Návrh opatrení pre zvýšenie životnosti drviacich nástrojov kladivového drviča

*Peter KRIŽAN [1, *], Miloš MATÚŠ [1], Jozef BÁBICS[1]*

[1] Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvalitu, Námestie Slobody 17, 81231 Bratislava, Slovensko

*** Email:** peter.krizan@stuba.sk

Dezintegrácia je proces, ktorým sa rozdrobuje vstupná surovina na menšie časti. Cieľom je redukcia objemu vstupnej suroviny pre následnú prepravu, manipuláciu, separáciu a zhutňovanie do formy tuhých palív. Kladivové mlyny patria medzi najrozšírenejšie typy dezintegračných strojov v drevárskom priemysle. Ich nevýhodou je prenášanie rázov vznikajúcich v procese dezintegrácie na ložiská uloženia rotora a ich citlivosť na vniknutie tvrdých nečistôt, ktoré spôsobujú v niektorých prípadoch poškodenie nie len nástroja ale celého dezintegračného stroja. Sprievodným javom dezintegračného procesu je vysoká miera opotrebovania drviacich nástrojov, čo spôsobuje výrazné zníženie životnosti nástrojov, a v konečnom dôsledku aj drviaceho stroja. Tento článok pojednáva o možnostiach zvýšenia životnosti drviacich kladív, definuje základné vzťahy medzi materiálových zložením drviacich nástrojov a mechanickými vlastnosťami nástrojov v procese dezintegrácie drevnej hmoty. Výsledky výskumu tu prezentované sa týkajú peletovania aj briketovania, keďže proces drvenia je nutným predpokladom pre úspešné zhutňovanie drevnej suroviny.

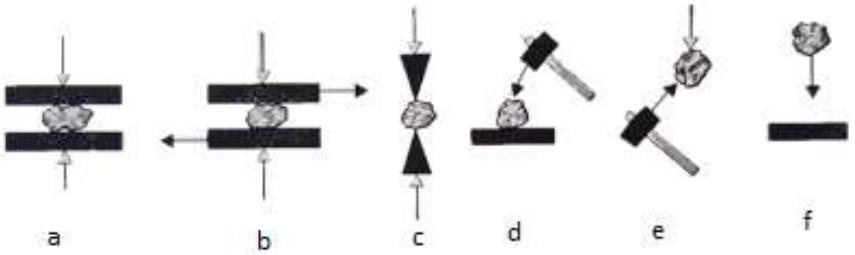
Kľúčové slová: biomasa, kladivový drvič, drviace kladivá, nástroje, opotrebovanie, životnosť, tvrdosť, tvrdo-chrómová liatina

1 Úvod

Dezintegračné stroje sa používajú vo viacerých odvetviach spracovania rôznych druhov surovín [1, 2]. Aby mohli byť stroje špecifikované pre potreby prevádzky a zabezpečiť tak požadovanú výstupnú frakciu, existujú viaceré konštrukčné riešenia a princípy dezintegračných strojov. Dezintegrácia vstupnej suroviny sa môže uskutočňovať rezaním, trhaním, nárazom dezintegračného nástroja na rozdrobovanú surovinu, rozbíjaním suroviny medzi pohyblivými a pevnými nástrojmi, tlakom a pohybom častíc medzi nástrojmi [1]. V procese dezintegrácie sa pri procese môžu aplikovať dva a viac zo spomenutých princípov zobrazených na Obrázku 1. Tento proces sa využíva pri ťažbe a spracovaní nerastných surovín, recyklácii rôznych druhov odpadov, v nábytkárskom a energetickom priemysle a ďalších odvetviach [1, 2, 3, 4].

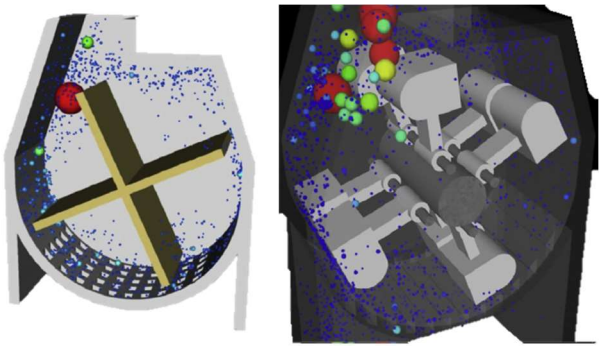
Proces dezintegrácie v kladivových dezintegračných strojoch nastáva vplyvom dynamického účinku nástroja, ktoré nazývame kladivo, pri kontakte so rozdrobovanou vstupnou surovinou, kedy dochádza k deleniu tohto materiálu na frakcie s podstatne menšími rozmermi. Veľkosť výstupnej frakcie je externe riadená sitom, ktoré uzatvára dezintegračnú

oblasť. Surovina je rozdrobovaná do tej doby, kým nedosiahne požadovaný rozmer výstupnej frakcie. Rozmer výstupnej frakcie je daný rozmermi otvorov na site, ktoré uzatvára oblasť dezintegračnej komory. Prvotným predpokladom pre použitie týchto mlynov je splnenie požiadavky, aby rozdrobovaná surovina bola krehká a málo pružná [2].



Obr. 1 Základné druhy dezintegrácie (a - tlakom, b - rozbíjanie a trhanie suroviny medzi pohyblivými a pevnými nástrojmi, c - strihanie a štiepenie, d - rozbíjanie suroviny na nepohyblivej podložke úderom nástroja, e - nárazom nástroja na voľne padajúcu surovinu, f – rozbíjanie suroviny nárazom na pevnú podložku) [2]

Kladivové mlyna patria medzi najrozšírenejšie typy dezintegračných strojov v drevárskom priemysle [1]. Existujú dva spôsoby konštrukčného riešenia uloženia kladivových nástrojov. Spomenuté spôsoby konštrukčného uloženia sú zobrazené na Obrázku 2. Menej používané sú kladivové dezintegračné stroje s pevne uloženými kladivami. Ich nevýhodou je prenášanie rázov vznikajúcich v procese dezintegrácie na ložiská uloženia rotora a ich citlivosť na vniknutie tvrdých nečistôt, ktoré spôsobujú v niektorých prípadoch poškodenie nie len nástroja ale celého dezintegračného stroja [1].



