už samozrejme príslušné hodnoty koeficienta k platiť nebudú.

V prípade systému uchytenia „votknutie – votknutie“ sa nám nepodarilo dokázať platnosť predchádzajúcej úvahy, a to že vyššie modálne tvary môžu pri pomalom náraste sily F nastať v prípade vhodného umiestnenia podpery. Ich priebehy môžeme zhladiť z Obr. 7. V miestach priesečníka priehybovej čiary prúta je priehyb nulový a rovnako aj sklon priehybovej čiary môžeme usúdiť, že je nulový. Pre tento prípad by sa asi najlepšie osvedčila podpera v podobe posuvného votknutia v osi x . Po nasimulovaní prútov sa však tento predpoklad nepotvrdil a deformácie prútov boli iné, ako uvádza riešenie príslušnej diferenciálnej rovnice. Jediné priblíženie k teoretickému tvaru sa nám podarilo dosiahnuť v prípade druhého modálneho tvaru, aj to len v prípade, ak sa posuvnému votknutiu povolí rotácia okolo osi x . Polvlny však nenastanú v jednej rovine. Obdobné výsledky vznikli aj v prípade uchytenia „votknutie – voľný koniec“, kde sa nám takisto nepodarilo nájsť vhodné podpery pre vznik vyšších modálnych tvarov podľa Obr. 8. Môžeme sa len domnievať, že k vhodnému zavedeniu podpier budeme ešte potrebovať prídavné silové účinky, napríklad v miestach najväčšieho priehybu prúta.

4. ZÁVER

Cieľom článku bolo predostrieť čitateľovi prvých päť modálnych tvarov prútov zaťažených vzperom a zaviesť podmienky pre ich vznik pri pomalom náraste sily F . Zo skúmaných štyroch uchytení prúta len pri uchytení „kĺb – kĺb“ a „votknutie – kĺb“ sa nám podarilo preukázať, že vyššie modálne tvary môžu nastať pri zavedení prídavných podpier. V praxi si tento stav môžeme predstaviť pri priehradových konštrukciách, pričom ich výpočet sa od výpočtu prvého modálneho tvaru líši len koeficientom k .

Pri uchyteniach „votknutie – votknutie“ a „votknutie – voľný koniec“ sa vyššie zmienená hypotéza nepodarila preukázať a pravdepodobne je potrebné zaviesť do systému ďalší silový účinok podľa úvahy z predchádzajúcej kapitoly. Tieto dva spôsoby uchytenia prútov a ich modálne stavy by bolo vhodné podrobiť ďalšiemu skúmaniu.

LITERATÚRA

- BODNÁR, F. – MINÁRIK, M.: 2009. Pružnosť a pevnosť II. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009, 209 s. ISBN 978-80-228-2083-7.
- GRIEVE, D. J.: 2004. Buckling of long slender columns under compression. [online]. [Cit. 2014-01-20]. Dostupné na: <<http://www.tech.plym.ac.uk/sme/desnotes/eulerderiv1.htm>>
- HÁJEK, E. – REIF, P. – VALENTA, F.: 1988. Pružnosť a pevnosť I. Praha – Bratislava: SNTL et ALFA, 1988, 432 s.
- JONES, R. M.: 2006. Buckling of bars, plates, and shells. Blacksburg: Bull Ridge Publishing, 2006, 848 s. ISBN 978-0-9787223-0-2.
- LINDBERG, H. E.: 2003. Little book of dynamic buckling. [online] [Cit. 2014-01-20]. Dostupné na: <<http://www.lindberglce.com/tech/buklbook.htm>>
- TREBUŇA, F. – JURICA, V. – ŠIMČÁK, F.: 2000. Pružnosť a pevnosť II. Košice: Viena, 2000, 318 s. ISBN 80-7099-478-9.

Kontaktná adresa:

Ing. Stanislav Kotšmíd

Katedra mechaniky a strojnictva, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky

Technická univerzita vo Zvolene

Študentská 26, 960 53 Zvolen

stanislav.kotsmid@gmail.com

doc. Ing. Pavel Beňo, PhD.

Katedra mechaniky a strojnictva, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky

Technická univerzita vo Zvolene

Študentská 26, 960 53 Zvolen

beno@tuzvo.sk

VYUŽITIE CO₂ LASERA AKO NETRADIČNÉHO NÁSTROJA NA ZMENU FARBY DREVA

UTILIZATION OF CO₂ LASER AS AN UNCONVENTIONAL INSTRUMENT TO WOOD COLOUR CHANGES

Ivan KUBOVSKÝ – Rastislav IGAZ

ABSTRACT: The paper deals with the use of laser radiation to achieve the wood colour changes. The surface of maple wood (*Acer pseudoplatanus*, L.) was irradiated using of industrial CO₂ laser which emits at a wavelength of 10.6 μm. Amount of energy impinging on the irradiated area was expressed as a cumulative irradiation dose which was dependent of the laser head motion speed in the range of 17 to 63 J/cm². Colour changes were measured by a spectrophotometer their results were shown in the CIELAB colour space and quantified by means of colour differences. The most significant changes were recorded at value of lightness L^* which has been decreased according to the increase of the irradiation dose from original value of 83 to value of 34.

Key words: CO₂ laser, irradiation dose, colour, colour differences

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá využitím laserového žiarenia na dosiahnutie farebných zmien dreva. Na ožarovanie povrchu javora horského (*Acer pseudoplatanus*, L.) bol použitý priemyselný CO₂ laser, vyžarujúci na vlnovej dĺžke 10,6 μm. Množstvo energie, dopadajúcej na ožarovanú plochu, bolo vyjadrené vo forme kumulatívnej dávky ožiarovania. Tá bola závislá na rýchlosti pohybu laserovej hlavice v rozsahu 17–63 J/cm². Farebné zmeny sa merali pomocou spektrofotometra, výsledky boli zobrazené v kolorimetrickom priestore CIELAB a kvantifikované prostredníctvom farebných diferencii. Najväčšie zmeny zaznamenala svetlosť L^* , ktorá sa s rastom dávky znižovala z pôvodnej hodnoty 83 na hodnotu 34.

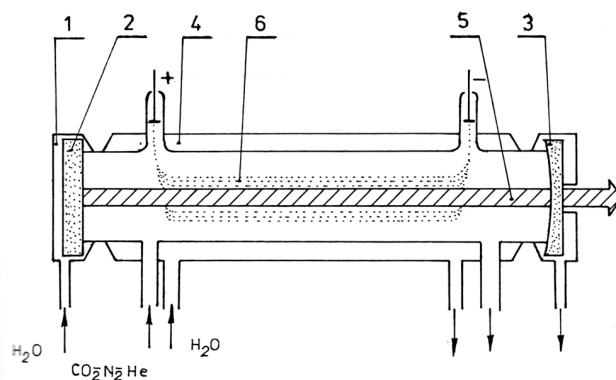
Kľúčové slová: CO₂ laser, dávka ožiarovania, farba, farebné diferencie

1. ÚVOD

1.1 Princíp činnosti CO₂ lasera

Laser je zariadenie, ktoré generuje koherentné a monochromatické žiarenie s veľmi malou divergenciou, čo ho radí medzi zdroje žiarenia s jedinečnými fyzikálnymi vlastnosťami. Laser na báze oxidu uhličitého využíva ako aktívne prostredie zmes troch

plynov: CO_2 , N_2 a He v rôznych pomeroch, v závislosti od konštrukcie zariadenia. Generované žiarenie vzniká v procese stimulovanej emisie pri vibračných prechodoch medzi energetickými hladinami v molekule CO_2 . Laser na báze CO_2 dokáže generovať žiarenie na viacerých vlnových dĺžkach v infračervenej (IR) oblasti spektra, od 9,1 do 11 μm . Najčastejšie je využívaná vlnová dĺžka 10,6 μm . Schéma usporiadania jednoduchého CO_2 lasera je na obrázku č. 1. Typický výkon jednoduchého CO_2 lasera dosahuje asi 50 W/m dĺžky optického rezonátora. Zvyšovanie výstupného výkonu sa dosahuje zväčšovaním aktívnej dĺžky rezonátora. Účinnosť CO_2 lasera dosahuje 20–30 % a je významne závislá od teploty aktívneho prostredia (GAJTANSKA a kol, 2004).



Obrázok 1 Schématické usporiadanie laserovej trubice jednoduchého CO_2 lasera (1 – chladenie zrkadiel, 2 – zadné vysoko odrazivé zrkadlo, 3 – polopriepustné výstupné zrkadlo, 4 – chladenie optického rezonátora, 5 – generovaný laserový zväzok, 6 – budenie aktívneho prostredia elektrickým výbojom)

CO_2 lasery sú často využívané v priemyselných aplikáciách, predovšetkým na rezanie, vŕtanie alebo zvarovanie, príp. na gravírovanie alebo popisovanie povrchov. Vlnová dĺžka žiarenia generovaného CO_2 laserom umožňuje opracovanie širokého spektra kovových aj nekovových materiálov, vrátane materiálov na báze dreva (GAJTANSKA a kol., 2004).

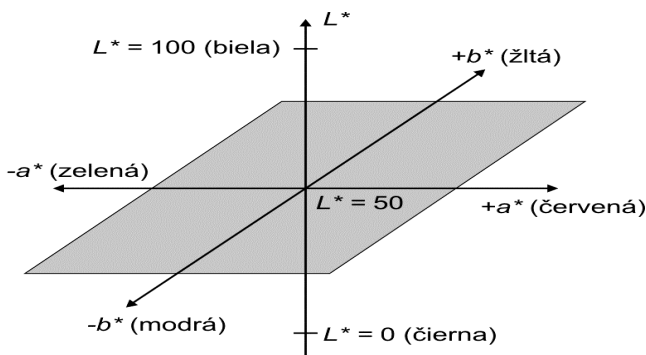
1.2 Farba dreva a možnosti jej vyjadrenia

Farba, ako dôležitá kvalitatívna vlastnosť dreva, často zásadným spôsobom ovplyvňuje naše rozhodovanie spojené s voľbou tohto typu materiálu. Pri výrobkoch z dreva sa jeho povrch obvykle upravuje nanášaním priehľadných alebo pigmentovaných náterových látok. Vzhľadom na to, že štruktúra dreva pozostáva z komplexu makromolekulových látok (celulóza, hemicelulózy, lignín), je možné jeho povrchové vlastnosti ovplyvniť tiež modifikáciou ich zloženia. To sa najčastejšie dosahuje pôsobením tepla, vlhkosti, UV žiarenia a niektorých chemických látok. Technologické postupy, pri ktorých hrá hlavnú úlohu teplo, sa využívajú pri priamom ohreve, v procese sušenia alebo pri pareni. Prostredníctvom nich môžeme meniť aj ďalšie vlastnosti dreva – najmä pevnosť, hustotu, modul pružnosti v ťahu a v ohybe, zvýšiť odolnosť voči ohňu, biologickým škodcom a dosiahnuť zníženie jeho hygroskopickosti (KÚDELA, LAUROVÁ, 2006). Veľmi často sa uvedené postupy využívajú na zmenu prirodzenej farby dreva alebo na odstránenie nežiadúcich

farebných zmien (ako následok niektorých technologických postupov). Za farebnosť dreva sú zodpovedné tzv. chromofóry, ktoré sú obsiahnuté najmä v ligníne. Sú to skupiny látok, absorbujúce elektromagnetické žiarenie s charakteristickými hodnotami vlnových dĺžok (KALOUS, 1987) predovšetkým v ultrafialovej a viditeľnej oblasti spektra, čo sa navonok prejavuje ako farba.

Pojem „farebný“ sa obvykle vyjadruje slovami: červený, zelený... (chromatické farby), ale tiež biely, šedý, čierny (achromatické farby). Skoro každá farba sa dá napodobniť zložením troch farebných podnetov vytvorených pomocou svetiel základných farieb – červenej, zelenej a modrej, keď svetlá rôznych farieb dopadajú na rovnaké miesto a vytvorí výsledný vnem novej farby (aditívny spôsob). Druhý spôsob je subtraktívny, ktorý sa uskutočňuje pri priehľadných látkach (farebné filtre) alebo pri zmiešavaní pigmentových farív v tlačiarňi. Farba je jednoznačne určená pomocou troch atribútov – farebný tón (odtieň), sýtosť a svetlosť.

Každú farbu je možné jednoznačne číselne kvantifikovať vo vhodnej kolorimetrickej sústave. Na základe odporúčania CIE (Commision Internationale de l' Eclairage) sa zobrazuje farba v príslušnej sústave ako vektor, ktorého veľkosť a orientácia je určená na základe množstva troch farebných podnetov (trichromatické zložky) alebo ich vzájomným pomerom (trichromatické súradnice). To umožňuje zobraziť farbu v trojrozmernom priestore. Jeden rozmer zodpovedá svetlosti (v prípade svetelných zdrojov jas). Ďalšie dva (odtieň a sýtosť) spoločne určujú chromatickosť. V oblasti výskumu sa najčastejšie využíva kolorimetrická sústava CIE $L^*a^*b^*$ 1976 (CIELAB). Os L^* predstavuje svetlosť, pomer čiernej a bielej, os a^* určuje pomer červenej (+) a zelenej (–), os b^* pomer žltej (+) a modrej (–). Priestorový model sústavy je znázornený na obrázku č. 2.



Obrázok 2 Model sústavy CIELAB (podľa POSPÍŠIL et al., 2006)

V strede je neutrálna šedá farba ($a^* = b^* = 0$, $L^* = 50$). Vzťahy medzi hodnotami X , Y , Z a L^* , a^* , b^* (WYSZECKI A STILES, 1982) sú nasledovné:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (2)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

kde X, Y, Z sú hodnoty trichromatických zložiek a X_n, Y_n, Z_n sú hodnoty trichromatických zložiek normalizovaných farebných svetiel (upravených pre $Y = 100$).

Vzťahy platia pre $X/X_n, Y/Y_n$ a $Z/Z_n > 0,008856$, pre iné pomery sú podrobne uvedené v norme (ČSN 011718). Sústava CIELAB umožňuje spoľahlivé a neskreslené zobrazenie údajov o farbe a s vysokou presnosťou vypočítať rozdiely medzi farbami – farebné diferencie. Pomocou nich sa určuje tzv. celková farebná diferencia ΔE^* , ktorá sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

kde $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$ sú farebné diferencie jednotlivých veličín L^*, a^*, b^* , získané ako rozdiel hodnoty príslušnej veličiny po zmene farby a pred jej zmenou (pôvodná, referenčná hodnota).

Cieľom príspevku je poukázať na možnosti využitia priemyselného CO₂ lasera na zmenu farby povrchu dreva v závislosti od veľkosti privedenej energie.

2. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

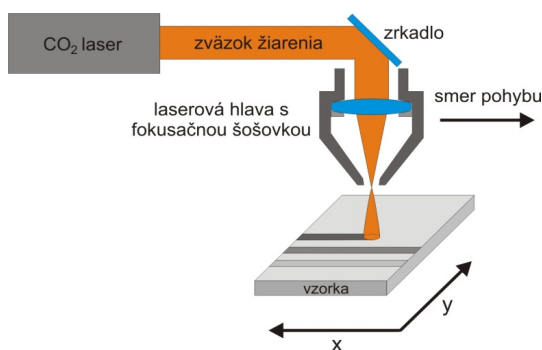
2.1 Ožarovanie povrchu

Experimentálny materiál tvoril javor horský (*Acer pseudoplatanus* L.) v tvare dvoch doštičiek s rozmermi 160 × 70 × 8 mm (dĺžka × šírka × hrúbka), získaných rozdelením pôvodnej dosky s dvojnásobnou šírkou. Tá bola získaná z kmeňa stromu tangenciálnym rezom. Vzorky boli upravené brúsnym papierom so zrnitosťou «150» a vysušné na absolútnu vlhkosť 12%. Ožarovanie povrchu vzoriek sa realizovalo v zariadení LCS 400 (obrázok č. 3). Je to laserové zariadenie, ktoré pracuje na vlnovej dĺžke 10,6 μm s maximálnym výkonom generovaného zväzku 400 W (na výstupe rezonátora).



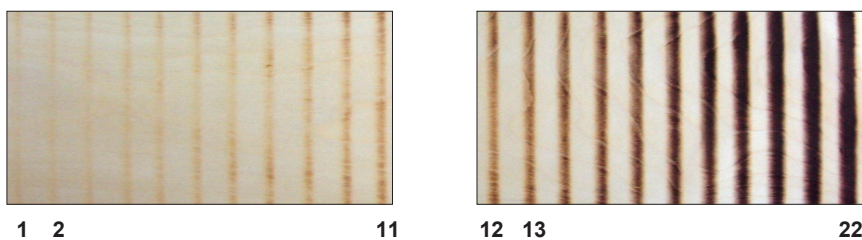
Obrázok 3 Laserové zariadenie LCS 400

Laserové zariadenie umožňuje meniť rastrovaciu rýchlosť laserovej hlavice, preto sme sa rozhodli meniť energiu zmenou tejto rýchlosti. Pri konštantnom výstupnom výkone a vzdialenosti hlavice (ohniska šošovky) sa tým dosiahne zmena dávky ožiarenia (H). Umiestnenie vzoriek bolo zvolené tak, aby laserový zväzok dopadal kolmo na ich povrch a postupoval v smere šírky vzorky (os x) zvolenou rýchlosťou. Po presunutí zväzku cez celú šírku vzorky sa laserová hlavica posunula v smere dĺžky vzorky (os y) o 20 mm. Rýchlosť sa zmenila a celý postup sa zopakoval (rozsah rýchlostí bol na skúšobnej vzorke stanovený experimentálne, na základe miery sfarbenia po ožiarení). Náčrt laserovej aparatúry použitej na ožarovanie je na obrázku č. 4.



Obrázok 4 Náčrt laserovej aparatúry použitej na ožarovanie

Na základe uvedeného postupu vznikla na povrchu dreva sústava vzájomne oddeľných rovnobežných plôch rôznej farby (11 pruhov na každej vzorke, obrázok č. 5).



Obrázok 5 Povrch javora po ožiarení

2.2 Výpočet dávky ožiarenia

Po dopade laserového zväzku na povrch materiálu sa časť energie absorbuje a okamžite premení na teplo. Proces je ovplyvnený koeficientami tepelnej a teplotnej vodivosti, špecifickej tepelnej kapacity a hustoty.

Laserové žiarenie má vysokú monochromatickosť, koherentnosť a veľmi malú rozbiehavosť. Pre gaussovský laserový zväzok profilu TEM_{00} , dopadajúci kolmo na povrch

vzorky a zároveň sa posúvajúci po jej povrchu konštantnou priamočiariou rýchlosťou (rastrovacia rýchlosť), možno ožiarenosť (intenzitu ožiarenia) vyjadriť podľa vzťahu (ORECH et al., 1988):

$$E(x, y, z, t) = \frac{P_0}{\pi \cdot \gamma \cdot w^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x - v \cdot t)^2}{w^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{w^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{z}{\tilde{a}}\right) \quad (5)$$

kde $E(x, y, z, t)$ je ožiarenosť od zväzku žiarenia dopadajúceho do bodu $[x, y, z]$ za čas t , P_0 je celkový vyžiarený výkon lasera, w je polomer stopy laserového zväzku (vzdialenosť od osi zväzku pre pokles intenzity na $1/e$ z maxima), z je vzdialenosť od ohniska a γ je hĺbka prieniku žiarenia. Po integrácii vzťahu cez súradnicu z dostaneme:

$$E(x, y, t) = \frac{P_0}{\pi \cdot w^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x - v \cdot t)^2}{w^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{w^2}\right) \quad (6)$$

Energia privedená na povrch dreva bola vyjadrená prostredníctvom dávky ožiarenia, ako časový integrál intenzity:

$$H = \int_0^t E(t) dt = \frac{dP}{dA} \quad (7)$$

kde dP je výkon, dA je plocha, $E(t)$ je ožiarenosť, H je dávka ožiarenia a t je doba expozície. Výstupný výkon lasera a vzdialenosť povrchu vzorky od ohniska fokusačnej šošovky boli konštantné. Vzhľadom na možnosť presne meniť hodnotu rastrovacej rýchlosti, dávka ožiarenia závisela len od nej. Efektívna hodnota výkonu, nameraná na povrchu vzorky, bola 40,5 W (výkon v celom priereze zväzku s profilom TEM₀₀). Ostatné parametre: vzdialenosť ohniska fokusačnej šošovky od povrchu vzorky $l = 250$ mm, priemer stopy $d = 8$ mm. Dávka ožiarenia sa menila v rozsahu 17,5 až 63,3 J/cm².

Tab. 1 Závislosť dávky ožiarenia od rastrovacej rýchlosti

	Vzorka č. 1											Vzorka č. 2										
Pruh	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
v (cm/s)	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8
H (J/cm ²)	17,5	18,1	18,8	19,5	20,3	21,1	22,0	23,0	24,1	25,3	26,6	28,1	29,8	31,6	33,8	36,2	38,9	42,2	46,0	50,6	56,3	63,3

2.3 Meranie farby

Farba sa merala pomocou spektrofotometra CM2600D (Konica-Minolta), ktorý je schopný merať hodnoty farebných súradníc vo zvolenom kolorimetrickom priestore (obr. č. 6).



Obrázok 6 Spektrofotometer CM 2600d

Pre naše merania sme zvolili priestor CIELAB (HRČKA, 2008). Prístroj pracoval v spojení s PC, komunikácia bola zabezpečená prostredníctvom sériového portu RS 232C. Pre ohraničenie meranej plochy sme použili meraciu clonu s priemerom otvoru 6mm. Osvetľovací systém bol nastavený na režim merania vrátane rozptýlených zložiek svetla (SCI). Prístroj meria s geometriou 8/d.

Najprv sa meralo na neožiarenom povrchu každej vzorky, kde sa uskutočnilo po 30 meraní (náhodne rozmiestnených po celej ploche). Z nameraných hodnôt L^* , a^* , b^* sa vypočítali aritmetické priemery. Tieto hodnoty boli pri ďalších výpočtoch považované za referenčné (index REF). Referenčná hodnota svetlosti je $L^*_{REF} = 83,26$, $a^*_{REF} = 4,21$ a $b^*_{REF} = 18,79$. Po skončení ožarovania bolo na každom ožiarenom pruhu vykonaných 80 meraní po celej šírke pruhu. Výsledné hodnoty sú uvedené v Tab. 2. Uvedené počty meraní boli zvolené pre interval spoľahlivosti 95 % (počet meraní bol počítaný z t-testu Studentovho rozdelenia).

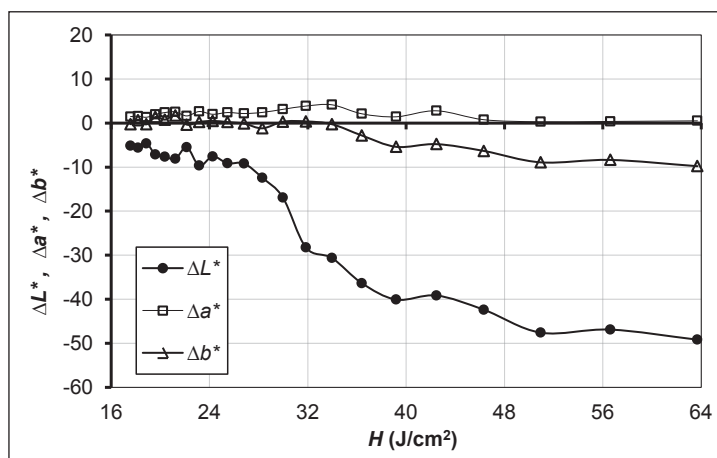
3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Hodnoty $L^*a^*b^*$ po úprave laserom (namerané na jednotlivých vytvorených pruhoch).

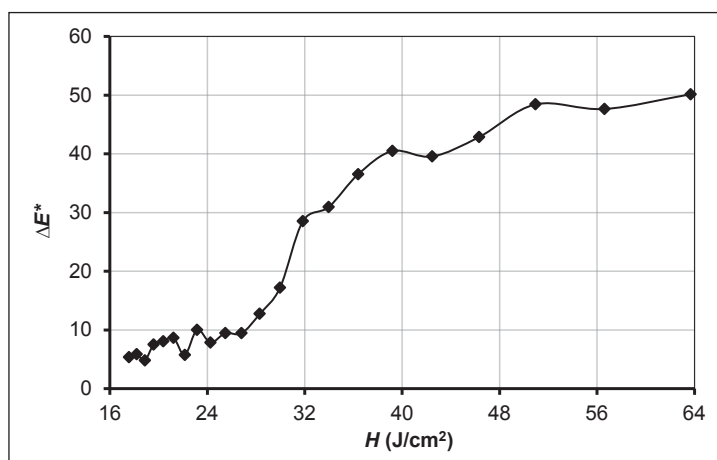
Tab. 2. Hodnoty $L^*a^*b^*$ po úprave laserom

Pruh	Vzorka č. 1											Vzorka č. 2										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
H (J/cm ²)	17,5	18,1	18,8	19,5	20,3	21,1	22,0	23,0	24,1	25,3	26,6	28,1	29,8	31,6	33,8	36,2	38,9	42,2	46,0	50,6	56,3	63,3
L^*	78,09	77,67	78,63	76,12	75,59	75,16	77,76	73,58	75,67	74,13	74,06	70,81	66,33	55,00	52,60	46,89	43,17	44,1	40,87	35,66	36,36	34,08
a^*	5,67	5,78	5,53	6,16	6,60	6,74	5,83	6,83	6,20	6,60	6,37	6,63	7,33	8,07	8,35	6,31	5,63	6,99	4,97	4,50	4,57	4,71
b^*	18,53	19,45	18,50	20,15	19,57	20,50	18,43	19,04	19,27	19,01	18,66	17,60	19,10	19,16	18,52	15,97	13,39	14,00	12,46	9,87	10,42	9,00

Farebné diferencie ΔL^* , Δa^* , Δb^* boli počítané ako rozdiel medzi hodnotou farby na jednotlivých pruhoch a referenčnou hodnotou ($\Delta L^* = L^* - L^*_{REF}$, $\Delta a^* = a^* - a^*_{REF}$, $\Delta b^* = b^* - b^*_{REF}$). Na výpočet celkovej farebnej diferencie ΔE^* bol použitý vzťah č. 7. Na obrázkoch č. 7 a 8 sú znázornené závislosti jednotlivých farebných diferencií od dávky ožarovania pre príslušné pruhu.



Obrázok 7 Hodnoty ΔL^* , Δa^* , Δb^* povrchu dreva upraveného laserom



Obrázok 8 Hodnoty ΔE^* povrchu dreva upraveného laserom

Ako je zrejme z grafov na obrázkoch č. 7 a 8, hodnota dávky ožiarenia má výrazný vplyv na zmenu prirodzenej farby dreva. Najväčšie zmeny vykázala hodnota svetlosti. Pri nízkych dávkach ožiarenia, zhruba do 20 J/cm², klesala ΔL^* nepatrne. V rozmedzí hodnôt 20 až 50 J/cm² bol jej pokles skoro lineárny. Pri vyšších dávkach ožiarenia sa svetlosť prakticky nemenila. To bolo spôsobené začínajúcim rozkladom dreva, sprevádzaným sčernaním ožiarenej plochy a zuholnatením vonkajšej vrstvy (SUJA et al., 2013). Hodnoty Δa^* a Δb^* sa menili len málo (neprekročili hodnotu 4, resp. 9). V podobnom rozsahu

ako diferencia svetlosti ΔL^* sa menila celková farebná diferencia ΔE^* , ktorá však v celom rozsahu použitej dávky ožiarenia rástla (podľa vzťahu č. 4). Podobné trendy boli zistené aj u iných drevín (KUBOVSKÝ, BABIAK, 2009).

4. ZÁVER

V prípade využitia priemyselného CO₂ lasera na zmenu farby dreva sa dá jednoduchým spôsobom meniť veľkosť privedenej energie. Pri nemennej vzdialenosti ohniska výstupnej fokusačnej šošovky od povrchu dreva sa to dosiahne zmenou rastrovacej rýchlosti laserovej hlavice. Na základe merania *žiarivého toku* je možné presne určiť množstvo dodanej energie. Ako vyplýva z dosiahnutých výsledkov, farba dreva je závislá od dávky ožiarenia v pomerne širokom rozsahu. Najviac sa pritom mení svetlosť, v menšej miere farebný odtieň dreva. Veľkosť dávky ožiarenia, potrebná na dosiahnutie želaných farebných diferencií, bude zrejme závisieť od druhu dreveniny (pri porovnateľnej hodnote vlhkosti dreva).

Uvedené výsledky možno v praxi využiť na popisovanie dreva a na dekoratívnu úpravu povrchu dreva. Na rozdiel od klasických metód (nanášanie náterových látok) stačí v tomto prípade dodať energiu vo forme elektromagnetického žiarenia, čo má tiež nezanedbateľný ekologický aspekt.

Príspevok bol vypracovaný s podporou grantovej agentúry KEGA Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v rámci projektu č. 011UMB-4/2012.

LITERATÚRA

- [1] GAJTANSKA, M., CHRISTOV, I., IGAZ, R.: 2004. *Lasery a ich využitie v priemysle*. VŠ učebnica. Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2004, 296 s. ISBN 80-228-1398-2.
- [2] KÚDELA, J., LAUROVÁ, M.: 2006. Permanent changes in properties of ash wood exposed to hydrothermal plasticization at high temperature. 5th International Symposium *Wood Structure and Properties*, TU vo Zvolene, 3. – 6. Sept. 2006. Zborník, s. 271 – 274.
- [3] KALOUS, V. a kol.: 1987. *Metody chemického výskumu*. Praha: SNTL, 1987, 432 s.
- [4] WYSZECKI, G., STILES, W. S.: 1982. *Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [5] POSPÍŠIL, J., HRDÝ, J., HRDÝ, J.: 2006. Fundamental color classification system for the digital imaging colorimetry. *JMO*, 6/2006, s. 175 – 178.
- [6] ORECH, J., RUSNÁK, P., JŮZA, F.: 1988. Model tvorenia reznej škáry pri rezaní dreva laserovým lúčom. *Drevársky výskum, zväzok 119*, 1988, s. 63 – 74.
- [7] HRČKA, R.: 2008. Identification of discoloration of beech wood in CIELAB space. *Wood Research*, 1/2008, s. 119 – 124.
- [8] SUJA, J., GAJTANSKA, M., IGAZ, R.: 2013. Návrh metódy merania stupňa zuhoľnatenia reznej špáry s využitím číslícového spracovania obrazu po procese rezania dreva zväzkom žiarenia. *Acta Facultatis Technicae*, XVIII, 2013 (1), s. 159 – 163.
- [9] KUBOVSKÝ, I., BABIAK, M.: 2009. Color changes induced by CO₂ laser irradiation of wood surface. *Wood Research*, 3/2009, s. 61 – 66. ISSN 1336-4561.

Kontaktná adresa:

Ing. Ivan Kubovský, PhD.,

Ing. Rastislav Igaz, PhD.,

Katedra fyziky, elektrotechniky a aplikovanej mechaniky,

Drevárska fakulta,

Technická univerzita vo Zvolene,

T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,

e-mail: kubovsky@tuzvo.sk

VYŠETROVANIE STABILITY MAZACÍCH OLEJOV PRI TVORBE PENY

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF LUBRICATING OILS IN THE FOAM FORMATION

Marián KUČERA

Abstract: The purpose of this research is to investigate the stability of different types of lubricating oils in the foam formation. It was followed the tendency to foam formation in three various lubricants used in practice. The properties that were tested included the resistance to foaming, and the impact of lubricant foaming on load-bearing capacity, or on the appearance of adhesion wear in samples with and without the anti-foaming agent. The anti-foaming agent was silicon-based. The experiment was performed in accordance with standard test method STN EN ISO 20 623 and using a 4-ball tribotester, CCD Camera and digital microscope. This experiment was carried out at three speeds ($1\ 200\ \text{min}^{-1}$, $1\ 800\ \text{min}^{-1}$ and $2\ 200\ \text{min}^{-1}$), load 392 N, temperature $55\ ^\circ\text{C}$ and time 60 minutes. If the lubricating layer is stronger, the welding of balls takes place at higher load and the wear is lower. If the speed increases, it arises discontinuous lubrication and the wear is higher.

Key words: stability of lubricants, foaming oil, adhesion wear, four-bal tribotester

Abstrakt: Cieľom tohto výskumu je hodnotenie stability rôznych typov mazacích olejov pri tvorbe peny. Tendencia tvorby peny bola hodnotená v troch rôznych mazivách používaných v praxi. Vlastnosti, ktoré boli testované zahŕňajú odpor voči tvorbe peny, vplyv penenia maziva na únosnosť alebo na vzhľad adhézneho opotrebovania vo vzorkách s a bez protipeniacej prísady, ktorá bola na báze silikónového oleja. Experiment bol vykonaný štandardnou skúšobnou metódou podľa normy STN EN ISO 20623 s využitím 4-guľôčkového prístroja, CCD kamery a digitálneho mikroskopu. Skúška bola vykonaná pri 3 rýchlostiach ($1\ 200$, $1\ 800$ a $2\ 200\ \text{min}^{-1}$), zaťaženi 392 N, teplote $55\ ^\circ\text{C}$ a čase 60 minút. Čím bola vrstva mazania hrubšia, zvarenie guľôčok sa uskutočnilo pri vyššom zaťaženi a opotrebovanie bolo nižšie. So zvyšujúcou sa rýchlosťou vzniká medzné mazanie a opotrebovanie sa zvyšuje.

Kľúčové slová: stabilita maziva, penivosť oleja, adhézne opotrebovanie, štvorguľôčkový prístroj

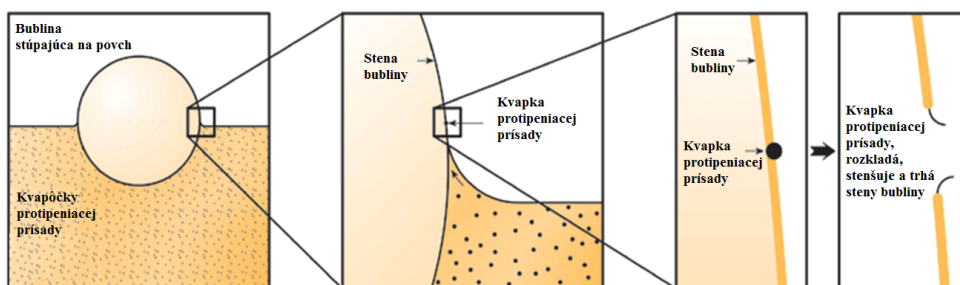
1 ÚVOD

Hlavnou úlohou maziva je znížiť negatívne dopady v tribologických procesoch, ktoré sa vzťahujú k treniu, opotrebeniu a zvyšovaniu teploty v tribomechanických systémoch. Mazanie teda predstavuje veľmi dôležitú súčasť celého procesu údržby (Jurča, Aleš 2012, Ahmadi, Mollazade 2009, Perič et al. 2013). Praktické skúsenosti v technických systémoch

údržby ukazujú, že najefektívnejší spôsob, ako predpovedať zlyhanie je založené na parametroch, ktoré spoľahlivo indikujú opotrebovanie. Pre zabezpečenie správneho mazania v jednotlivých trecích uzloch strojov a zariadení je preto nevyhnutná chemická a fyzikálna stálosť mazacích olejov (Syahrullail et al. 2013, Peťková et al. 2012). V technickej praxi sa často vyskytujú prípady, kedy dochádza k neočakávanému a nevysvetliteľnému peneniu oleja, čo následne vedie k narušeniu výkonnosti a stability mazacieho oleja. Penenie mazacieho oleja môže následne zapríčiniť poruchy a zlyhávanie technických zariadení. Prejavuje sa hlavne zmenšením pevnosti mazacej vrstvy, rýchlejším starnutím a poklesom viskozity mazacieho oleja.

1.1 Penenie

Pena je disperzný systém, emulzia vzduch-voda v ktorej sú plyn alebo para jemne rozptýlené v tvare malých bubliniek, vzájomne oddelenými tenkými vrstvami so zvýšenou viskozitou alebo pevnosťou. Zaujímajú nás spravidla dva parametre, sklon k penivosti a stabilita peny. Duncanson 2003 a Mayer 2008 uvádzajú, že sklon oleja k peneniu a stabilita peny je funkciou jeho čistoty, povrchového napätia, viskozity a teploty. Okrem toho je potrebné pamätať i na podmienky, ktorým je mazivo v prevádzke vystavené. Jedná sa najmä o zmeny prietoku a tlaku v mazacom systéme, množstvo absorbovaného vzduchu do oleja, prípadne prítomnosť ďalších nečistôt (Wooton et al. 2010). Na zamedzenie vytvárania stabilnej vrstvy peny na povrchoch mazacích olejov sa pri výrobe, ako aj počas prevádzky zariadení a agregátov, pridávajú prísady proti peneniu, ktoré znižujú povrchové napätie, čím dochádza k rýchlejšiemu rozloženiu peny (obr. 1).



Obrázok 1 Mechanizmus pôsobenia proti peniacej prísady

Za najúčinnnejšie a najpoužívanejšie prísady proti peneniu sa považujú rôzne typy silikónových olejov s rôznou viskozitou a molekulovou hmotnosťou – polysiloxany, polymetylsiloxany, polyvinylsiloxany a iné, ktorých povrchové napätie sa pohybuje v rozsahu od 16,0 do 21,0 mN.m⁻¹. Pri dávkovaní prísady proti peneniu je potrebné veľmi dôkladne, až experimentálne zistiť optimálnu koncentráciu použitého typu silikónového oleja. Menšia koncentrácia pôsobí ako nečistota, čo má za následok zvýšenie penivosti, pri nadmernej dávke dochádza k miernemu zakaleniu v dôsledku limitujúcej rozpustnosti protipeniacej prísady v mazacom oleji. Tým sa znemožní unikanie plynových bubliniek z oleja a opäť to vedie k zvýšenej penivosti. Odporúčané dávky sú v rozsahu

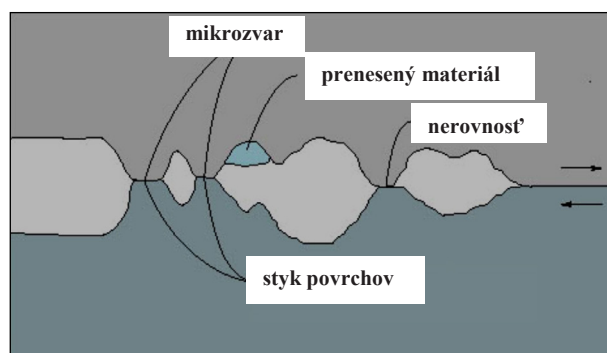
od 1 do 20 ppm podľa druhu použitého mazacieho oleja alebo technologickej kvapaliny a obsahu prítomných prísad.

1.2 Opotrebovanie

Opotrebenie, ako proces úbytku materiálu z povrchu jedného alebo oboch kontaktných povrchov tuhých telies prebieha pri všetkých druhoch ich relatívneho pohybu. Patrí k degradačným procesom. STN 01 5050 definuje opotrebovanie ako „trvale nežiadúcu“ zmenu povrchov (rozmerov), spôsobenú vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a opotrebovujúceho sa média. Prejavuje sa ako odstraňovanie alebo premiestňovanie častíc hmoty z opotrebovaného povrchu mechanickými účinkami, resp. sprevádzanými aj inými vplyvmi (napr. chemickými, elektrochemickými, elektrickými). Obvykle sa opotrebovanie rozdeľuje do 6 základných skupín: adhézne, abrazívne, erozívne, kavitačné, únavové a vibračné (Pošta 2006). Najčastejšie povahu opotrebovania charakterizujú zmeny tvaru a veľkosti a povrchová textúra častíc namáhaných trecích členov (Podsiadlo, Stachowiak 2000; Stachowiak 1998).

1.2.1 Mechanizmus opotrebovania adhéziou

K adhéznemu opotrebovaniu dochádza pri bezprostrednom styku kovu s kovom. Adhézne opotrebovanie je najčastejšia forma opotrebovania. Jeho podstatou je tvorba mikrozvarov medzi vrcholkami nerovností oboch povrchov, ich následné porušovanie, pri ktorom dochádza k vytrhávaniu častíc materiálu z povrchov (obr. 2).



Obrázok 2 Schéma mechanizmu adhézneho opotrebovania

Adhézne opotrebovanie je charakterizované oddeľovaním a premiestňovaním častíc z miest, kde pri relatívnom pohybe funkčných povrchov došlo k ich dotyku a k porušeniu povrchových vrstiev a ku kovovému dotyku oboch materiálov. Intenzitu adhézneho opotrebovania ovplyvňuje médium medzi funkčnými povrchmi napr. mazivo, ktoré môže čiastočne oddeliť dotykové plochy. Zmenšuje tak interakciu povrchových mikronerovností a nemôžu vznikáť podmienky pre vznik adhézných mikrospojov. Pri nepriaznivom

mazaní, ak majú materiály podobné chemické vlastnosti, nastáva zvrávanie za studena a zadieranie.

2 METÓDY A MATERIÁL

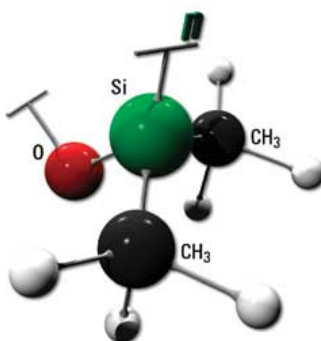
2.1 Skúšobné mazacie oleje

Na experiment boli použité tri rôzne typy mazacích olejov, ktorých vlastnosti sú uvedené v tabuľke 1. V skúšobných vzorkách mazacích olejov bol sledovaný sklon k tvorbe peny a stabilita peny a vplyv penenia maziva na adhézne opotrebovania s a bez protipeniacej prísady, ktorým bol polydimetylsiloxan (PDMS) na báze silikónového oleja. Základná chemická štruktúra proti peniacej prísady je zobrazená na obrázku 3.

Tabuľka 1 Základné vlastnosti skúšobných mazacích olejov

Parameter	Norma	E	T	M
Kinematická viskozita pri 100 °C mm ² .s ⁻¹	STN EN ISO 3104	9,61	10,8	5,26
Kinematická viskozita pri 40 °C mm ² .s ⁻¹	STN EN ISO 3104	46,41	68	31,26
Viskozitný index	ISO 2909	198	150	107
Bod vzplanutia °C	STN EN ISO 2592	220	230	< 170
Bod tuhnutia °C	ISO 3016	- 54	- 39	- 10
Vzhľad a farba	vizuálne	číra, žltohnedá	číra, žltohnedá	číra, žltohnedá

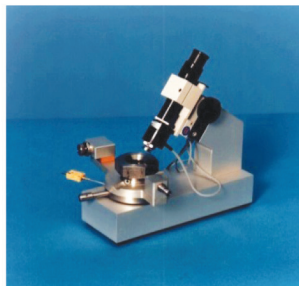
Poznámka: E – syntetický biologicky rozložiteľný hydraulický olej; T – viacúčelový olej pre traktory a inú mobilnú techniku; M – rezný olej na ropnom základe



Obrázok 3 Základná chemická štruktúra polydimetylsiloxanu

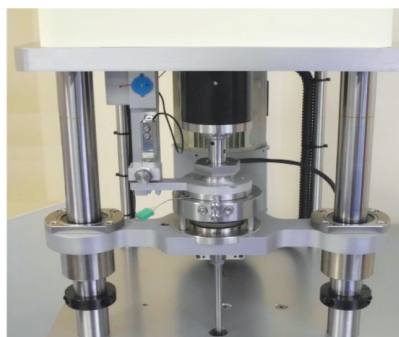
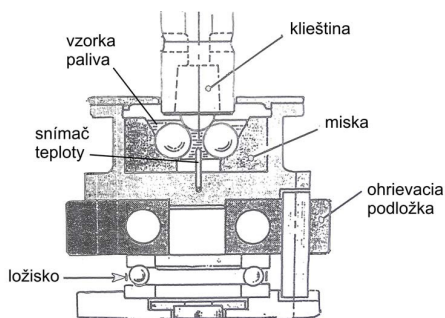
2.2 Zariadenie pre meranie

Pre vykonanie skúšok bol použitý univerzálny štvorgulôčkový prístroj Plint TE82 (obr. 4) na stanovenie protioderových a protizáderových vlastností mazacích olejov, mazivosti palív a iných kvapalín.



Obrázok 4 Štvorgulôčkový prístroj Plint TE82

Prístroj sa skladá z dvoch samostatných celkov – zo samotného prístroja a ovládacej skrine. Prístrojová veža je upevnená na pevnom kovovom stole, ktorý zabezpečuje stabilitu a dostupnosť obsluhy. Vo vrchnej časti prístrojovej veže je pohonná jednotka s prevodom. Prevod je tvorený remeňom. Pre nízkootáčkové skúšky je remeň ozubený, pre vysokootáčkové skúšky remeň plochý. Elektromotor poháňa cez prevod dutý hriadeľ, na ktorého spodnom konci je odnímateľné špeciálne skľučovadlo pre vrchnú guľôčku. Skľučovadlo počas skúšky pevne upína guľôčku a otáča sa s ňou otáčkami hriadeľa. Skľučovadlo s guľôčkou sa po dokončení skúšky z hriadeľa vytlačí tyčou, ktorá sa nasúva cez vrchný otvor do dutého hriadeľa, kde sa zatáča do závitú a vytlačí skľučovadlo. K vrchnej guľôčke sa pritláča spodná časť cez rameno, ktoré umožňuje pomocou závaží vytvoriť požadované osovú zaťaženie. Rameno je upevnené na otočnom čape. Na jednom konci ramena je plocha na uloženie závažia, na druhom, kratšom konci je pevné protizávažie na vyváženie. Na rameno, v presne definovanej vzdialenosti od otočného čapu, je upevnený úložný valec, v ktorom sú súčasťou spodnej časti. 1:20 je pomer medzi vzdialenosťou úložného valca od otočného čapu a vzdialenosťou konca ramena so závažím od otočného čapu. Tento úložný valec môže vykonávať len zvislý pohyb, teda buď pritláča spodné tri guľôčky k vrchnej (rameno je spustené), alebo sústavu odľahčuje (rameno je podopreté). Uloženie guľôčok je znázornené na obrázku 5.



Obrázok 5 Štvorgulôčkový prístroj so zaťažením

Miska s guľôčkami je priamo súčasťou momentového ramena, na ktorého konci sa snímajú vibrácie. Po nasadení a zatiahnutí fixačnej matice momentovým kľúčom sú guľôčky zaistené a nehybné. Pri skúškach, kedy môže dôjsť k zvareniu guľôčok, rameno opierajúce sa o snímač vibrácií pracuje ako poistka. To znamená, že pri zvarení sa miska s ramenom s otáčajúcim sa hriadeľom silovo spoja a rameno sa „oprie“ o snímač vibrácií takým rázom, že dôjde k vypnutiu motora. Prístroj je určený aj na skúšky, pri ktorých je predpísaná zvýšená teplota.

2.3 Guličky

Na meranie sú určené ložiskové guľôčky odpovedajúce technickým požiadavkám podľa STN 02 3680 s priemerom 12,7 mm, stupeň presnosti IT 16 a tvrdosťou 63 až 65 HRC podľa Rockwella. Guľôčky sú určené týmto zložením: C – 0,95 až 1,10%, Mn – 0,25 až 0,45%, Si – 0,15 až 0,35%, Pmax. – 0,027%, Smax. – 0,020%, Cr – 1,30 až 1,65%, Nimax. – 25 %, Cumax. – 0,25 %, (Ni+Cu)max. – 0,50%.

3 VÝSLEDKY

3.1 Stanovenie odporu proti tvorbe peny mazacích olejov

Skúška bola vykonaná v súlade s normou STN 65 6238. Metóda je založená na meraní objemu peny mazacích olejov pri určených teplotách – sekvencia I (pri teplote 24 °C), sekvencia II (teplote 93,5 °C) a sekvencia III – teplote 24 °C po ochladení z teploty 93,5 °C, ktorá sa vytvorí po priechode vzduchu olejom za 5 minút ± 3 s (penivosť) a na meraní objemu peny po 10 min státia alebo času do úplného vytratenia peny (stálosť peny). Výsledky stanovenia penivosti mazacích olejov bez protipeniacej prísady na báze silikónového oleja (PDMS) a s pridaním 15 ppm protipeniacej prísady uvádza tabuľka 2.

Tab. 2 Výsledky stanovenia penivosti mazacích olejov bez a s proti peniacou prísadou

Penenie	E	T	M
bez PDMS	sklon/stabilita (ml/ml)		
Sekvencia I	520/250	50/0	360/0
Sekvencia II	120/0	300/0	280/0
Sekvencia III	560/380	60/0	440/0
s PDMS			
Sekvencia I	150/0	0/0	0/0
Sekvencia II	100/0	20/0	20/0
Sekvencia III	40/0	0/0	0/0

3.2 Stanovenie odporu proti opotrebovaniu

Mazacie vlastnosti boli skúmané medzi pevnými tvrdými povrchmi skúšobných guľôčok, ktoré sú v pohybe a sú k sebe pritláčané stanovenou silou. Uzol trenia má tvar pyramídy, ktorú tvoria štyri rovnaké, oceľové guľôčky. Tri spodné sú umiestnené v miske. Štvrtú, vrchnú guľôčku fixuje skl'učovadlo, spojené cez hriadeľ a prevod s elektromotorom. Všetky kontaktné miesta sú počas celého trvania skúšky ponorené v skúmanej vzorke mazacieho oleja. Pohybom otáčajúcej sa guľôčky po troch nehybných guľôčkach vzniká zmiešané (podľa stavu dotyku trecích dvojíc) trenie, dôsledkom ktorého vzniká opotrebenie. Veľkosť opotrebenia je priamo závislá od kvality mazania. Smerodajná je teda veľkosť opotrebenia. Opotrebenie predstavuje trecia stopa vo väčšine prípadov v tvare podobnom elipse. Rozmery elipsy určujeme dvoma na seba kolmými priermi, z ktorých počítame strednú hodnotu.

Experiment bol vykonaný štandardnou skúšobnou metódou podľa normy STN EN ISO 20623 s využitím 4-guľôčkového prístroja, CCD kamery a digitálneho mikroskopu. Skúška bola vykonaná pri 3 rýchlostiach (1 200, 1 800 a 2 200 min⁻¹), zaťaženi 392 N, teplote 55 °C a čase 60 minút. Čím bola vrstva mazania hrubšia, zvarenie guľôčok sa uskutočnilo pri vyššom zaťaženi a opotrebovanie bolo nižšie. So zvyšujúcou sa rýchlosťou vzniká medzné mazanie a opotrebovanie sa zvyšuje. Výsledky sú uvedené v tabuľke 3.

Tab. 3 Výsledky trecích stôp pri použití 4-guľôčkového tribotestera

Test opotrebovania	E	T	M
bez PDMS	veľkosť trecej stopy (mm)		
Otáčky (min ⁻¹)			
1200	0,42	0,37	0,58
1800	0,39	0,42	0,65
2200	0,44	0,47	0,84
s PDMS			
1200	0,42	0,37	0,59
1800	0,40	0,33	0,65
2200	0,37	0,38	0,72

4 DISKUSIA A ZÁVERY

Na základe vykonaného testovania vlastností maziva a to odolnosti proti peneniu a opotrebovaniu sme dospeli k týmto záverom:

- mazivá s nižšou viskozitou majú vyšší sklon k tvorbe peny, mazivá s vyššou viskozitou majú vyššiu stabilitu proti tvorbe peny,
- pri všetkých testovaných mazivách bolo pridaním proti peniacej prísady pozorované zlepšenie sledovaných vlastností (penivosť aj opotrebovanie),
- so zvyšovaním rýchlosti bolo vo väčšine prípadov zaznamenané zvýšenie opotrebovania bez rozdielu či bola alebo nebola použitá protipeniaca prísada,
- pri nižších rýchlostiach bolo zaznamenané kvapalinové mazanie a nedochádzalo k žiadnym významným zmenám pri opotrebovaní,
- pri vysokých otáčkach ($2\,200\text{ min}^{-1}$) bol zaznamenaný štatisticky významný rozdiel pri mazivách s alebo bez protipeniacej prísady – vznik medzného mazania.

LITERATÚRA

- AHMADI, H., MOLLAZADE, K. 2009. An Oil Condition Monitoring Technique to Determine the Optimal Oil Type and Maintenance Schedule. *Structural Health Monitoring*, 8 (4): 331–339. ISSN 1475-9217. doi:10.1177/1475921709102137.
- DUNCANSON, M. 2003. Effect of Physical and Chemical Properties on Foam in Lubricating Oils. *Lubrication engineering*, 59 (5), s. 9 – 13. ISSN 0024-7154.
- JURČA, V., ALEŠ, Z. 2012. Maintenance management systems in agriculture in the Czech Republic. *Eksploatacja i niezawodność, Maintenance and Reliability*, roč. 14, č. 3, s. 233 – 238. ISSN 1507-2711.
- MAYER, A. 2008. Causes and Solutions for Foaming in Oil. *Machinery Lubrication*.
- PERIĆ, S., NEDIĆ, B., TRIFKOVIĆ, D., VURUNA, M. 2013. An Experimental Study of the Tribological Characteristics of Engine and Gear Transmission Oils. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 59 (7 – 8), 443 – 450. ISSN 0039-2480. doi:10.5545/sv-jme.2012.870.
- PEŤKOVÁ, V., STOPKA, J., PAČAIOVÁ, H., BALLA, J., KUREKOVÁ, M., DEMIAN, P., SLOBODA, A., KMEC, P., LOŠONSKÝ, M. 2012. Tribotechnika v teórii a praxi. Vydavateľstvo VIENALA: TU v Košiciach: Strojnícka fakulta, s. 366. ISBN 978-80-8126-057-5.
- PODSIADLO, P., STACHOWIAK, G. W. 2000. Scale-invariant analysis of wear particle morphology-a preliminary study. *Tribology International*, 33(3): 289 – 295. ISSN 0301-679X. DOI:10.1016/S0301-679X(00)00044-X.
- POŠTA, J., 2006. *Provoznosť strojů*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2. vydání, Praha. ISBN 80-213-0966-0.
- SYAHRULLAIL, S., WIRA, J. Y., WAN NIK, W. B., FAWWAZ, W. N. Friction Characteristics of RBD Palm Olein using Four-Ball Tribotester. *Applied Mechanics and Materials*. vol. 315 s. 936-940. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.315.936.
- STACHOWIAK, G. W. 1998. Numerical characterization of wear particles morphology and angularity of particles and surfaces. *Tribology International*, 31(1): 139 – 157, ISSN 0301-679X. doi:10.1016/S0301-679X(98)00016-4.
- WOOTON, D., MUNSON, G. L., LIVINGSTONE, G. 2010. Detect and control lube foaming – The causes and the fixes depend on the additives. *PlantServices*.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Marián Kučera, PhD.,
 Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene,
 Študentská 26, SK – 960 53 Zvolen
 e-mail: marian.kucera@tuzvo.sk

VPLYV POSUVNEJ RÝCHLOSTI A FREKVENCIE OTÁČANIA NÁSTROJA NA KRÚTIACI MOMENT PRI VRTANÍ

IMPACT OF FEED SPEED AND ROTATION SPEED OF TOOL ON TORQUE DURING DRILLING

Jaroslav ĽALÍK – Ľubomír JAVOREK

ABSTRAKT: Vrtanie je najpoužívanejším spôsobom výroby otvorov pre kolíky, skrutky, závitky potrebné pre spájanie dielcov. Článok opisuje vplyv rýchlosti otáčania nástroja a rýchlosti posuvu na krútiaci moment pri vrtaní dreva. Porovnáваме namerané hodnoty krútiaceho momentu pri rôznych posuvných rýchlostiach a rôznych rýchlostiach otáčania nástroja.

Kľúčové slová: Vrtanie, posuvná rýchlosť, krútiaci moment

ABSTRACT: Drilling is the most widely used method of production holes for pins, screws, thread required for joining of parts. This article describes the impact of rotation speed of tool and feed speed to torque when we drilling wood. Comparing the measured torque values at different feed speeds and different speeds of rotation of the tool.

Key words: Drilling, feed speed, torque

1. ÚVOD

Vrtanie v porovnaní s pílením, frézovaním či brúsením nie je také frekventované, napriek tomu je potrebné mu venovať obzvlášť veľkú pozornosť. Väčšina vytváraných otvorov sa vyhotovuje vrtaním. Preto je energetická a ekonomická náročnosť nástrojov veľmi relevantná a pre efektívne a produktívne využitie nástrojov je potrebné sledovať a znižovať ju. Veľkosť krútiaceho momentu je potrebné udržať v primeraných hraniciach aj z hľadiska tepelného zaťaženia nástroja.

Zníženie trenia v mieste rezu znižuje krútiaci moment a tým aj tepelné zaťaženie reznej hrany. Znížením trenia znižujeme straty a tým aj energiu vynaloženú na vrtanie.

Pri zmenšení krútiaceho momentu a pri zachovaní rovnakej frekvencie otáčania sa znižuje opotrebenie nástroja, čo zaisť vyššiu životnosť nástroja, a klesá výkon potrebný na vrtanie čím sa priamo znižuje spotreba elektrickej energie, ktorú stroj odoberá zo siete. Znižovaním opotrebenia nástrojov sa skraca čas prestojov potrebných na výmenu nástroja a znižujú sa náklady na preostrenie otupených nástrojov, prípadne na kúpu nových nástrojov.

2. CHARAKTERISTIKA VRTANIA

2.1 Prierezové parametre triesky

Ak sa jedná o vrták s jednou reznou hranou, bude teoretický prierez odoberanej triesky A_{D1} daný vzťahom:

$$A_{D1} = b_D \cdot h_D = \frac{f_n}{1} \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{D_n}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{D_n \cdot f_n}{2} = \frac{D_n \cdot f_z}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (1)$$

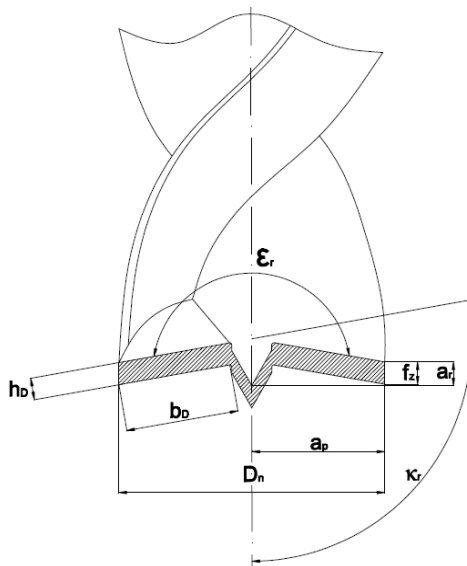
kde: b_D – šírka prierezu triesky,
 h_D – hrúbka prierezu triesky,
 f_n – posuv na otáčku.

Pri nástroji s dvoma reznými hranami, bude teoretický prierez triesky odoberanej jednou reznou hranou daný vzťahom:

$$A_{D1} = b_D \cdot h_D = \frac{f_n}{2} \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{D_n}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{D_n \cdot f_n}{4} = \frac{D_n \cdot f_z}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (2)$$

Ak sa jedná o vrták s dvoma reznými hranami, bude výsledný prierez odoberanej vrstvy daný vzťahom:

$$A_D = 2 \cdot A_{D1} = \frac{D_n \cdot f_n}{2} = D_n \cdot f_z \quad [\text{mm}^2] \quad (3)$$



Obr. 1: Prierezové parametre triesky pri vrtaní (h_D – hrúbka prierezu triesky, b_D – šírka prierezu triesky, f_z – posuv na zub, a_p – šírka rezu, a_r – hĺbka rezu, D_n – priemer nástroja, ϵ_r – uhol hrotu, κ_r – uhol nastavenia hlavnej reznej hrany)

2.2 Silové a energetické parametre

Proces vrtania je zaradený do kategórie uzavretého rezania, pri ktorom sa najčastejšie výpočet silových veličín realizuje experimentálne, pretože je zložitý.

Všeobecne pre reznú silu F_c , čiže pre tangenciálnu zložku výslednej sily, ktorá pôsobí na ramene $\frac{D_n}{4}$, platí:

$$F_{c1} = F_{c2} = F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot \frac{D_n \cdot f_n}{4} \quad [N] \quad (4)$$

kde: k_c – merná rezná sila,

A_D – prierez triesky odobratý pri jednej otáčke nástroja.

Pre rezný moment odpovedajúci tejto sile platí:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D_n}{2} = k_c \cdot \frac{D_n^2 \cdot f_n}{8} \quad (5)$$

Pri vrtaní hlbokých dier je veľkosť rezného krútiaceho momentu daná krútiacim momentom M_c pre odobranie triesky, ďalej krútiacim momentom M_{kf} , ktorý je vytvorený trením fazetky vrtáka o dieru a krútiacim momentom M_{kt} , ktorý je spôsobený trením triesky o stenu drážky vrtáka a otvoru.

$$M_k = M_c + M_{kf} + M_{kt} \quad [Nm] \quad (6)$$

Pri narastaní hĺbky otvoru rastú aj trecie momenty M_{kf} a M_{kt}

Pre výpočet osovej sily F_{of} z veľkosti reznej sily F_c sa používa empirický vzťah:

$$F_{of} = k \cdot F_c \quad [N] \quad (7)$$

Konštanta k sa určuje v závislosti od veľkosti otupenia nástroja a jej veľkosť sa pohybuje v širokom rozmedzí. Tak ako výsledný krútiaci moment aj výsledná osová sila je daná zložkami:

$$F_{of} = F_f + F_{ff} + F_{ft} \quad [N] \quad (8)$$

3. EXPERIMENT

3.1 Stroj, nástroj, meracia aparatura

Stroj

Na vrtanie bola pri experimente použitá stĺpová vrtáčka typu RFh 75/1750 od výrobcu Csepel (Obr. 2). Technické parametre sú uvedené v tabuľke 1.



Obr. 2: Vrtáčka RFh 75/1750

Tabuľka 1: Technické parametre stroja

Rozmery stroja (d × š × v)	3 300 mm × 1 400 mm × 3 650 mm
Frekvencia otáčania vretena	19 min ⁻¹ – 1900 min ⁻¹
Posuv	0,047 mm – 2 mm
Max. priemer vrtáka	75 mm
Rozmery pracovného stola (d × š)	1 100 mm × 2 050 mm
Celkový príkon	11 kW

Nástroj

Na vrtanie sa ako nástroj použili 3 kusy skrutkovitých vrtákov na drevo (Obr. 3). Nástroje boli odstupňované v troch priemeroch (Ø12 mm, Ø16 mm, Ø20 mm).



Obr. 3: Vrták Ø12 použitý pri vrtaní

Meracia aparatúra

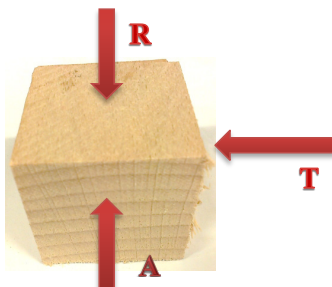
Na meranie osovej sily a rezného momentu bolo pri experimente použité meracie zariadenie od firmy Kistler (Obr. 4). Meracie zariadenie pozostáva z dynamometra typu 9272 (merací rozsah osovej sily -5 kN až 20 kN, merací rozsah momentu -200 Nm až 200 Nm), multi-kanálového zosilňovača 5070A, 16-bitového A/D prevodníka 5697A a notebooku s meracím programom Dynoware.



Obr. 4: Meracia aparatúra od firmy Kistler

Materiál a podmienky experimentu

Pri experimente boli vŕtané vzorky s rozmermi ($d \times \text{š} \times v$ – $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) z dreveniny buk, ktoré boli s vlhkosťou $20\% \pm 2$. Vzorky boli upnuté tak, aby bolo možné vŕtanie v troch smeroch na drevné vlákna (axiálne, radiálne, tangenciálne) (Obr. 5).



Obr. 5: Vzorka dreva a smery vŕtania pri experimente

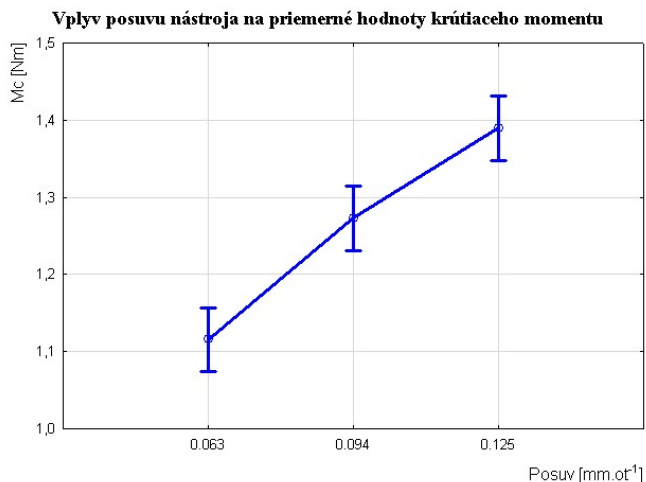
Frekvencia otáčania nástroja bola menená v troch stupňoch 375 min^{-1} , 475 min^{-1} , 600 min^{-1} . Posuv bol menený v troch stupňoch a to $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$.

4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

4.1 Vplyv posuvu na krútiaci moment

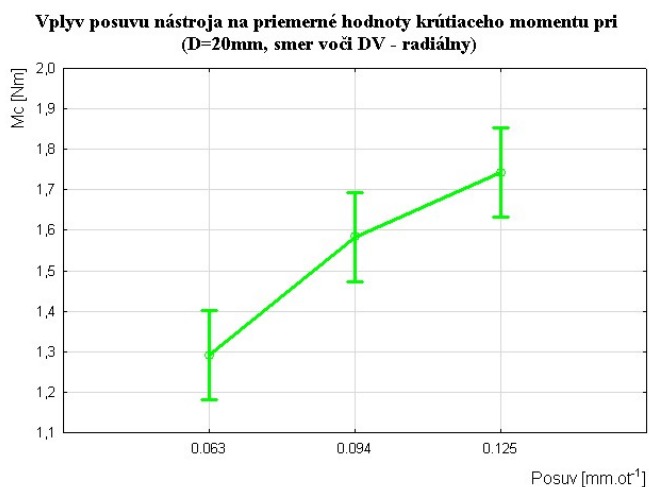
Z grafu (Obr. 6) je zreteľne vidieť, že zmena posuvu značne ovplyvňuje krútiaci moment. Pri zmene posuvu z $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ na $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ vzrástli priemerné hodnoty krútiaceho momentu približne o $14,3\%$ a pri zvýšení posuvu na $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ vzrástli

priemerné hodnoty krútiaceho momentu o 22,9% oproti hodnote pri najnižšom posuve. Z tohto merania vyplýva, že priemerné hodnoty krútiaceho momentu narastajú skoro lineárne s nárastom posuvu.



Obr. 6: Priemerné hodnoty krútiaceho momentu namerané pri rôznych posuvoch

Pri zmene smeru vŕtania vzhľadom na drevné vlákna sa v niektorých prípadoch prejavila ešte väčšia zmena krútiaceho momentu. Napríklad pri nástroji s priemerom 20 mm a radiálnom smere vŕtania (Obr. 7) je viditeľná väčšia zmena priemerných hodnôt krútiaceho momentu. Pri zmene posuvu z 0,063 mm·ot⁻¹ na 0,094 mm·ot⁻¹ boli priemerné

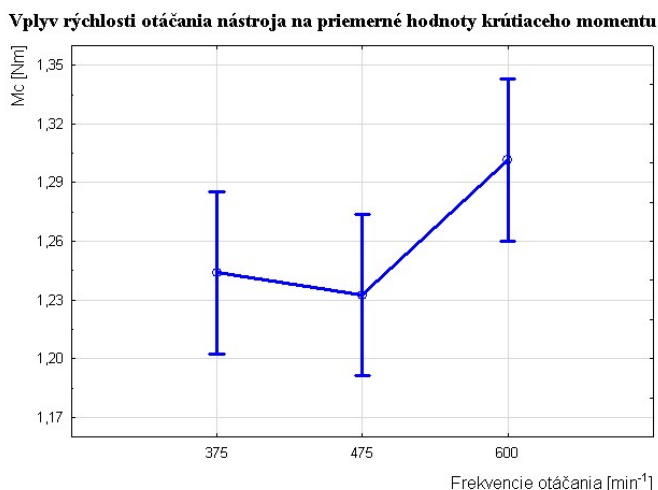


Obr. 7: Priemerné hodnoty krútiaceho momentu nameraného pri nástroji D = 20 mm a radiálnom smere vŕtania

hodnoty krútiaceho momentu zvýšené o 22,5% a pri zmene posuvu na hodnotu 0,125 mm·ot⁻¹ sa priemerné hodnoty krútiaceho momentu zvýšili o 34,9% oproti najnižšiemu posuvu.

4.2 Vplyv frekvencie otáčania na krútiaci moment

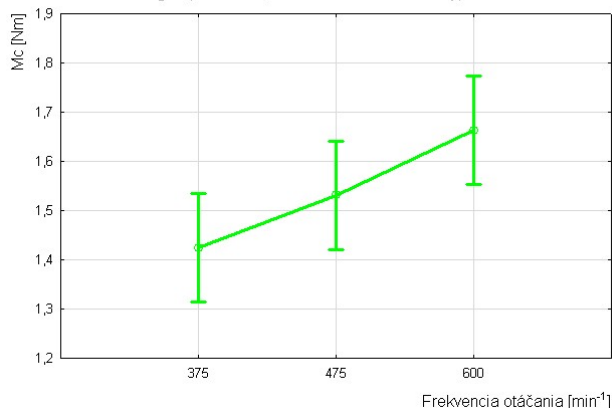
Na (Obr. 8) je zobrazený graf závislosti krútiaceho momentu od frekvencie otáčania nástroja. Z grafu je viditeľné, že krútiaci moment nerastie so zvyšovaním frekvencie otáčania nástroja lineárne. Pri zmene frekvencie otáčania nástroja z 375 min⁻¹ na 475 min⁻¹ dokonca klesli priemerné hodnoty krútiaceho momentu nástroja o 0,8%. Pri zvýšení frekvencie otáčania nástroja na 600 min⁻¹ bol nárast krútiaceho momentu približne o 4,8% v porovnaní s najnižšími otáčkami.



Obr. 8: Závislosť priemerných hodnôt krútiaceho momentu od frekvencie otáčania nástroja

Na (Obr. 9) je zobrazený graf závislosti krútiaceho momentu od frekvencie otáčania nástroja pri radiálnom smere vŕtania a nástroji Ø 20 mm. Pri tomto smere vŕtania a tomto nástroji došlo k výraznejšej zmene priemerných hodnôt krútiaceho momentu. Pri zvýšení frekvencie otáčania nástroja z 375 min⁻¹ na 475 min⁻¹ sa zvýšili priemerné hodnoty krútiaceho momentu o 7,7% a pri zvýšení na 600 min⁻¹ sa priemerné hodnoty krútiaceho momentu zvýšili o 16,9% oproti najnižšej frekvencii otáčania. Nárast priemerných hodnôt krútiaceho momentu pri zvýšení frekvencie otáčania nástroja je menší oproti nárastu pri zvýšení posuvu.

Vplyv rýchlosti otáčania nástroja na priemerné hodnoty krútiaceho momentu pri ($D=20\text{mm}$, smer voči DV - radiálny)



Obr. 9: Priemerné hodnoty krútiaceho momentu nameraného pri nástroji $\text{Ø}20\text{ mm}$ a radiálnom smere vrtania

5. ZÁVER

Pri tomto meraní bolo preukázané, že krútiaci moment pri vrtaní bukovej dreveny skrutkovicovým vrtákom lineárne narastá pri zvyšovaní posuvu nástroja. Pri zdvojnásobení posuvu narástol krútiaci moment približne o 22,9 %, čo je hodnota prijateľná vzhľadom na to, že sa zdvojnásobila rýchlosť vrtania. Takže je z hľadiska časovej hospodárnosti možné používať najvyšší posuv, ktorý zvýši efektivitu vrtania a enormne nezvýši energetickú náročnosť procesu. Pri porovnávaní hodnôt krútiaceho momentu pri zmene frekvencie otáčania nástroja sa nepreukázalo výrazné zvýšenie hodnôt krútiaceho momentu. V priemere došlo len k zvýšeniu o 4,8 % pri porovnaní hodnôt pri najnižšej a najvyššej frekvencii otáčania nástroja. Pri zmene frekvencie otáčania z 375 min^{-1} na 475 min^{-1} sa priemerné hodnoty krútiaceho momentu dokonca znížili o 0,8 % čo poukazuje na to, že táto frekvencia otáčania nástroja je najvhodnejšia.

Literatúra

- JAVOREK, L., OSWALD, J. (2001): Possibilities for monitoring of drilling. Medzinárodná vedecká konferencia „*Woodscience and engineering in the third millennium*“. Brašov 16. – 17. November 2001.
- JAVOREK, L. (2006): *Nástroje* (1. časť). Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 171 s. ISBN 978 80-228-1714-1.

Kontaktná adresa:

Ing. Jaroslav Lalík, PhD.
e-mail: lalik.jaroslav@gmail.com

doc. Ing. Ľubomír Javorek, CSc.
e-mail: lubomir.javorek@tuzvo.sk

Katedra drevárskych strojov a zariadení, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, SK-960 53 Zvolen

POROVNANIE TRECÍCH CHARAKTERISTÍK V KONTAKTNEJ VRSTVE KLZNÝCH ULOŽENÍ

FRICION CHARACTERISTICS COMPARISON AT CONTACT LAYER OF THE SLIDING FIT

Ján MARIENČÍK – Ján TURIS – Pavel BEŇO – Adam DROBA

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá experimentálnym zisťovaním koeficientu trenia pri rôznych typoch klzných ložísk, ktoré sú určené na prevádzku bez dodatočného domazávania. V teoretickej časti práce sa nachádza prehľad problematiky zameraný na materiálové vlastnosti povrchu skúmaných klzných uzlov. Experimentálna časť pozostáva z vyhodnotenia merania trecích charakteristík.

Kľúčové slová: kontaktná vrstva, klzné uloženie, koeficient trenia

ABSTRACT: The article deals with the experimental detection of the coefficient of friction for different types of sliding bearings, which are intended for operation without of additional relubrication. In the theoretical part of the paper provides an overview of issues focused on the material properties of the surface of the investigated sliding nodes. Experimental part of consists evaluation of measuring the friction characteristics.

Keywords: contact layer, sliding fit, friction coefficient

1 ÚVOD

Kontakt alebo dotyk medzi prvkami v tribologickom systéme určuje správanie sa a vlastnosti systému pri splnení požiadaviek na funkciu. Pre správne definovanie kontaktných procesov je potrebné myslieť na celý rad faktorov, ako napríklad na makro a mikrogeometriu spolupôsobiacich telies, materiálové vlastnosti, druh a rýchlosť pohybu, veľkosť zaťažujúcich síl. (Blaškovič, 1990)

1.1 Štruktúra a vlastnosti technických povrchov

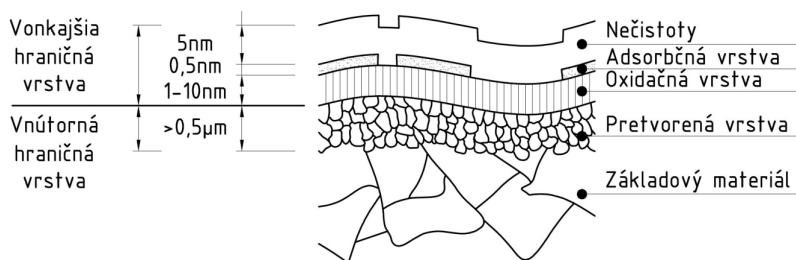
Tribologický uzol je ohraničený systémovou obálkou. Vstupy do tribologického systému sú dané prevádzkovými premennými faktormi, ktoré pôsobia na prvky tribosystému, kde dochádza k procesom trenia a opotrebenia. Pre popis týchto procesov je potrebné sledovať a merať tribologické charakteristiky. Povrchové spracovanie základného materiálu má dôležitú funkciu pre správnu funkciu tribosystému. (Zdravecká, 2012)

Technické povrchy sú opísané geometricky ohraničenými vrstvami. Materiálové vlastnosti povrchu a vnútorného materiálu technických častí vykazujú podstatné rozdiely

pokiaľ ide o chemické zloženie, tuhosť a štruktúru. Usporiadanie jednotlivých vrstiev technických povrchov kovových materiálov je zjednodušene znázornené v obrázku 1. Povrch je charakterizovaný troma oblasťami, ktoré sú: základový materiál, vnútorné a vonkajšie hraničné vrstvy.

Vnútorná hraničná vrstva pozostáva v závislosti od technológie výroby zo základného materiálu spojeného s pretvorenou alebo spevnenou vrstvou. Vonkajšia hraničná vrstva sa skladá väčšinou zo základného materiálu rôzneho zloženia a môže pozostávať z oxidačnej vrstvy, adsorpčnej vrstvy a nečistôt. Pri kontaktných javoch sú práve tieto hraničné vrstvy veľmi dôležité. (Czichos, 2010)

Hrúbka jednotlivých vrstiev závisí od procesov ich spracovania. V priebehu technologických procesov vznikajú zvyškové napätia, ktoré sa vyvíjajú pod vplyvom týchto procesov. Povrchovú integritu charakterizuje mikrogeometria, mechanické a fyzikálne vlastnosti. Defekty na povrchu môžu vzniknúť v pôvodnom materiáli pri jeho výrobe, technológiou povrchového spracovania alebo nedostatočným riadením parametrov výrobného procesu.