Obr. 2 Model pevného uloženia kladív (vľavo) a otočného uloženia (vpravo) [5]

Druhý spôsob konštrukčného riešenia uloženia kladivových nástrojov je otočné uloženie nástrojov na čape. Rotáciou rotora zaujmú kladivové nástroje vplyvom odstredivej sily radiálnu polohu. Otočné uloženie chráni nástroje a stroj pred poškodením v prípade vniknutia tvrdého telesa do dezintegračnej komory [5]. Nárazom na tvrdý nespracovateľný materiál dôjde k vychýleniu kladív z radiálnej polohy, pričom sa do nej odstredivou silou vrátia. Dezintegračná komora je z výstupnej časti uzavretá sitom, ktorého rozmery otvorov určujú rozmer výstupnej frakcie. Surovina sa nachádza v dezintegračnej komore, pokiaľ nenadobudne rozmery otvorov sita a neprepadne vplyvom gravitácie smerom dole [1, 5].

Nástroje dezintegračných strojov sa podieľajú priamo na procese dezintegrácie spracovávanej suroviny v dezintegračnej komore stroja. Rozlišujeme pomerne veľké množstvo nástrojov z hľadiska tvarov a hmotnosti. Tvary nástrojov závisia na zvolenom typu dezintegračného stroja. Tvar a hmotnosť týchto nástrojov sa volí v závislosti na druhu

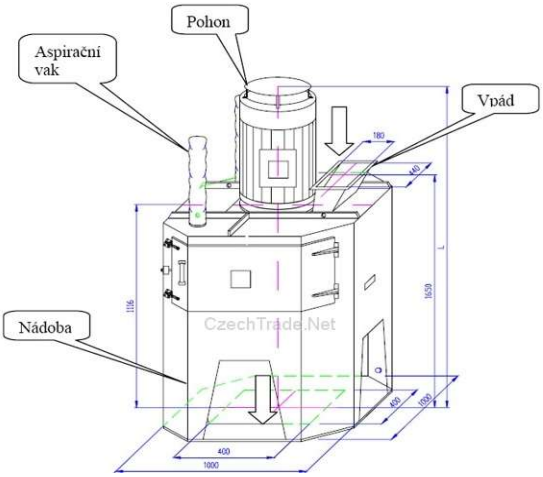
dezintegrovanej suroviny a jej veľkosti. Hmotnosti kladív veľkých kladivových dezintegračných strojov sa pohybujú od 30 do 130 kg [1, 2, 5].

Dezintegrácia je dynamický proces, v ktorom vystupuje viacero parametrov vplývajúcich na opotrebovanie funkčných častí. Vzhľadom na charakter procesu dezintegrácie je miera a rýchlosť opotrebovania dezintegračných nástrojov vo všeobecnosti vysoká. Materiál a tvar nástroja, spracovávaná surovina, ako aj typ dezintegrácie vplývajú na opotrebovanie nástrojov a častí stojov, ktoré prichádzajú do styku so spracovávanou surovinou. Opotrebovanie je vo väčšine prípadov nežiaduci proces degradácie materiálu. S mierou opotrebovania je spojená časová náročnosť na údržbu alebo výmenu opotrebovaných častí. Prestoje vznikajúce pri týchto úkonoch spôsobujú v niektorých prípadoch nemalé finančné straty. Miera opotrebovania, spojená s materiálovým úbytkom takisto vplýva na finančnú náročnosť údržby alebo výmeny opotrebovaných častí. Materiálová náročnosť na výmenu spôsobuje environmentálnu záťaž, ktorá nie je zanedbateľná v dnešnej dobe. S ohľadom na ekonomické a environmentálne hľadiská sa snažíme mechanizmom opotrebovania predísť.

Výskumná úloha, ktorá vznikla na základe spolupráce a priameho zadania priemyselného partnera je podnetom a významom spracovania tohto príspevku. Cieľom tohto príspevku je prezentovať získané informácie z návrhu možností pre zvýšenie životnosti drviacich nástrojov. Základná výskumná úloha vzišla z požiadavky priemyselného partnera, ktorý nás oslovil s riešením enormného opotrebovania drviacich nástrojov kladivového mlyna.

2 Vstupná analýza riešeného problému

Pre výskum vplyvu parametrov vplývajúcich na opotrebenie nástrojov kladivového drviča sme spolupracovali so spoločnosťou, ktorá sa zaoberá výrobou drevných peliet a ich predajom od roku 2010. Výrobný závod sa nachádza v obci Sebedražie v okrese Prievidza. Ako vstupný materiál používajú drevný odpad z drevospracujúcich podnikov vo forme pilín zo smrekového, dubového a bukového dreva [3]. Denná produkcia závodu je 15 ton peliet za deň pri 24 hodinovej prevádzke. Mesačná produkcia peliet sa teda pohybuje okolo 450 ton za mesiac. Distribúcia peliet je v súčasnej dobe orientovaná len na Slovenský trh. Ako vstupný materiál používajú drevný odpad z drevospracujúcich podnikov vo forme pilín zo smrekového, dubového a bukového dreva bez zastúpenia kôry. Drevné pelety sú vyrábané v kombinácii smrekového dreva v pomerom 20 až 30 % s dubovým a bukovým drevom v pomerom 70 až 80 % [3]. Na homogenizáciu vstupnej suroviny v predprípravnej fáze výroby peliet používa spoločnosť kladivový mlyn českej spoločnosti TAURUS, s.r.o., Chrudim (obrázok 3) [3], ktorá sa špecializuje na výrobu strojov a kompletných technologických liniek pre výrobu kŕmnych zmesí, spracovanie obilnín po zbere, skladovanie komodít, spracovanie biomasy a technológií pre pivovary, mini pivovary a liehovary [6]. Vertikálny kladivový mlyn pracuje pri konštantných otáčkach [4]. Pre potreby regulácie otáčok je možne inštalovať frekvenčný menič na hlavnú časť motora kladivového mlyna, ale pre potreby tejto prevádzky nie je regulácia otáčok potrebná. Kladivový mlyn s príkonom 22 kW pracuje pri otáčkach 2 940 min^{-1} s hodinovou produkciou 3,2 až 4 tony za hodinu. Na rotore s priemerom Ø 620 mm je uložených 16 kusov nástrojov v 4 uzloch uloženia. Čap na ktorom sú nástroje uložené má priemer Ø 24 mm a vzdialenosť medzi jednotlivými nástrojmi je zabezpečená vymedzovacími krúžkami. Parametre používaného kladivového mlyna sú uvedené v Tabuľke 1. Prechod vstupnej suroviny cez kladivový mlyn je vertikálny. Drevný odpad vstupuje v hornej časti voľným sypaním zo závitovkového dopravníka a vystupuje v dolnej časti.

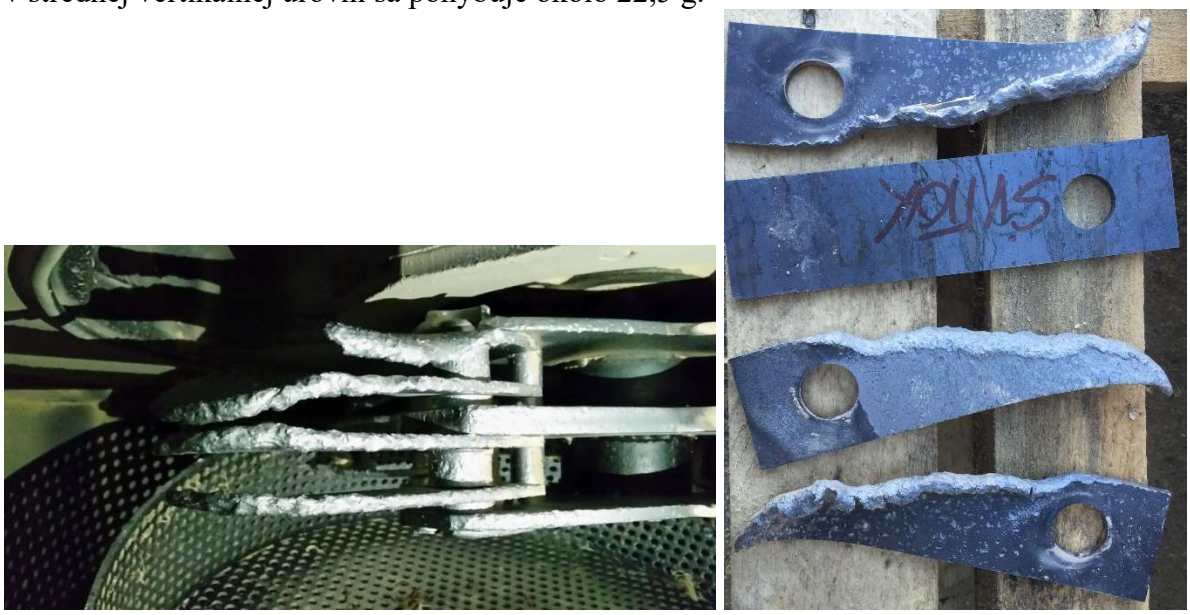


Obr. 3 Schéma kladivového mlyna

Tab.1 Parametre kladivového mlyna

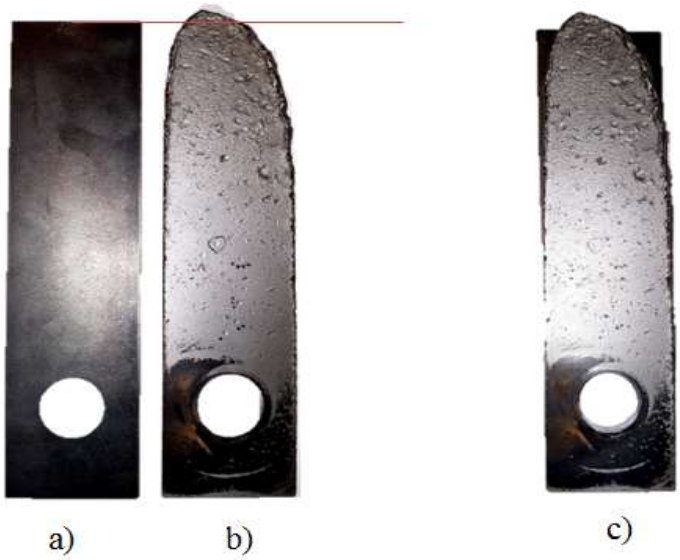
Údaj	Jednotka	Hodnota
Výrobca :	-	TAURUS, s.r.o., Chrudim
Os rotácie rotora :	-	vertikálna
Počet kladív :	ks	16
Priemer rotora :	mm	620
Otáčky :	otáčok/min	2940
Hmotnosť :	kg	470
Menovitý prúd :	A	40,5
Hodinový výkon :	t/h	3,2 – 4,0
Príkon :	kW	22
Rozmery celkové (d/š/v):	mm	1000/1000/1800

V súčasnej dobe spoločnosť používa nástroje z konštrukčnej ocele neznámeho chemického zloženia, pre zistenie tohto druhu materiálu bolo potrebné vykonať chemický rozbor materiálu. Nástroje dosahujú koniec životnosti vplyvom opotrebenia po približne šiestich týždňoch prevádzky, kedy spracujú približne 630 ton drevného odpadu. Je potrebné uviesť, že opotrebenie nástrojov nevzniká vplyvom nevhodnej geometrie nástroja alebo použitým materiálom, ale je vyvolané samotným procesom dezintegrácie. Na obrázku 4 môžeme vidieť, že opotrebenie na rotore kladivového mlyna je nerovnomerné. Najväčšiu mieru opotrebenia pozorujeme v hornej vertikálnej úrovni, teda v najvyššej úrovni. Zvýšená miera opotrebenia nástroja v tejto úrovni oproti nižším úrovniam je v dôsledku blízkosti vstupného otvoru vo vertikálnom smere, kde sú najrozmernejšie frakcie vstupujúceho materiálu dezintegrované prvou vertikálnou úrovňou drviacich nástrojov. Úbytok hmotnosti nástroja v strednej vertikálnej úrovni sa pohybuje okolo 22,5 g.



Obr. 4 Pohľad na opotrebované drviace kladivá v kladivovom mlyne (vľavo) a v porovnaní s nepoškodeným drviacim kladivom (vpravo)

Na obrázku 5. je zobrazené opotrebenie nástrojov po vyššie uvedenej dobe prevádzky. Z obrázku možno pozorovať, že dĺžka opotrebeného nástroja je väčšia, ako dĺžka nástroja pred opotrebením. Rozmerové deformácie sú zrejmé z prekrytia nástrojov na obrázku 5 (c), ktorý zobrazuje nástroj pred použitím a po opotrebení.



Obr. 5 Zobrazenie nástroja - nepoškodeného (a), opotrebeného nástroja (b), prekrytie nástrojov (c)

Poznatky z pozorovania a zisťovania súčasného stavu opotrebenia dezintegračných nástrojov a kvantifikovanie parametrov vystupujúcich v procese dezintegrácie, bolo nutné premietnuť do ďalšieho postupu riešenia tohto problému. Základným aspektom, ktorý ovplyvňuje enormné opotrebovanie drviacich kladív je nevhodne použitý základný materiál drviacich kladív a nedostatočná resp. absentujúca tepelná úprava drviacich kladív. Preto sme sa rozhodli, že úlohu rozdelíme na 2 základné etapy:

1.) návrh vhodného materiálového zloženia drviacich kladív, výroba a testovanie drviacich kladív v laboratórnych podmienkach.
2.) experimentálny výskum navrhnutých materiálových zložení drviacich kladív v dynamickej prevádzke kladivového mlyna.