Obr. 1 Schematické zobrazenie prierezu kovového povrchu

Tretia vrstva v dôsledku chemickeko-tepelnej interakcie medzi vzdušnou atmosférou a kovom počas trenia môže oxidovať. Rýchlosť chemických reakcií rastie so zvyšovaním teploty, ktorá vzniká v trecej vrstve v dôsledku trenia. (Zdravecká, 2012)

Pre bežné prevádzkové podmienky je najvhodnejšie využiť pre konštrukciu klzných uložení s prevádzkou bez prívodu maziva materiály, ktoré obsahujú tuhé mazivá v štruktúre, najčastejšie polytetrafluoretylén (PTFE). Podrobnejšie sú vlastnosti týchto materiálov popísané v tabuľke 1. (Barysz, 1995)

Tab. 1 Vlastnosti plastických hmôt (Barysz, 1995)

Polymér	Medza klzu (objemová) (MPa)	Medza pevnosti v šmyku (objemová) (MPa)	Medza pevnosti v šmyku (povrchová) (MPa)	Súčiniteľ trenia (za sucha) (-)
Polyvinylchlorid (PVC)	150	50	70	0,4 až 0,5
Polystyrén (PS)	200	40	80	0,4 až 0,5
Polymetylmakrylát (PMMA)	200	60	100	0,4 až 0,5
Polykaprolaktám (PA)	100	60	50	0,3
Polyetylén (PE)	20	14	10	0,6 až 0,8
Polytetrafluoretylén (PTFE)	20	20	4	0,05 až 0,1

2 METODIKA MERANIA

Hlavným cieľom experimentu bolo skúmanie a porovnanie hodnôt koeficientov trenia a taktiež porovnanie teplôt v závislosti na zaťaženi a otáčkach nameraných na klzných dvojiciach, ktoré pracujú bez domazávania a pozostávajú z klzného ložiska a hriadeľa. Meranie bolo vykonané na meracom zariadení Tribotestor M'12 (Obr. 2). Meranými vzorkami boli rozmerovo identické dva druhy klzných ložísk (Obr. 4) vyrobené z odlišných materiálov s rozmermi:

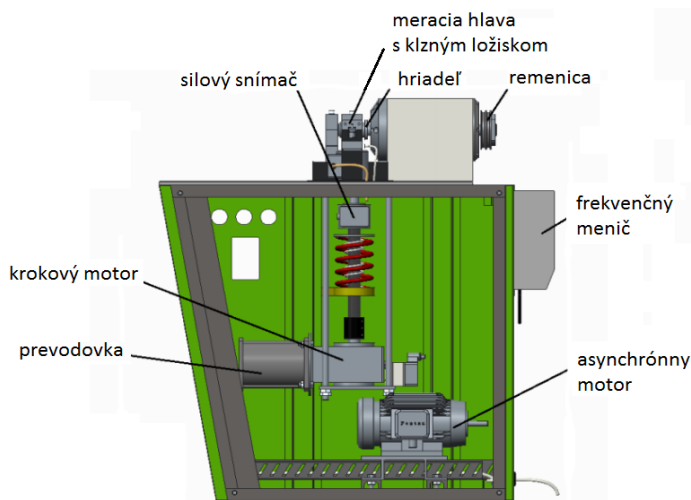
Vonkajší priemer ložiska: $D = 50 \text{ mm}$

Vnútorý priemer ložiska: $d = 40 \text{ mm}$

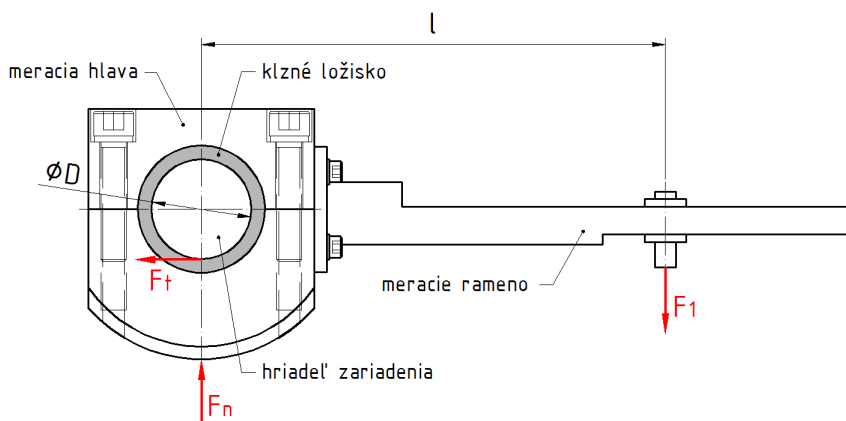
Šírka ložiska: $B = 40 \text{ mm}$

Pri meraní bolo do meracej hlavy pevne uložené klzné ložisko spolu s teplotným snímačom a nasunutú otočne na hriadeľ z materiálu E 335 (11 600) vyrobený s toleranciou $f7$ s drsnosťou Ra 0,8 (Obr. 3). Následne bol hriadeľ roztočený prostredníctvom elektromotora a frekvenčného meniča na zvolené otáčky $n = 150 \text{ min}^{-1}$. Prostredníctvom krokového motora spolu s prevodovým mechanizmom bolo na meraciu hlavu vyvíjané zaťaženie $F_n = 1 \text{ kN}$. Zaťažujúca sila potom spôsobuje vznik trecej sily F_t , ktorá sa dá vypočítať na základe rovnováhy momentov podľa vzťahu (1), pomocou sily F_1 meranej silovým snímačom a dĺžky ramena, na ktorom táto sila pôsobí. (Marienčík, 2013), (Rusnák, 2009), (Rusnák, 2012), (Sokol, 2013)

$$F_1 \cdot l = F_t \cdot \frac{D}{2} \quad (1)$$



Obr. 2 Tribotestor M'12

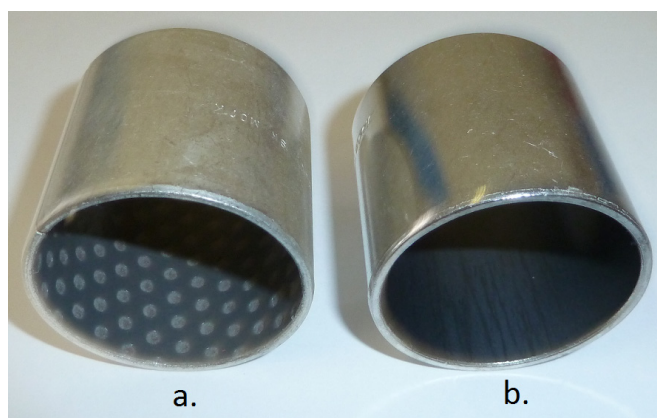


Obr. 3 Uloženie klzného ložiska v meracej hlave (Marienčík, 2013)

2.1 Charakteristika použitých klzných ložísk

Ložisko 1 je klzné ložisko z kompozitu POM (Obr. 4a). Vyznačuje sa bezúdržbovou prevádzkou. Klzná plocha ložiska je tvorená pomedenou oceľovou výstuhou, na ktorej je nanosená porézna matrica z cínového bronzu s vrstvou acetálovej živice. Tieto klzné ložiská sú vhodné pre prevádzku s počiatočnou náplňou plastického maziva a domazávanie potom nie je potrebné.

Ložisko 2 je z polyamidu PTFE (Obr. 4b). Vyrobené je z termoplastického materiálu s prídavkom PTFE a skleneného vlákna. Tento materiál eliminuje nutnosť mazania, pri dosiahnutí požadovanej únosnosti a životnosti. Pri mazaní je možné výkon ložiska ešte zvýšiť. (SKF, 2000)



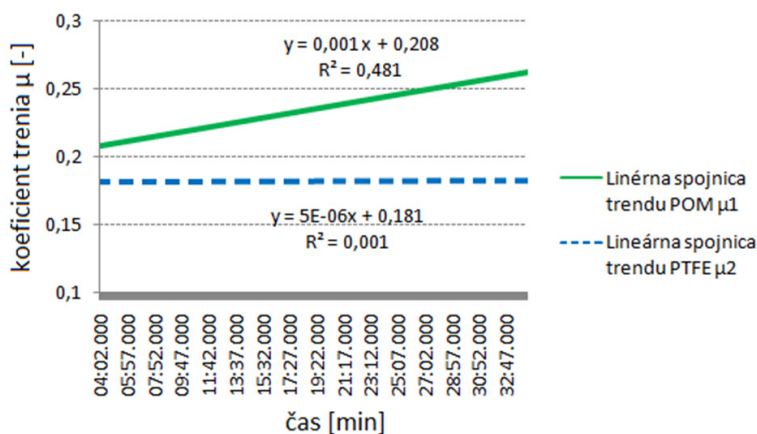
Obr. 4 Použitá klzná ložiská
a.) Ložisko 1 z kompozitu POM, b.) Ložisko 2 z polyamidu PTFE

2.2 Charakteristika skúšobného zariadenia

Skúšobný stroj Tribotester M'12 je určený vo všeobecnosti k rýchlemu zisťovaniu parametrov a vlastností klzných ložísk, hydrodynamicky mazaných klzných ložísk, pórovitých ložísk sytených mazivom, ako aj iných klzných elementov. Zariadenie je určené na simuláciu prevádzkových podmienok klzného uzla, prípadne vykonávanie modelových skúšok klzných materiálov pri štandardných rozmeroch skúmaných ložísk a hriadeľov. Môže pracovať pri konštantnej rýchlosti a premenným parametrom sa stáva merné zaťaženie, ktoré sa môže nastavovať ručne, alebo sa jeho zmena robí automaticky podľa dopredu nastaveného programu. Zariadenie umožňuje skúšku medznej zaťaženia, tzv. zadieraciu skúšku, skúšku medznej rýchlosti, tzv. rýchlostnú zadieraciu skúšku, skúšku únosnosti pre určenie diagramu p - v a skúšku životnosti.

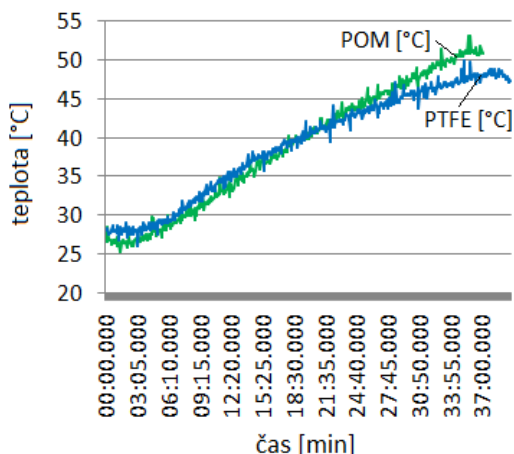
3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

V rámci experimentu boli vykonané merania na dvoch druhoch bežne dostupných klzných ložísk bez dodatočného domazávania s cieľom zistenia hodnôt koeficientu trenia pri zvolenom zaťažení a otáčkach.



Graf. 1 Závislosť koeficientu trenia na čase pri ložiskách s klznou vrstvou POM a PTFE

Výsledkom merania je zobrazenie veľkostí koeficientov trenia v závislosti na čase, ktorý možno vidieť v grafe č. 1. Je možné pozorovať, že ložisko s klznou vrstvou vykazovalo pri zvolenom zaťažení a podmienkach vyššie hodnoty koeficientu trenia, ako ložisko s vrstvou PTFE. Hodnota koeficientu trenia pri tomto ložisku mala zároveň vzrastajúci charakter a na konci merania dosiahla hodnotu približne $\mu = 0,26$. Naopak u ložiska s výstelkou PTFE mal koeficient trenia počas celej doby zaťaženia stabilný charakter a jeho veľkosť sa pohybovala pri hodnote $\mu = 0,18$.



Graf. 2 Porovnanie teplôt pri ložiskách s klznou vrstvou POM a PTFE

Ďalšou úlohou experimentu bolo aj porovnanie teplôt pri zvolenom zaťažení u oboch typov ložísk. Na základe grafu č. 2 sa dá konštatovať, že pri oboch ložiskách dochádzalo počas merania k určitému nárastu teploty, pričom priebeh bol prakticky identický.

4 ZÁVER

Z nameraných hodnôt vyplýva, že klzná ložisko PTFE vykazovalo lepšie prevádzkové vlastnosti pri rovnakom zaťažení a podmienkach, oproti ložisku POM. Nameraný súbor hodnôt však nepostačuje na jednoznačné určenie vhodnosti jedného alebo druhého ložiska pre konkrétny trecí uzol. V budúcnosti by bolo vhodné experimentálne skúmať väčší počet vzoriek, za účelom získania väčšieho reprezentatívneho množstva komplexných údajov. Priestor na ďalší výskum je možné vidieť v oblasti počiatočného mazania plastickým mazivom, pretože práve ložisko POM je ponúkané ako predmazávané bez dodatočného prívodu maziva pri prevádzke. Bolo by teda zaujímavé zistiť, ako sa tieto typy ložísk budú správať po počiatočnom predmazaní, v porovnaní s nameranými hodnotami nachádzajúcimi sa v tomto článku.

LITERATÚRA

- BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M. 1990. *Tribológia*. Bratislava: ALFA, 1990, 360 s. ISBN 80-05-00633-0
- BARYSZ, I., ČILLÍK, L., ŽIAČIK, A., PFLIEGEL, M. *Klzné uloženie. Konštrukčné a teoretické riešenia*. Žilina: VŠDŠ v Žiline, 1995, 523 s. ISBN 80-7100-2823-8
- CZICHOS, H., HABIG, K. H. 2010. *Tribologie-Handbuch*. Berlín: MercedesDruck, 2010, 757 s. ISBN 978-3-8348-0017-6

- MARIENČÍK, J., TURIS, J., BEŇO, P. 2013. *The Tribological Characteristics of the Sliding Bearing*. International Journal of Interdisciplinarity in Theory and Practice, 2013, roč. 1, č. 2, str. 90 – 93. ISSN 2344-2409
- MARIENČÍK, J., TURIS, J., BEŇO, P. 2013. *Silové a tepelné účinky na klzná ložiská bez domazávaní*. In. Technológia Europea 2013, Hradec Králové, Česká republika, 16. – 20. 12. 2013. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2013, str. 13 – 20. ISBN 978-80-87952-01-6
- RUSNÁK, J., KADNÁR, M., KUČERA, M. 2009. *Biologicky odbúratel'né oleje z pohľadu ich tribologických vlastností*. Nitra: SPU Nitra, 2009, 88 s. ISBN 978-80-552-0166-
- RUSNÁK, J., KADNÁR, M., KUČERA, M. 2012. *Výskum kľúčových parametrov klzných uložení mazaných ekologickými olejmi*. Nitra: SPU Nitra, 2012, 87 s. ISBN 978-80-552-0764-3
- SOKOL, M., DRDOL, K., KAMAS, P., MEDVECKÝ, L. 2012. *Aretačno-posuvný systém pre inovatívne spôsoby vrtania ultrahlbokých geotermálnych vrtov*. In. Národní tandemová konference Konstruování – Green Engineering, Liberec, Česká republika, 15. 11. 2012. Liberec: Technická univerzita, 2012, str. 144 – 152. ISBN 978-80-7372-937-0
- ZDRAVECKÁ, E., ONDAŠ, M. 2012. *Tribológia povrchových vrstiev*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2012, 120 s. ISBN 978-80-553-0885-2
- SKF 2000. *Kluzná pouzdra SKF*. Katalóg produktov. SKF, 2000, 45 s.

Kontaktná adresa:

Ing. Ján Marienčík,

Ing. Ján Turis, PhD.,

doc. Ing. Pavel Beňo, PhD.,

Ing. Adam Droba

Fakulta environmentálnej a výrobnéj techniky, Technická univerzita vo Zvolene

Študentská 26, SK – 960 53 Zvolen

e-mail: jmariencik@gmail.com, jan.turis@tuzvo.sk, pavel.beno@tuzvo.sk, adam.droba@tuzvo.sk

SIMULÁCIA PREMIESTŇOVANIA STROMU V PROCESSE LESNEJ ŤAŽBY HARVESTEROM

SIMULATION OF TREE MOTION IN THE PROCESS OF LOGGING OF HARVESTER

Milan MIKLEŠ

Abstrakt: Pri projektovaní lesných strojov je potrebné poznať sily, ktoré počas ich práce na ne pôsobia. Sily sa určujú z pohybových rovníc sledovanej sústavy pri využití poznatkov mechaniky ťažby stromov. V práci je stanovený matematický model na simulovanie pádu stromu, aby sme mohli určovať príslušné konštrukčné parametre stroja. Prístup dovoľuje výpočet silového pôsobenia na časti technologickej hlavice počas pádu stromu a simulovanie účinku tlačného ramena. Simulácia pohybu stromu na počítači je venovaná chovaniu stromov s rôznou hmotnosťou a rôznych tvarov pri rôznych podmienkach a v tom istom čase. V práci sú uvedené výsledky simulácie modelu mechaniky stromu.

Kľúčové slová: lesná ťažba, simulácia, ťažbové stroje

Abstract: When designing forest machines, it is necessary to know the forces acting upon them during their operation. The forces can be determined from equations of motion of the system concerned applying the knowledge of tree felling mechanics. In the present paper a mathematical model for tree fall simulation is described enabling to determine the relevant constructional parameters of the machine. This approach facilitates to calculate the forces acting upon the components of the felling head during tree fall and to simulate the effect of the pushing jib. Computer simulation of tree motion deals with the behavior of trees of different mass and different shape under different conditions and at a definite time. The paper presents the results obtained by simulation of tree fall mechanics model.

Key words: logging, simulation, logging machines

1 PROBLEMATIKA A METÓDY

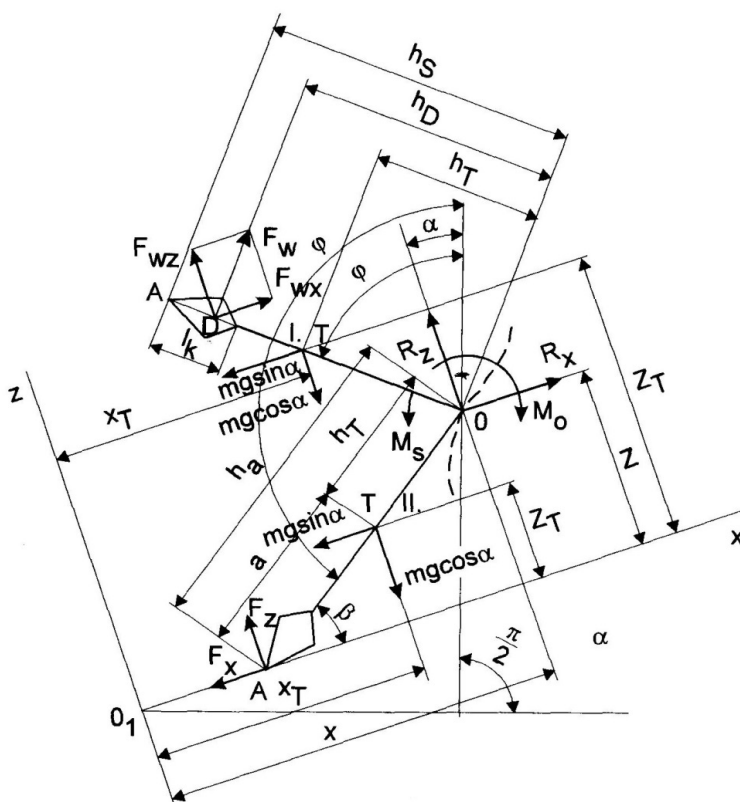
Mechanika stromu

Pri teoretickom sledovaní vzájomného pôsobenia medzi stromami a lesnými strojmi manipulátorového typu, možno urobiť predpoklad, že premiestňovanie stromu (zväzku stromov) a manipulátora sa uskutočňuje v jednej rovine. Pre určenie síl vzájomne pôsobiacich medzi strojom a stromom, určíme vo všeobecnom prípade diferenciálne rovnice

rovinného premiestňovania stromu strojmi s manipulátorom. Pre určenie všeobecných diferenciálnych rovníc rovinného pohybu stromu v procese jeho spíľovania, zväzkovania a približovania ťažbovými strojmi s hydromanipulátorom za predpokladu, že strom je absolútne tuhé, symetrické teleso, voči pozdĺžnej osi použijeme Lagrangeove rovnice druhého druhu.

Na obr. 1 je v pravouhlom súradnicovom systéme všeobecná schéma rovinného pohybu stromu pri jeho premiestňovaní napríklad, manipulátorom ťažbového stroja, keď bod 0 (prízemok stromu) sa pohybuje za pôsobenia reakčnej sily R po zadanej rovinnnej trajektórii (nezáväzne po krivke), označenej na obrázku prerušovanou čiarou; a bod D (stred korony stromu), v ktorom sa v procese premiestňovania skúma vplyv síl odporu F_w , Artamonov (1981).

Strom v procese takého zložitého pohybu má tri stupne voľnosti. Jeho ťažisko T sa pohybuje posuvne pozdĺž osi x a z ; pritom strom sa otáča okolo osi kolmej k rovine xo_1z prechádzajúcej cez bod 0 , väzby stromu hlavicou – adaptérom manipulátora.



Obrázok 1

Os x pravouhlého systému súradníc bude totožná so smerom povrchu, sklonená k horizontu o uhol α , nakoľko najobecnejším prípadom sa javí rovinné premiestňovanie stromu pri polohe stroja na naklonenom povrchu.

Pretože počet Lagrangeových rovníc druhého druhu pre holonómne systémy je rovný počtu stupňov voľnosti tuhého telesa, t.j. počtu jeho zovšeobecnených súradníc, tak pre sledovaný pohyb stromu platia rovnice:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

kde: E_K – kinematická energia stromu,

\dot{q}_i – zovšeobecnené súradnice,

Q_i – zovšeobecnené sily, zodpovedajúce súradniciam.

Vzťah pre výpočet kinetickej energie E_K stromu, uskutočňujúceho rovinný pohyb vzťahujúci sa k ťažisku stromu, má tvar:

$$E_K = \frac{1}{2} (mv_T^2 + I_T \omega^2) \quad (2)$$

kde je m – hmotnosť stromu [kg],

v_T – rýchlosť pohybu ťažiska stromu [ms^{-1}],

I_T – hmotný moment zotrvačnosti stromu k osi prechádzajúcej cez ťažisko kolmo k rovine xO_1z [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$],

ω – okamžitá uhlová rýchlosť otáčania stromu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$].

V prvom člene vzťahu (2) je kvadrát rýchlosti posuvného pohybu ťažiska stromu, ktorý je možné vyjadriť podľa vzťahu

$$v_T^2 = \dot{x}_T^2 + \dot{z}_T^2 \quad (3)$$

Podľa obrázku 1 súradnice ťažiska stromu pre jeho ľubovoľnú polohu sú:

$$x_T = x - h_T \sin(\varphi - \alpha),$$

$$z_T = z + h_T \cos(\varphi - \alpha).$$

Tieto rovnice platia aj pre polohu I, keď strom sa ukladá prízemkom do zväzku na stroj (zväzkovanie v procese pádu). Pre polohu II, keď strom sa zväzkuje (hrbkuje), alebo sa približuje pri vľčení vršku po zemi, platí:

$$x_T = x - h_T \cos \beta = x - h_T \cos \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi - \alpha) \right] = x - h_T \sin(\varphi - \alpha)$$

$$z_T = z - h_T \sin \beta = z - h_T \sin \left\{ - \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi - \alpha) \right] \right\} = z + h_T \cos(\varphi - \alpha)$$

Prvé derivácie súradníc x_T a z_T podľa času sú:

$$\dot{x}_T = \dot{x} - h_T \dot{\varphi} \cos(\varphi - \alpha)$$

$$\dot{z}_T = \dot{z} + h_T \dot{\varphi} \sin(\varphi - \alpha) \quad (4)$$

Dosadením hodnôt \dot{x}_T a \dot{z}_T z výrazu (4) do rovnice (3) dostaneme

$$v_T^2 = \dot{x}^2 + \dot{z}^2 - 2\dot{x}h_T\dot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha) - 2\dot{z}h_T\dot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) + h_T^2\dot{\varphi}^2 \quad (5)$$

Keď dosadíme do vzťahu (2) za v_T^2 z výrazu (5) a uvažujúc, že $\omega = \dot{\varphi}$, dostaneme hodnotu kinetickej energie stromu:

$$E_K = \frac{1}{2}m[\dot{x}^2 + \dot{z}^2 - 2\dot{x}h_T\dot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha) - 2\dot{z}h_T\dot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) + h_T^2\dot{\varphi}^2] + \frac{1}{2}I_T\dot{\varphi}^2 \quad (6)$$

Vypočítame parciálne derivácie kinetickej energie E vyjadrenej rovnicou (6), podľa zovšeobecných rýchlostí \dot{x} , \dot{z} a $\dot{\varphi}$:

$$\frac{\partial E_K}{\partial \dot{x}} = m\dot{x} - mh_T\dot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha),$$

$$\frac{\partial E_K}{\partial \dot{z}} = m\dot{z} - mh_T\dot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha),$$

$$\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\varphi}} = mh_T^2\dot{\varphi} - m\dot{x}h_T\cos(\varphi - \alpha) - m\dot{z}h_T\sin(\varphi - \alpha) + I_T\dot{\varphi}.$$

Derivácie týchto výsledkov podľa času:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{x}}\right) = m\ddot{x} + mh_T\dot{\varphi}^2\sin(\varphi - \alpha) - mh_T\ddot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha), \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{z}}\right) = m\{\ddot{z} - h_T[\ddot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) + \dot{\varphi}^2\cos(\varphi - \alpha)]\},$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\varphi}}\right) = mh_T^2\ddot{\varphi} + I_T\ddot{\varphi} + mh_T\dot{x}\dot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) - mh_T\dot{x}\cos(\varphi - \alpha) - mh_T\dot{z}\dot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha) - mh_T\dot{z}\sin(\varphi - \alpha)$$

Parciálne derivácie kinetickej energie podľa všeobecných súradníc:

$$\frac{\partial E_K}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial E_K}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_K}{\partial \varphi} = m\dot{x}h_T\dot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) - m\dot{z}h_T\dot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha)$$

Keď dosadíme vzťahy (7) a (8) do Lagrangeových rovníc (1) po úprave dostaneme diferenciálne rovnice rovinného pohybu stromu v procese jeho stínky, zväzkovania a približovania:

$$\begin{aligned} m\{\ddot{x} - h_T[\ddot{\varphi}\cos(\varphi - \alpha) + \dot{\varphi}^2\sin(\varphi - \alpha)]\} &= Q_x \\ m\{\ddot{z} - h_T[\ddot{\varphi}\sin(\varphi - \alpha) + \dot{\varphi}^2\cos(\varphi - \alpha)]\} &= Q_z \\ \dot{\varphi}(mh_T^2 + I_T) - mh_T[\ddot{x}\cos(\varphi - \alpha) + \ddot{z}\sin(\varphi - \alpha)] &= Q_\varphi \end{aligned} \quad (9)$$

Tvar týchto rovníc zodpovedá všeobecným rovniciam za predpokladu, že pohyb je rovinný, súradnice sa vzťahujú k ťažisku stromu.

Pre riešenie získaných diferenciálnych rovníc je nevyhnutné poznať zovšeobecnené sily Q_x , Q_z , Q_φ , ktoré sa určujú pre každý konkrétny prípad premiestňovania stromu osobitne.

Ako vidieť na obr. 1, sledovaný proces stínky, zväzkovania a približovania stromov môžeme rozdeliť na dve fázy. Jedna fáza (na obr. 1 je označená rímskou I), fáza stínky a súčasného zväzkovania, zodpovedá takému pohybu stromu, keď jeho vršok sa ešte nedotkol zeme alebo druhej podpory a premiestňuje sa vo vzdušnom prostredí, prekonávajúc jeho odpor F_W . Druhá fáza (na obr. 1 označená číslom II), fáza čistého paketovania a približovania, zodpovedá pohybu stromu pri ktorom jeho vršok po páde na zem (podperu) premiestňuje sa vlečením po jeho povrchu, prekonávajúc vlečný odpor F_x .

Hodnoty zovšeobecnených síl Q_x , Q_z , Q_φ pre sledované fázy rovinného pohybu stromu nájdeme ako koeficienty pri virtuálnych premiestneniach δx , δz , δj , vo výraze pre virtuálnu prácu všetkých síl pôsobiacich na strom, zahrňujúc reakčné sily (v mieste väzby) R_x a R_z v bode 0, (pozri obr. 1):

$$\delta A = (R_x \pm F_{W_x} + mg \sin \alpha) \delta x = (R_z \pm F_{W_z} - mg \cos \alpha) \delta z + \\ + [mgh_T \cos \alpha \sin(\varphi - \alpha) + mgh_T \sin \alpha \cos(\varphi - \alpha) \pm F_W h_D + M_s - M_o] \delta \varphi$$

Odtiaľ dostaneme zovšeobecnené sily pre sledovanú fázu I premiestňovania stromu:

$$Q_x = R_x \pm F_{W_x} + mg \sin \alpha \\ Q_z = R_z \pm F_{W_z} - mg \cos \alpha \\ Q_\varphi = mgh_T \cos \alpha \sin(\varphi - \alpha) + mgh_T \sin \alpha \cos(\varphi - \alpha) \pm h_D F_W + M_s - M_o \quad (10)$$

kde M_s – natláčací moment, ktorý pôsobí na strom k bodu 0 väzby stromu so strojom, napríklad s manipulátorom,

M_o – moment odporu proti otáčaniu stromu k bodu 0,

F_{W_x} a F_{W_z} – zložky sily F_W odporu vzduchu pri premiestňovaní stromu.

Dosadíme výrazy všeobecných síl (10) do rovníc (9) dostaneme systém diferenciálnych rovníc, ktoré opisujú vo všeobecnom tvare rovinný pohyb stromu v procese jeho stínky a súčasného zväzkovania:

$$m \{ \ddot{x} - h_T [\ddot{\varphi} \cos(\varphi - \alpha) - \dot{\varphi}^2 \sin(\varphi - \alpha)] \} = R_x \pm F_W \cos(\varphi - \alpha) - mg \sin \alpha \\ m \{ \ddot{z} - h_T [\ddot{\varphi} \sin(\varphi - \alpha) - \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi - \alpha)] \} = R_z \pm F_W \sin(\varphi - \alpha) - mg \cos \alpha \\ \ddot{\varphi} (mh_T^2 + I_T) - mh_T [\ddot{x} \cos(\varphi - \alpha) + \ddot{z} \sin(\varphi - \alpha)] = \\ = mgh_T [\cos \alpha \sin(\varphi - \alpha) + \sin \alpha \cos(\varphi - \alpha)] \pm h_D F_W + M_s - M_o \quad (11)$$

Po úprave rovnice sú použité na počítačovú simuláciu.

2 MODELOVANIE A SIMULÁCIA

Keď konštruktér navrhuje lesný stroj, postupne sa pred ním vynára veľa podstatných nezodpovedaných otázok.

Jedna z ciest je stanoviť matematický model na simulovanie padajúceho stromu, aby sa mohli vypočítať príslušné konštrukčné parametre. Takýto teoretický prístup dovoľuje výpočet silového pôsobenia (napätí) na časti technologickej hlavice počas premiestňovania a simulovanie účinku tlačného ramena. Matematický model je možné použiť tiež na štúdium účinku vodorovného tlačenia dolnej časti stromu (prízemku), potom čo bol odrezaný.

Iná aplikácia modelu môže byť na skúmanie spôsobov ako znížiť poškodenie stromu pri stínke, zmenšením nárazu stromu na zem, prípadne záchytné zariadenie. Všetky navrhované riešenia na zníženie poškodenia je možné otestovať najskôr na modeli a potom pri reálnych skúškach v lese. Takýmto spôsobom môžeme vylúčiť niektoré riešenia skôr ako sa uskutočnia drahé skúšky v teréne, pretože simulácia na modeli ukázala, že riešenie je nepraktické a neefektívne. Zostrojený matematický model je možné vyskúšať na viac všeobecných aspektoch mechaniky stromu. Naším cieľom je rozobrať a predstaviť tieto všeobecné aspekty. Popíšeme matematický model, podklady pre simuláciu.

Popis modelu

Prvým krokom v skonštruovaní modelu na simulovanie, je popis stromu ako ideálneho mechanického systému. Model popisovaného stromu má definovať všetky charakteristiky stromu, vplyvajúce na rýchlosť a smer pádu. Druhým krokom je aplikovanie všeobecných zákonov mechaniky na toto idealizované mechanické teleso a napísanie rovníc pohybu. Vytvorený model môže potom simulovať pohyb, nadobudnutú energiu a silu v každom čase. Tretím krokom je zavedenie matematického modelu na výpočet špecifických problémov. Vo štvrtom kroku výsledky z výpočtov by mali byť porovnané so skutočnými pokusmi v teréne.

Je veľa spôsobov ako popísať strom, ale pre túto úvahu, mechaniky stromu potrebujeme iba technickú charakteristiku stromu vzťahujúcu sa na definovanie dynamiky stromu.

Tieto charakteristiky, sú:

h_T – výška ťažiska stromu,

I – moment zotrvačnosti stromu k osi otáčania stromu ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$),

M_o – moment odporu proti otáčaniu stromu ($\text{N} \cdot \text{m}$),

R – reakcia v mieste väzby stromu (N),

F_w – odpor vzduchu v korune stromu vo výške h_D (N) (ťažisko priemetu plochy koruny do smeru pohybu)

G – tiaž stromu (N),

m – hmotnosť stromu v kg ,

g – gravitačné zrýchlenie – $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Výška ťažiska (h_T)

Ťažisko T je bod rovnováhy stromu. Umiestnenie T je definované vzdialenosťou h_T od miesta rezu v dolnej časti (prízemku).

Tiaž G a poloha ťažiska sú najdôležitejšie technické údaje o strome.

U nás sa tomuto problému venovali Mikleš, M.; Svitok (1987, 1989); Mikleš, J. (2007, 2010), stanovili v prácach polohu ťažiska pre naše najdôležitejšie hospodárske drevinu smrek a buk. Autori zistili, že v závislosti na druhu, veľkosti a miesta stromu, výška ťažiska je medzi 30 % – 40 % celkovej výšky stromu.

Moment zotrvačnosti na prízemku (I) – k osi otáčania

Hodnota momentu zotrvačnosti (I), závisí od hmotnosti, ktorá je rozdelená pozdĺž celej výšky stromu. Rýchlosť pádu je závislá na hodnote I . Vyšší a ťažší konár, či ostatná časť stromu viac prispieva do momentu zotrvačnosti. Príspevok do celkovej hodnoty I elementu hmotnosti dm , umiestneného vo výške h od dolnej časti sa rovná hmotnosti násobenej štvorcem výšky (mh^2). Celkový moment zotrvačnosti môže byť vypočítaný ako suma všetkých mh^2 od každého jednotlivého elementu. Moment zotrvačnosti k osi otáčania v mieste prízemku je vyjadrený v kgm^2 . Základné údaje sú v práci Barinov, Aleksandrov (1989).

Moment odporu nedorezu

Pri spil'ovaní JMP sa strom nespíli úplne, ale ostane určitá časť na zadržanie kmeňa, nedorez. Toto je i podstata pri riešení väčšiny strojov na ťažbu dreva. Táto časť dreva sa chová ako kĺbové spojenie, keď strom padá nedorez poskytuje kontrolu nad smerom dopadu. Účinok „zadržiavacieho efektu nedorezu“ na rýchlosť pádu závisí od jeho hrúbky, kde je umiestnený vo vzťahu k bodu rotácie a od odporu proti ohybu vlákien dreva. Tak ako strom padá, tento nedorez sa láme a dáva menší a menší odpor. Hoci počítačový program môže simulovať moment odporu nedorezu (M_o), všetky príklady uvedené v tomto rozbere predpokladajú, že nedorez je úplne predelený a teda, že moment odporu je nulový. Peň podopiera dolnú časť stromu. R je reakcia pňa na dolnú časť stromu.

R_x a R_z sú horizontálna a vertikálna zložka tejto reakcie.

M_o sa vyjadruje v N.m

R_x a R_z sú v newtonoch (N), ale vo všeobecnosti sa vyjadrujú ako zložky tiaže.

Sila odporu vzduchu je F_w

Tak ako strom naberá rýchlosť, odpor vzduchu v konároch rastie. Odpor vzduchu, či tvorenie brzdiacej sily je zdrojom sily F_w , ako protikladu k smeru pádu a predpokladá sa jej pôsobenie v bode F , strede odporu vzduchu v korune.

Moment odporu vzduchu je daný:

$$M_w = h_D \cdot F_w = h_D \cdot \frac{Ac_x \rho v^2}{2} \quad (12)$$

kde:

M_w – moment trecej sily v newton metroch (N.m),

h_D – výška pôsobiska sily odporu vzduchu (m),

F_w – trecia sila v newtonoch (N),

A – povrch, na ktorom pôsobí odporu vzduchu, predpokladá sa, že je to premietnutá plocha koruny so roviny, kolmej na smer pádu stromu v m^2 ,

ρ – hustota vzduchu, rovná $1,29 \text{ kg.m}^{-3}$,

c_x – koeficient aerodynamického odporu koruny stromu (bezrozmerná hodnota),

v – rýchlosť ťažiska koruny v m.s^{-1} .

Premiestňovanie stromu

Model stromu predpokladá pohyb v rovine. Všeobecný pohyb je popísaný ako rotácia okolo osi v dolnej časti, spojený s presunom prízemka stromu od pňa. Umiestnenie stromu počas pádu premiestňovania v ktoromkoľvek čase je úplne definovaná v sústave súradníc XOZ pomocou osí x a z , stredu rotácie O na prízemku stromu a uhlom φ medzi pozdĺžnou osou stromu a vertikálnou osou (Mikleš, M., 1994).

Rovnica pohybu stromu

Všeobecné zákony kinematiky môžu byť aplikované na model stromu na určenie pohybu spíleného stromu. Môžeme dostať z rovnice (11) pri $\alpha = 0$, $M_\theta = 0$ a $M_s = 0$. Posun konca stromu v smere osí x a y a otáčanie j sú definované potom nasledujúcimi rovnicami:

$$R_x - F_w \cos \varphi = Mh_T (\varepsilon \cos \varphi - \omega^2 \sin \varphi) + Ma_x$$

$$R_z - F_w \sin \varphi - G = -Mh_T (\varepsilon \sin \varphi + \omega^2 \cos \varphi) + Ma_z$$

$$Gh_T \sin \varphi - M_o - F_w h_D = I\varepsilon$$

Pre viacero problémov nie sú tieto rovnice priamym riešením. Výsledky simulácie zahrnuté do počítačového programu sú uvedené ďalej.