Z dôvodu časovej náročnosti a zložitosti experimentálneho výskumu, sa v tomto príspevku budeme ďalej venovať iba prezentácii výsledkov prvej etapy riešenia opotrebovania drviacich kladív.

3 Návrh materiálového zloženia drviacich kladív

Pre výskum v rámci prvej etapy riešenia, bolo potrebné navrhnúť taký materiál, ktorý má zvýšenú odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu ako opotrebeniu, ktoré sa najviac prejavuje v procese dezintegrácie. Po konzultácii s odborníkmi riešiteľského kolektívu v tejto oblasti a štúdiu danej problematiky sme zvolili ako materiál pre výskum liatinu s vysokým obsahom chrómu [7]. Aplikácie tohto typu liatiny pri dezintegrácii drevného odpadu doposiaľ nie sú známe. Používajú sa v prevažnej miere iba nelegované konštrukčné ocele. Ich výhodou je cenová dostupnosť a jednoduchosť úpravy.

Biele oteruvzdorné liatiny majú štruktúru tvorenú matricou a karbidmi. Procesom kryštalizácie sú určené v odliatkoch bielych liatin tvar, množstvo, rozmery a rozloženie primárnych a eutektických karbidov. Tepelným spracovaním a legovaním, je možné regulovať

štruktúru kovovej matrice, pričom fáza karbidov je od stuhnutia odliatku nemenná [3]. Chróm sa používa ako hlavná legovacia prísada bielych oteruvzdorných liatin. Obsah chrómu v týchto liatinách sa pohybuje v rozsahu 11 až 35%. Komplexné karbidy chrómu sú tvrdšie ako legovaný cementit, čo vplýva na pevnosť a oteruvzdornosť liatin. Odolnosť voči opotrebeniu liatin rastie so zvyšujúcim obsahom uhlíka a chrómu [2, 3]. Vysokochrómové liatiny všeobecne používané obsahujú 23 až 28% Cr a až do 1,5% Mo. Prísada Mo zaisťuje maximálnu tvrdosť a zabraňuje perlitickej transformácii. Vysokochrómové liatiny je vhodné z uvedených dôvodov legovať Mo, okrem tenkých prierezov. Zabráni sa tvorbe perlitu, ktorý má nepriaznivý vplyv na odolnosť liatin voči opotrebeniu časticami. Optimálne zloženie bielej chrómovej liatiny pre proces opotrebenia voľnými časticami je 2,7-2,8% C, 27-28% Cr, 0,5-1% Si, 0,5-1,25% Mn [3]. Aplikácie odliatkov z bielych oteruvzdorných liatin sú široké, použité boli v opravárenských závodoch, pri lisovaní brikiet na formy a razníky, na lopatky miešadiel zlievarenských formovacích zmesí, na valce valcovacích stolíc, alebo na kladivá drvičov uhlia a pod [3, 7].

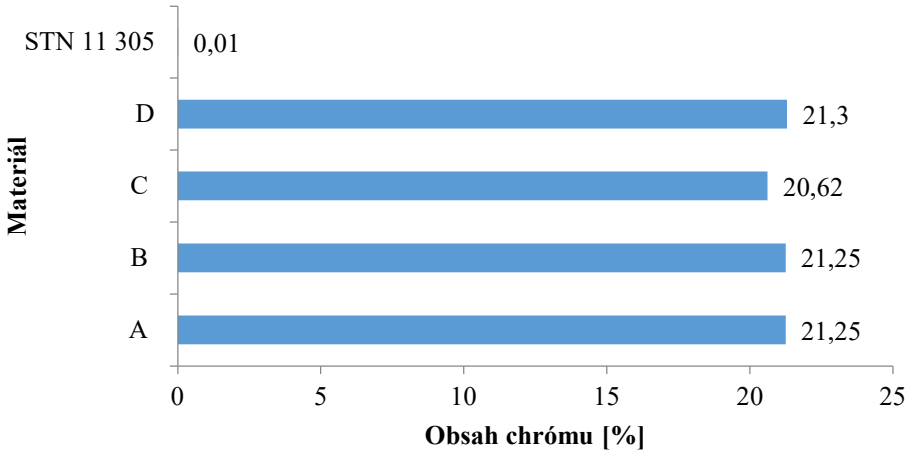
Aby bolo možné porovnať mieru opotrebenia navrhnutých skupín materiálov so súčasne používanými materiálmi, bolo nutné vykonať chemický rozbor súčasne používaného materiálu drviacich kladív. Výsledkom chemickej analýzy je, že zloženie pôvodného nástroja zodpovedá konštrukčnej oceli STN 11 305, upokojenej hliníkom. Percentuálny podiel chemického zloženia jednotlivých navrhnutých materiálov a pôvodne používaného materiálu nástroja sa nachádza v nasledujúcej tabuľke 2.

Tab.2 Chemické zloženie pôvodného materiálu a navrhnutých materiálov [7, 8, 9]

Prvok	Navrhnuté materiálové zloženia - liatiny				Pôvodný materiál
	Materiál A 17 680K (%)	Materiál B 17 680 (%)	Materiál C 17 679 (%)	Materiál D 17 673 (%)	STN 11 305 (%)
C	3,9470	3,9470	3,3840	2,9380	0,0630
Si	0,4757	0,4757	0,4524	0,3649	0,01
Mn	0,9790	0,9790	0,9410	0,8800	0,4200
P	0,0189	0,0189	0,0191	0,0205	<0,001
S	0,0187	0,0187	0,0049	0,0152	0,012
Cr	21,25	21,25	20,62	21,30	0,01
Mo	1,727	1,727	1,471	1,552	0,02
Ni	5,73	5,73	5,42	5,34	0,02
Al	<0,0030	<0,0030	<0,0030	<0,003	0,038
Co	0,0116	0,0116	0,0088	0,0098	<0,001
Cu	<0,0020	<0,0020	<0,0020	0,0062	0,006
Nb	<0,0020	<0,0020	<0,0020	0,0021	0,01
Ti	0,0119	0,0119	0,0090	0,0083	<0,00
V	0,0294	0,0294	0,0173	0,0180	<0,00
W	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,0100	<0,01
B	<0,0010	<0,0010	<0,0010	0,0011	<0,00
N	0,0485	0,0485	0,0418	0,0441	0,009
Fe	65,8	65,8	67,6	67,5	99,37

Navrhované materiály budeme sú označené veľkými písmenami A až D. Skupina nástrojov A je rovnakého chemického zloženia ako skupina B. Aj keď vysokochrómové liatiny sú navrhované na používanie v stave po odliatí, pre skupinu A navrhujeme vykonať tepelnú úpravu na zistenie vplyvu tejto úpravy pri spracovaní drevnej odpadovej hmoty. V stave po odliatí navrhujeme používať pre merania skupinu nástrojov z materiálov B, C a D. Tieto tri skupiny budú s rozdielnym obsahom chrómu a uhlíka. Na obrázku 6 je grafické zobrazenie percentuálneho obsahu chrómu pôvodne používaného materiálu a každého z navrhnutých materiálov.

Po určení chemického zloženia jednotlivých skupín navrhnutých materiálov sme tieto nástroje zhotovili vo forme odliatkov (obrázok 7). Formovalo sa na modelovej doske, na ktorej bolo 7 modelov kladivových nástrojov. Odliate boli do bentonitovej formy s kremičitým pieskom. Štruktúra povrchu bola charakteristická pre odliatky z pieskovej formy.



Obr. 6 Grafické porovnanie %-neho obsahu chrómu v materiáloch [8]

Po navrhovanom označení odliatych nástrojov bolo nutné upraviť rozmery diery. V stave po odliatí bol priemer diery menší o 1 mm. Vzhľadom na vlastnosti navrhnutých materiálov bolo nutné zvoliť nekonvenčnú technológiu obrábania. Konvenčnými technológiami obrábania sú takéto liatiny obtiažne obrobiteľné [9]. Do úvahy pripadajú technológie vodného lúča, laser a EDM [10]. V každom prípade je to však nová výskumná úloha pre riešenie technologického postupu pre obrábanie takýchto materiálov. Problémom bolo malé množstvo materiálu na odobratie a steny diery ostali mierne zošikmené. Brúsením sme toto zošikmenie vyrovnali. Pre budúce aplikácie by sme navrhovali pre odlievanie do formy zmenšiť rozmer diery, aby sme mali dostatok materiálu na obrábanie vodným lúčom a zamedzili by sme uvedenému zošikmeniu.

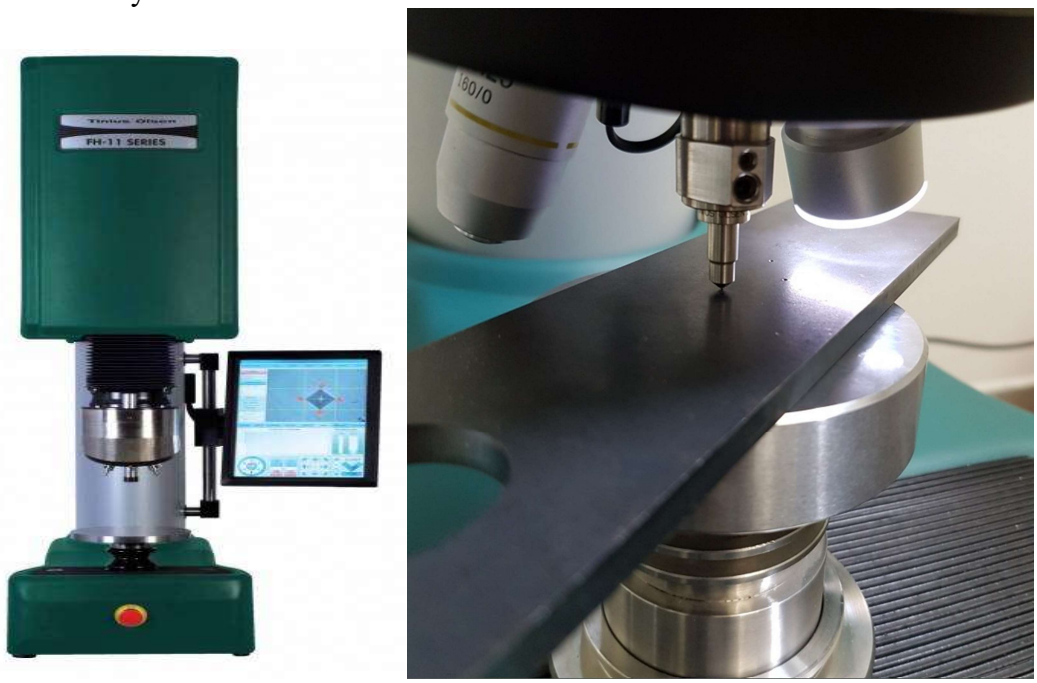
Obr. 7 Odliate drviace kladivá z rôznych materiálových zložení [8]

Označené materiály skupiny A sme po označení mohli tepelne spracovať. Tepelnú úpravu nástrojov materiálovej skupiny A sme vykonávali pomocou muflovej laboratórnej pece českej

spoločnosti LAC, s.r.o. typu LMH 07/12. Tento typ je vhodný na tepelné spracovanie kovov. Pracovná komora má objem 7 litrov a maximálna teplota pece je 1 200°C [8]. Tepelné spracovanie bolo urobené tak, že do komory pece bola umiestnená kovová podložka, na ktorú sa vybrané nástroje umiestnili po jej vyhriatí na požadovanú teplotu. Do komory pece vyhriatej na 900°C boli vložené odliate drviace kladivá materiálu A. Po ustálení teploty v komore pece na 900°C prebehla austenitizácia po dobu jednej hodiny. Kalenie nástrojov sa uskutočnilo na vzduchu po uložení na kovovú podložku. Popúšťanie sa vykonalo pri teplote 600°C po dobu 6 hodín s následných chladnutím na vzduchu. Týmto tepelným spracovaním sme chceli dosiahnuť vyššiu odolnosť voči opotrebeniu v podmienkach experimentu.