3 VÝSLEDKY

Táto časť je venovaná chovaniu stromov s rôznou hmotnosťou a rôznych tvarov, pri rôznych podmienkach a v tom istom čase, k čomu je s výhodou použitý počítač.

Tabuľka 1

Strom smrek	Hmotnosť M (kg)	Moment zotrvačnosti I (kgm ²)	Ťažisko h_T (m)	Výška l (m)	Priemer 1,3 m	Priemer v mieste rezu d (m)
VB1P	18,6	530,0	1,76	5,0	6	8
VB1U	39,8	1680,0	3,19	8,8	8	10
VB2P	124,9	10489,4	6,0	15,1	12	14
VB2U	332,0	28071,3	8,4	22,9	19	26
VB3P	625,7	75501,7	9,8	26,9	24	26
VB3U	1062,7	141456,6	10,8	30,0	30	31

Legenda:

Význam symbolov v označení stromu: VB – výskum Beňuš, 1 – mladina,
 P – podúrovňový strom, 2 – žrdovina,
 U – úrovňový strom, 3 – kmeňovina.

Na zistenie parametrov padajúcich stromov boli uskutočnené dva druhy simulácií:

Simulácia I – V tejto simulácii strom padá voľne pôsobením vlastnej tiaže. Neuvažuje sa s pôsobením odporu vzduchu. Predpokladá sa, že strom celý čas rotuje okolo stredu na dolnej časti pňa, a že počiatočný uhol sklonu stromu je 1° .

Simulácia II – od simulácie I sa odlišuje tým, že uvažuje aj s odporom vzduchu pri páde stromu.

Počítačový model padajúceho stromu

Základom pre vytvorenie počítačového modelu STROM boli matematické modely získané štúdiom mechaniky pádu a premiestňovania stromu. Model STROM bol vytvorený v programovacom jazyku PASCAL a pri svojej činnosti efektívne využíva štatistické a grafické možnosti programu STATGRAPHICS.

Model umožňuje prácu s uvažovaním odporu vzduchu a bez odporu vzduchu. Model s odporom vzduchu je vytvorený pre dve dreviny – smrek a borovicu. Ak je známa presná hodnota momentu zotrvačnosti stromu je ju možné zadať, v opačnom prípade si ju program sám vypočíta. Ako vstupné hodnoty sa zadávajú nasledovné veličiny:

m (kg) – hmotnosť stromu. Definičný odpor $M \in (0, 10000)$

h_T (m) – výška (poloha) ťažiska $h_T \in (0, 30)$

l – výška stromu. $l \in (0, 100)$

φ_0 (deg) – počiatoč. uhol sklonu stromu. $\varphi_0(1^\circ, 20^\circ)$

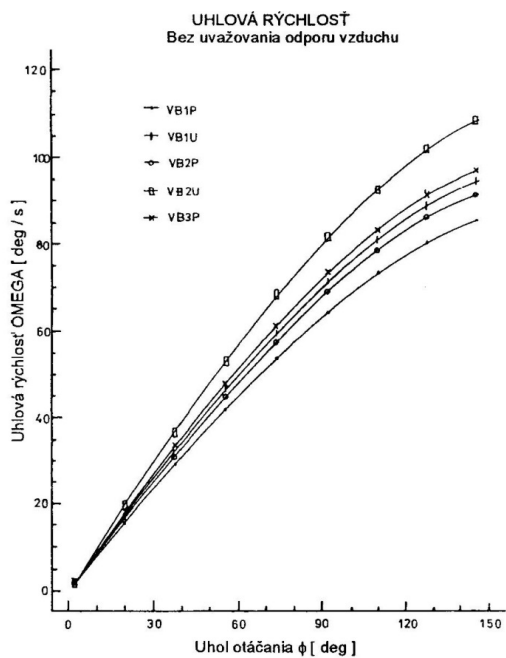
λ – koeficient charakterizujúci korunu. $\lambda \in (0, 1)$

ψ (deg) – uhol smerového pádu. $\psi \in (0^\circ, 180^\circ)$

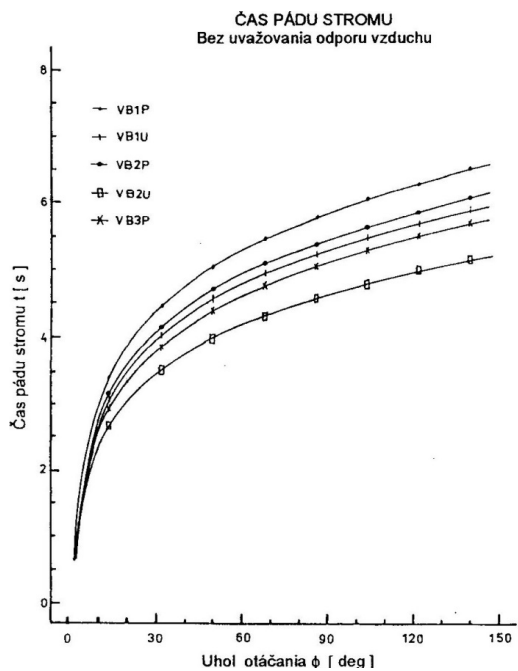
a (m) – výška pôsobiska korigujúcej sily pri smerovom páde, $a = l m$.

Pri modeli zohľadňujúcim odpor vzduchu v korune stromu je definičný obor výšky stromu upravený na 15–30 m a definičný obor hmotnosti stromu na 225 – 2250 kg.

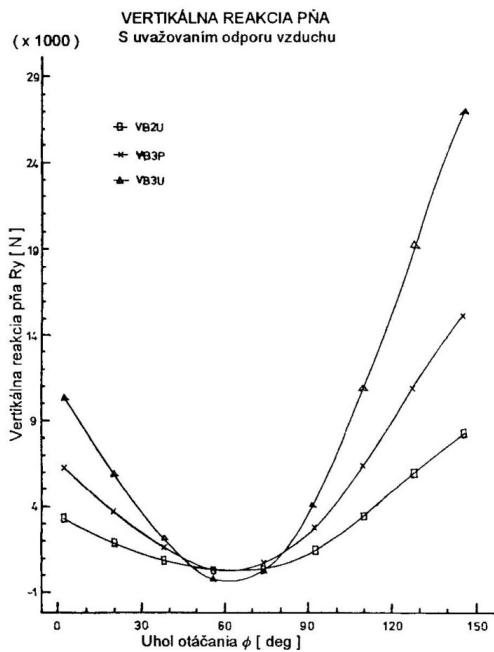
Vypočítané hodnoty charakteristík stromov sú ukladané do súborov STR a KOR. Výstupom sú grafické závislosti nasledovných funkcií na obrázkoch č. 2–8.



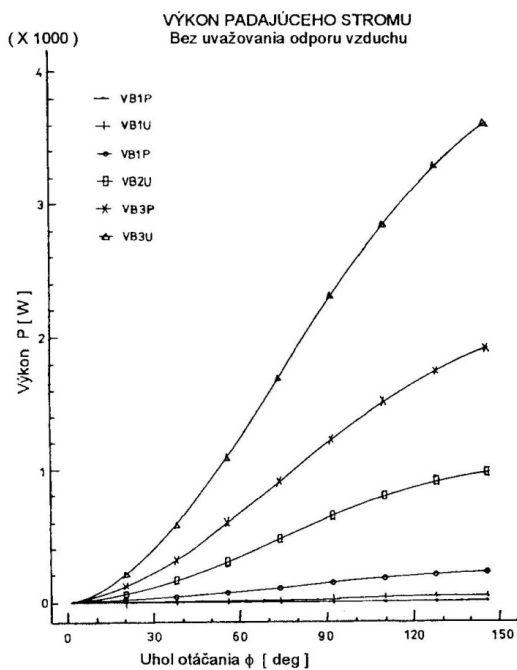
Obrázok 2



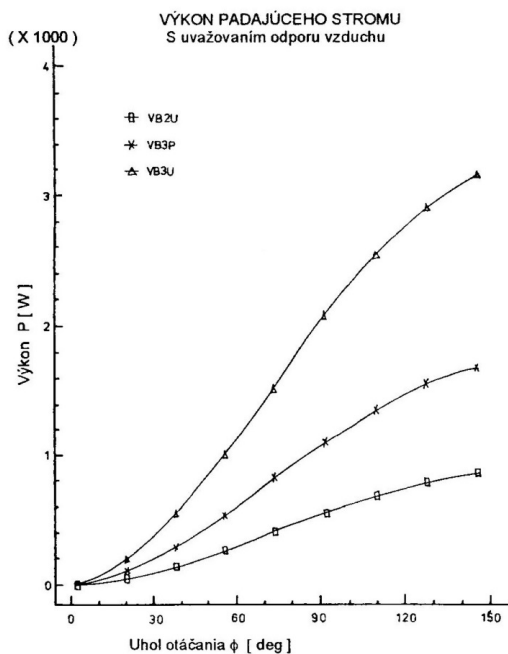
Obrázok 3



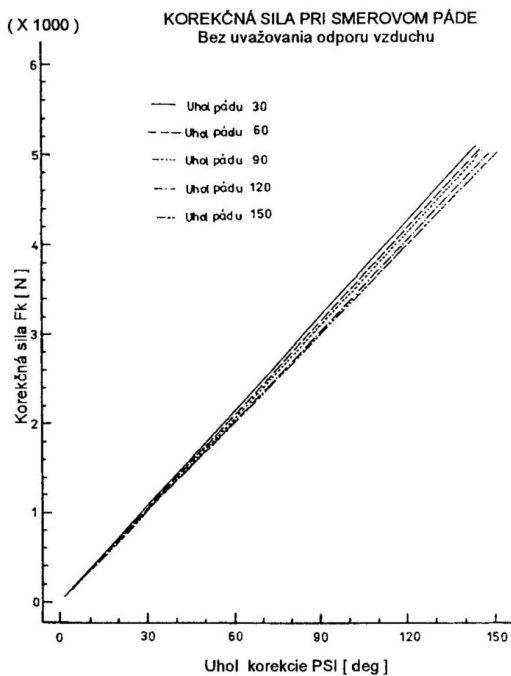
Obrázok 5



Obrázok 6



Obrázok 7



Obrázok 8

Analytické vyjadrenie funkčnej závislosti lambda v horeuvedených matematických modeloch bolo z experimentálnych hodnôt regresnou analýzou stanovené nasledovne:

- smrek: $\lambda = 1,068 \times \varphi^{-0,038}$
- borovica: $\lambda = 0,993 - 0,0005 \times \varphi$

Spracovaný program má kapacitu 45,8 kB.

LITERATÚRA:

- ARTAMONOV, J. G. 1981. Projektovanie i rasčet gidromanipulatorov lesnych mašin, Leningrad, LTA 1981, 84 s.
- BARINOV, K. N.; ALEKSANDROV, V. A. 1988. Projektovanie lesopromyšlennogo oborudovaniya, Leningrad, ILU 1988, 238 s.
- MIKLEŠ, J. 2006. Metóda výpočtu potrebného výkonu pre prácu elektrických pohonov drevobrábacích strojov, založená na modelovaní a simulácii. In: Trendy lesníckej, drevárskej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese. TU Zvolen, 2006, s. 139 – 142, ISBN 80-228-1648-5.
- MIKLEŠ, M.; SVITOK, R. 1987. Určenie hmotnostno-geometrických parametrov stromu a kmeňa smreka, Lesnictví, 33, 1987, č. 3, s. 235 – 244.
- MIKLEŠ, M.; SVITOK, R. 1989. Určenie hmotnostno-geometrických parametrov stromu a kmeňa buka, Acta Facultatis Forestalis, XXXI, 1989, s. 209 – 221.
- MIKLEŠ, M. 1994. Teória technologického vybavenia lesných ťažbových strojov pre stínku a opravovanie stromu, DDP, TU Zvolen, 1994, 240 s.
- MIKLEŠ, J. et al. 2010. Statystyczny model drzewa jodly dla procesu okrzesywania, In: Prace komisji nauk rolniczych, lesnych i weterynaryjnych PAU, Krakow, NR 14, 2010, s. 113 – 122, ISSN 1733-5183.
- MIKLEŠ, J. 2007. Štatistický model stromu smreka pre určenie parametrov odvetvovacích mechanizmov. In: Acta facultatis technicae Zvolen, TU Zvolen, 2007, s. 91 – 99, ISSN 1336-4472.
- PETRÁŠ, R. 1989. Matematický model tvaru kmeňa ihličnatých drevín, Lesnictví, 35, 1989, č. 10, s. 867 – 878.
- PETRÁŠ, R.; NOCIAR, V. 1991. Sortimentáčne tabuľky hlavných drevín, Bratislava, Veda, 1991, 304 s.

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Milan Mikleš, DrSc.,

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnej techniky,

Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,

E-mail: milan.mikles@tuzvo.sk

REGULÁCIA TEPLoty MODELU TEPLovZDUŠNEJ SUŠIARNE PROGRAMOVATEĽNÝM AUTOMATOM

TEMPERATURE CONTROL OF HOT AIR OVEN MODEL BY PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

Lubomír NAŠČÁK – Peter KOLEDA

ABSTRACT: Temperature control is often used in technology processes. The article describes a modern method of temperature control of a hot air oven model; control system is realised by means of programmable logic controller; the entry of input operating parameters is realised by means of a touch panel. Theoretically computed parameters of PID regulator are evaluated on a real model of thermal system. The quality of regulation fills the criteria selected at computing of controller parameters. The result of scientific work is the obtained course of output variable which validates the theoretical knowledge from the field of automatic control.

Key words: controller, control circuit programmable logic controller.

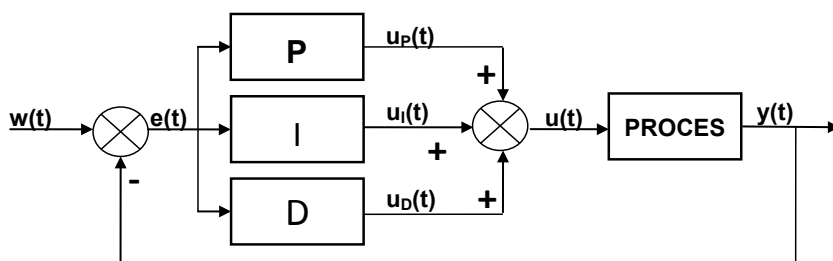
ABSTRAKT: Regulácia teploty je často používaná v technologických procesoch. V článku je popísaná moderná metóda regulácie teploty modelu teplovzdušnej sušiarne, riadiaci systém je realizovaný pomocou programovateľného automatu, ovládanie a zadávanie vstupných parametrov je realizované pomocou dotykového panela. Teoreticky vypočítané parametre PID regulátora sme overili na reálnom modeli tepelnej sústavy. Kvalita regulácie zodpovedala kritériám, ktoré sme si zvolili pri výpočte parametrov regulátora. Výsledkom vedeckej práce je získanie priebehu výstupnej veličiny, čím sa overili teoretické poznatky z oblasti automatického riadenia.

Kľúčové slová: regulátor, regulačný obvod, programovateľný automat.

1. ÚVOD

Realizácia spojitého riadenia lineárnych systémov sa najčastejšie realizuje pomocou PID štruktúr. V praxi predstavujú PID štruktúry cca 85 až 90 % všetkých metód riadenia. Výrobcovia programovateľných automatov implementujú PID regulátory do PLC systémov, pretože takáto aplikácia je veľmi žiadaná a nevyhnutná pre kvalitnú reguláciu spojitých systémov. Na overenie vlastností a kvality regulácie sme použili reálny model teplovzdušnej sústavy, ktorej identifikáciu sme realizovali deduktívnou metódou, vyhodnotením nameranej prechodovej charakteristiky. Správna identifikácia sústavy, ktorá je zostavou prvkov vymedzujúcich a ovplyvňujúcich priestor, ktorý bude ohrievaný, má

podstatný vplyv na návrh optimálnych parametrov regulátora. V praxi je najviac rozšírená aplikácia regulátora s tromi paralelne zapojenými vetvami. Prvá paralelná vetva je proporcionálna (P-vetva), ktorá násobí vstupnú veličinu regulátora nastavitelným koeficientom. Druhá paralelná vetva integruje (I-vetva) a tretia derivuje (D-vetva) vstupnú veličinu regulátora, ktorou je regulačná odchýlka. Moderné počítačom riadené systémy využívajú spätnú väzbu na báze senzorického merania výstupnej hodnoty $y(t)$, porovnania s nastavenou cieľovou hodnotou $w(t)$ a úpravou riadiaceho výstupu $u(t)$ na základe tejto hodnoty. V našom prípade nastavovanie teploty môžeme vykonať meraním aktuálnej teploty, porovnaním s cieľovou hodnotou a následným nastavením výkonu špirály tak, aby regulovaná teplota dosiahla cieľovú hodnotu – žiadanú hodnotu v čo najkratšom čase a s najmenším preregulovaním. PID algoritmus porovnáva hodnotu vstupu s cieľovou hodnotou a vypočítava hodnotu výstupu na riadenie procesu.



Obrázok 1 Štruktúra regulačného obvodu

Pre daný typ procesu je vhodný štruktúra PI regulátora, ktorý zabezpečuje nulovú regulačnú odchýlku v ustálenom stave a je adekvátny na riadenie statických systémov.

2. MATERIÁL A METÓDY

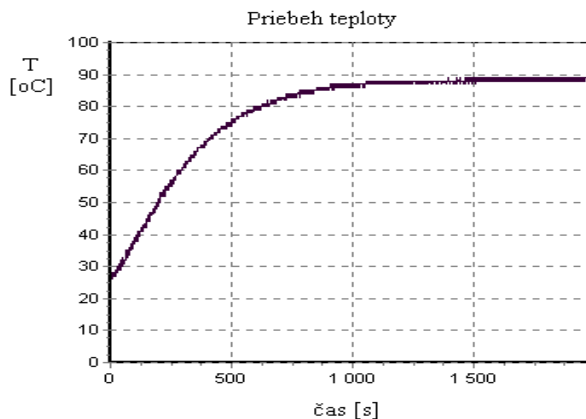
2.1 Identifikácia a modelovanie tepelného systému

Identifikácia riadeného systému a optimálne určenie parametrov matematických modelov má podstatný význam pri návrhu riešenia regulačného obvodu. Prostredníctvom modelu vieme predvídať správanie sa reálneho systému v normálnej a aj v poruchovej prevádzke, tiež pri zmene parametrov systému.

Riadená sústava predstavuje model teplovzdušnej sušiarne. Riadená veličina modelu je teplota, riadiaca veličina zodpovedá výkonu výhrevnej špirály a otáčkam jednosmerných motorov ventilátorov, ktoré zabezpečujú prúdenie vzduchu v modeli. Riadenie elektrických veličín špirály a ventilátorov je realizované impulznou šírkovou moduláciou.

Tepelnú sústavu sme identifikovali z nameranej prechodovej charakteristiky, pri maximálnom príkone tepelnej energie. Metóda skokovej zmeny vstupnej veličiny pri identifikácii sústavy je vhodne použiteľná pre jednoduché systémy (Åström, 2008). Namerané boli tieto údaje:

v čase $t_0 = 0$ s **v čase $t_{ustálenia} = 1990$ s**
 $T_{špir_vzduch0} = 24$ °C $T_{špir_vzduch1} = 195$ °C teplota prostredia pri výhrevnej špirále
 $T_{senzor0} = 24$ °C $T_{senzor1} = 89$ °C teplota prostredia pri senzore



Obrázok 2 Prechodová charakteristika tepelnej sústavy

Z priebehu prechodovej charakteristiky môžeme konštatovať, že sústava je 1. rádu, ktorej obrazový prenos v obecnom tvare je

$$S(s) = \frac{K}{1 + sT_s} \quad (1)$$

Zosilnenie sústavy K vypočítame zo vzťahu

$$K = \frac{T_{senzor1} - T_{senzor0}}{T_{špir_vzduch1} - T_{špir_vzduch0}} = \frac{89 - 24}{195 - 24} = 0,38 \quad (2)$$

Časovú konštantu sústavy T_s určíme ako čas, v ktorom prechodová charakteristika nadobúda hodnotu teploty

$$T = 0,632 \cdot (T_{senzor1} - T_{senzor0}) + T_{senzor0} = 0,632 \cdot (89 - 24) + 24 = 65 \text{ °C} \quad (3)$$

Teplote 65 °C zodpovedá časová konštantu sústavy $T_s = 350$ s. Výsledný tvar prenosovej funkcie sústavy potom je

$$S(s) = \frac{0,38}{1 + 350s} \quad (4)$$

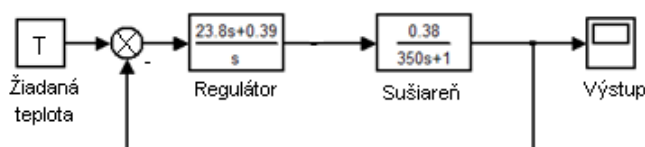
Najpoužívanejšou metódou návrhu regulačnej štruktúry zostáva aj naďalej klasické spätnoväzobné riadenie s PID regulátorom, a to ako v analógovej, tak aj v diskretnnej verzii regulačného obvodu. Riadenie na základe PID algoritmov sa používa najmä na riadenie systémov SISO (Single Input Single Output). Pri návrhu PID algoritmov je najdôležitejší

výber vhodnej štruktúry regulátora a jeho optimálnych parametrov (P, I, D). Výber regulátora a jeho parametre výrazne ovplyvňujú kvalitu riadenia (Kozák, Dvorščák, 2013). Kvalita regulácie závisí aj od použitej metódy výpočtu parametrov regulátora. Pre aplikáciu regulácie teploty sme zvolili paralelnú štruktúru PI regulátora, ktorý zabezpečuje nulovú regulačnú odchýlku v ustálenom stave.

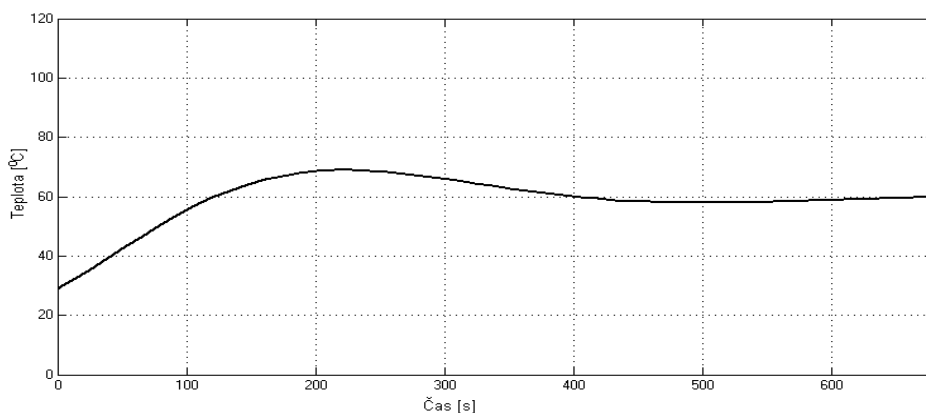
Nástroje softvérového balíka Matlab (MathWorks, 2014) umožňujú návrh spojitého PID regulátora na základe prenosu riadeného systému (4). Pre takýto systém sme zvolili metódu ladenia regulátora pomocou klasických vzťahov v otvorenej slučke využívajúcej približné integrálne zosilnenie (Åström, 2006). Proporcionálne zosilnenie takto navrhnutého regulátora $P = 24$, integračná časová konštanta $T_i = 61$ sek. Prenos regulátora má tvar

$$R(s) = \frac{23,8s + 0,39}{s} . \quad (5)$$

Navrhnutý regulačný obvod podľa obr. 3 má dobu regulácie 330 s a maximálne pre-regulovanie 13 % (obr. 4).



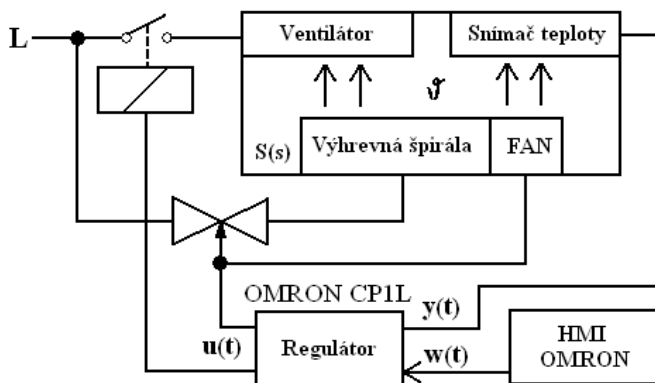
Obrázok 3 Model systému regulačného obvodu



Obrázok 4 Časový priebeh regulácie teploty v prostredí MATLAB

Fyzikálny model systému pozostáva z kovovej konštrukcie, ktorá predstavuje model teplovzdušnej sušiarne, kde prebieha regulácia teploty. Ako akčné členy sú použité špirála, jednosmerné ventilátory a ventilátor chladenia na zmenšenie maximálneho preregulovania obr. 2. Na realizáciu riadiaceho systému sme použili programovateľný automat

(PLC) značky OMRON CP1L s dotykovým panelom (Omron, 2013, 2014). Použité PLC je ideálny riadiaci systém s možnosťou pružného modulárneho systému riadenia. Vývojové prostredie na tvorbu a ladenie riadiaceho programu je jednoduché a ľahko osvojiteľné, umožňuje užívateľovi pohodlnú prácu v intuitívnom grafickom prostredí s možnosťou nastavenia všetkých podstatných parametrov. Riadenie výkonu špirály a otáčok cirkulačných ventilátorov je realizované pulzne šírkovou moduláciou (PWM) z PLC.



Obrázok 5 Bloková schéma regulácie teploty s riadiacim systémom

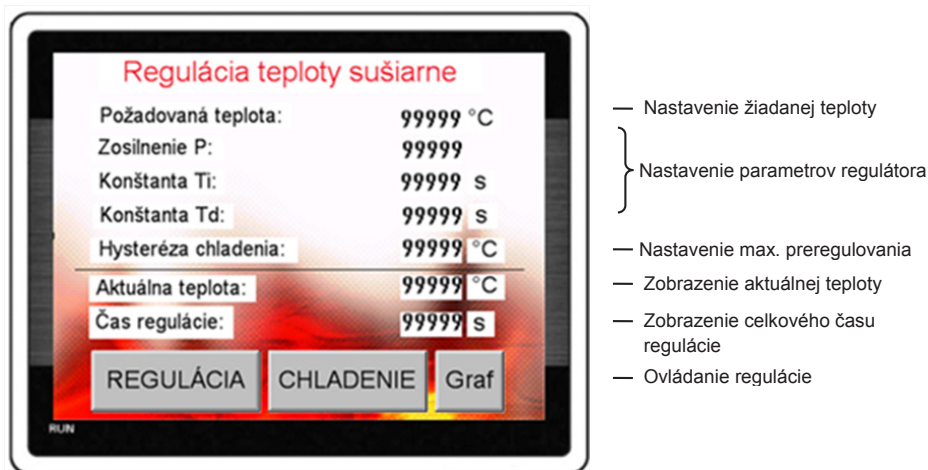
3 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Praktickým využitím teoreticky získaných poznatkov z automatického riadenia, ich aplikovaním pomocou moderných automatizačných prostriedkov bola vytvorená aplikácia na riadenie a monitorovanie procesu regulácie.

Riadiaci program realizovaný v grafickom prostredí CX-Programmer, sa funkčne člení na 3 hlavné časti:

- Program pre prvotnú inicializáciu použitých premenných
- Program pre číselné konverzie a zápis do pamäte
- Program realizujúci mechanizmus regulácie

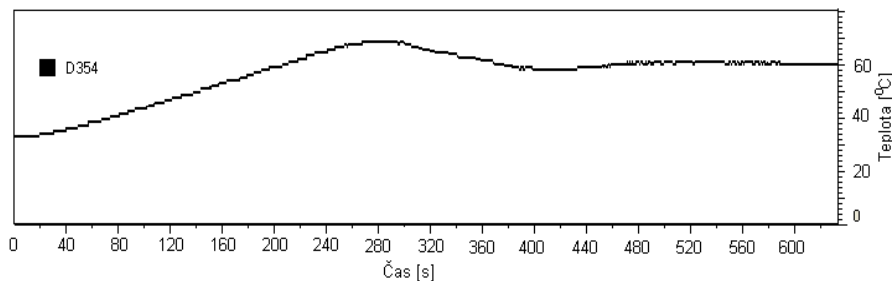
Vizuálne prostredie LCD displeja tvorí užívateľské rozhranie, ktoré je projektované v programe NQ Designer (obr. 6). Po spustení a inicializácii systému je zobrazená základná obrazovka určená pre zobrazenie a editáciu parametrov regulátora. Zmenu parametrov je možné vykonať len pri vypnutej regulácii a vykonáva sa dotykom na položku a zadáním hodnoty z číselnej klávesnice.



Obrázok 6 Dotykový displej zadávania parametrov regulácie

V prípade potreby je možné okamžite po spustení regulácie zobrazit' grafický priebeh regulovanej teploty. Stlačením tlačidla graf je prepnutá grafická obrazovka s grafom zachytávajúcím posledných 600 s regulácie spolu s aktuálnym stavom systému.

Odmeraný priebeh teploty na reálnom modeli teplovzdušnej sušiarne s určenými parametrami je znázornený na obr. 7, doba regulácie je 362 s, maximálne preregulovanie 7%. Informácia o skutočnej teplote je ukladaná do údajového registra D354.



Obrázok 7 Priebeh regulácie teploty modelu teplovzdušnej sušiarne

4 ZÁVER

Zo získaných simulačných a prakticky nameraných priebehov výstupnej, regulovanej veličiny možno konštatovať, že boli overené poznatky z teórie automatického riadenia. Systém riadenia sme úspešne implementovali na reálnom modeli teplovzdušnej sušiarne

s použitím moderných automatizačných prostriedkov. Na realizovanom systéme je možné pružne overovať reguláciu teploty s rôznymi parametrami regulátora a aj so zmenou jeho štruktúry.

LITERATÚRA

- ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. 2006. *Advanced PID Control*. ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006, 460 s. ISBN 1556179421
- ÅSTRÖM, K. J., MURRAY, R. M. 2008. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008, 408 s. ISBN 978-0691135762
- KOZÁK, Š., DVORŠČÁK, B. 2013. Aplikácia PLC Mitsubishi na riadenie hydraulických systémov. ATP journal 4/2013, Bratislava, 12 – 13 s., ISSN 1335-2237
- MATHWORKS, Inc. 2014. Products and Services: System Identification Toolbox. [cit. marec 2014]. Dostupné na internete < <http://www.mathworks.com/products/sysid/> >
- OMRON Corporation. 2013. Industrial Automation, CP series CP1L CPU Unit. December 2013, [cit. marec 2014]. Dostupné na internete <<http://www.ia.omron.com/products/family/1916/>>
- OMRON Corporation. 2014. Industrial Automation, Programmable Terminals: NB Series. Marec 2014, [cit. marec 2014]. Dostupné na internete <<http://www.ia.omron.com/products/family/3110/>>

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.,

Ing. Peter Koleda, PhD.,

Katedra informatiky a automatizačnej techniky,

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene,

Študentská 26, 960 53 Zvolen

ANALÝZA DISTRIBUČNEJ VEĽKOSTI ČASTÍC AEROSÓLOV PROCESNEJ KVAPALINY V PROCESE SÚSTRUŽENIA

PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYSIS OF METALWORKING FLUID AEROSOLS DURING TURNING PROCESS

Erika SUJOVÁ – Petra SEMANOVÁ – Pavol KOLEDA

ABSTRACT: Metalworking fluids commonly used in the metal machining technological process, represent in addition to the advantages also the risks associated with contamination working environment. The problem to quantification of liquid aerosols from metalworking fluids in working environment is the application of adequate measurement methods that should be possible to define particles size distribution of metalworking fluid aerosols. This paper deals with particles size distribution analysis of metalworking fluid aerosols during turning process. The measurements were performed on an experimental stand with integrated conventional lathe and there was used method of image analysis.

Key words: metalworking fluids, aerosol, turning, particle analysis

ABSTRAKT: Procesné kvapaliny bežne používané v technologickom procese obrábania kovov predstavujú okrem výhod aj riziká spojené najmä s kontamináciou pracovného ovzdušia. Problémom pri kvantifikácii kvapalných aerosólov z procesných kvapalín v pracovnom ovzduší je aplikácia vhodnej metódy merania, ktorou by bolo možné stanoviť distribučnú veľkosť častíc aerosólu. Článok sa zaoberá analýzou distribučnej veľkosti častíc aerosólov procesnej kvapaliny vznikajúcich v procese sústruženia. Merania boli vykonané na experimentálnom stende s integrovaným konvenčným sústruhom a pre hodnotenie veľkosti častíc bola použitá metóda analýzy obrazu.

Kľúčové slová: procesné kvapaliny, aerosól, sústruženie, analýza častíc

ÚVOD

Súčasná svetová výroba je charakterizovaná silnejúcim medzinárodným ekologickým povedomím s čoraz prísnejšími predpismi a zákonmi. V technológii obrábania majú ako pomocné technologické prostriedky z hľadiska používaného objemu najväčšie zastúpenie procesné kvapaliny.

Procesné kvapaliny používané pri obrábaní kovov predstavujú komplexné zmesi, ktoré zabezpečujú predovšetkým chladiacu a mazaciu funkciu. Okrem toho odstraňujú triesky z miesta rezu a plnia funkciu antikorošnej ochrany obrobku resp. nástroja. Použitím procesných kvapalín možno teda zvyšovať produktivitu, zlepšiť kvalitu vyrábaných súčiastok, znížiť spotrebu nástrojových materiálov a elektrickej energie (Dado a kol., 2009).

Existujú štyri druhy procesných kvapalín: čisté oleje, rozpustné oleje, polysyntetické a syntetické kvapaliny. Použitie procesných kvapalín v technologickom procese obrábania kovov však generuje aerosóly, ktoré predstavujú značné riziko znečistenia pracovného prostredia a majú aj negatívny vplyv na človeka, ktorý s nimi prichádza do styku. Dlhodobý účinok procesných kvapalín na človeka môže spôsobiť rozličné zdravotné problémy, ako dermatitída, astma, hypersenzitívna pneumónia, rakovina a pod. (Mečiarová – Dado, 2009), (Fišerová, 2010).

Aerosól je termín voľne aplikovaný na disperziu kvapalných častíc, z ktorých mnohé sú dostatočne veľké na to, aby boli samostatne viditeľné, bez vizuálnej podpory, ale zvyčajne sú menšie než $20\mu\text{m}$. Yue a kol. identifikovali dva primárne mechanizmy vzniku kvapalného aerosólu z procesných kvapalín: odparovanie – kondenzácia a atomizácia. Pre extrémne teploty, ktoré sú generované počas obrábania, MWFs sa môžu odparovať a potom kondenzovať v blízkosti samovoľne generovaného kvapalného jadra, alebo iných cudzích častíc vytvárajúcich kvapky. Atomizácia je čisto mechanický proces. Vplyvom prúdu kvapaliny, ako aj vplyvom rotácie obrobku alebo rezného nástroja sa prenáša mechanická energia na kvapalinu, ktorá sa stáva nestabilná a rozkladá sa na kvapky (Yue, 2000), (Kenneth – Sutherland, 1999).

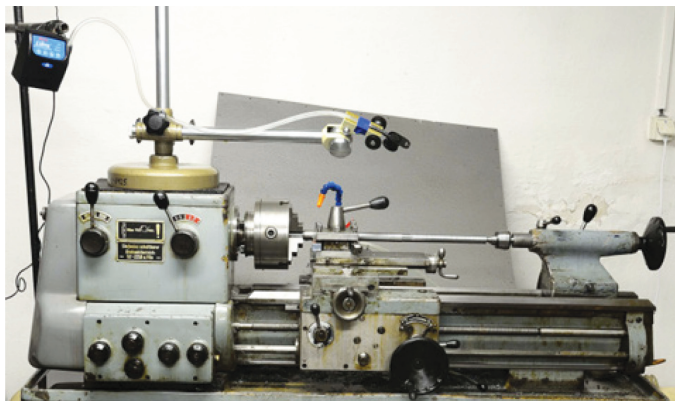
Obsahom článku je hodnotenie veľkosti častíc aerosólov procesnej kvapaliny v procese sústruženia pomocou metódy analýzy obrazu. V experimente bola sledovaná závislosť priemerov častíc na meniacich sa podmienkach obrábania: zmene otáčok vretena sústruhu a zmene prietokovej rýchlosti procesnej kvapaliny.

1. MATERIÁL A METÓDY

1.1 Podmienky experimentu

Analýza veľkosti častíc aerosólov procesnej kvapaliny vznikajúcich v procese sústruženia bola uskutočnená na experimentálnom stende (obr. 1, 2), ktorý pozostával z hrotového sústruhu (KART, model EMU-250), vybaveného univerzálnym chladiacim systémom (OPTIMUM Maschinen Germany). Obrobky boli vyrobené z automatovej ocele ISO 44SMn28 (1,0762) s menovitou dĺžkou 400 mm. Ich priemer kolísal medzi 24 – 19 mm, v závislosti do postupu sústruženia. Obrábacím nástrojom bol sústružnícky nôž zo spekaných karbidov s uhlom rezného klina $b = 45^\circ$. Boli stanovené nasledujúce rezné podmienky: posuv ($40\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), hĺbka rezu (0,4 mm). Ako procesná kvapalina bola použitá syntetická kvapalina zmiešaná s vodou v 5 % koncentrácii, ktorá bola na miesto obrábania aplikovaná pomocou trysky umiestnenej nad obrobkom vo vzdialenosti cca 70 mm. Veľkosť častíc vznikajúcich počas sústruženia na experimentálnom stende bola zisťovaná v závislosti na meniacich sa podmienkach obrábania:

- otáčky vretena sústruhu: 500-800-1250 ot.min⁻¹;
- prietoková rýchlosť procesnej kvapaliny: 1,75 – 3,5 l.min⁻¹.



Obr. 1 Celkový pohľad na experimentálny stand



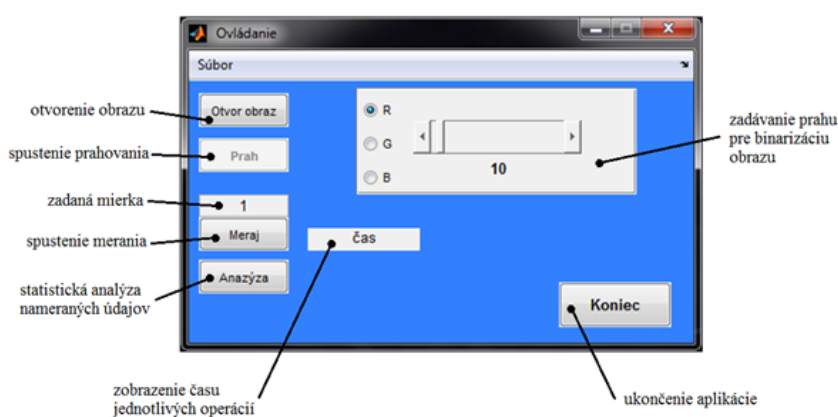
Obr. 2 Detailný pohľad na tvorbu kvapiek a ligamentov

1.2 Opis metodiky analýzy veľkosti častíc pomocou analýzy obrazu

Pred samotným meraním bolo potrebné získať obrázky, v ktorých sa nachádzajú analyzované častice. Pre správnu identifikáciu týchto častíc v snímke je nutné, aby boli kontrastné voči ich okoliu. Merané častice predstavujú kvapky procesnej kvapaliny rozptýlenej

do priestoru počas sústruženia oceľovej tyče. Pri snímaní bola preto potrebná rýchla uzávierka clony fotoaparátu pri fotení, aby nedochádzalo k rozmazaniu a deformácii tvaru kvapiek pri ich rýchлом pohybe. Taktiež bolo potrebné dostatočne osvetliť analyzované kvapky, aby boli pri rýchlej uzávierke dostatočne viditeľné v snímke.