4 Laboratórne testovanie navrhnutých drviacich kladív

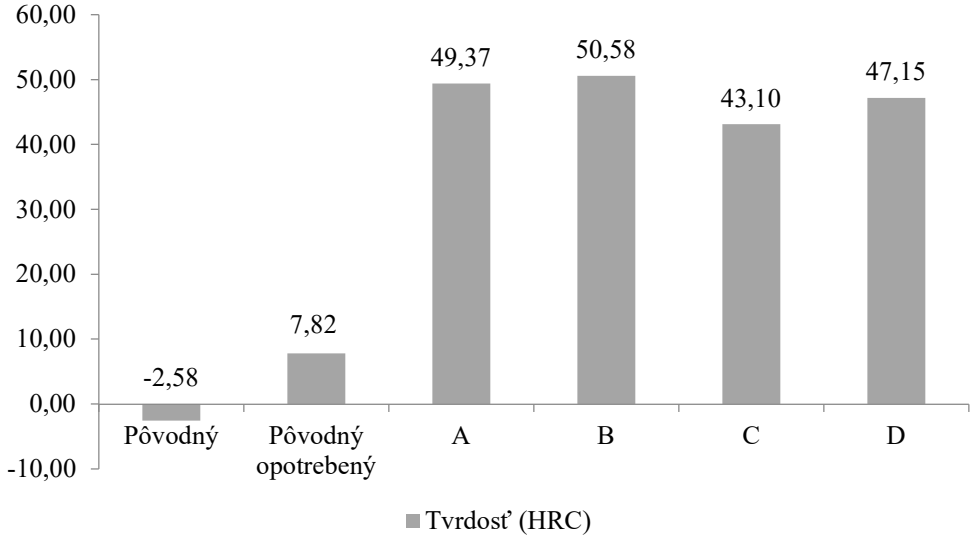
Pred meraniami na vykonanie v prevádzkových podmienkach, sme zvolili vykonať laboratórne skúšky odolnosti proti adhéznemu opotrebeniu a skúšky tvrdosti materiálov. Laboratórne skúšky sme vykonali aj s pôvodne používanými, aj s navrhnutými materiálmi A, B, C, D. Cieľom testovania klzného trenia je kvantifikovanie miery opotrebenia v uzloch uloženia nástrojov na čape. Predísť tak nadmernému poškodeniu čapov a určiť doby trvanlivosti uloženia je cieľom tejto skúšky. Výmenou pôvodných nástrojov za navrhnuté oteruvzdorné materiály nástrojov môže nastať zvýšená miera opotrebenia v mieste uloženia nástrojov. Zvýšená miera opotrebenia v mieste uloženia by mohla spôsobiť degradáciu materiálu čapu, ktorá by mohla viesť k poškodeniu kladivového mlyna vplyvom nadmerného poškodenia čapu v mieste uloženia, počas pracovných otáčok. Materiál čapu je s určitosťou menšej tvrdosti a s menšou odolnosťou voči opotrebeniu ako je materiál navrhnutých nástrojov. Materiál čapu by mal spĺňať požiadavku na minimálne rovnakú tvrdosť materiálu, aby v tribologickej dvojici nedochádzalo k nadmernému opotrebeniu v tomto uzle. Pre zamedzenie uvedeného poškodenia navrhujeme vykonať skúšky chemického zloženia čapov. Pre osadenie nástrojov bude potrebné nájsť na základe chemického rozboru používaného čapu materiálovú dvojicu k navrhnutým materiálom.



Obr. 8 Použitý tvrdomer FH11 (vľavo) a meranie tvrdosti nepoškodeného nástroja (vpravo) [10]

Ako jeden zo sledovaných parametrov pre zistenie vplyvu parametrov vplývajúcich na opotrebenie dezintegračných nástrojov sme zvolili tvrdosť materiálu. Tvrdosť materiálu je jeden zo sledovaných parametrov, ktorý nám stanoví hodnoty faktorov vplývajúcich na opotrebovanie nástrojov [10]. Pre tento účel sme vykonali meranie tvrdosti navrhovaných aj súčasne používaných materiálov. Pre meranie tvrdosti sme použili zariadenie na meranie tvrdosti firmy Tinius Olsen z rady FH11 SERIES, ktoré je zobrazené na obrázku 8. Použili sme Rockwellovu metódu merania tvrdosti. Metóda je navrhnutá na sériové kontrolné skúšky kalených, zušľachťovaných alebo inak tepelne spracovaných ocelí [10]. Táto skúška tvrdosti nevyžaduje úpravu povrchu, lebo hĺbka vtlačku je meraná tak, že zaťažením silou 98 N sa nastaví meranie hĺbky na nulu a následne sa zaťaží skúšobnou silou. Po odľahčení na hodnotu 98N sa odčíta hĺbka vtlačku. Meranie nastáva po odľahčení, aby sa eliminovali pružné deformácie podložky meradla a deformácie stojanu.

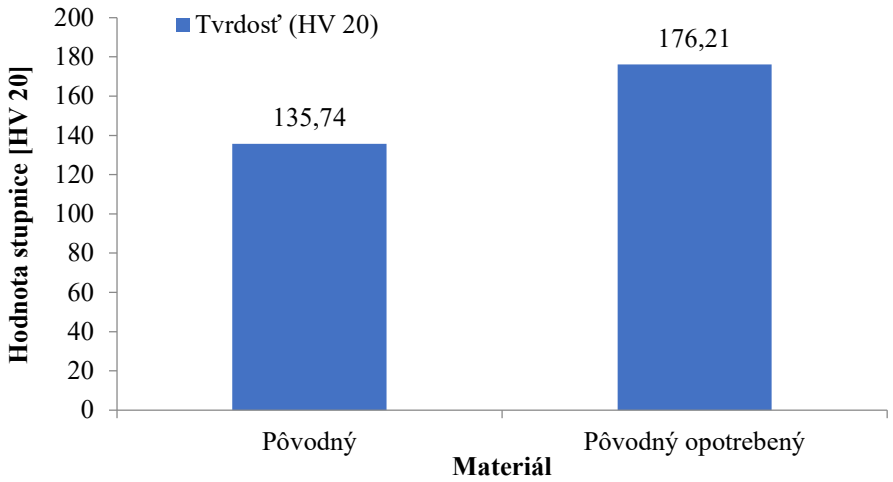
Pre každý z meraných materiálov sme namerali sedem hodnôt tvrdosti. Z týchto zaznamenaných hodnôt sme pri štatistickom spracovaní vyškrtli maximálnu a minimálnu nameranú hodnotu z dôvodu rozdielnej nerovnomernej štruktúry materiálu. Ako je zrejmé z grafického znázornenia na obrázku 9, merané hodnoty tvrdosti pôvodne používaného materiálu nástroja sme zaznamenali mínusové hodnoty stupnice HRC, čo znamená, že táto stupnica tvrdosti nemá použiteľný rozsah pre meranie tvrdosti materiálu pôvodne používaného dezintegračného nástroja. Oblasť použitia stupnice HRC je od 20 do 70 HRC a je určená najmä pre tvrdé tepelne spracované materiály [10]. Mínusové hodnoty znamenajú, že sme namerali tvrdosť menšiu, ako ja spodná hranica stupnice. Z uvedeného dôvodu sme zvolili pre meranie tvrdosti pôvodne používaného materiálu metódu merania tvrdosti podľa Vickersa, ktorej stupnica je jednotná pre mäkké kovy aj tvrdé kalené ocele.



Obr. 9 Výsledky merania tvrdosti navrhnutých materiálových zložení drviacich kladív [8]

Vnikajúce teliesko je rovnaké pre všetky metódy Vickersovej skúšky tvrdosti. Teliesko je diamant v tvare pravidelného štvorbokého ihlana so štvorcovou základňou [10]. Vrcholový uhol je 136° ± 0,5°. Vickersova metóda merania tvrdosti dáva jednotnú stupnicu tvrdosti od najmäkších kovov až po najtvrdšie kalené ocele. Na veľkosti zaťaženia nezávisia hodnoty tvrdosti. Skúška je nevhodná pre meranie tvrdosti hrubých a nerovnorodých štruktúr ako je liatina [10]. Ak je štruktúra skúšaného materiálu príliš hrubá a sila, pomocou ktorej vniká ihlan do skúšaného materiálu malá, môže nastať prípad, kedy bude vtlačok len na jednej časti

štruktúry. Výsledná tvrdosť tak nebude odpovedať celkovej tvrdosti. Vzhľadom na uvedené ovplyvňujúce faktory a na štruktúrne zloženie testovaných materiálov sme pri štatistickom spracovaní vyradili z nameraných hodnôt maximálnu a minimálnu hodnotu. Vyhodnotenie bolo vykonané z piatich nameraných hodnôt. Hodnoty aritmetických priemerov pôvodných materiálov sú zobrazené na obrázku 10. Môžeme pozorovať, že na opotrebovanom pôvodne používanom materiály sme namerali vyššiu tvrdosť materiálu, čo môže byť spôsobené spevnením materiálu nástroja plastickou deformáciou. Porovnaním Vickersovej stupnice s Rockwellovu stupnicu sme chceli poukázať na hodnoty tvrdosti pôvodného materiálu, ktoré nespadajú do Rockwellovej stupnice, avšak bolo možné vykonať spoločné vyhodnotenie keďže poznáme prevodový vzťah medzi hodnotami HV a HRC. Výsledky sú zobrazené v spoločnej stupnici HRC na obrázku 9. Na základe uvedených výsledkov vidíme rádovo rozdielne hodnoty tvrdosti HRC, ktoré predurčujú navrhnuté materiály pre použitie pri vysoko abrazívnych procesoch.



Obr. 10 Zobrazenie tvrdosti pôvodne používaného materiálu pred a po opotrebení [8]

Meranie adhézneho opotrebenia si vyžaduje úpravu vzoriek skúšobného materiálu. Skúšobné vzorky sme zhotovili z odliatkov nástrojov. Úprava odliatkov na rozmery skúšobnej vzorky bola vykonaná technológiou vodného lúča. Pre potreby skúšky sme vyrezali skúšobné telieska s rozmermi 47 x 15 x 7 mm. Ako etalónové skúšobné teliesko použijeme teliesko z pôvodne používaného materiálu. Pre vykonanie skúšky nie je požadované brúsenie alebo iná úprava povrchu. Po odrezaní na požadovaný rozmer a odmastení skúšobných teliesok sme zaznamenali ich parametre. Označovanie skúšobných teliesok sme zvolili pomocou vodovzdorného lakového popisovača na kovové povrchy materiálov. Označenie jednotlivých skúšobných teliesok sa skladá z označenia navrhnutého materiálu veľkým písmenom podľa označenia v návrhu a z poradového čísla skúšobného telieska. Na obrázku 11 sú znázornené označené skúšobné telieska z každej navrhnutej skupiny materiálov.

Obr. 11 Pripravené skúšobné telieska pre meranie adhézneho opotrebenia [8]

Skúšky adhézneho opotrebenia boli realizované tiež v laboratórnych podmienkach na pôde fakulty. Na zistenie klzných vlastností navrhovaných materiálov nástrojov sme použili skúšobné zariadenie švajčiarskej firmy Wolpert Werkstoffprufmachinen GmbH, Amsler A 135, ktorý je zobrazený na obrázku 12. Skúšobná metóda opotrebenia patrí do skupiny porovnávacích skúšok so skúšobnými telieskami. Pri medznom trení je skúška adhézneho opotrebenia typu „ kotúč – príložka “. Podstata skúšky spočíva v pôsobení statickej sily *Fn* vyvodenej pružinou na skúmanú dvojicu materiálov počas určitej doby [10]. Skúšaná vzorka materiálu je pritláčaná k rotujúcemu kotúču [10]. V priebehu skúšky je možné zaznamenávať teplotu v mieste styku a priebeh trecieho momentu, pomocou ktorého sa následne určí súčiniteľ trenia.

Obr. 12 Skúšobné zariadenie Amsler A 135 (vľavo) a principiálna schéma skúšky (vpravo) [8]

Dvojica testovaných materiálov bola počas skúšky vystavená statickej zaťažovacej sile *Fn*. Skúšobnou vzorkou je teliesko obdĺžnikového prierezu *47 x 15 x 7 mm*, ktoré je pritláčané ku kotúču konštantnou prítlačnou silou, ktorý vykonáva rotačný pohyb. V dôsledku trenia vzniká počas doby skúšky v mieste kontaktu trecí moment *Mt*, ktorý je počas skúšky nepretržite zaznamenávaný. Vyhodnotením záznamu priebehu trecieho momentu *Mt* po skúške a zo získaných výsledkov určíme súčiniteľ trenia μ.

Z priebehu trecieho momentu a priemeru kotúča určíme treciu silu F_T podľa vzťahu:

$$F_T = \frac{M_t}{\frac{d}{2}} = \frac{2.M_t}{d} \qquad (N) \qquad (1)$$

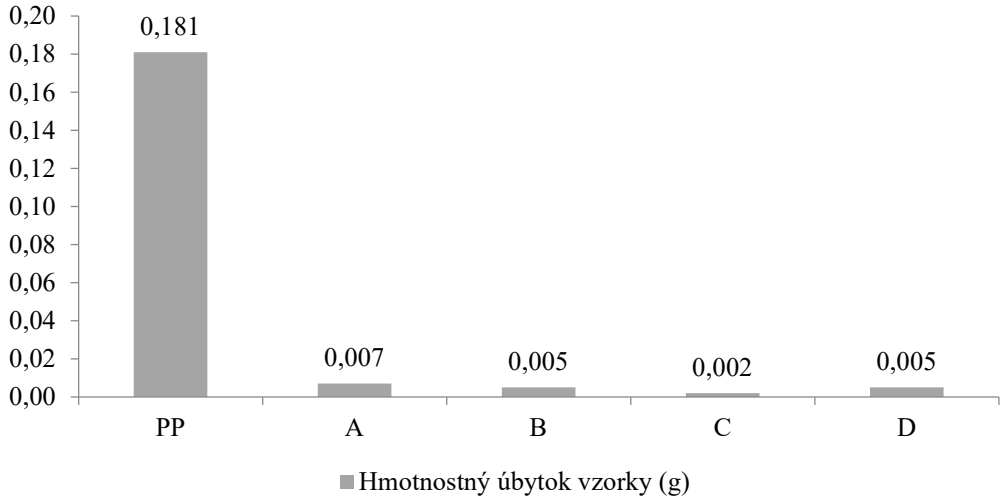
kde,
F_T - trecia sila (N),
Mt – trecí moment (N.m),
d – priemer kotúča (m).