Meranie rozmerov častíc v zosnímaných obrazoch bolo realizované pomocou vytvorenej aplikácie (obr. 3) (Koleda, 2012).



Obr. 3 Navrhnutá aplikácia (Koleda, 2012)

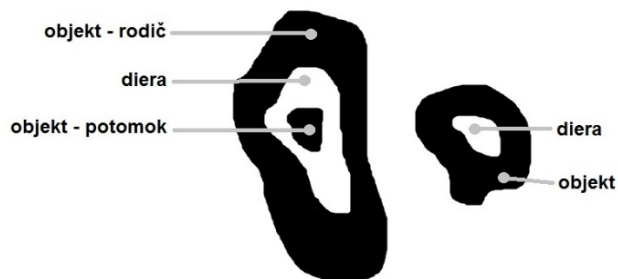
Aplikácia bola navrhnutá a vytvorená v programovom prostredí Matlab (Mathworks). Súčasťou tohto programu sú už vytvorené funkcie, ktoré boli využité pri niektorých krokoch analýzy a merania rozmerov častíc v obraze. Jednotlivé časti aplikácie boli navrhnuté tak, aby bolo možné spracovať obraz a analyzovať nájdené častice po jednotlivých krokoch.

Pri vyhodnotení snímky pomocou tejto aplikácii bol najprv otvorený obraz, ktorý sa má práve spracovávať. Následne bola vybratá farebná zložka (červená, zelená alebo modrá), v ktorej sa bude otvorený obraz prahovať a tiež veľkosť daného prahu. Podľa nastaveného prahu bol následne obraz binarizovaný, kde obrazové body s jasom v danej zložke farby väčším ako bola zadaná hodnota prahu boli nahradené čiernym bodom, predstavujú hľadané častice. Body s menším alebo rovným jasom boli nahradené bielou farbou a predstavujú okolie častíc. Vhodnou voľbou prahu boli merané objekty v obraze ponechané, pozadie objektov bolo odstránené.

Po odstránení pozadia meraných častíc pomocou prahovania boli zisťované potrebné parametre analyzovaných kvapiek. Identifikácia a zisťovanie potrebných charakteristík častíc v obraze bolo vykonávané v programe Matlab pomocou funkcie `bwboundaries`:

$$[B, L, N, A] = \text{bwboundaries}(II, \text{'noholes'}) \quad (1)$$

Funkcia `bwboundaries` sleduje vonkajšie hranice objektov, ako aj hranice otvorov vo vnútri objektov v binárnom obraze. Taktiež sleduje objekty (potomkovia) úplne uzatvorené v iných objektoch (rodičia) (obr. 4).

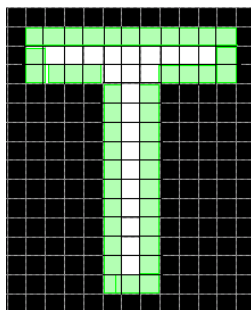


Obr.4 Typy hľadaných objektov (Mathworks)

V identifikovaných časticiach sú následne zisťované potrebné rozmery. Pri danom meraní je zisťovaný obvod a ekvivalentný priemer každej častice. Tieto parametre sú určované pomocou funkcie `regionprops` aplikovanej na nájdené častice. Obvod je vypočítaný podľa vzorca:

$$P = \text{regionprops}(II, 'Perimeter') \quad (2)$$

Táto funkcia prinavrátí vzdialenosť okolo častice. Vzdialenosť je počítaná medzi každým párom susedných pixelov, ktoré tvoria hranicu častice (obr. 5).



Obr. 5 Obvod častice

Ekvivalentný priemer častice bol vyjadrený pomocou:

$$E = \text{regionprops}(II, 'EquivDiameter') \quad (3)$$

Ekvivalentný priemer častice predstavuje priemer kruhu s rovnakým obsahom ako má skúmaná častica, pričom táto častica nemusí mať kruhový charakter.

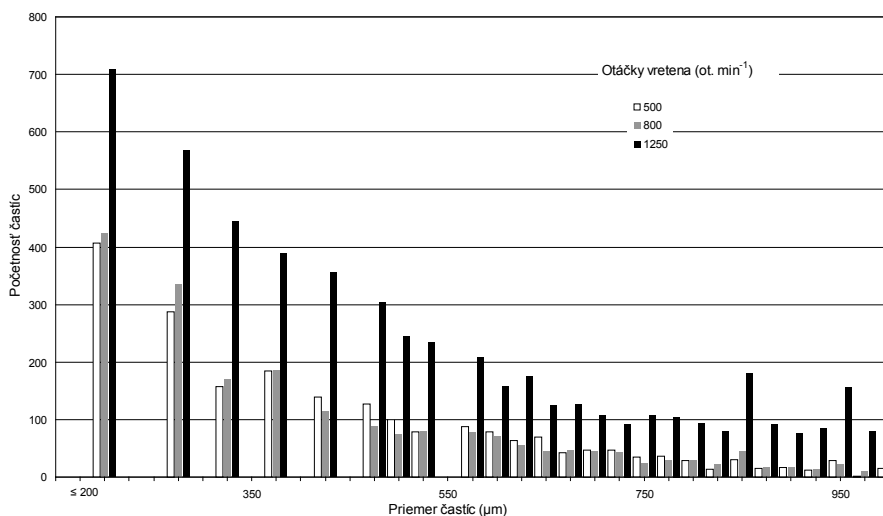
Po zistení uvedených parametrov častíc boli namerané údaje prepočítané pomocou vopred zadanej mierky, ktorá udáva prevod z obrazových jednotiek (pixelov) do metrických jednotiek (mm).

2 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

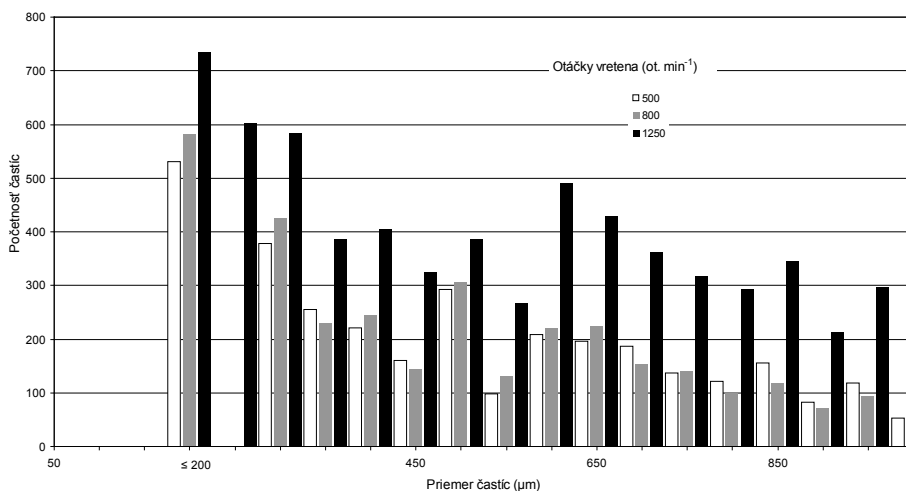
Výsledné hodnoty veľkosti častíc boli exportované z Matlab-u do programu MS Excel pre ďalšie spracovanie do grafov. Histogramy veľkosti častíc vyjadrujú rozdelenie častíc disperzného systému podľa ich veľkosti do jednotlivých frakcií charakterizovaných priemerom častice. V rámci uskutočnených meraní boli hodnotené veľkosti častíc v rozsahu 200 až 2500 μm , rozdelené do intervalov po 50 μm . Vyhodnotenie vyjadruje závislosť priemerov častíc na meniacich sa podmienkach obrábania: pri zmene otáčok vretena sústruhu a zmene prietokovej rýchlosti procesnej kvapaliny.

Obr. 6 znázorňuje závislosť veľkosti častíc od otáčok vretena pri prietokovej rýchlosti 1,75 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ a obr. 7 znázorňuje závislosť veľkosti častíc od otáčok vretena pri prietokovej rýchlosti 3,5 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Z dôvodu prehľadnosti grafov boli do zobrazenia zahrnuté častice s najväčšou významnosťou zastúpenia s priemerom do 1 000 μm .

Z výsledkov meraní je zrejmé, že pri vyšších otáčkach vretena je väčší podiel častíc menších než 200 μm , ktoré sú potenciálnym zdrojom aerosólov v pracovnom ovzduší. Veľkosť častíc 200 μm bola minimálna limitujúca veľkosť častíc, ktorú sme pri danej metodike vyhodnotenia obrazu vedeli identifikovať. Častice s menším priemerom nebolo možné exaktne rozmerovo definovať, preto sme ich kumulatívne pripočítali k početnosti limitujúcej veľkosti častíc, čo je vyjadrené definovaním priemeru častíc $\leq 200 \mu\text{m}$. Z výsledkov vyplýva, že pri veľkosti otáčok 1 250 za minútu bol vygenerovaný najvyšší podiel najmenších častíc v porovnaní s otáčkami vretena sústruhu 800 a 500 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Zároveň je možné konštatovať, že pri prietokovej rýchlosti procesnej kvapaliny 3,5 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ je generované väčšie množstvo častíc s menším priemerom ako je tomu pri prietokovej rýchlosti procesnej kvapaliny 1,75 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Pre náš výskum sú najvýznamnejšie častice s najmenším priemerom, t. j. frakcia $\leq 200 \mu\text{m}$, pretože z tejto skupiny sa kumulujú častice aerosólov, ktoré najdlhšie ostávajú v pracovnom ovzduší a predstavujú riziko jeho znečistenia chemickým alebo biologickým faktorom.



Obr. 6 Závislosť veľkosti častíc od otáčok vretena pri prietokovej rýchlosti 1,75 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$



Obr. 7 Závislosť veľkosti častíc od otáčok vretena pri prietokovej rýchlosti 3,5 l.min⁻¹

3 DISKUSIA VÝSLEDKOV

Autori Yue, Y. a kol. (Yue a kol., 2004a) skúmali vlastnosti aerosólov procesných kvapalín. Konštatovali, že hmotnostná koncentrácia častíc vznikajúcich pri atomizačnom procese je jednou zo základných charakteristík pre vyhodnotenie kvality ovzdušia. Ďalšou dôležitou vlastnosťou je distribúcia veľkosti kvapiek, ktorá je charakterizovaná ich stredným priemerom a štandardnou odchýlkou. Pre proces sústruženia, v ktorom vertikálne orientovaný prúd kvapaliny dopadá kolmo k povrchu obrobku, je formovaný valcovitý film kvapaliny, ktorý je vždy nestabilný, bez ohľadu na hodnotu Reynoldsovho čísla závislom na vlastnostiach prúdu. Použitím vzťahu (4) pre rotujúci obrobok pre stredný priemer častíc (Matsumoto – Takashima, 1978), bol odvodený nasledovný výraz:

$$\bar{D} = 1,23R \left(\frac{1}{N_l} \right)^{\frac{2}{7}} \left(\frac{\rho q_l^2}{4\zeta R^3} \right)^{\frac{1}{7}} \left(\frac{\zeta}{\rho R^3 \omega} \right)^{\frac{2}{7}} \quad (4)$$

q_l je celkový objemový prietok (m³.s⁻¹), pri ktorom vznikajú ligamenty,

R – polomer obrobku (m),

ρ – hustota procesnej kvapaliny (kg.m⁻³),

ζ – povrchové napätie procesnej kvapaliny (N.m⁻¹),

ω – uhlová rýchlosť obrobku (rad.s⁻¹).

Počet ligamentov, N_l , je stanovený na základe analýzy narušenia kvapalného filmu na obvodě obrobku. Za predpokladu, že počet ligamentov je spojený s maximálnou rýchlosťou rastu rozrušenia kvapalného filmu, N_l možno vypočítať z nasledujúce rovnice:

$$We = N_l^2 \left\{ 3 + (8N_l - 3)St \left[1 + \sqrt{1 + \frac{1}{N_l St}} \right] \right\} \quad (5)$$

kde We je Weberovo číslo a St je číslo stability, ktoré možno získať zo vzťahu:

$$St = \frac{\mu^2}{\rho \sigma R} \quad (6)$$

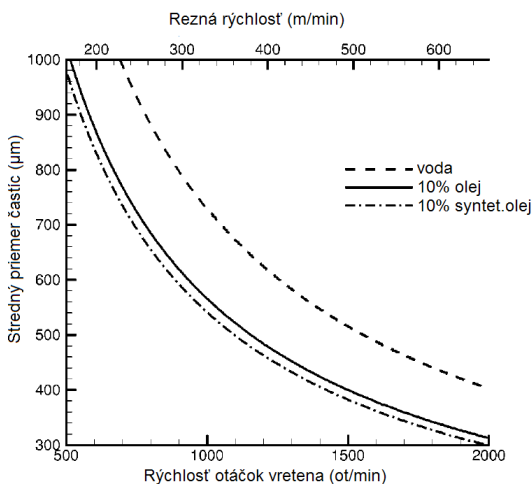
μ – dynamická viskozita procesnej kvapaliny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

Vo svojom výskume autori Yue, Y. a kol. (Yue a kol., 2004) zistovali závislosť medzi predpokladaným stredným priemerom častíc, otáčkami vretena a reznou rýchlosťou. Výsledky sú zobrazené na obr. 8, ktorý ukazuje, že typ kvapaliny môže mať evidentný vplyv na stredný priemer kvapiek. Z výsledkov autori vyvodili závery, že zníženie rýchlosti je dôležitým parametrom, ktorý má vplyv na tvorbu kvapiek produkovaných atomizačným procesom.

Autori (Sun a kol., 2004) na základe overenia si predikčného modelu a následných experimentov dospeli k záverom:

- Vytvorený model presne predikuje rozdelenie veľkosti častíc a rozdelenie hmotnostnej koncentrácie.
- Ak je aplikácia procesnej kvapaliny prerušená, hmotnostná koncentrácia ubúda exponenciálne.
- Predpoklad, že častice v kontrolovanom objeme majú logaritmickeo-normálne rozdelenie sa zdá byť správny.

Bez ohľadu na stredný priemer kvapky spojený s atomizačným mechanizmom, pre distribučné rozdelenie častíc v kontrolovanom objeme budú dominovať malé častice, z dôvodu javov sedimentácie a odparovania.



Obr. 8 Závislosť stredného priemeru častíc na reznnej rýchlosti a rýchlosti otáčok vretena sústruhu pre tri druhy procesných kvapalín (Yue a kol., 2004)

Na základe doteraz vykonaných experimentov boli vyvedené nasledovné závery:

- Otáčky vretena majú dominantný vplyv na hmotnostnú koncentráciu aerosólu, vyššie otáčky vretena vedú k vyššej hmotnostnej koncentrácii.
- Významné hodnoty hmlových častíc submikrometrickej veľkosti sú produkované v procese sústruženia, pričom zvýšenie otáčok vretena má za následok zvýšenie počtu týchto častíc.
- Rýchlosť, posuv a hĺbka rezu boli uznané ako významné faktory pri tvorbe kovových prachových častíc a kvapalinovej hmly. Ďalej bolo zistené, že hmotnostná koncentrácia sa zvyšuje s rastúcou hodnotou rýchlosti, rýchlosti posuvu a hĺbky rezu.
- Pri porovnaní experimentálnych výsledkov bolo zistené, že mechanizmus odparovania / kondenzácie číni väčší príspevok k tvorbe hmly než atomizácia. V skutočnosti za podmienok realizovaných v rámci štúdie bolo zistené, že koncentrácia produkovanej hmly bola 14 až 400 krát vyššia, než bola koncentrácia generovaná pomocou atomizácie (Michalek a kol., 2003), (Yue a kol., 2004) (Sun a kol., 2004), (Kenneth, 1999).

Výsledky nami realizovaných meraní potvrdzujú závery vyslovené citovanými zahraničnými (Yue a kol., 2004), (Sun a kol., 2004), (Matsumoto – Takashima, 1978), (Michalek a kol., 2003), že na veľkosť častíc aerosólov procesných kvapalín má vplyv veľkosť otáčok a aj jej prietoková rýchlosť. Podrobnejšie zisťovanie závislosti distribučného rozdelenia veľkosti častíc aerosólu od rôznych druhov procesnej kvapaliny a aj určenie vplyvu jednotlivých parametrov procesu sústruženia na koncentráciu aerosólov v pracovnom ovzduší bude predmetom ďalšieho výskumu.

ZÁVER

So sprísňujúcimi sa zákonmi o BOZP a hygienickými normami pre rizikové faktory pracovného prostredia (chemické a biologické faktory) musia používatelia pri výbere procesnej kvapaliny posúdiť nielen ich technologické a ekonomické parametre, ale posúdiť kvapalinu tiež z hľadiska potenciálnych humánnych rizík, t. j. nepriaznivých vplyvov na obsluhu stroja. Pribúdajú nové kritériá výberu a hodnotenia procesných kvapalín, akými sú napr. toxicita, horľavosť, karcinogenita a iné.

V rámci prezentovaného výskumu bola zisťovaná distribučná veľkosť častíc kvapalného aerosólu procesnej kvapaliny generovaného v procese sústruženia. Merania boli uskutočnené na experimentálnom stende pri meniacich sa podmienkach obrábania – otáčkach vretena a prietoku kvapaliny. Veľkosť častíc bola vyhodnotená metódou analýzy obrazu a následne spracovaná do histogramov vyjadrujúcich distribučnú veľkosť častíc. Na základe zistených výsledkov je možné konštatovať, že veľkosť otáčok vretena sústruhu a prietoková rýchlosť procesnej kvapaliny majú významný vplyv na početnosť a distribučnú veľkosť častíc vznikajúceho aerosólu. Výsledky uskutočnených meraní korešpondujú s výsledkami citovaných zahraničných autorov.

Použitá metodika analýzy obrazu neumožňuje identifikovať častice menšie ako 200 μm , čo je jej výrazný nedostatok. Predmetom ďalšieho výskumu bude analýza častíc submikrometrickej veľkosti a hodnotenie koncentrácie aerosólov použitím presnejšej metódy merania – laserového fotometra DustTrak DRX.

LITERATÚRA

DADO, M. – HNILICA, R. – MEČIAROVÁ, J. – SCHWARZ, M. 2009. Rezná kvapalina ako rizikový faktor pri obrábaní kovov. In: *XXII. Medzinárodná konferencia: Aktuálne otázky*

- bezpečnosti práce. Štrbské Pleso – Vysoké Tatry: 18. – 20. 11. 2009. s. 109 – 115. ISBN 978-80-553-0220-1.
- FIŠEROVÁ, S. 2010. Aerosoly v pracovnom ovzduší v provozu aglomerace hutního podniku. *Integrovaná bezpečnosť 2010*. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2010, s. 28 – 36. ISBN 978-80-8096-133-6.
- KENNETH, L., SUTHERLAND, J.W. 1999. An experimental investigation into the effect process conditions on the mass concentration of cutting fluid mist in turning. In: *Journal of Cleaner Production*. roč. 7. s. 341 – 330.
- KOLEDA, P. 2012. *Metóda optoelektronického merania frakčných častíc pri trieskovom obrábaní dreva*: dizertačná práca. Zvolen: Technická Univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky. s. 140.
- MATHWORKS: Product documentation. [cit. 14. decembra 2013] Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/image_props.htm
- MATSUMOTO, S. – TAKASHIMA, Y., 1978. Atomization Characteristic of Power Law Fluids by Rotating Disk. 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLAS'78), s. 145 – 50.
- MEČIAROVÁ, J. – DADO, M. 2009. Health effects of metalworking fluid mist. In: *MITECH '09: international scientific conference "Material science and manufacturing technology": proceedings* /ed. Milan Brožek. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2009. s. 155 – 159. ISBN 978-80-213-1931-8.
- MICHALEK, D. – HII, W. W. – SUN, J. – GUNTER, K. L. – SUTHERLAND, J. W. 2003. Experimental and Analytical Efforts to Characterize Cutting Fluid Mist Formation and Behaviour in Machining. In. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18: s. 842 – 854, 2003. ISSN: 1047-322X.
- YUE, Y. 1996. Cutting fluid mist formation via atomization mechanisms. In: *Proceedings of symposium on design for manufacturing and assembly*, ASME Bound Volume-DE, roč. 89, s. 37 – 46.
- YUE, Y. – SUN, J. – GUNTER, K. L. – MICHALEK, D. J – SUTHERLAND, J. W. 2004. Character and Behaviour of Mist Generated by Application of Cutting Fluid to a Rotating Cylindrical Workpiece, Part 1: Model Development. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 8/ 2004, roč. 126, ASME. s. 417 – 425.
- SUN, J. – JU, C. – YUE, Y. – GUNTER, K. L. – MICHALEK, D. J – SUTHERLAND, J. W. 2004. Character and Behaviour of Mist Generated by Application of Cutting Fluid to a Rotating Cylindrical Workpiece, Part 2: Experimental Validation. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 8/ 2004, roč. 126, ASME. s. 426 – 434.

Kontaktná adresa:

Ing. Erika Sujová, PhD.

Katedra výrobných technológií a materiálov, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen, e-mail: sujovae@tuzvo.sk

Ing. Petra Semanová

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen, e-mail: xmilatova@tuzvo.sk

Ing. Pavol Koleda, PhD.

Katedra informatiky a automatizovanej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen, e-mail: pavol.koleda@tuzvo.sk

SKÚMANIE STAVU TEPELNE OVPLYVNENEJ OBLASTI MATERIÁLU PO ELEKTROISKROVOM DRÔTOVOM REZANÍ

EXAMINING THE STATE OF HEAT AFFECTED ZONE OF THE MATERIAL AFTER THE WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Miroslava ŤAVODOVÁ

ABSTRACT: Wire Electrical Discharge Machining is one of the technological possibilities of electrical discharge machining. WEDM gives possibility to cut the materials, which would by otherwise technology problematic, mainly conventional technology. Electro wire cutting uses thermal energy. The electrical discharge, which is emerging between the electrodes, the tool and the workpiece, it is converted to thermal energy. The action of discharge significantly increases the temperature on the material surface. This temperature can influence the structure of the material. The heat affected zone (HAZ) is formed. Validation and assessment of the presence of this zone is possible through microscopic analysis of material structure and microhardness measurements in HAZ.

Key words: wire electrical discharge machining, heat affected zone, quality of surface, structure, microhardness, steels

ABSTRAKT: Elektroerozívne drôtové rezanie WEDM je jednou z technologických možností elektroerozívneho obrábania. Umožňuje delenie takých materiálov, ktoré by bolo inými, hlavne konvenčnými technológiami problematické. WEDM využíva tepelnú energiu, na ktorú sa premení elektrický výboj vznikajúci medzi elektródami, nástrojom a obrobkom. Pôsobením výboja dochádza k výraznému zvýšeniu teploty na povrchu materiálu. Táto teplota môže ovplyvniť štruktúru materiálu. Vznikne teplom ovplyvnená oblasť (TOO). Potvrdenie a hodnotenie prítomnosti tejto zóny je možné pomocou mikroskopickej analýzy štruktúry materiálu a merania mikrotvrdości v TOO.

Kľúčové slová: elektroerozívne drôtové rezanie, teplom ovplyvnená oblasť, kvalita povrchu, štruktúra, mikrotvrdość, ocele

1. ÚVOD

Elektroerozívne a/alebo elektroiskrové metódy obrábania vodivých materiálov sú založené na využití tepelnej energie, na ktorú sa premení elektrický výboj, vznikajúci medzi elektródami, teda nástrojom a obrobkom. Za nástroj sa podľa druhu EDM považuje

tvarová elektróda – EDM Sinking, drôt – WEDM Wire Electrical Discharge Machining alebo rotujúci (brúsny) kotúč – EDG Electrical Discharge Grinding).

Elektroiskrové drôtové rezanie WEDM alebo aj WIRE-EDM je progresívnou modifikáciou elektroiskrového obrábania. Jeho zavedenie zaznamenalo výrazný pokrok vo výrobe tvárniacich nástrojov, predovšetkým strižných a lisovacích nástrojov. Tieto nástroje sa vyrábajú prevažne z legovaných ocelí triedy 19. Pre zachovanie kvality povrchu po EDM je potrebné poznať vplyvy tejto technológie na materiál, hlavne na jeho povrch. To predurčuje voľbu následnej dokončovacej operácie.

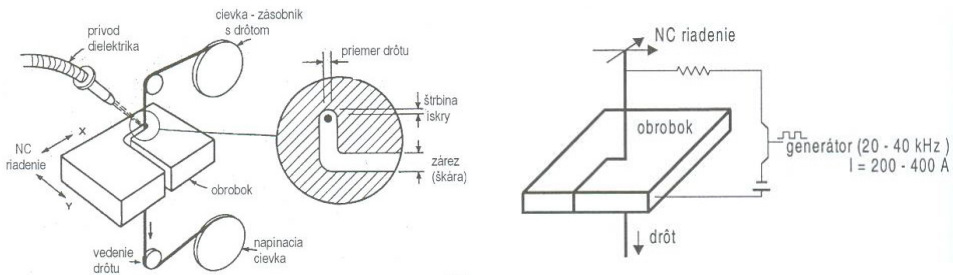
Povrch vytvorený WEDM má štruktúru nazývanú „pomarančová kôra“. Pod povrchom existuje vrstva – teplom ovplyvnená oblasť (TOO), kde je predpoklad zmien v štruktúre materiálu pôsobením vysokých teplôt a intenzívneho chladenia dielektrickou kvapalinou (RAJURKAR, K. P. 1995; STRAKA, L.). Dĺžka, resp. hrúbka TOO je rôzna. Tieto zmeny môžu ovplyvniť mechanické vlastnosti materiálu a tým aj celkovú kvalitu povrchu materiálu po rezaní WED. Zistenie prítomnosti TOO a prípadných zmien mechanických vlastností materiálu v tejto oblasti nám umožňuje mikroskopická analýza štruktúry materiálu a meranie mikrotvrdości podľa Vickersa.

Treba zdôrazniť, že prítomnosť TOO v materiáli je nežiaduci jav, ktorý ovplyvňuje kvalitu povrchovej a podpovrchovej vrstvy. Môže to predurčovať následnú voľbu dokončovacej operácie (ĽAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N. 2012).

2. MATERIÁL A METÓDY

2.1 Elektroiskrové drôtové rezanie WIRE-EDM

EDM je energolúčový proces, proces tepelného úberu materiálu. Lúč elektrického výboja je usmernený pomocou nástroja v dielektrickom prostredí. Používa iskrový výboj s vysokou prúdovou hustotou a nízkym urýchľovacím napätím.



Obr. 1 Princíp elektroiskrového drôtového rezania s detailom vzniku reznej medzery a zjednodušená schéma zapojenia WEDM (MAŇKOVÁ, I., 2000)

Účinok vysokých lokálnych teplôt spôsobuje metalurgické zmeny v povrchovej vrstve. Vysoká rýchlosť ochladzovania povrchu má za následok poruchy kryštalickej mriežky, fázové zmeny a vznik zvyškových napätí v povrchovej vrstve (LOK, Y. K. LEE, T. C., 1997; MAŇKOVÁ, I., 2000). Tieto zmeny nie sú stále ale súvisia s parametrom výboja,

dielektrikom, druhom rezaného materiálu, medzerou medzi nástrojom a obrobkom a pod. Prítomnosť teploty ovplyvnenej oblasti priamo vplyva na kvalitu povrchu materiálu po EDM.

Na obr. 1 je princíp elektroiskrového drôtového rezania – WEDM. Detail vzniku reznej medzery ukazuje vzdialenosť, tzv. gab medzi rezacím drôtom a rezaným materiálom. Pohyb drôtu je pomalý a je riadený NC alebo CNC systémom stroja, podľa požadovaného tvaru vyrábaného predmetu. Najrozšírenejším materiálom rezného drôtu – nástrojovej elektródy sú mosadzné a medené drôty, prípadne drôty z molybdénu alebo wolfrámu.

2.2 Posúdenie kvality reznej plochy ocele triedy 19 po WEDM

Kvalita reznej plochy po WEDM je porovnateľná s kvalitou povrchov dosahovanou na rovinných brúskach. Brúsené plochy sa síce lesknú, no mnohokrát vykazujú vyššie hodnoty drsnosti ako plochy po WEDM, ktoré sú matné. Povrch rezaného materiálu WEDM je možné skúmať z viacerých hľadísk. Sú to hlavne tvar reznej plochy, drsnosť povrchu a TOO materiálu a s ním spojené zmeny mikrotvrdosti v povrchovej štruktúre materiálu.

Zmeny v povrchovej vrstve vplyvom tepelného pôsobenia elektroerizívneho obrábania závisia od veľkosti energie a trvaní impulzu. Keďže pri erodovaní je rezaný povrch bodovo roztavený a odparený, možno predpokladať, že pri tom vznikajú chemické a fyzikálne pochody, ktoré menia vlastnosti materiálu na jeho povrchu. Celková hĺbka účinku sa mení od 10 do 30 μm v závislosti od toho, či je meraná na neopracovanom povrchu alebo dokončenom, opracovanom (MEČIAROVÁ, J., 2010; STRAKA, L., 2009).

Pri WEDM vznikajú v mieste obrábania – delenia vysoké teploty, vplyvom ktorých sa povrchová vrstva pretavuje a nasycuje difundovaným uhlíkom a tak vyvoláva štruktúrne zmeny. Tvoria ju dendridy tuhého roztoku a eutektoidné zmesi. Prítomnosť tvoriacich sa karbidov zvyšuje tvrdosť a krehkosť povrchovej vrstvy. Pod roztavenou povrchovou vrstvou je TOO. Hĺbka tejto oblasti závisí od východiskovej, základnej štruktúry rezaného materiálu a od charakteru jeho fázových zmien počas procesu. TOO je závislá aj od typu rezanej ocele. Pri oceliach legovaných karbidotvornými prvkami je TOO oveľa menšia ako napríklad pri zakalených uhlíkových oceliach (STRAKA, L., 2009; ČIČO, P., KALINCOVÁ, D., KOTUS, 2011).

Priebeh TOO je charakterizovaný tromi zónami. Na natavenom a rýchlo zakalenom povrchu materiálu sa tvorí tenká pretavená epitaxiálna vrstva (10 ÷ 40 μm). Za pretavenou vrstvou je oblasť kontaminovaná rezacím drôtom (25 μm , niektoré zdroje udávajú až 250 μm). Pod touto vrstvou je tzv. „biela vrstva“, silne nauhličená stuhnutá tavenina s tvrdosťou okolo 60 HRC. Táto vrstva sa pri metalografickom skúmaní javí ako dokonale homogénna a vidno aj jej laminárny charakter s hrúbkou okolo 400 μm (MAŇKOVÁ, I. 2000; STRAKA, L.; LLOYD, H. K., WAREN, R. H., 1965).

Na nástrojové ocele sa kladú vysoké požiadavky na vlastnosti ako sú tvrdosť, odolnosť proti popúšťaniu, húževnatosť, reznosť a odolnosť voči opotrebeniu, prekaliteľnosť a stálosť rozmerov. Sú to ocele triedy 19. Legované nástrojové ocele sú legované karbidotvornými prvkami, predovšetkým chrómom, molybdénom, vanádom a wolfrámom. Sú využívané hlavne na nástroje pre prácu za studena ale pri vhodnom legovaní je možné tieto ocele použiť aj na nástroje pre prácu za tepla a obrábacie nástroje. (KALINCOVÁ,

D., 2010) Práve chemické zloženie materiálu je jedným z faktorov, ktorý predurčuje zmeny jeho štruktúry pri obrábaní. Výrazne sa to prejavuje aj pri energolúčových technológiách, kde je proces obrábania spojený so zmenami spôsobenými vysokou teplotou.

Oceľ 19 552 je legovaná nástrojová oceľ pre prácu za tepla. Ekvivalentné označenie ocele podľa štandardov ISO je X38CrMoV5-1. Chemické zloženie v percentách je uvedené v tabuľke 1. Využitie materiálu je hlavne na formy pre tlakové liatie ľahkých kovov, hlavne pre vysoké výkony pri liatí hliníka a jeho zliatin, valce a piesty pre lisovú komoru, nástroje na pretlačovanie, pre nástroje na strihanie za tepla atď. (LEXIKÓN KOVOV 1.8, 2009; FIALA, J. a kol., 1987).

Tabuľka 1 Chemické zloženie ocele 19 552 (LEXIKÓN KOVOV 1.8, 2009)

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %
0,36–0,42	0,90–1,2	0,30–0,50	max. 0,030	max. 0,030	4,80–5,50	1,10–1,40	0,25–0,50

3. EXPERIMENT

V experimente bola sledovaná štruktúra povrchu materiálu ocele 19 552 po EDM a mikrotvrdosť v tepelne ovplyvnenej oblasti (TOO) a v základnom materiáli (ZM).

Materiál bol rezaný na zariadení CHARMILLES ROBOFIL 310(F). Je to elektroerozívna drôtová rezačka, bežne používaná v strojárskych praxi (obr. 3). Delenie ocele sa uskutočnilo mosadzným drôtom s priemerom 0,3 mm. Hrúbka vzorky bola $h = 6$ mm, tvrdosť materiálu 51 HRC.



Obr. 3 Elektroerozívna drôtová rezačka CHARMILLES ROBOFIL 310(F) (Pálinkás, R., 2013)



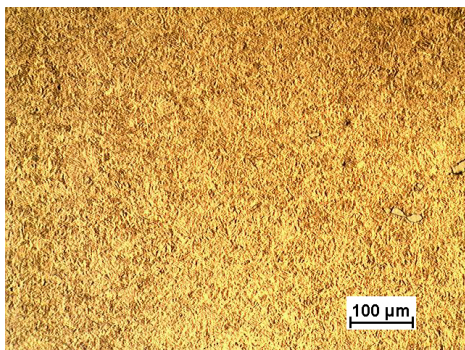
Obr. 4 Poloautomatický mikrotvrdomer

Vzorka pre sledovanie a hodnotenie štruktúry a mikrotvrdoosti povrchu materiálu bola pripravená štandardným spôsobom v laboratóriu štruktúrnych vlastností materiálov KVTM. Mikrotvrdosť bola meraná na poloautomatickom mikrotvrdomeri Micromet (obr. 4).

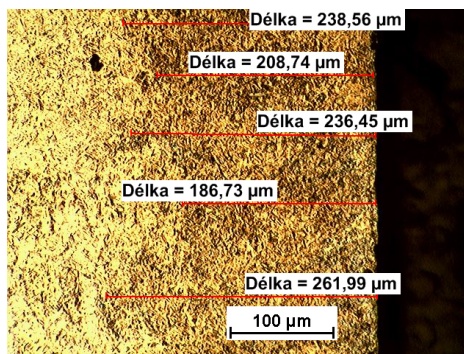
Hodnotenie mikrotvrdoosti sa robilo metódou HV 0,05. Metóda je založená na stanovení hĺbky vrstvy z nameraných hodnôt mikrotvrdoosti od povrchu do jadra materiálu.

3.1 Hodnotenie mikroštruktúry TOO

Mikroštruktúra základného materiálu a TOO po rezaní je na obr. 5 a 6.



Obr. 5 Mikroštruktúra ocele 19 552
(zv. 125 krát)



Obr. 6 Namerané hrúbky TOO po WEDM
(zv. 200 krát)

Mikroštruktúra základného materiálu je martenzitická, jemnozrná (obr. 5). Teplom ovplyvnená oblasť materiálu je zreteľne viditeľná (obr. 6), avšak jej hrúbka nie je všade rovnaká. Po spracovaní obrázku pomocou programu Nis Elements bola vypočítaná priemerná hodnota TOO na vybranom úseku. Priemerná hodnota dĺžky TOO je 226,49 μm.

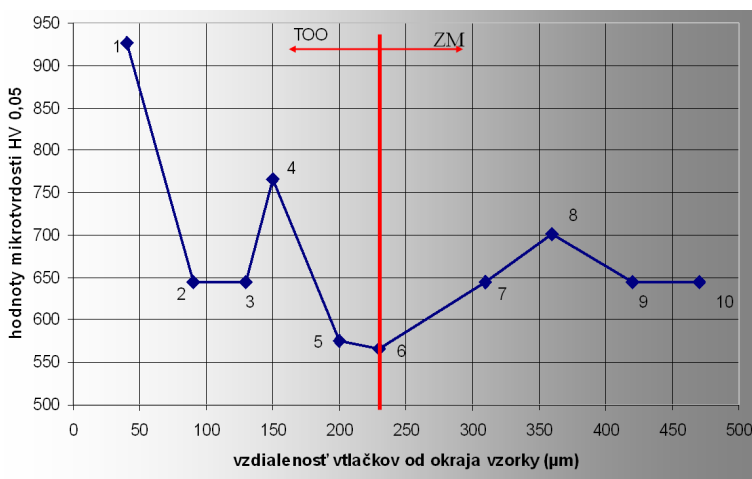
3.2 Meranie mikrotvrdości v TOO

V ďalšom kroku bola vykonaná skúška mikrotvrdości. Pre zistenie zmien tvrdosti materiálu v TOO bol meraný priebeh mikrotvrdości na výbruse s použitím mikrotvrdomera Micromet. Vzďialenosti od okraja vzorky, priemery vtlačkov a hodnoty HV sú v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Výsledky merania priebehu mikrotvrdości metódou HV 0,05

Číslo vtlačku	Vzďialenosť vtlačku od okraja vzorky (μm)	Priemer vtlačku D (μm)	Hodnota HV 0,05
	TOO		
1	40	10,0	927
2	90	12,0	644
3	130	12,0	644
4	150	11,0	766
5	200	12,7	575
6	230	12,8	566
	ZM		
7	310	12	644
8	360	11,5	701
9	420	12	644
10	470	12	644

Na obrázku 7 je graf závislosti mikrotvrdosti na vzdialenosti vtláčku od okraja vzorky. Červená čiara v grafe naznačuje rozdelenie umiestnenia vtláčkov. Môžeme povedať, že vtláčok č. 6 je približne na rozhraní tepelne ovplyvnenej oblasti a základného materiálu, keďže priemerná hodnota dĺžky TOO bola na vybranom úseku 226,49 μm .



4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledky experimentu, ktorého cieľom bolo zistenie prítomnosti TOO u legovanej ocele 19 552, sú dokumentované v tabuľke 2 a obr. 7.

Na metalografickom výbruse sa TOO v štruktúre materiálu odlišila tmavším sfarbením po naleptaní 2% Nitalom. Jej priemerná hrúbka je 226,49 μm . Môžeme predpokladať, že je to TOO, ktorá vznikla pôsobením tepla pri technológii obrábania materiálu energolúčovými procesmi. Ďalej je grafom na obr. 7 demonštrovaná závislosť mikrotvrdosti HV 0,05 na vzdialenosti od okraja vzorky. Jej priebeh ukazuje rozdielnosť hodnôt mikrotvrdosti na hrúbke cca 500 μm .

V dostupnej literatúre, kde sú dokumentované výsledky meraní mikrotvrdosti a hodnotenie štruktúry po WEDM bola zvolená podobná metodika. Avšak u ocelí triedy 19 neboli zaznamenané až tak výrazné hĺbky tepelného účinku, ktorý sa prejaví na TOO. Podľa niektorých autorov (MAŇKOVÁ, I., 2000; STRAKA, L.; MÔCIK, S., 2011) sa TOO pohybuje v rozmedzí 10 až 30 μm . Výrazná TOO je skôr typická pre delenie materiálu laserovým lúčom. Pri delení WED boli väčšie TOO zaznamenané pri zakalených uhlíkových oceliach. Pri výskumoch sa skôr ukázali problémy z povrchovými trhlinami (RAJURKAR, K. P., 1995; NOVAK, M. 2012; STRAKA, L.). Zvyškový austenit, prítomný v týchto oceliach vytvára priaznivé podmienky pre vznik mikro a makrotrhlin. Tento efekt sa však v našom experimente neprejavil. Napriek tomu staršie štúdie (LLOYD, H. K.; WARREN, R. H., 1965) pripúšťajú prítomnosť TOO v rozpätí 400 ÷ 1 000 μm v závislosti na energii impulzov.

Tak isto priebeh mikrotvrlosti bol špecifický (obr. 7). Podľa (MAŇKOVÁ, I. 2000; LLOYD, H. K. WARREN, R. H., 1965) sa TOO delí na tri zóny. Každá je charakterizovaná určitými hodnotami mikrotvrlosti. Závajú od druhu materiálu, ale aj od technických a technologických parametrov. Ak predpokladáme, že TOO vzorky je cca 226 µm, nami namerané hodnoty mohli byť vo všetkých troch zónach.

Pri konečnom zhodnotení experimentu môžeme konštatovať, že merania len z časti preukázali porovnateľné výsledky s výsledkami publikovanými v literatúre. Prítomnosť TOO po WEDM sa síce potvrdila, ale jej veľkosť nezodpovedá väčšine literárnych zdrojov, nakoľko v experimentoch boli odlišné parametre WEDM.

5. ZÁVER

Sledovanie kvality obrábaných povrchov materiálov je veľmi dôležité pre ich následné použitie. Z výsledkov experimentu možno vysloviť záver, po WEDM sa pri legovaných oceliach triedy 19, konkrétne ocele 19 552 mikroskopickou analýzou preukázala TOO, ktorá ovplyvňuje tvrdosť materiálu pod povrchom. Zmenou štruktúry v tejto oblasti môže dôjsť aj zmene mechanických vlastností, výskytu mikrotrochlín, čo si vyžaduje následnú dokončovaciu operáciu. Pre hlbšie skúmanie a exaktnejšie výsledky je však potrebné vykonať viac experimentov.

LITERATÚRA:

- ČIČO, P., KALINCOVÁ, D., KOTUS, M., 2011: *Influence of welding method on microstructural creation of welded joints* / In Research in agricultural engineering = Zemědělská technika. – ISSN 1212-9151. – Vol. 57, Special Issue (2011), S52-S58.
- FIALA, J. a kol. 1987: *Strojnické tabulky*, SNTL Praha, 1987, str. 71.
- KALINCOVÁ, D. 2010: *Technické materiály*, TU vo Zvolene, 2010, str. 67 – 68.
- LEXIKÓN KOVOV: verzia 1.8, 2009, VERLAG DASHÖFFER, Praha.
- LLOYD, H. K., WARREN R.H. 1965: *Metalurgy of spark machined surfaces*, Journal of the iron and steel institute, March 1965, pp. 238 – 247.
- LOK, Y. K. LEE, T. C. 1997: *Processing of advanced ceramics using the wire-cut EDM process*. Journal of Material Processing Technology 63, (1 – 3), January 1997.
- MAŇKOVÁ, I. 2000: *Progresívne technológie*, Vienaľa Košice, 2000, str. 63 – 89.
- MEČIAROVÁ, J. Effects of selected cutting parameters on surface roughness in side milling. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*. Poznań : Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010, Vol. 30, No. 4, s. 21 – 28. ISSN 1233-9709.
- MÔCIK, S., 2011: *Teplom ovplyvnená oblasť po termickom rezaní*. Časopis Strojárstvo 2011, Ročník 4, číslo 12. ISSN 1335-2938.
- NOVAK, M. 2012 : *Surfaces with high precision of roughness after grinding*, Manufacturing technology, June 2012, Vol. 12, No. 12 ISSN 1213-2489, pp. 66 – 70.
- PÁLINKÁS, R. *Hodnotenie zóny rezu po elektroerozívnom obrábaní*, Bakalárska práca, 2013, Zvolen.
- RAJURKAR, K. P. 1995: *Monitoring and control Systems for Die-Sinking and Wire EDM process*. EDM technology. Vol III, 1995, pp. 9 – 16.
- STN EN ISO 6507-1:2006-06 Kovové materiály. Skúška tvrdosti podľa Vickersa. Časť 1: Skúšobná metóda.

- STRAKA, L., 2009: *Matematické modelovanie a simulácia vplyvu technologických parametrov na kvalitu reznej plochy nástrojovej ocele po elektroerozívnom rezaní*, Habilitačná práca, TU v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove. 2009.
- STRAKA, L.: *Metodika merania tepelne ovplyvnenej zóny vzoriek po EDM rezaní drôtovou vyrezávačkou*, Dostupné na internete 10.01.2014 <http://www.fvt.tuke.sk/journal/pdf08/4-str-51-53.pdf>.
- ŤAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N. 2012: *Hodnocení kvality povrchu materiálu po řezání AWJ* / In *Strojírenská technologie : časopis pro vědu, výzkum a výrobu.* – ISSN 1211-4162. – Roč. 17, č. 3 (2012), s. 18–192.

Kontaktná adresa:

Ing. Miroslava Ťavodová, PhD.
Katedra výrobných technológií a materiálov
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene
Študentská 26, 960 53 Zvolen
tavodova@tuzvo.sk

REFERÁTY

SIMULÁCIA ŠÍRENIA ZVUKU V INTERIÉRI

SIMULATION OF SOUND PROPAGATION IN INTERIOR

Zdenka BECK – Petra LAZAROVÁ – Alexandra GOGA BODNÁROVÁ

ABSTRAC: The paper deals with the noise prediction methods, which are applied in simulation programs for creating noise maps in the interior. On the market is the amount of software products enabling modelling of acoustic situations, whether existing or proposed industrial plants. In the selection software products, it is important to know their algorithms, options, differences and their advantages and disadvantages for the objective assessment of acoustic situations.

Key words: acoustics, methods, simulation, working environment

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá metódami predikcie hluku, ktoré sú aplikované v simulačných programoch pre tvorbu hlukových máp v interiéri. Na trhu je množstvo softvérových produktov umožňujúcich modelovanie akustickej situácie, či už existujúcich alebo navrhovaných priemyselných prevádzok. Pri výbere softvérových produktov je dôležité poznať ich algoritmy výpočtu, možnosti, odlišnosti a ich výhody a nevýhody pre objektívne posúdenie akustickej situácie.

Kľúčové slová: akustika, metódy, simulácia, pracovné prostredie

1. ÚVOD

Klasické výpočtové metódy štatistickej akustiky využívajú jednoduché výpočtové vzťahy a zameriavajú sa predovšetkým na čo najpresnejšie zistenie frekvenčného priebehu času dozvuku, prípadne hladín akustického tlaku v posudzovanej miestnosti.

Klasické geometrické metódy sú založené na fyzikálnom zákone o odraze a vo všeobecnosti sa orientujú na dizajn navrhovanej miestnosti, kontrolu pokrytia miestnosti priamym a odrazeným zvukom a slúžia ako základ algoritmu pre mnohé počítačové programy.

Základným rozdielom medzi simulačnými metódami a tradičnými štatistickými metódami je v tom, že výsledkom simulácie nie je len všeobecná celková hodnota času dozvuku, príp. hladiny akustického tlaku, ale je to impulzná odozva priestoru, z ktorej môžeme odvodiť väčšinu akustických veličín, tak isto ako z merania.

Akustické simulácie a ich výsledky vyúsťujú v štádiu spracovania projektu do návrhu rozmiestnenia akustických obkladov, tvarovania plôch, návrhu umiestnenia odrazových, difúzných, či pohltivých materiálov. V prípade použitia simulácií pri posúdení priestorovej akustiky existujúcich stavieb a na diagnostiku akustických porúch uzatvo-

reného priestoru poskytujú možnosť vizualizácie zvukovej energie v priestore a v čase, kontrolu odrazov a posúdeniu akustických parametrov odvodených zo simulovanej impulzovej odozvy priestoru (Tomaševič, 2010).

2. SIMULAČNÉ METÓDY

V súčasnosti existuje viacero typov softvérov, pomocou ktorých môžeme simulovať virtuálny priestor a získať jeho akustické vlastnosti. Mnohé z týchto programov dobre spolupracujú s CAD systémami, čo prispieva k rýchlejšiemu vytvoreniu geometrie modelu, napríklad v AutoCADE, a následným exportom geometrie miestnosti do akustického softvéru.

Čo sa týka simulačných metód, existuje viacero typov algoritmov používaných v praxi. Medzi najrozšírenejšie patrí metóda zrkadlového zdroja (Image Source Method – IMS) a lúčová metóda (Ray Tracing – RTM) ako aj jej varianty (Beam – Tracing, Cone – Tracing atď.) Niektoré programy využívajú i kombináciu týchto metód, najčastejšie metódu zrkadlového zdroja s lúčovou metódou. Známa je i metóda difúzneho poľa.

Špeciálnu skupinu simulačných programov tvoria softvéry založené na metóde konečných prvkov (Finite Element Method – FEM) a jej variantoch, ktorými sú napr. metóda konečných objemov (Control Volume Method – CVM) alebo metóda okrajových elementov (Boundary Element Method – BEM) Metóda FEM bola pôvodne vyvinutá ako inžinierska metóda pre riešenie všeobecných úloh pevnostnej analýzy založenej na partiálnych diferenciálnych rovniciach. Touto metódou sa dajú počítať napätia a posunutia v materiály za rôznych okrajových podmienok. Dnes našla táto metóda konečných prvkov uplatnenie aj v CFD (výpočtová dynamika tekutín-computational fluid dynamics) hlavne tam, kde sa riešia rovnice prúdenia a v priestorovej akustike na riešenie špeciálnych problémov (Tomaševič a kol., 2010).

2.1 Metóda difúzneho poľa

Predikcia hluku s touto metódou je relatívne jednoduchá: hladina akustického tlaku v ľubovoľnom bode sa získa súčtom príspevkov priamych a odrazených polí, pričom odrazené pole sa považuje za difúzne. Umiestnenie, emisia zdrojov hluku a celková absorpcia v miestnosti sú jedinými vstupnými parametrami, ktoré sa vyžadujú na predikciu hladín akustického tlaku podľa týchto metód (STN EN ISO 11690-3, 2000).

Korektná predikcia hluku v priestoroch priemyselných hál vychádza z poznatku, že zvukové pole nie je možné vo všeobecnosti považovať za difúzne vzhľadom na nasledovné skutočnosti:

- tvary priemyselných hál charakterizované pomerom dĺžky-šírky-výšky majú zvyčajne pomer ľubovoľných dvoch rozmerov väčší ako tri,
- priestor haly zvyčajne nie je prázdny, ale je zaplnený inventárom, ktorý spôsobuje rozptyl a absorpciu zvuku,
- pohltivosť povrchov haly (podlaha, obvodové steny, strop) je väčšinou rozložená obzvlášť nerovnomerne.

Ak je cieľom predikcie hodnotenie expozície hluku, môžu sa metódy difúzneho poľa použiť ako prvý krok hodnotenia. V prípade, že predikciou stanovené hodnoty určujúcich

veličín prekročia limitné, resp. akčné hodnoty, je potrebné použiť presnejšie metódy (Dado a kol., 2012).

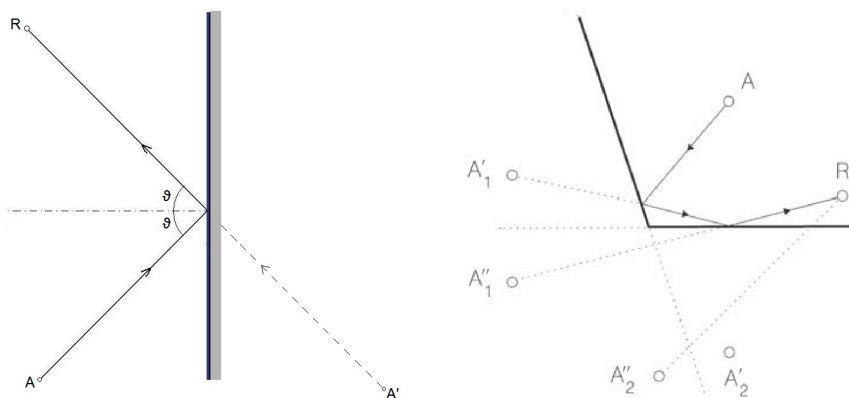
2.2 Metóda zrkadlového zdroja

Metóda zrkadlového zdroja (Image source method – ISM), niekedy nazývaná aj ako metóda mysleného zdroja je založená na zákone o odraze (t. j. uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu). Softvér, ktorý je na tejto metóde založený, teda počíta polohy zrkadlových obrazov zdroja zvuku za odrazovým povrchmi, vytvára spojnice zvukových lúčov spájaním obrazov zdroja zvuku s mikrofónmi a z dĺžky 3D vektorov zvukových lúčov pozná čas, v ktorom odrazený zvuk prichádza k posudzovanému bodu. Každý odraz sa zaznamenáva v pamäti počítača a postupne sa vytvára reflektogram z ktorého sa neskôr odvodí impulzová odozva na sledovanej pozícii.

Pre ISM metódu je teda typický bodový zdroj zvuku a bodový prijímač. Samozrejme že pre reflektogram je dôležité poznať nielen čas, v ktorom odrazy na posudzovanú pozíciu prichádzajú, ale aj ich intenzitu, príp. fázu. Intenzita každého odrazu v impulzovej odozve je vypočítaná z výkonu a smerovosti virtuálneho zdroja zvuku na základe fyzikálnych zákonov o intenzite zvuku v známej vzdialenosti od zdroja. V modeloch sa počíta aj s pohltivosťou zvuku vzduchom.

Pri dopade zvukového lúča na stenu modelu sa časť zvukovej energie odrazí a časť sa pohltí. Pri odraze lúča od stien a objektov v modeli je braná do úvahy zvuková pohltivosť týchto plôch tak, že sa veľkosť zvukovej energie po náraze jednoducho vypočíta ako $(1 - \alpha)$, kde α (–) je súčiniteľ zvukovej pohltivosti.

Takýmto spôsobom sa môžu postupne získať všetky odrazy, až kým ich intenzita vďaka dĺžke trajektórie zvukového lúča, pohltivosti povrchov a pohltivosti vzduchom nepoklesne na nulu, prípadne pod prah počutia (Tomašovič a kol., 2010).



Obr. 1 Princíp metódy zrkadlových zdrojov (Kutruff, 2007)

A – originálny zdroj, A' – zrkadlový zdroj prvého rádu, A'' – zrkadlový zdroj druhého rádu

Za normálnych podmienok však počet zrkadlových zdrojov rastie exponenciálne a preto je táto metóda (ako samostatná metóda) vhodná iba pre menšie a jednoduchšie

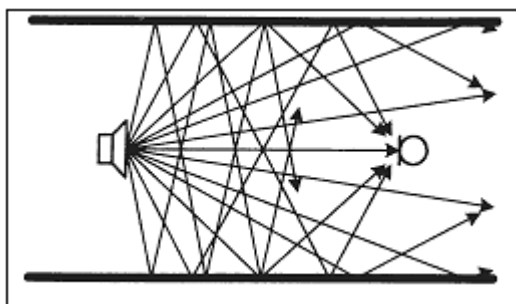
modely, t. j. modely s malým počtom stien. Pri komplikovaných priestoroch je pre zachovanie reálneho času simulácie potrebné metódu ISM kombinovať s inými metódami ako napríklad s lúčovou metódou.

2.3 Lúčová metóda (Ray-tracing)

Lúčová metóda našla v minulosti uplatnenie v simuláciách denného osvetlenia. Svetelné vlny možno totiž vďaka ich relatívne malej vlnovej dĺžke (v porovnaní s rozmermi stavebných konštrukcií) považovať za lúče. V akustike bola lúčová metóda prvýkrát použitá v šesťdesiatych rokoch pri simulácii koncertných sál. Dnes sa využíva najmä v kombinácii s inými metódami a veľmi často je použitá v rôznych modifikáciách. (Tomašovič a kol., 2010).

Lúčová metóda v akustike predpokladá, že za určitých okrajových podmienok môžeme zvukové vlny modelovať ako lúče. V stredných a vysokých kmitočtoch (nad 500 Hz) lúčová metóda obyčajne dobre koreluje s meraniami. V nižších kmitočtoch musíme niekedy počítať s menšími odchýlkami. Moderný softvér však dokáže tento predpoklad (považovanie zvukových vln za lúče) kompenzovať v algoritme výpočtu, pomocou difúzných modelov.

Lúčová metóda v akustických programoch generuje z bodového zdroja množstvo zvukových lúčov a sleduje dráhu šírenia a odrazy každého z nich. Spôsob, akým sú lúče z virtuálneho zdroja vyslané, môže byť buď preddefinovaný alebo náhodný. Typické je však rovnomerné rozloženie lúčov okolo zdroja. Poslucháči sú typicky modelovaní ako objemové telesá (tvaru gule, kocky a podobne). Najčastejšie sa však využívajú guľové tvary pretože umožňujú všesmerovú štruktúru, ktorú je možné relatívne ľahko uplatniť pri výpočte. Na výpočte je tiež veľmi dôležité, aby cez objem virtuálneho poslucháča preniklo čo najviac lúčov, a tak aby sa dosiahli čo najlepšie štatistické výsledky (Tomašovič a kol., 2010).



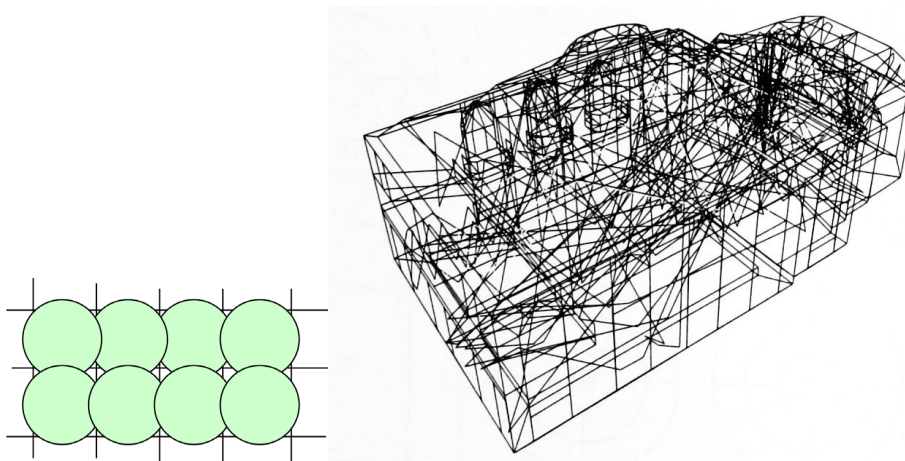
Obr. 2 Princíp metódy sledovania lúča (Novák, 2013)

Tento algoritmus umožňuje vykreslenie tzv. akustických máp pre rozličné preddefinované roviny v rámci skúmaného priestoru, napr. rovinu v ktorej predpokladáme miesta poslucháčov. Akustické mapy sú veľmi výhodné pri získavaní celkového obrazu o posudzovanej miestnosti a fungujú teda na princípe rozdelenia posudzovanej roviny na štvorcovú

sieť s poslucháčmi modelovanými ako guľové objekty s priemerom o čosi väčším než je raster roviny (obr. 3 vľavo). Po vyslaní lúčov z virtuálneho zdroja sa potom do výpočtu uvažujú lúče, ktoré prenikli do toho ktorého objemu ako počuteľné odrazy zvuku, t. j. s intenzitou nad prahom počutia (Tomašovič a kol., 2010).

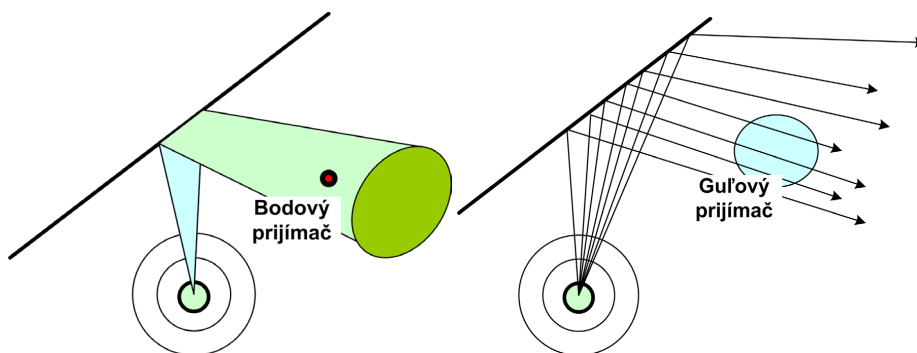
2.4 Beam-tracing method

Medzi najpoužívanejšie Beam-Tracing metódy patria kužeľové a ihlanové metódy. Princípom beam-tracingu, t. j. objemových lúčov je algoritmus, v ktorom sú tieto lúče vyslané z bodového zdroja, ich trajektória je ohraničená stenami modelu, od ktorých sú počas šírenia odrážané a testované na detekciu bodového prijímača. Bodový prijímač pomáha eliminovať počet exponenciálne narastajúcich zrkadlových zdrojov, čo je výhodou napríklad oproti lúčovej metóde kde je prijímač obyčajne guľového tvaru (Tomašovič a kol., 2010).



Obr. 3 Príklad štvorcovej siete s guľovými telesami, ktoré predstavujú poslucháčov (obr. vľavo) ukážka prvých desiatich lúčov vyslaných v modeli softvéru ODEON (obr. vpravo) (Vaculík, 2013)

Kužeľová (Cone-tracing) metóda je založená na sledovaní kužeľovitého zväzku lúčov vyžiareného virtuálnym zdrojom zvuku. Výhodou tejto metódy je usmernené vysielanie lúčov pod rôznymi priestorovými uhlami a relatívne rýchle výpočty. Avšak to, že kužele nepokrývajú celkom guľový povrch vyžarovania zvukovej energie okolo zdroja, sa už v minulosti ukázalo byť nevýhodou. Priľahlé kužele bolo potrebné prekryť a použiť algoritmus na zabránenie viacnásobných započítaní zvukovej energie, príp. rozdelenie energie tak, aby tieto viacnásobné príspevky dávali (v priemere) správnu hladinu zvuku. Drobné chyby sú často eliminované štatisticky (Tomašovič a kol., 2010).



Obr. 4 Príklad rozdielu medzi lúčovou metódou (ray-tracing) a cone tracing metódou (Vaculík, 2013)

2.5 Metóda konečných prvkov

Metóda konečných prvkov (Finite Element Method – FEM) sa vo veľkej miere využíva pri riešení všeobecných úloh stavebnej mechaniky. Základom metódy konečných prvkov je generovanie siete bodov v posudzovanom priestore, zostavenie prvkov z bodov siete, interpolácia pre spojenie lokálneho riešenia s uzlovými bodmi a riešenie partiálnych diferenciálnych rovníc zvukového vlnenia v uzlových bodoch. Uzlové body sú body v ktorých sa vypočítavajú funkčné hodnoty riešenia, prípadne derivácie určujúcich veličín. Uzlové body siete vytvárajú štruktúru prvkov, ktoré vyplňujú fyzikálnu oblasť priestoru. Prvky môžu byť jedno, dvoj alebo trojrozmerné. Hranica každého prvku je určená uzlovými bodmi, ale uzlové body sa môžu nachádzať vo všeobecnosti i vo vnútri a na stenách prvku. Steny prvku môžu byť lineárne, ale i kvadratické čiary. Pre dosiahnutie spoľahlivých výsledkov v akustike je potrebných minimálne šesť prvkov na vlnovú dĺžku a preto je vhodné využívať tieto metódy len pre malé miestnosti a pre nízke frekvencie. Pri použití týchto metód je teda okrem geometrického modelu priestoru potrebné skonštruovať aj konvergujúcu sieť (Tomašovič a kol., 2010).

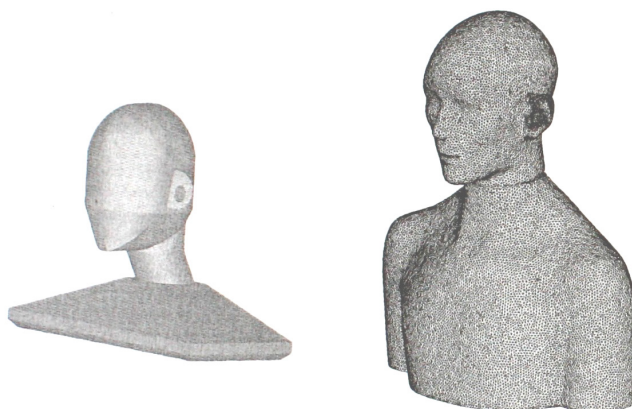
2.6 Metóda okrajových prvkov

Ak sa rozhodneme pre použitie metódy okrajových prvkov (Boundary Element Method – BEM) plochy, ktoré ohraničujú posudzovaný priestor musíme najprv rozdeliť na diskkrétne zložky s príslušnými akustickými vlastnosťami. Každá z týchto zložiek je potom považovaná za zdroj zvuku, ktorý vyžaruje zvukovú energiu do uzatvoreného priestoru a prispieva ku generovaniu celkovej impulzovej odozvy. Jedným z najväčších problémov metódy okrajových prvkov je veľké množstvo výpočtov na vygenerovanie impulzovej odozvy, najmä pri odrazoch vyšších rádov, kde počet zložiek rastie exponenciálne.

Tieto algoritmy (FEM, BEM) si v porovnaní s lúčovými metódami vyžadujú veľmi dlhý výpočtový čas, keďže pri výpočte využívajú numerické metódy a iterácie. Metóda

konečných prvkov sa v priestorovej akustike používa v špeciálnych prípadoch a to najmä v prípadoch, kde lúčovú metódu nie je možné uplatniť (t. j. vlnovú dĺžku nemôžeme zanedbať). Akustické modely simulované FEM a BEM metódami dávajú výborné výsledky na vybrané simulované kmitočty. Takáto vysoká presnosť, ktorá je na úkor výpočtového času, však nie je pre architektonickú akustiku potrebná, pretože v priestorovej akustike sú výsledky požadované len s presnosťou na oktávové pásma. Metóda okrajových prvkov preto našla svoje uplatnenie vo výpočtoch v ktorých je vlnová dĺžka dôležitým detailom a v akustike existujú pre BEM rôzne zaujímavé aplikácie. Jedna z nich je napríklad simulácia ľudskej hlavy pre výpočet funkcie hlavy HRTF (Head Related Transfer Function). Táto funkcia sa obyčajne meria v bezdozvukovej komore a jej parametre sa potom využívajú pri auralizácii virtuálneho priestoru. V súčasnosti existujú úspešné pokusy simulácií týchto HRTF dát v BEM, ktoré možno jednoducho aplikovať do akustického softvéru pre predikciu priestoru.

BEM simulácie pomáhajú nielen pri získavaní informácií akustickej pohody pre dospelých, ale napríklad i pri simuláciách detských HRTF, nakoľko merania na deťoch sú z časových dôvodov nemožné. Ďalej BEM metódy ukazujú ako výhodné pri modelovaní a optimalizácii mikrofónov na binaurálnych načúvacích prístrojoch pre posluchovo postihnutých ako aj pri vývoji kochleárných implantátov (Tomašovič a kol., 2010).



Obr. 5 Príklad 3D modelov ľudskej hlavy simulovanej v BEM (Tomašovič a kol., 2010)

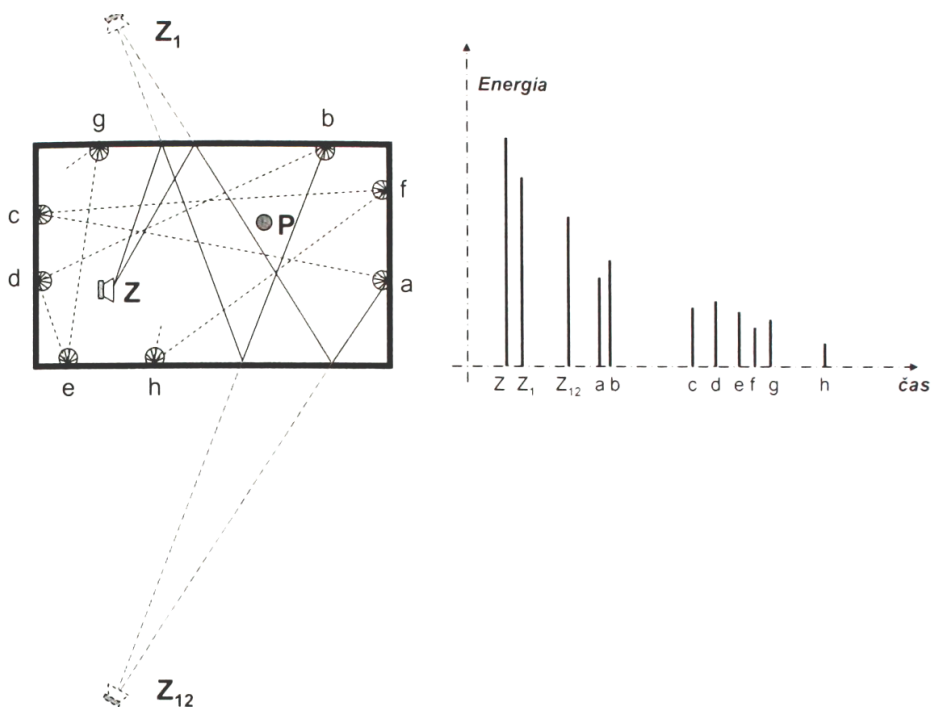
2.7 Hybridné metódy

Za účelom redukcie času výpočtu boli vytvorené hybridné metódy, ktoré kombinujú výhody metód sledovania lúča a zrkadlových zdrojov. Ako príklad použitia hybridnej metódy pri predikcii huku v priemyselných halách je výpočtový algoritmus počítačového programu ODEON. Impulzové odozvy bodových zdrojov sú vypočítané použitím hybridnej metódy, v ktorej sú v prvom kroku spojením metód zrkadlových zdrojov a sledovania lúča stanovené „skoré“ odrazy. V tejto časti simulácie sú lúče vysielané zo zdroja za účelom detekcie potenciálnych zrkadlových zdrojov.

Za každým po detekcii zrkadlového zdroja sa príslušná odrazivá plocha začne správať ako zdroj, ktorý vyšle určitý počet rozptýlených lúčov a informácie o ich trajektóriách a počte identifikovaných zrkadlových zdrojov sú ukladané. Rozptýlené lúče sú odrážané jednotlivými povrchmi miestnosti až do definovanej hodnoty prechodového stavu (z angl. transient order). Následne sú prostredníctvom špeciálnej metódy sledovania lúča (ray-radiosity), ktorá generuje sekundárne zdroje vyžarujúce energiu lokálne z povrchov stien, determinované „neskoré“ odrazy (Dado, 2012).

Rozhranie týchto dvoch častí je definované číslom TO (Transition order), ktoré vyjadruje maximálny rád zrkadlového zdroja, ktorý bude použitý pre záznam do prvej časti reflektogramu. Typickou hodnotou je $TO = 2$, čo znamená že metódou zrkadlového zdroja sú počítané odrazy od zrkadlových zdrojov prvého a druhého rádu. Napríklad: zvolíme $TO = 0$, znamená že v simulácii bude použitá len lúčová metóda (Tomašovič a kol., 2010).

Na obr. 6 sú dva susedné lúče sledované až po šiestu úroveň odrazu. Hodnota prechodového stavu je nastavená na úroveň 2, takže pri prekročení uvedenej hodnoty bude smer odrazu lúčov stanovený náhodným výberom z rozdelenia podľa Lambertovho zákona. Prvé dva odrazy sú zrkadlové a oba lúče identifikovali zrkadlové zdroje Z_1 a Z_2 . V rámci odozvy každý z uvedených zrkadlových zdrojov umožňuje vznik jedného odrazu, keďže oba zdroje sú z miesta príjemcu viditeľné. Avšak v prípade zložitejšieho tvaru miestnosti to nemusí platiť pre všetky zrkadlové zdroje (Dado, 2012).



Obr. 6 Princíp výpočtovej metódy pre impulzovú odozvu v Odeone: lúče vytvárajú obrazy zdrojov pre skoré odrazy a sekundárne zdroje na stenách pre neskoršie odrazy. Vpravo je znázornený príslušný reflektogram (podľa manuálu programu Odeon)

V softvéri ODEON sú simulácie v zásade uskutočnené v dvoch krokoch: (1) v časti nezávislej pozície prijímača (v programe nazývaná tiež Trace-rays) a (2) v časti závislej od pozícii prijímača. Toto rozdelenie impulzovej odozvy je urobené pre potreby skrátenia výpočtového času uložením a viacnásobným použitím niektorých už vypočítaných častí odoziev (trajektórií lúčov). Skoré odrazy lúčov sú spravidla zrkadlové a neskoršie odrazy sú odrážané podľa „Late Reflection method“.

V Trace-rays, časti nezávislej na pozícii prijímača sú lúče vyslané zo zdroja postupne všetkými smermi tak, že vystopujú všetky možné trajektórie a následne sú uložené do pamäte počítača (ray-history) vo formáte: číslo lúča + zasiahnutých stien modelu, súradnice bodov v ktorých lúč narážal o steny atd. Informácie z tejto databázy možných trajektórií sú potom použité pre tvorbu reflektogramu ktorejkoľvek pozície prijímača v miestnosti, čo značne skraca simuláciu čas.

V časti závislej od pozície prijímača softvér „zobiera“ z vytvorenej databázy (ray-history) príslušné odrazy lúčov pre užívateľom definovanú pozíciu prijímača a do reflektogramu samozrejme pridá priamy zvuk (Rindel, 2000).

2.7.1 Výpočet skorých odrazov (Early Reflection Method)

Pri simulácii najprv prebieha tzv. test viditeľnosti zdroja pre každú pozíciu prijímača, založený na efektívnom určení zrkadlových zdrojov zvuku, ktoré majú veľkú pravdepodobnosť byť počas simulácie použité. Týmto sa zo simulácie odstráni nadbytočný výpočtový čas.

Keď sú efektívne zrkadlové zdroje nájdené, prebieha tvorba prvej časti reflektogramu použitím metódy zrkadlového zdroja (ISM) a metódy ESR (early scattering rays). V tejto časti simulácie sú lúče vyslané zo zdroja a informácia o ich putovaní v modeli je uložená do pamäte počítača. Ukončenie putovania každého lúča určuje geometria simulovaného priestoru.

Zrkadlová metóda ako taká nezahrňuje rozptyl zvuku. Z dôvodu začlenenia rozptylu zvuku do skorých odrazov, výpočet použitý pre prvú časť reflektogramu je v podstate už sám o sebe hybridnou metódou. Zakaždým ako je nájdený zrkadlový zdroj, v programe sa okamžite spustí podprogram pre rozptyl zvukovej energie od dotčného zrkadlového zdroja zvuku / povrchu. Napr. ak majú všetky povrchy v miestnosti koeficient rozptylu $s = 0,3$ tak energia zrkadlovo odrazených lúčov od myslených (zrkadlových) zdrojov prvého rádu je vynásobená číslom $(1-0,3)$, energia zrkadlovo odrazených lúčov od myslených zdrojov druhého rádu je vynásobená $(1-0,3) \cdot (1-0,3)$ a rozptýlené lúče pokrývajú zvyšok zvukovej energie. Vždy keď program identifikuje zrkadlový zdroj, príslušná odrazivá plocha sa začne správať ako zdroj, ktorý vyšle počet rozptýlených lúčov. Tieto skoré rozptýlené lúče budú ďalej odrážané povrchmi virtuálnej miestnosti až do zadaného čísla TO.

Vo všeobecnosti je v tejto časti braná do úvahy smerovosť primárneho zdroja v relevantnom smere vyžarovania, pohltivosť stien modelu, pohltivosť zvuku vzduchom, útlm zvuku vzdialenosťou od zdroja (vypočítanej z dĺžky putovania zvukového lúča), frekvenčne závislá strata energie vplyvom rozptylu. Rozptyl zvuku nastáva v prípade drsnosti povrchu zadanej koeficientom rozptylu alebo kvôli malému rozmeru ploche v modeli, alebo aj vplyvom hrán geometrie modelu (Tomašovič a kol., 2010).

2.7.2 Výpočet neskorších odrazov (Late Reflection Method)

Druhá časť reflektogramu je založená na špeciálnej lúčovej metóde. Tu už lúče nie sú „prieskumníkmi geometrie“, ale stávajú sa „nosičmi“ zvukovej energie. Zakaždým ako lúč narazí na niektorý z vnútorných povrchov modelu, vytvorí sa na mieste nárazu sekundárny zdroj. Energia sekundárneho zdroja sa rovná celkovej energii primárneho zdroja podelená číslom lúčov a vynásobená koeficientmi odrazivosti povrchov, od ktorých sa lúč počas putovania odrazil (kým dopadol na dotýčnú plochu). Každý z takto vytvorených sekundárnych zdrojov na vnútorných povrchoch modelu je ďalej uvažovaný ako povrchový zdroj s vyžarovaním tvaru povrchu polgule so smerovou charakteristikou podľa Lamberta, Oblique-Lamberta alebo uniformnej smerovosti, v závislosti od odrazu zvuku a od programových nastavení.