Súčiniteľ trenia určíme z vypočítanej trecej sily F_T a zo známej konštantnej hodnoty prítlačnej sily *Fn* podľa vzťahu:

$$\mu = \frac{F_T}{F_n} \qquad (-) \qquad (2)$$

Výsledky merania adhézneho opotrebenia a výpočtu súčiniteľa trenia vidíme v tabuľke 3 a na obrázku 13. Z vykonanej skúšky môžeme konštatovať, že pôvodne používaný materiál

nástroja má najvyšší súčiniteľ trenia a úbytok hmotnosti vzorky. Pôvodne používaná konštrukčná oceľ má podľa vykonanej skúšky najmenšiu odolnosť proti opotrebeniu. Najmenšiu hodnotu súčiniteľa trenia sme vypočítali pre navrhovaný materiál C, na ktorom sme súčasne namerali najmenšiu hodnotu úbytku hmotnosti. Z porovnania výsledkov tejto skúšky sa javí ako najvhodnejší materiál liatina C.



Obr. 13 Grafické porovnanie nameraných úbytkov hmotnosti [8]

Tab.3 Namerané hodnoty z merania a vypočítané hodnoty súčiniteľa trenia [8]

Materiál vzorky	Súčiniteľ trenia (-)	Tvrdosť (HV)	Hmotnostný úbytok vzorky (g)	Hmotnostný úbytok kotúča (g)
PP	1,79	135,74	0,181	0,002
A	1,73	513	0,007	0,005
B	1,27	528	0,005	0,003
C	0,81	434	0,002	0,000
D	1,67	484	0,005	0,007

5 Záver

Na základe získaných výsledkov je možné jednoznačne potvrdiť, že navrhované materiálové zloženia A, B, C a D sú vhodnejšie pre výrobu drviacich nástrojov kladivového mlyna z pohľadu opotrebovania. Zo známej hodnoty úbytku hmotnosti pôvodne používaného materiálu nástroja je možné si prepočítať teoretické hodnoty opotrebenia pre navrhnuté materiály nástrojov [10]. Pri výpočte je možné uvažovať, že pôvodne používaný nástroj z konštrukčnej ocele 11 305 spracoval 630 ton drevnej suroviny. Po uvedenom množstve spracovanej drevnej suroviny bolo potrebné opotrebené nástroje vymeniť za nové. Ak uvažujeme, že miera opotrebenia dezintegračných nástrojov má lineárnu závislosť, vieme určiť ich teoretickú mieru opotrebenia za určité časové obdobie [10]. Z údajov hmotnostných úbytkov z vykonanej skúšky a reálnej prevádzky je možné určiť teoretické hodnoty množstva materiálu, ktorý by sme spracovali použitím jednej sady nových nástrojov [10]. Navrhované

nástroje materiálovej skupiny C vykazujú, za spomínaných uvažovaných podmienok, najvyššiu teoretickú odolnosť voči opotrebeniu. Prepočítané množstvo spracovanej suroviny je približne 96 krát väčšie, ako množstvo spracovaného drevného odpadu pôvodne používaným nástrojom z konštrukčnej ocele STN 11 305. Avšak pre potreby korektného a reálneho vyhodnotenia použiteľnosti navrhovaných materiálových zmesí pre drviace nástroje (A, B, C, D) je nutné zrealizovať aj experimentálny výskum v reálnej prevádzke. Takto získané hodnoty hmotnostného úbytku a teda opotrebovania drviacich nástrojov, budú vierohodne zohľadňovať aj dynamický účinok celého procesu, špecifické umiestnenie nástrojov na čape, alebo špecifickú pozíciu jednotlivých drviacich nástrojov. Tieto aspekty totiž tiež ovplyvňujú skutočné opotrebovanie a teda životnosť drviacich nástrojov v procese dezintegrácie na kladivových mlynoch.

Poďakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu APVV-19-0607 “Optimalizované progresívne tvary a netradičné kompozitné suroviny ušľachtilých biopalív” financovaného Agentúrou pre vedu a výskum, a za podpory projektu VEGA 1/0665/21 „Výskum a optimalizácia technologických parametrov progresívnej aditívnej výroby efektívnych ochranných prostriedkov proti COVID-19“, financovaného Ministerstvom školstva SR a Slovenskou akadémiou vied.

Použitá literatúra

[1] Lisičan, J.: Teória a technika spracovania dreva, Zvolen, MATCENTRUM, 1996, s. 626, ISBN 80-967315-6-4.
[2] Ditner, O.: Drcení a mletí nerostných surovin, Praha, SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. s. 241.
[3] Zdravecká, E., Smetana, Š., Suchánek, J.: Abrazívne a erozívne opotrebenie, Košice, TU v Košiciach, 2012, s. 157, ISBN 978-80-553-1250-7.
[4] Murgaš, M., Dřímal, D.: Vysokochrómová liatina so zvýšenou ťažnosťou, In: CO-MAT-TECH 2006, Trnava, 2006.
[5] Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 2– Impact crushers. [online], [citované dňa 06. apríla 2017],
dostupné z < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089268751400394X >.
[6] Murgaš, M.: Renovačné technológie, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1996.
[7] Pokusová, M., Brusilová, A., Šooš, Ľ., Berta, I.: Abrasion wear behavior of High-chromium Cast Iron, Archives of foundry engineering, Vol. 16, str. 69 – 74, ISSN 1897-3310.
[8] Šoltýs, S.: Výskum opotrebovania nástrojov kladivového drviča pri dezintegrácii drevnej biomasy, Diplomová práca, ÚSETM SjF STU v Bratislave, školiteľ: doc. Ing. Peter Križan, PhD, 2017.
[9] Kovač, P., Savković, B., Pokusová, M., Kulundžić, N., Vrabel, M.: Machinability study of surface grinding of hard high alloyed cast iron, In.: Development in Machining Technology, Zv. 8., Cracow University of technology, Cracow, 2018.
[10] Križan, P., Šooš, Ľ., Pokusová, M., Matúš, M.: Materiály pre nástroje zhutňovacích nástrojov, Bratislava, Vydavateľstvo F.X. spol. s.r.o., 2017, s. 257, ISBN 978-80-89313-62-4.