Intenzita vyžarovania je proporčná kosínusu uhla, ktorý zviera vektor sekundárneho zdroja k prijímaču s kolmicou na dotýčnú plochu. Intenzita odrazu v bode prijímača je potom dopočítaná na základe fyzikálneho zákona o poklese intenzity so štvorcem vzdialenosti. Čas prichádzajúcich odrazov zvuku je vypočítaný z dĺžky trajektórie lúča od primárneho k sekundárnemu zdroju a so vzdialenosti medzi sekundárnym zdrojom a prijímačom. Typická impulzová odozva zahŕňa viac než 100 000 odrazov, pričom každý z odrazov je definovaný časom príchodu, hladinou akustického tlaku v každom oktávovom pásme a uhlom dopadu. Frekvenčný rozsah v ktorom prebieha výpočet odozvy je 63 Hz až 8 kHz, pričom oktávové pásmo 16 kHz je extrapolované ako deviate pásmo, ktoré je neskôr využité len na auralizáciu. Akustické veličiny ako T_{30} , EDT, C_{80} a podobne sú odvodené (vypočítané) z integrovanej dozvukovej krivky.

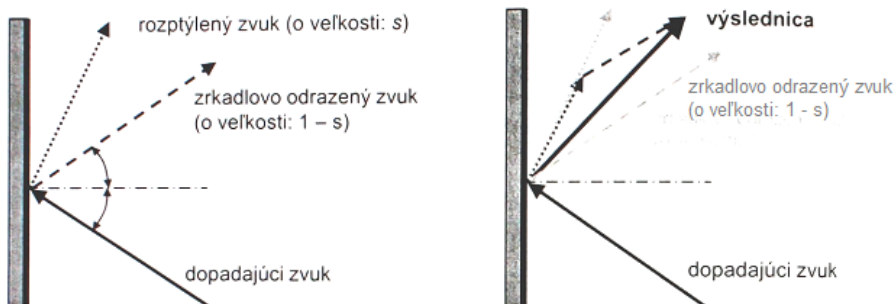
Neskoré odrazy v algoritme neprodukujú exponenciálne narastajúce množstvo odrazov v čase ako by sa dalo predpokladať, ale udržuje sa konštantná hustota odrazov vo všetkých nasledujúcich výpočtoch za účelom skrátenia dĺžky výpočtového času. V tejto časti je braná do úvahy smerovosť primárneho zdroja v relevantnom smere radiácie, pohltivosť stien modelu, pohltivosť zvuku vzduchom, útlm zvuku vzdialenosťou od zdroja (vypočítanej z dĺžky putovania zvukového lúča), frekvenčne závislá strata energie vplyvom rozptylu (Tomašovič a kol., 2010).

2.7.3 Metóda „Late-ray“ odrazu

Využitie rozptylu založeného na vektorovej metóde je efektívny spôsob započítania rozptylu do RTM. Metóda „Late-ray“ odrazu je vektorovou metódou v ktorej je smer odrazeného lúča vypočítaný zo zrkadlovo odrazeného vektoru (podľa Snellovho zákona) váženého číslom $(1-s)$, keď vektor rozptýleného zvuku (náhodného smeru, podľa Lambertovej uhovej distribúcie ideálneho rozptylu) je vážený súčiniteľom rozptylu s ($-$).

Keď $s = 0$, zvukový lúč je odrazený zrkadlovo a naopak, ak $s = 1$, dopadnutý lúč je odrazený náhodným smerom. Obyčajne sú však hodnoty rozptylu okolo 0,1 až 0,2 a v týchto prípadoch sa odrazený lúč vychýli od zrkadlového smeru odrazu len minimálne.

Túto metódu používa softvér pri výpočte neskorých odrazov zvuku pri bodovom zdroji (kde sú skoré odrazy simulované ISM metódou) a počas tvorby celého reflektogramu v prípade priamkových a plošných zdrojov zvuku (Tomašovič a kol., 2010).



Obr. 7 Schematická ukážka rozptylu vektorovou metódou (podľa manuálu programu Odeon)

3. ZÁVER

Príspevok tvorí teoretickú časť zaoberajúcu sa metódami predikcie hluku v pracovnom prostredí, ktorých algoritmy sú implementované v softvérových produktoch pre tvorbu hlukových máp interiéru. Cieľom príspevku je poukázať na dôležitosť porozumenia rozdielnostiam, možnostiam, výhodám i nevýhodám týchto metód a to predovšetkým pre správne použitie metódy vo výpočte konkrétnej situácie, čím je možné vopred sa vyhnúť neobjektívnosti, chybám a nepresnostiam vo výpočtoch.

LITERATÚRA

- TOMAŠOVIČ, P. a kol.: 2010. *Akustika budov. Priestorová akustika*. Bratislava: STU v Bratislave, 2010, 62 – 86 s. ISBN 978-80-227-3235-2.
- VACULÍK, M.: Priestorová akustika. Simulácia akustických vlastností priestoru. [online]. Žilina: Katedra telekomunikácií a multimédií EF ŽU. [cit. 2013-11-25]. Dostupné na internete: <http://kt.uniza.sk/ktam/download/Studijne_materialy/Multimedia/Priestorova_akustika/PRAK06.pdf>.
- DADO, M. a kol.: 2012. *Meranie a predikcia hluku v priemyselných halách*. Časopis výskumu a aplikáci v profesionálnej bezpečnosti [online], 2012, roč. 5, č. 1 – 2. Dostupné na internete: <<http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-01-02-2012/mereni-hluku-v-halach.html>>. ISSN 1803-3687.
- DADO, M. – HNILICA, R.: 2012. *Predikcia hluku v pracovnom prostredí*. Zvolen: TU vo Zvolene, 2012. 64 s. ISBN 978-80-228-2370-8.
- KUTRUFF, K. H.: 2007. *Sound propagation in rooms*. In: Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken: John Willey and Sons, 2007, 103 s. ISBN 9780247139597.
- NOVÁK, J.: *Matematické modely popisujúci šírenie hluku*. [online]. Liberec: Ekosoft. [cit. 2013-11-20]. Dostupné na internete: <<http://ekosoft.byl.cz/clanky/modely.htm>>.
- RINDEL, J. H.: 2000. *The Use of Computer Modeling in Room Acoustic*. In: Journal of Vibroengineering, 2000, Vol. 4, No. 3, pp. 219 – 224.
- STN EN ISO 11690-3: 2000, Akustika – Odporúčané postupy na navrhovanie nízko-hlučných pracovísk vybavených strojovými zariadeniami – Časť 3: Šírenie zvuku a predpovedanie hluku na pracovisku.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0432-12 a v rámci projektu VEGA 1/1216/12.

Kontaktná adresa:

Ing. Zdenka Beck

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky,
Park J. A. Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: zdenka.kluknavska@tuke.sk

Ing. Patra Lazarová

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky,
Park J. A. Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: petra.lazarova@tuke.sk

Ing. Alexandra Goga Bodnárová

Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky,
Park J. A. Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: alexandra.bodnarova@tuke.sk

HODNOTENIE DRSNOSTI POVLAKOV NA RAZIDLÁCH MINCÍ

EVALUATING THE ROUGHNESS OF COATINGS FOR COINS PUNCHES

**Tomáš HANES – Rudolf KAŠTAN – Júlia HRICOVÁ – Petra SEMANOVÁ
– Juraj KOSTÚR**

ABSTRACT: The paper deals with the roughness control of coated functional parts of tools for the mintage by three different coats. The roughness of relief coining die is a very important factor for achievement quality surface minted coin. The quality of particular coats on the relief minting dies in term of their roughness was evaluated by three different methods and the results were compared with each other. There was used measurement methods by the contact profilometer, the optical interferometry, the confocal microscopy and the visualization in program Gwyddion.

Key words: roughness, coining die, optical interferometry, confocal microscopy

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá kontrolou drsnosti povlakovaných funkčných častí nástrojov na razenie mincí tromi rôznymi povlakmi. Drsnosť reliéfu razidla mince je veľmi dôležitý faktor pre dosiahnutie kvality povrchu vyrazenej mince. Kvalita jednotlivých povlakov na reliéfe razidiel z hľadiska ich drsnosti bola hodnotená rôznymi metódami a výsledky boli medzi sebou porovnané. Použité boli metódy merania pomocou dotykového profilometra, optickej interferometrie, konfokálnej mikroskopie a vizualizácie v programe Gwyddion.

Kľúčové slová: drsnosť, razidlo mince, optická interferometria, konfokálna mikroskopia

ÚVOD

Drsnosť povrchu je definovaná ako *súhrn nerovností povrchu s relatívne malými vzdialenosťami vznikajúcimi ako dôsledok použitej technológie výroby* (STN EN ISO 4287:1999).

Charakter povrchu súčiastok a častí strojov významne ovplyvňuje vlastnosti funkčných, ale aj voľných povrchov súčiastok. Je jedným z parametrov, ktoré určujú použiteľnosť jednotlivých súčiastok v rámci rôznych konštrukčných celkov. Optimálna voľba charakteru povrchu a dodržanie požiadaviek na charakter povrchu pri vyhotovení výrobkov ovplyvňuje správnu funkciu, životnosť, cenu a vzhľad jednotlivých súčiastok, ale aj celej konštrukcie. Dodržanie rovnakej kvality funkčných povrchov je jednou z podmienok

úplnej vzájomnej zameniteľnosti a vymeniteľnosti súčiastok. Drsnosť vzájomne sa pohybujúcich funkčných povrchov ovplyvňuje straty trením, odolnosť voči opotrebeniu, životnosť súčiastok, funkciu mazania, dobu zábehu, odolnosť voči účinkom prostredia a pod. Drsnosť voľných povrchov súčiastok ovplyvňuje vzhľad výrobkov, odolnosť voči korózii, prestup tepla a iné. Preto je potrebné, aby požadované vlastnosti povrchu súčiastok boli predpisované na výkresoch súčiastok, v normách, v technických podmienkach a pod.

Vlastnosti povrchu určuje najmä drsnosť povrchu, ktorou nazývame veľmi jemné nerovnosti, ktoré vznikli pri výrobe súčiastky, a to:

- na *obrobenom povrchu* sú to stopy po rezných nástrojoch pri sústružení, frézovaní, hoblívaní, brúsení, lapovaní a pod.,
- na *neobrobenom povrchu* sú to odtlačky nerovností foriem pri odlievaní, zápustiek pri kovaní, valcov pri valcovaní a pod.

Predpisovanie a stanovovanie jednotlivých parametrov drsnosti je u nás normalizované pomocou prevzatých medzinárodných noriem ISO. Základné pojmy, definície a postupy na hodnotenie určuje norma STN EN ISO 4287: 1999 Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Charakter povrchu: Profilová metódy. Termíny, definície a parametre charakteru povrchu.

Charakter povrchu sa v zmysle tejto normy a ďalších noriem hodnotí podľa profilovej metódy, t. j. zo skutočného profilu nerovností povrchu, t. j. čiary, ktorá vznikne rezom skutočného povrchu definovanou plochou.

Skutočný povrch súčiastky, t. j. povrch ohraničujúci teleso a oddeľujúci ho od okolitého prostredia sa vždy menej alebo viac líši od geometrického povrchu, ktorý predstavuje ideálny povrch, ktorého menovitý tvar je určený výkresom (Žarnay, 2013).

V praxi sa vo veľkej miere drsnosť kontroluje dotykovým spôsobom profilovou metódou. Snímaný profil, nazývaný primárny profil, obsahuje okrem zložiek drsnosti aj ďalšie zložky (vlnitosť a tvar), ktoré je pre vyhodnotenie drsnosti potrebné eliminovať filtrovaním. Po odfiltrovaní sa získa profil drsnosti (Drsnosť povrchu, 2013).

Dlhoročné skúsenosti ukázali, že hodnota R_a (tj. stredná aritmetická odchýlka profilu drsnosti) neposkytuje dostatočné informácie, ktoré by umožnili získať ucelenú predstavu o stave profilu a povrchu. Spoliehať sa iba na hodnoty opisujúce drsnosť povrchu z lineárneho merania (R_a) je nepresné. Aj keď dostaneme hodnotu, ktorej sme sa naučili rozumieť, napriek tomu neposkytuje podrobnejšie informácie o stave povrchu. Moderné prístrojové vybavenie dovoľuje plošne zmapovať povrch a vyhodnotiť tzv. plošnú drsnosť (S_a). Dosiagnuté hodnoty plošnej drsnosti sú odlišné od hodnôt lineárnej drsnosti. Tieto nepresnosti sú jednak dané technológiou (spôsobom) merania, a tiež aj charakterom prevedeného merania (Kříž, 2011).

MATERIÁL A METÓDY

Materiál – oceľ Böhler K455

Drsnosť povrchu bola meraná na funkčnej ploche nástrojov na razenie mincí. Razičlá boli vyrobené z ocele firmy Böhler K455 (DIN 60 WCrV 7). Je to oceľ odolná voči rázom, s vysokou húževnatosťou a odolnosťou proti tlakovému namáhaniu, ako aj vysokou

odolnosťou proti opotrebeniu oterom. Tepelné spracovanie a chemické zloženie je uvedené v tabuľke 1. Používa sa na výrobu strižných nástrojov (matrice a razníky) pre spracovanie hrubších plechov, pre razníky pre dierovanie za studena, pre masívne raziace nástroje, na nože nožníc pre strihane za studena, na nástroje pre opracovanie dreva, na pretrhávacie nástroje a na nástroje pre prácu za tepla s nízkym tepelným namáhaním. Popúšťací diagram ocele K455 je na obrázku 1 (Böhler K455, 2013).

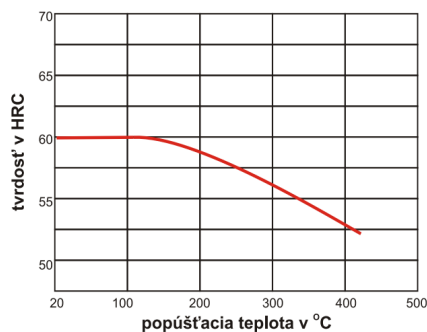
Tabuľka 1 Tepelné spracovanie a chemické zloženie ocele Böhler K455 (Böhler K455, 2013)

Tepelné spracovanie							
Teplota tvárnenia				1050 – 850 °C			
Teplota žihania na mätko				710 – 750 °C			
Tvrdosť po žihaní na mätko				max. 225 HB			
Teplota žihania na odstránenie vnútorných pnutí				650 °C			
Chemické zloženie		C	Si	Mn	Cr	V	W
Obsah prvkov v %		0,63	0,60	0,30	1,10	0,18	2,00

Popúšťací diagram BÖHLER K 455

- kaliaca teplota 890 °C

- prierez skúšobnej vzorky: štvorhran 20 mm



Obrázok 1 Popúšťací diagram ocele Böhler K455 (Böhler K455, 2013)

Razidlá boli povlakované tromi rôznymi povlakmi:

- TiCrN od firmy STATON, s. r. o. (nanášaný technológiou PVD, hrúbka 1,5 µm),
- CrN od firmy Oerlikon Balzers, a. s. (nanášaný technológiou PVD, hrúbka 2,8 µm),
- WC/C od firmy Oerlikon Balzers, a. s. (nanášaný technológiou PVD, hrúbka 5 µm).

Povlakované razidlá sú na obrázku 2, TiCrN je lesklý zlatý, CrN je lesklý striebornošedý a WC/C je matný antracitový.



Obrázok 2 Povlakované razidlá (zľava povlak TiCrN, CrN a WC/C)

Metódy merania

Pri kontrole drsnosti povrchu sa využívajú metódy, ktoré možno rozdeliť na metódy kvalitatívne a kvantitatívne.

Metódy kvalitatívne sú založené na subjektívnom porovnávaní kontrolovaného povrchu s povrchom vzorovým, ktorého drsnosť je známa. Porovnávať sa môžu iba povrchy opracované rovnakým alebo aspoň podobným spôsobom, pričom výsledkom kontroly je zistenie, že kontrolovaná plocha je hladšia alebo drsnejšia ako vzorová, resp. že jej drsnosť je v rozmedzí dvoch po sebe nasledujúcich vzoriek (napr. $3,2\ \mu\text{m}$ a $6,3\ \mu\text{m}$). Na porovnávanie sa využívajú vzorkovnice drsnosti povrchu. Sú to kazety zoradené do jednotlivých kolekcii obsahujúce vzorky (etalóny) obrobené rôznymi druhmi opracovania v rôznych stupňoch drsnosti. Porovnávanie sa vykonáva hmatom a zrakom, pričom hmat umožňuje presnejšie rozlíšenie dvoch drsností. Pri kontrole zrakom je možné pomôcť si lupou, alebo sa využívajú porovnávacie mikroskopy.

Metódy kvantitatívne vyjadrujú drsnosť povrchu číselne. Prístroje, ktorými sa tieto parametre zisťujú, sú založené buď na optickom (bezdotykovom), alebo dotykovom spôsobe merania. Pri optickom spôsobe zisťovania drsnosti sa využíva napríklad princíp svetelného rezu a princíp interferenčný (Drsnosť povrchu, 2013).

Pre meranie drsnosti (lineárnej a plošnej) povlakovaných razidiel sme použili nasledovné metódy merania:

- meranie dotykovým profilomerom Hommel Tester T500 (R_a),
- meranie metódou optickej profilometrie pomocou Sensofar PLu neox ($R_a + S_a$),
- meranie konfokálnou mikroskopiou pomocou Sensofar PLu neox (S_a),
- vizualizácia a meranie v programe Gwyddion (R_a).

Pri *dotykovom spôsobe zisťovania drsnosti* sa po povrchu pohybuje merací dotyk s malým polomerom hrotu (zvyčajne $2\ \mu\text{m}$ až $10\ \mu\text{m}$), ktorý je súčasťou snímača založeného zvyčajne na princípe indukčnom alebo piezoelektrickom. Pohyb meracieho dotyku pozdĺž meraného povrchu je motorický. Vychýľovanie meracieho dotyku vyvoláva zmenu elektrických veličín, ktoré sa zachytávajú a spracovávajú vo vyhodnocovacej jednotke. Tá následne vyhodnotí preddefinované parametre a výsledné hodnoty vypíše cez tlačiareň,

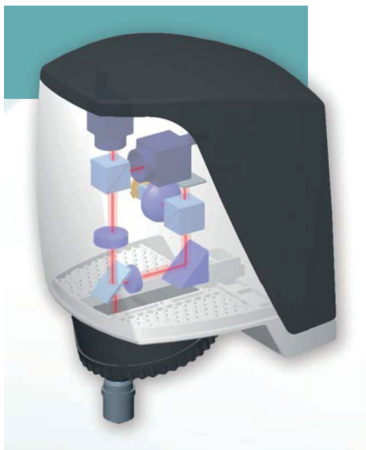
displej alebo ich zasiela do počítača. Forma výstupu ako aj možnosť voľby vyhodnocovaných parametrov sú závislé na type a výbave profilomera (Drsnosť povrchu, 2013). Meranie bolo vykonané pomocou profilomera Hommel Tester T500 (obrázok 3).



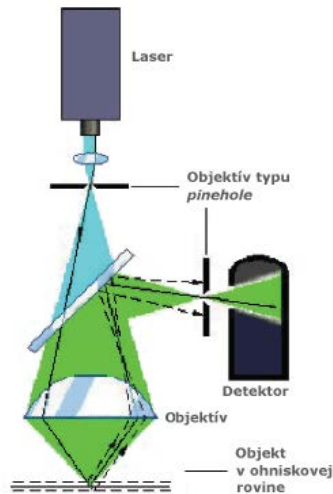
Obrázok 3 Meranie drsnosti pomocou dotykového profilomera

Interferenčná metóda sa využíva pri meraní drsnosti povrchu veľmi jemne obrobených plôch (brúsených, honovaných, superfinišovaných, lapovaných) do hodnoty $R_a = 1 \mu\text{m}$. Princíp interferencie svetla spočíva v skladaní vlnení s rovnakou frekvenciou a konštantným fázovým posuvom (koherentné vlnenie), čo sa dosiahne využitím jedného zdroja, kedy sa svetlo rozdelí a opäť spojí. Interferencia sa v okulári javí ako súbor svetlých a tmavých kriviek. Označenie a názov interferencie pochádza od Thomasa Younga (Drsnosť povrchu, 2013). Schéma usporiadania zrkadiel v mikroskope Sensofar PLu neox je na obrázku 4 (Sensofar, 2013).

Základným princípom **konfokálnej (CLSM) mikroskopie** je osvetlenie vzorky laserovým lúčom, ktorý je zaostrý na jediný bod (Pawley, 1995). Následne sa vyžiarené svetlo (fluorescencia) premieta na apertúru, ktorá je umiestnená pred snímacím detektorom (obrázok 5). Takto, bod po bode, konfokálna mikroskopia umožňuje objemové snímanie mikroštruktúr selektívnym zobrazovaním paralelných rezov (Dickinson a kol., 2001). Výsledný multispektrálny obraz takto predstavuje nielen priestorové (prípadne aj časové) rozloženie intenzity, ale obsahuje informáciu aj o spektrálnej signatúre zobrazovaných objektov (Pawley, 1995).



Obrázok 4 Usporiadanie zrkadiel v mikroskope Sensofar PLU noex (Dickinson a kol., 2001)



Obrázok 5 Princíp konfokálnej mikroskopie (Sensofar, 2013)

Gwyddion je modulárny program vyvinutý za účelom vizualizácie a analýzy dát získaných primárne metódou mikroskopie skenovania sondou. Vo všeobecnosti je možné ho použiť na akúkoľvek úlohu z oblasti spracovania súborov výškových dát. Jedná sa o softvér s otvoreným zdrojovým kódom šíreným pod licenciou GNU/GPL. Gwyddion podporuje veľké množstvo formátov súborov výškových dát, je tiež možné vytvoriť modul pre čítanie a zápis do ďalších odlišných formátov. Základná distribúcia podporuje viac ako 70 rozličných typov súborov vytváraných prístrojmi vyrábanými spoločnosťami po celom svete. Program disponuje širokou škálou nástrojov pre spracovanie obrazu, počínajúc všeobecne používanými postupmi pri práci s grafickými dátami, ako sú otočenie, prevrátenie, a orezanie obrazu, cez rozličné metódy uplatňované v oblasti spracovania digitálneho obrazu, zahŕňajúce postupy od konvolúcie po Fourierovu transformáciu, až po úkony špecifické pre úpravu a rekonštrukciu dát získaných zo zariadenia typu mikroskop atomárnych síl, alebo jemu podobnému, kompenzujúce nedostatky tohto spôsobu získavania informácie o snímanej vzorke (Ťavodová, 2013).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

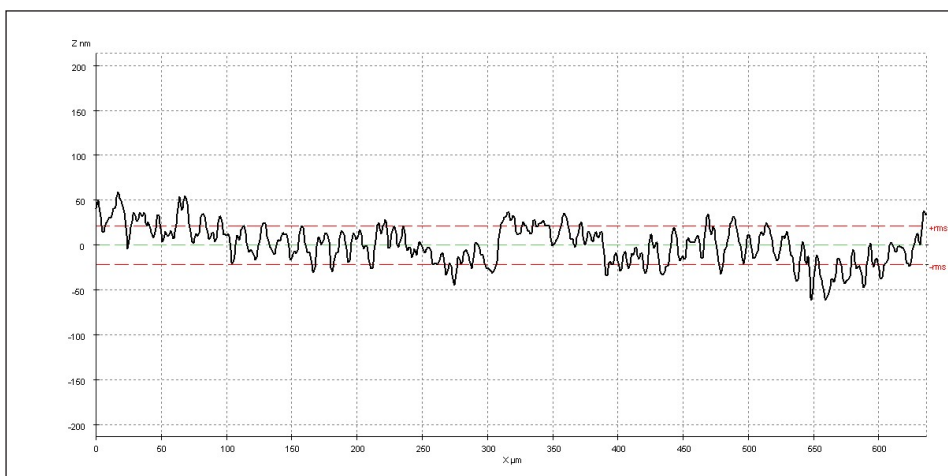
Pri meraní drsnosti dotykovým profilomerom bol použitý už spomínaný Hommel Tester T500. Nastavená meraná dĺžka na reliéfe razidla bola $L_t = 4,8$ mm a nastavená medzná vlnová dĺžka bola $L_c = 0,8$ mm. Dotykový profilomer vyhodnocoval R_a (strednú aritmetickú odchýlku profilu drsnosti). Na každom razidle bolo vykonaných 5 meraní na rovných plochách reliéfu. Výsledky merania sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Hodnoty drsnosti namerané dotykovým profilometrom

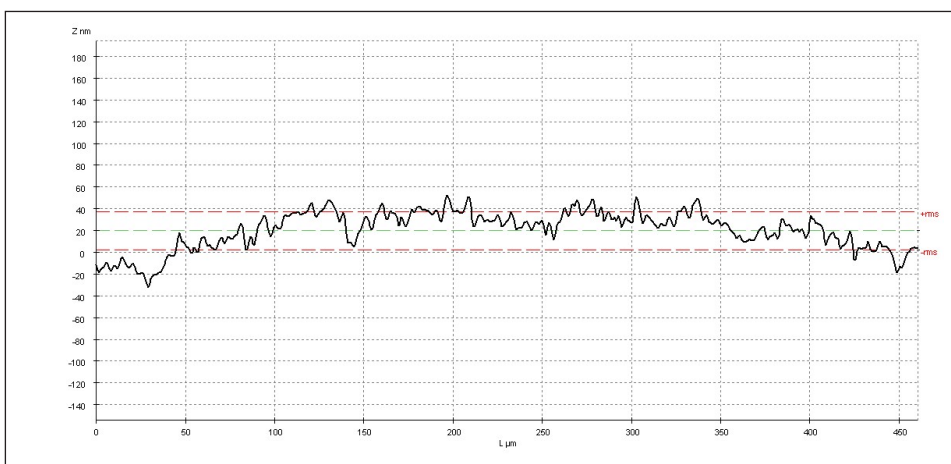
Povlak	CrN	TiCrN	WC/C
Meranie	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]
1	0,06	0,01	0,15
2	0,05	0,02	0,15
3	0,06	0,01	0,14
4	0,04	0,02	0,17
5	0,05	0,01	0,14
Priemer	0,052	0,014	0,15

Optickou interferometriou sme merali drsnosť na mikroskope Sensofar PLu neox pri 20-násobnom zväčšení na rovnej ploche reliéfu. Na obrázkoch 6 až 8 sú grafy nameranej drsnosti. Namerané hodnoty sú naledovné:

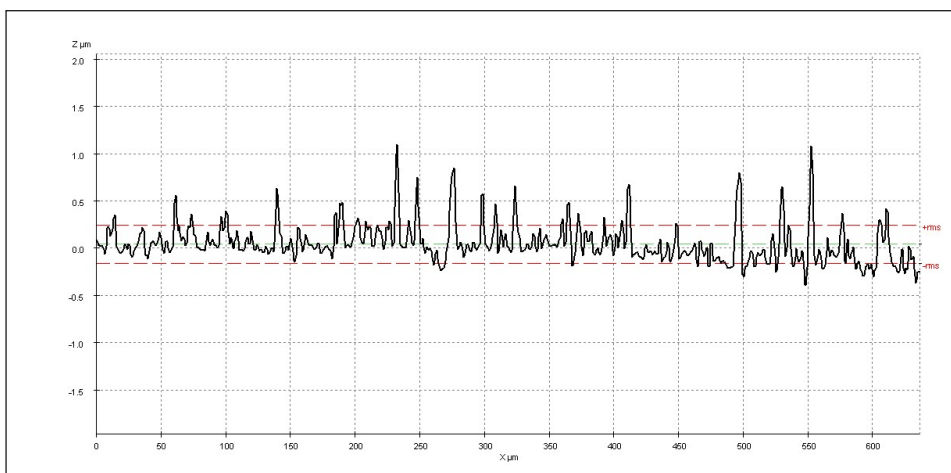
- povlak CrN: Ra = 0,017354 μm ,
- povlak TiCrN: Ra = 0,014223 μm ,
- povlak WC/C: Ra = 0,14029 μm .



Obrázok 6 Graf strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti reliéfu razidla s povlakom CrN



Obrázok 7 Graf strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti reliéfu razidla s povlakom TiCrN



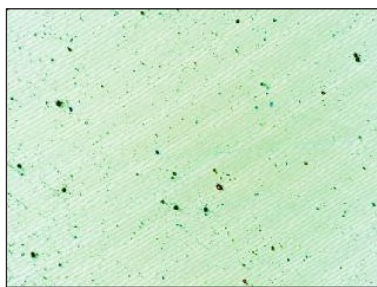
Obrázok 8 Graf strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti reliéfu razidla s povlakom WC/C

Pomocou optickej interferometrie bola nameraná aj hodnota plošnej drsnosti – Sa. Plošná drsnosť bola meraná na ploche 636,61 μm x 477,25 μm pri zväčšení 20-krát. Na obrázkoch 9 až 11 sú výstupy z programu SensoSCAN neox, kde je odfotená meraná plocha. Namerané hodnoty sú nasledovné:

- povlak CrN: Sa = 0,050975 μm
- povlak TiCrN: Sa = 0,025833 μm
- povlak WC/C: Sa = 0,14029 μm



Obrázok 9 Snímka povlaku CrN



Obrázok 10 Snímka povlaku TiCrN



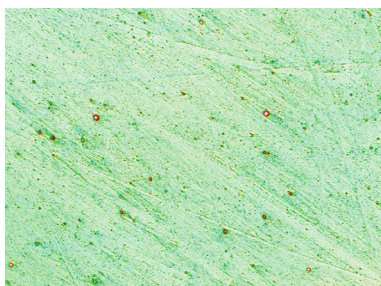
Obrázok 11 Snímka povlaku WC/C

Pomocou konfokálnej mikroskopie bola tiež nameraná hodnota plošnej drsnosti – Sa. Plošná drsnosť bola meraná na ploche 636,61 μm x 477,25 μm pri zväčšení 20-krát. Na obrázkoch 12 až 14 sú výstupy z programu SensoSCAN neox, kde je odfotená meraná plocha. Namerané údaje sú nasledovné:

- povlak CrN: Sa = 0,048104 μm
- povlak TiCrN: Sa = 0,038329 μm
- povlak WC/C: Sa = 0,17024 μm



Obrázok 12 Snímka povlaku CrN



Obrázok 13 Snímka povlaku TiCrN



Obrázok 14 Snímka povlaku WC/C

Drsnosť povrchu je možné určiť aj pomocou počítačového programu Gwyddion. Princíp spočíva v namodelovaní skutočného tvaru povrchu z veľmi kvalitnej fotografie a následnom zmeraní drsnosti. Vizualizáciou a meraním sme však zistili, že program nedokáže vyhodnotiť parametre drsnosti veľmi hladkých – vyleštených povrchov. Preto je táto metóda merania drsnosti povrchu nevhodná pre nástroje na razenie mincí.

Z nameraných údajov bola zostavená tabuľka 3.

Tabuľka 3 Namerané hodnoty drsností povlakov na reliéfe

	Dotyková profilometria	Optická interferometria		Konfokálna mikroskopia	Rozdiel v %	
	Ra [μm]	Ra [μm]	Sa [μm]	Sa [μm]	Ra	Sa
CrN	0,052	0,017354	0,050975	0,048104	66,627	5,632
TiCrN	0,014	0,014223	0,025833	0,038329	1,593	48,372
WC/C	0,15	0,14029	0,14029	0,17024	6,474	21,348

ZÁVER

Drsnosť funkčnej časti nástroja na razenie mincí – reliéfu razidla, je veľmi dôležitým parametrom. Aby nástroj zanechal aj na minci požadovanú drsnosť povrchu, musí spĺňať sám veľmi prísne požiadavky na drsnosť povrchu. Čím je nižšia hodnota drsnosti povrchu razidla, tým sa znižuje pravdepodobnosť vzniku nezhodných mincí pri vysokej kadencii a razení obehových mincí, cca 700 úderov/min, a to z titulu nalepovania nečistôt na povrch funkčnej časti nástroja. Preto sa funkčné plochy razidiel – reliéfy, leštia.

Rozdiel hodnôt lineárnej drsnosti nameraných rôznymi metódami je v prípade povlakov TiCrN a WC/C 1,6 % a 6,5 %. Pri povlaku CrN je rozdiel 66,6 %. Rozdiel hodnôt plošnej drsnosti nameraných rôznymi metódami je väčší v prípade povlakov TiCrN a WC/C, a to 48,4 % a 21,4 %. V prípade povlaku CrN sa hodnoty líšia iba o 5,6 %. Z nameraných hodnôt vyplýva, že hodnoty lineárnej drsnosti povlakov TiCrN a WC/C získané dielenským meraním (dotykový profilometer Hommel Tester T500), sú skoro totožné s vysokopresným laboratórnym meraním (mikroskop Sensofar PLu neox). Hodnoty

plošnej drsnosti majú medzi jednotlivými metódami väčšie odchýlky, okrem povlaku CrN, kde bol rozdiel len 5,6 %. Pôvod týchto odchýlok môže byť podnetom k ďalšiemu skúmaniu.

LITERATÚRA

- Böhler K 455 – prospekt firmy. 2013 [online]. [cit. 2013.09.10] Dostupný na internete: <http://www.bohler.sk/slovak/files/downloads/023_BOHLER_K455.pdf>
- DICKINSON, M. E., BEARMAN, G., TILLE, S., LANSFORD, R., FRASER, S. E. 2001. Multispectral imaging and linear unmixing add a whole new dimension to laser scanning fluorescence microscopy. In *Biotechniques*. 2001, vol. 31, no. 3, p. 1272–1278.
- Drsnosť povrchu. 2013 [online]. [cit. 2013.08.21] Dostupný na internete: <<http://web.tuke.sk/smetrologia/navody/uloha10.pdf>>
- KŘÍŽ, M. 2011. Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku. In *MM Průmyslové spektrum*. ISSN 1212-5272, 2011, roč. 15, č. 7–8, s. 50–51.
- PAWLEY, J. B. 1995. *Handbook of biological confocal microscopy*. New York: Plenum Press, 1995.
- Sensofar PLu neox. 2013 [online]. [cit. 2013.11.29] Dostupný na internete: <<http://www.sensofar.com/sensofar/products/plu-neox>>
- STN EN ISO 4287: 1999 Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Charakter povrchu: Profilová metóda. Termíny, definície a parametre charakteru povrchu.
- ŤAVODOVÁ, M. 2013. Profil povrchu materiálu po rezaní AWJ v 3D vizualizáciách. In *Strojárstvo: mesačník o strojárstve*. ISSN 1335-2938, 2013, roč. 17, č. 10, s. 108–109.
- ŽARNAY, M. a kol., 2013. *Konštruovanie 1*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, 2013. ISBN 978-80-554-0610-7.

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu IPA TUZVO 10/2013 „Výskum kvality povlakovaných vrstiev na nástrojoch pre tvárnenie za studena pri zmenách parametrov vrstvy“

Kontaktná adresa:

Ing. Tomáš Hanes

Katedra mechaniky a strojnictva

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, TU vo Zvolene, Študentská ulica 26, 960 53 Zvolen,

e-mail: tomas.hanes@tuzvo.sk, tel.: +421 45 52 06 381

Ing. Rudolf Kaštan

Mincovňa Kremnica, š. p., Štefánikovo námestie 25/24, 967 15 Kremnica,

e-mail: rudolf.kastan@gmail.com, tel.: +421 910 434 004

Ing. Júlia Hricová, PhD.

Katedra výrobných technológií a materiálov

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, TU vo Zvolene, Študentská ulica 26, 960 53 Zvolen,

e-mail: julia.hricova@tuzvo.sk, tel.: +421 45 52 06 876

Ing. Petra Semanová, Ing. Juraj Kostúr

Katedra lesnej a mobilnej techniky

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, TU vo Zvolene, Študentská ulica 26, 960 53 Zvolen,

e-mail: petra.milatova@tuzvo.sk, juraj.kostur@tuzvo.sk, tel.: +421 45 52 06 381

METODIKA KONCEPČNÉHO NÁVRHU UNIKÁTNEHO AUTONÓMNEHO ROBUSTNÉHO MECHATRONICKÉHO SYSTÉMU NA VRTANIE ULTRAHLBOKÝCH GEOTERMÁLNYCH VRTOV

METHODOLOGY OF DESIGN CONCEPT OF THE UNIQUE AND MASSIVE MECHATRONIC SYSTEM APPLIED FOR PROVIDING AN ULTRA-DEEP GEOTHERMAL WELLS

Ľudovít MEDVECKÝ – Kamil DRDOL – Peter KAMAS – Martin SOKOL

ABSTRACT: In the development of new products are applied methods of work depending on the type of product, its technical complexity, novelty and other specific aspects of not only the product itself, but also the environment of the product, production and operational use. The article, on the example of anchoring system, which is subsystem of plasmabit, unique, autonomous robust technical system for drilling an ultradeep geothermal wells, deals with the important phase of product development, which follows completion of the assignment for solution and formation of the functional and structural concepts.

Key words: development of product, conception, conceive, geothermal well, anchoring, plasmabit

ABSTRAKT: Pri vývoji nových výrobkov sa uplatňujú metódy práce v závislosti na druhu výrobku, jeho technickej náročnosti, novosti a iných špecifických aspektoch nielen samotného výrobku, ale i prostredia vývoja, výroby a prevádzkových podmienok použitia. Článok sa na príklade aretačného systému, ktorý je subsystémom plazmabit, unikátneho autonómneho robustného technického systému na vrtanie ultrahlbokých geotermálnych vrto, zaoberá dôležitou fázou vývoja výrobku, ktorá nasleduje po kompletizácii zadania pre riešenie, a to tvorením jeho funkčnej a konštrukčnej koncepcie.

Kľúčové slová: vývoj výrobku, koncepcia, koncipovanie, geotermálny vrt, aretácia, plazmabit

1. ÚVOD

Zariadenie s pracovným názvom plazmabit, určené pre geotermálne vrty, by malo byť schopné pracovať v hĺbkach až 10 km pod povrchom. Vysoká teplota až 400 °C a tlak

až 100 MPa ovplyvňujú vlastnosti materiálov, správanie sa a vlastností zariadení a elektroniky. Ide o autonómny vrtací systém s vlastným pohybom.

V súčasnosti nie sú známi výrobcovia takýchto zariadení a nie sú známe ani žiadne zariadenia ktoré by pracovali v podobných prevádzkových podmienkach. Súčasní výrobcovia zariadení pre geotermálne vrty, plynárensky a ropný priemysel produkujú systémy účinné do hĺbky maximálne 5 km.

Plazmabit pozostáva z niekoľkých subsystémov. Hlavnú funkciu vykonáva plazmatrón, ktorý rozrušuje horninu. Ďalej sú potrebné systémy pre pohyb a aretáciu, riadiaca elektronika, energetické systémy, prívod a rozvody chladiacej vody z povrchu a pod.

Článok sa zaoberá návrhom koncepcie aretačného subsystému plazmabitu, ktorý je organicky spojený s pohybovým systémom zabezpečujúcim pohyb plazmabitu vo vrte.

2. KONCIPOVANIE

Aretačný subsystém plazmabitu, tak ako aj samotný plazmabit, je unikátny systém. Etapa koncipovania je zásadná a rozhodujúca, ktorým smerom sa vývoj zariadenia orientuje (Pahl, 2005).

Je vhodné riešiť úlohu vo variantoch počnúc výberom fyzikálnych princípov, cez varianty kinematických schém, orgánových štruktúr a končiac variantmi konštrukcie. Možno zostaviť morfológickú schému možných riešení a vybrať optimálne riešenie podľa základných kritérií, ktorými sú spoľahlivá funkcia a realizovateľnosť pri prijateľných nákladoch.

Vzhľadom na šírku problematiky v úvodných fázach hľadania optimálnej koncepcie je nutné vybrať varianty riešenia, ktoré sú perspektívne, a vyradiť varianty, ktoré sú v daných prevádzkových podmienkach zjavne nevýhodné alebo menej výhodné (Čillík, 2001; Medvecký 2006).

2.1 Fyzikálne princípy

Pre aretáciu aj pohybový mechanizmus je možno aplikovať fyzikálne princípy:

Mechanické – princípy veľmi vhodné, pretože vyhovujú podmienkam vysokých tlakov a teploty a generovaniu veľkých síl. K svojej činnosti vyžadujú energiu, ktorú treba priviesť z povrchu.

Hydraulické – princípy menej vhodné, vyhovujú podmienkam vysokých tlakov a veľkých síl, problém je s teplotami nad 80°C. Energiu môžu získať na povrchu (nad vrutom) a viesť nadol hydraulicky, alebo priviesť z povrchu elektrickú energiu a transformovať ju v systéme plazmabitu.

Pneumatické – princípy nevhodné, problém so stlačiteľnosťou pri vysokých tlakoch, nevhodné pre generovanie veľkých síl a pre premenlivé teploty.

Elektrické – princípy vhodné v spojení s mechanickými alebo hydraulickými princípmi. Nevyhnutné pre transport energie a generovanie výkonu (pohybov a síl). Podobne ako hydraulika sú problematické pri vysokých teplotách.

2.2 Kontakt aretačného systému so stenou vrtu

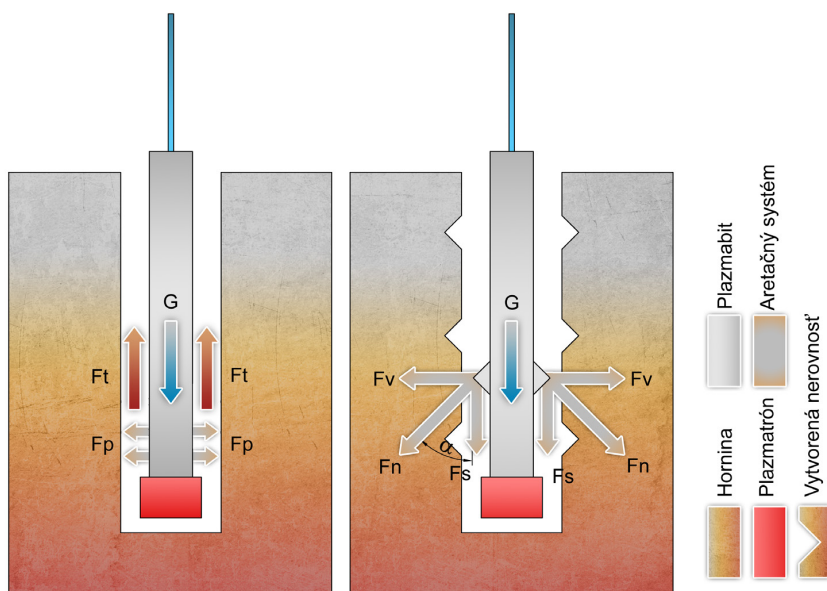
Kontakt aretačného mechanizmu so stenami vrtu je nevyhnutný kvôli prenosu síl potrebných na prekonávanie tiaže systému a reguláciu pohybu a riadenie polohy systému.

Principiálne možno rozlíšiť prenos síl trením (Obrázok 1) a tvarom (Obrázok 2) (Žarnay, 2011).

Pri prenose síl trením aretačné prvky sa opierajú o hladkú valcovú stenu vrtu. Z uvedeného na obrázku vyplýva, že sily sú vysoké. Pri aretácii tvarom sa sily významne znižujú, ale nemožno predpokladať vhodné tvary v stenách vrtu, tie je nutné vyrobiť napr. plazmou pri samotnom vŕtaní diery alebo vytvoriť mechanicky samotným aretačným systémom.

Pri prenose síl tvarom sa aretačné prvky opierajú o vytvorené nerovnosti v stene vrtu. Z uvedeného vyplýva, že sily sú nižšie, cca 10 x menej ako v prípade s prenosom s trením (pri uhle kontaktného povrchu nerovnosti $\alpha = 45^\circ$).

Pre praktické použitie sa predpokladá kombinácia uvedených princípov, pretože kontaktné prvky sa pri veľkých silách budú zarávať do stien vrtu a sami si budú v stenách vytvárať tvary pre zachytenie zvislých síl. „Pre presnejšie určenie vlastností kontaktu sa musí brať do úvahy celý rad faktorov ako napríklad drsnosť a chemické procesy v povrchových vrstvách spolupôsobiacich telies.“ (Marienčík, 2012)



Obrázok 1 vľavo – Tiaž plazmabitu na steny vrtu sa prenáša trením, (Tiaž $G = 40\,000\text{ N}$, Trecia sila $F_t > 40\,000\text{ N}$, Faktor trenia $f = 0,07$ až $0,2$, Prítlčná sila aretácie $N > F_t/f = 57\,1430\text{ N}$)

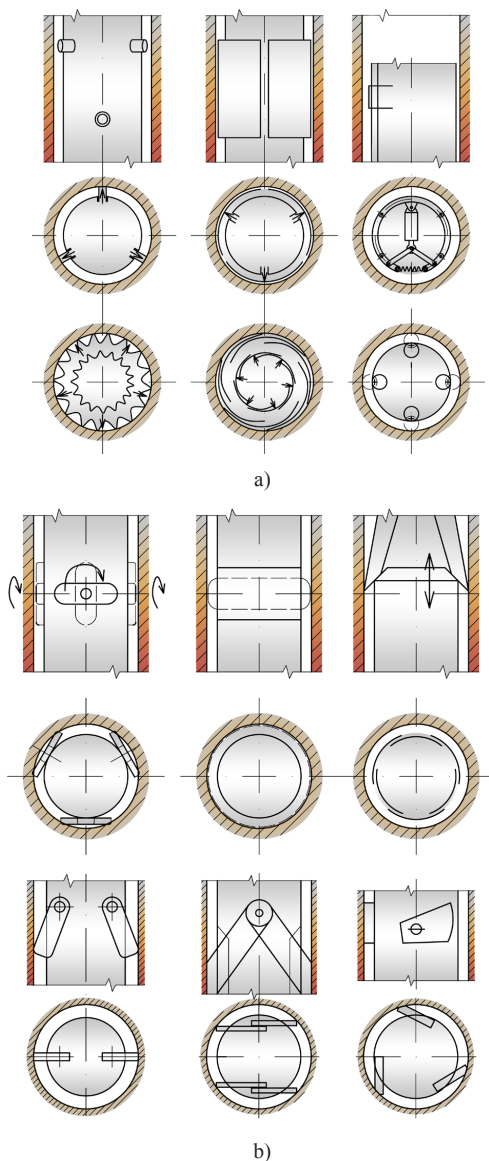
Obrázok 1 vpravo – Tiaž plazmabitu na steny vrtu sa prenáša tvarom, (Tiaž $G = 40\,000\text{ N}$, vodorovná zložka sily F_v , zvislá zložka F_s , počet podpier n , Normálová sila na povrch vytvorenej nerovnosti $F_n = 282\,88\text{ N}$)

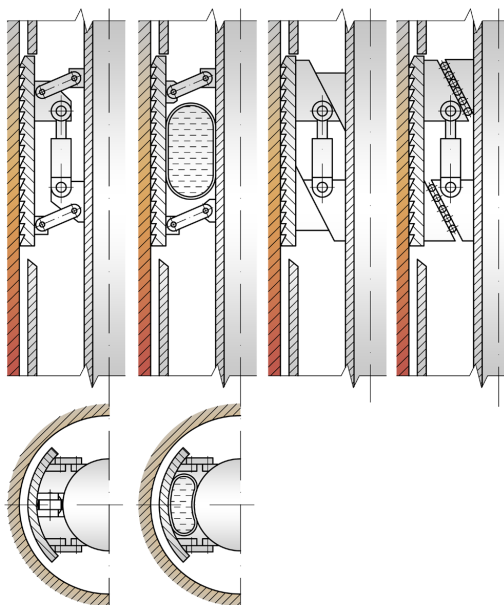
2.3 Mechanizmy na kontakt aretačného systému so stenou vrtu

Intuitívne možno vymyslieť množstvo kinematických schém rôzne princípy a mechanizmy aretačných systémov. Je nutné ich dať ich na papier a porovnávať podľa stanovených kritérií.

Usporiadanie mechanizmov pre aretáciu trením možno vytvoriť veľké množstvo (Obrázok 3) ako mechanických tak aj hydraulicko-mechanických (Obrázok 4).

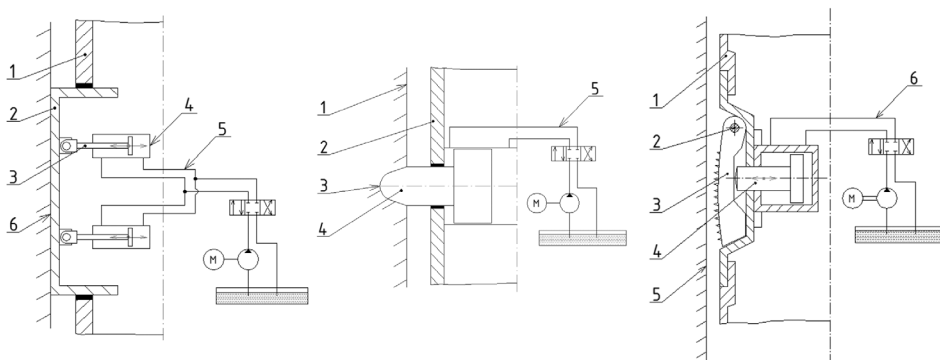
Principiálne sa koncepcie aretácie tvarom nelíšia od koncepcií aretácie trením, odlišnosť bude vo veľkosti prítlačných síl, veľkosti zdvihu a riešení detailov kontaktu.





c)

Obrázok 3 Návrh rôznych mechanických princípov aretácie trením pohybového systému vo vrte: a) vzoprenie sa kolíkmi, valcovými segmentmi, rozpinajúci sa vlnovec (Žarnay, 2011, 2013), b) pootáčajúce sa vačky alebo ramená zapierajúce sa do steny vrtu, c) iné princípy mechanizmov tlaku na steny vrtu



1 – plášť plazmabitu,
 2 – pohybový prvok,
 3 – hydraulický piest,
 4 – priamočiary hydromotor,
 5 – hydraulický obvod,
 6 – stena vrtu.

1 – stena vrtu,
 2 – plášť plazmabitu,
 3 – priehlbina v stene vrtu,
 4 – hydraulický piest,
 5 – hydraulický obvod.

1 – plášť plazmabitu,
 2 – čap kontaktného prvku,
 3 – výkyvný kontaktný prvok,
 4 – hydraulický piest,
 5 – stena vrtu,
 6 – hydraulický obvod.

Obrázok 4 Návrhy rôznych hydraulicko-mechanických princípov aretácie trením a tvarom pohybového systému vo vrte

2. ZÁVER

Vývojová úloha týmto nekončí, ale pokračuje tvorením riadiaceho systému (v súčasnej dobe navrhovaný v spolupráci s externým dodávateľom), 3D modelov systému, výpočtami, hodnotením a výberom návrhov, optimalizáciou funkcií a tvarov, špecifikáciou typových a normalizovaných prvkov, rozpracovaním výkresovej dokumentácie, výrobou, skúškami a úpravami prototypu. Uvedené skutočnosti, resp. činnosti už však nezodpovedajú náplni príspevku nakoľko sa jedná o samostatné témy rozpracovávané v ďalších štádiách projektu.

LITERATÚRA

- ČILLÍK, L., ŽARNAY, M.: 2001. *Metodika konštruovania*. ŽU – EDIS, Žilina 2001, 191 s. ISBN 80-7100-934-2
- MEDVECKÝ, Š.: 2006. *Konštruovanie 1*. ŽU – EDIS, Žilina 2006, 630 s. ISBN 978-80-8070-640-91
- MEDVECKÝ, L., ŽARNAY, M., GAJDÁČ, I., SOKOL, M., MUDRÁK, J., DRDOL, K., KAMAS, P.: 2012. *Konštrukčný návrh funkčného vzoru pohybového systému plazmabitu. Štúdia k výskumnej správe KKČS-2012-139-04*, Žilina 2012.
- PAHL, G., BEITZ, W., FELDHUSEN, J., GROTE, K. H.: 2005. *Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Productentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer-Verlag, Berlin 2005. 764 s. ISBN 3-540-22048-8.
- ŽARNAY, M., MEDVECKÝ, L.: 2011. *Návrh koncepcií pohybového a aretačného systému plazmabitu. Štúdia k výskumnej správe KKČS-2011-139-01*, Žilina 2011.
- ŽARNAY, M., MEDVECKÝ, L., SOKOL, M., KAMAS, P.: 2013. *Systém pohybového systému plazmabitu. Základné informácie pre vývoj hydraulického a elektrického systému (výskumná správa)*, Žilina 2013.
- MARIENČÍK, J., TURIS, J., BEŇO, P., REMPEROVÁ, M.: 2012. Kontaktné procesy pri elasticom a plastickom kontakte v tribologickom systéme. in ACTA FACULTATIS TECHNICAЕ ZVOLEN, XVII, 3, 2012, 123 – 130 s. ISSN 1336-4472.

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: „Autonómne robustné mechatronické systémy pre ultra hlboké geotermálne vrty“, kód ITMS 26220220139, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

This publication is the result of the project implementation: “Autonomous robust mechatronic systems for ultra deep geothermal boreholes”, ITMS code 26220220139, supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Ľudovít Medvecký, PhD.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

e-mail: ludovit.medvecky@fstroj.uniza.sk

Ing. Martin Sokol

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

e-mail: martin.sokol@fstroj.uniza.sk

Ing. Peter Kamas

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
e-mail: peter.kamas@fstroj.uniza.sk

Ing. Kamil Drdol

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
e-mail: kamil.drdol@fstroj.uniza.sk



Agentúra

Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR

pre štrukturálne fondy EÚ



ŠTÚDIUM SÍL PRI ODVETVOVANÍ ČLÁNKOVÝM PÁSOM NOŽOV

STUDY OF FORCES OF A DELIMBER WITH CHAIN BELT OF KNIFES

Juraj MIKLEŠ

ABSTRACT: In the course of chipless cutting of wood with a wedge tool in a direction against the fiber texture large cutting forces come into being. Hence the cutting process requires great energy consumption. Chip less limbing is one of the specific cases of this cutting process. Tools of complicated design are used for limbing. A specific feature of tools to be used for limbing by the static method is a necessary linking of efficient cutting with the feeling ability of tools in the course of their movement on the surface of the stem treated.

Key words: forest harvest, delimeter, delimiting tool

ABSTRAKT: Pri beztrieskovom delení dreva klinovým nožom v smere, ktorý nesúhlasí so smerom vlákien dreva, vznikajú značné rezné sily. Z toho vyplýva aj značná energetická náročnosť procesu rezania. Preto tiež niekedy proces beztrieskového delenia dreva klinovým nožom v smere, ktorý nie je totožný so smerom vlákien, sa nazýva silovým rezaním. Jedným zo špecifických prípadov tohto spôsobu je silové rezanie vetiev. Pri silovom rezaní vetiev sa používajú nože zložitej konštrukcie. Zvláštnosťou nožov určených pre zrezávanie vetiev silovou metódou je nevyhnutné spojenie efektívneho rezania s kopírovacou schopnosťou nožov v procese premiestňovania po povrchu obrábaného kmeňa.

Kľúčové slová: lesná ťažba, odvetvovací stroj, odvetvovací nôž

ÚVOD

V ťažbovom procese LH sa dá očakávať ďalší rozvoj strojného odvetvovania ihličnatých drevín a niektorých listnatých drevín, ktoré sú svojou morfológiou spôsobilé pre strojné odvetvovanie. Súčasné motomanuálne odvetvovanie je nevyhovujúce. Práca je zdraviu škodlivá, nebezpečná (mnoho vážnych úrazov) a z hľadiska produktivity práce nevyhovujúca.

1. PROBLEMATIKA A DOTERAJŠIE POZNATKY

Problematika nožových hlavíc spočíva v minimalizácii preťahovacích síl a v dodržaní noriem kvality odvetvovania potrebných pre spracovanie dreva.

K priečnemu profilu odvetvovacích nožov je potrebné pripomenúť, že niektoré jeho charakteristiky sú diktované podmienkami práce nožov na kmeni, ktorý má určitú krivosť a zbiehavosť. Ostrie nožov musí čo najtesnejšie priliehať k povrchu kmeňa, ale nesmie do kmeňa zarezat'. Materiál noža a ostrie je nutné voliť tak, aby ostrie mohlo mať optimálny uhol, pri veľkej trvanlivosti a malých nárokoch na ostrenie. Pritom musia byť nože húževnate, aby nedochádzalo k ich vylamovaniu, zvlášť v zimnom období. Pravdepodobne zostane najlepším riešením Havarovanie tvrdého materiálu ostria na nôž z konštrukčnej ocele.

Z teoretických rozborov vyplýva, že sústava nožov posuvných okolo kmeňa pracuje pri rovnakom počte nožov kvalitnejšie, ako sústava nožov výkyvných (otáčavých). U najnovších modelov mobilných strojov sú používané nožové hlavice prevažne s výkyvnými nožmi. Hlavice s posuvnými nožmi sa používajú pri stacionárnych odvetvovacích strojoch, ktoré sú súčasťou spracovateľskej linky na celé stromy na hlavných skladoch. Pre harvestory a procesory sú vhodnejšie hlavice, do ktorých sa vkladá strom zhora, alebo ktoré sa na strom nasadzujú zhora. Majú byť rozmerovo úsporné, hmotnostne úsporné a prevažkovo odolné, každý nôž by mal byť k telesu hlavice pripojený len jedným kĺbom, aby sa vôľa kĺbových spojov nesčítavala a profily nožov vzhľadom k osi kmeňa nerozlad'ovali. Tieto hlavice mávajú nepárny počet nožov, pričom stredný nôž je väčšinou nepohyblivý (Valmet má trojnožovú hlavicu so stredným nožom pohyblivým k symetrickej rovine). Tesnosť priloženia nožov ku kmeňu v celom rozsahu odvetvovaných priemerov sa dosahuje prehnutím nožov do tvaru krivky, ktorá najčastejšie býva kuželosečkou.

Priečne rezy odvetvovaných kmeňov sú kruhové, ale i nepravidelné (vajcovité, oválne). Hlavice s väčším počtom nožov sa môžu lepšie prispôbiť nepravidelnostiam priečných rezov. Pohyb nožov však nesmie byť synchronizovaný. Je potrebné hľadať systém, ktorý nastavuje optimálnu vzájomnú polohu nožov. Procesory budú musieť byť vybavené hlavcami pre oba smery preťahovania, pričom reverzačným pohybom bude opravené prvé odvetvovanie a zrezané koreňové nábehy.

2. ANALÝZA SÍL PRI ODVETVOVANÍ NOŽOVOU ODVETVOVACOU HLAVICOU

V tomto prípade urobíme silovú analýzu pre celú nožovú odvetvovaciu hlavicu pri rôznych konštrukčných riešeniach (pevné segmenty nožov, kĺbové uloženie nožov).

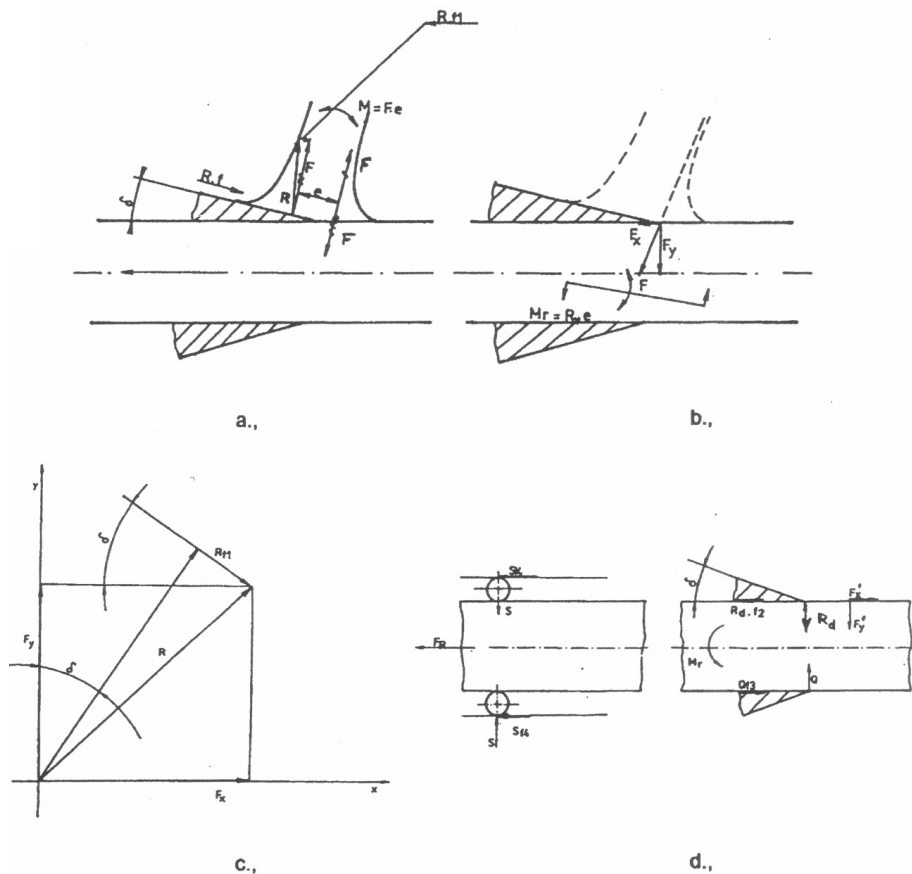
Od čela noža na vetvu pôsobí sila R , ktorá dosahuje maximálnu hodnotu, keď je zrezaná polovica vetvy a trecia sila R_{f_1} ktoré dávajú výslednicu F (pozri obr. 1).

V ťažisku plochy, nezrezanej polovice vetvy v rovine rezania priložíme dve rovnaké, navzájom opačne pôsobiace sily F . Z toho vyplýva, že na vetvu bude pôsobiť sila F (prečiarknutá raz) a dvojica síl F (prečiarknutá dvakrát s momentom $M = F \cdot e$ (kde e je rameno dvojice).

Rozoberieme daný systém síl, odstránime myslenu vetvu a budeme kompenzovať jej pôsobenie na kmeň rovnakou, ale opačne pôsobiacou silou F' a reakčným momentom $M_r = R_v \cdot e$. Rozložíme silu F'_y na dve zložky (pozri obr. 1b).

Ako vidieť z obrázku, sila F'_y odtláča kmeň od aktívnej chrbtovej plochy noža a pritláča kmeň k neaktívnej ploche. Existencia tejto sily vysvetľuje odľahčenie chrbta tuhého noža (nepôsobia žiadne sily), pôsobia tu len kontaktné sily pružno-plastickej deformácie povrchu, ktoré experimentálne potvrdil rad autorov.

Na obr. 1d sú uvedené všetky sily, ktoré pôsobia na kmeň.



Obr. 1

Kmeň sa nachádza v stave rovnováhy (uvažujeme s priamočiarym rovnomerným pohybom) za pôsobenia rovinnej sústavy síl: F_R – sily preťahovania stromu F'_x – rezný odpor, F'_y – odtlačacia sila, Q – reakcia od chrbta spodného noža, Qf_3 – trecia sila na chrbte neaktívnej časti nožovej hlavice, R_d – sily na chrbte aktívnej časti nožovej hlavice, $R_d f_2$ – trecie sily na chrbte aktívnej časti nožovej hlavice, S – sily od podávacích valcov vyvolávajúce treciu silu Sf_4 zabezpečujúcu posun kmeňa. Okrem toho na kmeň pôsobí dvojica síl s momentom $M_r = R_e$. Sily S a $S \cdot f_4$ sú veľmi malé, preto ich zanedbáme.

Keď premietneme všetky sily do osí y, dostaneme:

$$Q = R \cos \delta - R \cdot f_1 \sin \delta - R_d \quad (1)$$

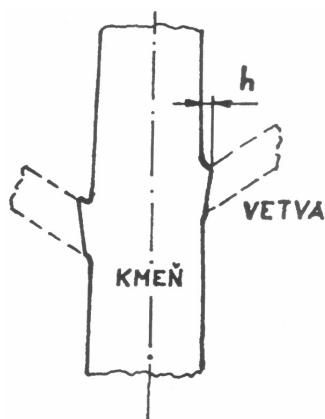
Výskumom mnohých autorov bolo dokázané a našim výskumom potvrdené, že pôsobenie síl na nôž od schopností pružného vracania vlákien môžeme zanedbať. V súlade so všeobecným zákonom rezania dreva, stláčanie vlákien na čelnej a chrbtovej ploche bude prebiehať pri stálom napätí, číselne charakterizujúcom pružnosť dreva pri ohýbaní a stláčaní vlákien.

Vtedy všeobecný tlak na plochy noža s určitým zjednodušením bude proporcionálny objemu časti noža, ktorá vnikla do dreva. Tretia sila $R_d \cdot f_2$ pri veľkej hrúbke triesky (nad 5 mm) tvorí 1,0–0,5 % z celkovej reznej sily. Kritická dĺžka vetiev, pri ktorej je prerušená tvorba triesky je rovná 40–50 mm. Z toho vyplýva, že sily R_d a $R_d \cdot f_2$ môžeme zanedbať ako veľmi malé. Potom rovnica (1) nadobudne tvar

$$Q = R \cos \delta - R \cdot f_1 \sin \delta \quad (2)$$

Silu Q môžeme považovať za reakciu sily odtlačania. zrezávanie vetiev je charakterizované veľkými silami a malými reznými rýchlosťami, čo dovoľuje vizuálne nájsť také efekty, ako odtlačanie nožov alebo kmeňa stromu v smere kolmom k osí kmeňa. Vo všetkých prípadoch, keď nôž (segment valcovej plochy) je uložený pevne a kmeň má dva stupne voľnosti, pri rezaní sa odtláča na stranu chrbtovej neaktívnej plochy noža. Ak nôž má dva stupne voľnosti voči kmeňu, ako je to u článkových, ohybných kĺbových nožov (napr. OSA), tak je odtlačaný na stranu zrezávanej vetvy.

V oboch prípadoch je výsledok ten istý: rez v profile má tvar uvedený na obr. 2.



Obr. 2

3. ROZBOR SÍL PRI ODVETVOVANÍ ČLÁNKOVÝM PÁSAM OHYBNÝCH KLBOVÝCH NOŽOV

V súlade tiež s existujúcimi predstavami sa musí objasniť efekt preťahovania. Dochádza k zjavnému protirečeniu medzi výsledkom experimentov a využitím nožových odvetvovacích strojov. Na obr. 3 sú ukázané niektoré varianty rozloženia vetiev na kmeni stromu. Poloha II ja naj nepriaznivejšia pretože, v tomto prípade sila Q odd'ahuje články ohybných klbových nožov maximálne. Rozoberieme tento prípad podrobnejšie.

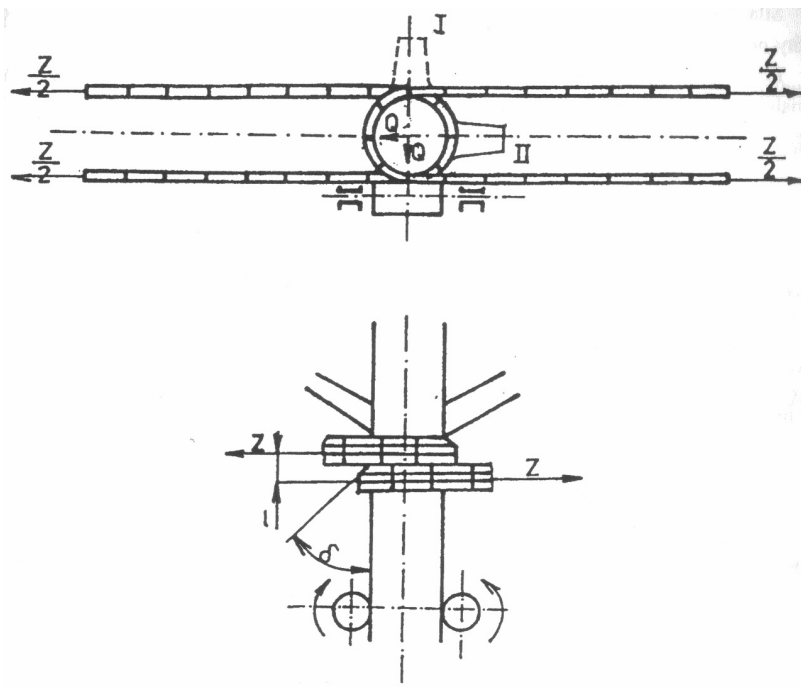
Z obr. 3 vidieť, že zo strany ohybných klbových nožov na kmeň pôsobia dve rovnaké a proti sebe smerujúce sily Z . Takto nože vždy sú pritláčané ku kmeňu rovnakými silami, čo je súčasne doprevádzané vznikom doplnkových trecích síl pri posune stromov.

Kvalitné odvetvovanie sa zabezpečí len pri splnení podmienky:

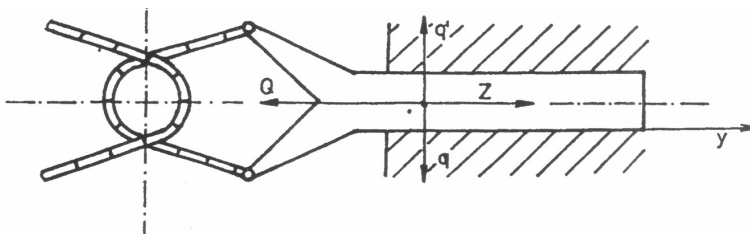
$$Z \geq Q \Rightarrow Z \geq R \cos \delta - R \cdot f_1 \sin \delta \quad (3)$$

Pri porušení tejto podmienky nože pod vplyvom sily Q sa vzd'ajú od povrchu kmeňa, článkový pás sa rozťahuje.

Na schéme obr. 4 je znázornené silové pôsobenie na ohybné klbové nože. Pritom q – tiaž nožov zahrňujúca všetky pohybujúce súčasti (piest, piestnica atď.), q' – normálová reakcia vedenia, Q – odtláčacia sila, Z – predpätie (ťahová sila) nožov.



Obr. 3



Obr. 4

Predpokladáme, že predpätie nožov zahrňuje aj trecie sily, ktoré pôsobia pri pohybe nožov počas pôsobenia prevládajúcej sily odtlačania $Q_{prev} = Q - Z$.

Diferenciálna rovnica pohybu nožov v smere osi y , ktorá je kolmá k osi kmeňa, má nasledovný tvar:

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = Q_{prev} \quad (4)$$

Síla Q_{prev} je premenná a nachádza sa podobne ako rezná sila v lineárnej závislosti od dráhy noža v smere posuvu do okamihu, keď je zrezaná polovica vetvy.

Pri stálnej rýchlosti preťahovania stromov v_A , sila Q_{prev} sa bude nachádzať v lineárnej závislosti od času t . Potom sila Q_{prev} môže byť vyjadrená nasledovne:

$$Q_{prev} = kt \quad (5)$$

kde: k – smernica priamky

t – čas do okamihu keď $Q = Z$.

Po dosadení do rovnice (4) hodnotu Q_{prev} , dostaneme

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = kt \quad (6)$$

Rýchlosť pohybu odtlačaných nožov vyjadríme vzťahom $v = \frac{dy}{dt}$ potom $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$, po dosadení do vzťahu (6) dostaneme:

$$m \frac{dv}{dt} = kt \text{ alebo } mdv = ktdt$$

Po integrovaní tejto rovnice dostaneme

$$mv = \frac{k \cdot t^2}{2} + C_1$$

Pre počiatočné podmienky $t = 0$, $v = 0$ je integračná konštanta $C_1 = 0$. V tomto prípade, rýchlosť v ako funkcia času t sa určí nasledovne:

$$v = \frac{k \cdot t^2}{2 \cdot m} \quad (7)$$

Po úprave rovnice (7), keď dosadíme $v = \frac{dy}{dt}$ dostaneme:

$$dy = \frac{k \cdot t^2}{2 \cdot m} dt$$

Po integrovaní tejto rovnice dostaneme:

$$y = \frac{k \cdot t^3}{6 \cdot m} + C_2$$

Pre počiatkové podmienky $t = 0$, $y = 0$ integračná konštanta $C_2 = 0$ a rovnica nadobudne tvar:

$$y = \frac{k \cdot t^3}{6 \cdot m}$$

Uvažujeme v prvom priblížení, že pri zrezávaní druhej polovice vetvy odtlačacia sila, ktorá od maximálnej hodnoty klesá na nulu podľa toho istého zákona ako pri prerezávaní prvej polovice t.j. lineárne. Z toho vyplýva, že dráha nožov v smere y v prvej polovine rezania a v druhej je rovnaká.

ZÁVER

Riešenie predmetnej problematiky je veľmi dôležité vzhľadom k tomu, že v nasledovnom období sa má uskutočniť prenikavý rozvoj strojného odvetvovania ihličnatých a niektorých listnatých drevín, ktoré sú svojou morfológiou spôsobilé pre strojné odvetvovanie. Súčasné motomanuálne odvetvovanie je nevyhovujúce. Práca je zdraviu škodlivá, nebezpečná a z hľadiska produktivity práce nevyhovujúca.

V rámci vývoja odvetvovacích strojov bola overená rada princípov, z ktorých najperspektívnejší je pozdĺžne preťahovanie stromov nožovou hlaviceou alebo pozdĺžne ťahanie hlavice po strome. Nože (segmenty nožov) na princípe beztrieskového silového rezania pri dynamickom pôsobení v dôsledku preťahovacej sily zabezpečujú odrezávanie vetiev. Tieto nožové hlavice majú buď nožové článkové reťaze alebo sústavu oblúkových (segmenty) alebo lomených nožov, ktoré sú prisúvané k stromu. Problematika nožových hlavíc spočíva v minimalizácii preťahovacích (rezných) síl a v dodržaní štandardov kvality odvetvovania potrebných pre spracovanie dreva v priemysle.

Ako je zrejme z článku, na zlepšenie kvality odvetvovania má vplyv rýchlosť preťahovania stromu, výška zostatku vetiev je proporcionálna kvadrátu času, spotrebovaného na ich zrezanie. Zlepšenie kvality odvetvenia sa môže dosiahnuť zvýšením tiaže nožov a sily montážneho napnutia (tým pritlačenia ku kmeňu) nožov, že možno dosiahnuť zriadením poistného ventilu v hydraulickom systéme ovládania nožov. Pritom treba mať na zreteli, že zo zväčšovaním pritlačnej sily nožov ku kmeňu výrazne vzrastie odpor preťahovania stromov. Preto je účelné veľkosť sily Z podľa možnosti znížiť a určiť tak, aby výška zostatku vetiev maximálneho priemeru neprevyšovala 3–5 mm, čo prakticky bude v súlade s požiadavkami kvality a štandardami.

LITERATÚRA

1. DOROFJEV L. G. 1982. Issledovanie kačestva mašinnoj očistki derevjev ot sučjev i obosnovanije parametrov sučkoreznych ustrojstv, autoreferát KDP, MLTI Moskva, 1982, 18 s.
2. MAC DONALD A. J. 1993. A rewiew of Mechanical Delimbers in Western Canada, FERIC, Technical Report No TR-93, Vancouver, 1993, 27 s.
3. KOVÁČ, J. – KOVÁČOVÁ, K.: The analysis of chipless cutting in the process of delimiting trees, In: COYOUS 2011, Proceedings of the 4th International fo Young Scientists, Praha, 2011, s. 176 – 185, ISBN 978-80-213-2186-1
4. MARKO, J. – HOLÍK, J.: Teória delenia dreva, Vedecké štúdie 10/2000/A, Technická univerzita Zvolen, 2000, 66 s.
5. MIKLEŠ, J.: Research into the geometry of the delimiting head of cutting knives. In Research in agricultural engineering = Zemědělská technika. – ISSN 1212-9151. – Vol. 59, no. 1 (2013), s. 29 – 34.
6. MIKLEŠ, M.: Teória technologického vybavenia lesných ťažbových strojov, Vedecké štúdie 6/1997/A, Technická univerzita Zvolen, 1997, 55 s.
7. MIKLEŠ, M. – TUHÁRSKY, J. – ČERNECKÝ, J.: Aplikácia holografickej interferometrie na interakciu nástroj – obrobov, In: Acta technologica agriculturæ 1, SUA Nitra, 2000, s. 12 – 17.
8. MIKLEŠ, M. – KOVÁČ, J. – KRILEK, J., 2010: Výskum rezných podmienok priečného delenia dreva, TU Zvolen, 61 s., ISBN 978-80-228-2147-6
9. MIKLEŠ, M. – MIKLEŠ, J.: Rezné mechanizmy v lesnej ťažbe; 1. vyd. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2012. – 83 s. ISBN 978-80-228-2428-6
10. MIKLEŠ, M. 1994. Určenie technických parametrov odvetvovacej hlavice, In: Zborník referátov z medzinárodnej vedeckej konferencie – Pokroky v mechanizácii poľnohospodárstva, 1994, s. 131 – 137.
11. MIKLEŠ, M. A KOL.. 1993. Teória a stavba lesných strojov II, ES TU Zvolen, 1993, 273 s., ISBN 80-228-0281-6
12. SOKOLOV V. N – LEONOV A. L. 1987. Kačestvo mašinnoj obrezki sučjev, In: Voprosy mehanizacii lesosečnych rabot, Trudy CNIIME, Chimki, 1987, s. 46 – 51.
13. VORONICYN K. I. – GUGEL'EV S. M. 1989: Mašinnaja obrezka sučjev na lesoseke, Lesnaja promyšlennost', 1989, 272 s.

Kontaktná adresa:

Ing. Juraj Mikleš, PhD.,

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,

Katedra environmentálnej techniky, Študentská 26, 960 53 Zvolen, Slovensko,

e-mail: miklesj@tuzvo.sk, tel.: +421/45/5206 553