

OPONENTSKÝ POSUDEK

Habilitační práce:

Evaluácia energetickej náročnosti vybraných procesov obrábania

Habilitant: Ing. Peter Koleda, PhD.,

Katedra výrobní a automatizační techniky, Fakulta techniky, TU ve Zvolenu.

Obor habilitačního řízení: Výrobní technika

Rozsah: 168 stran

Na základě požadavku děkana Fakulty techniky Technické univerzity ve Zvolenu doc. Ing. Pavola Beňu, PhD. ze dne 7. 10. 2020, předkládám dále uvedený posudek habilitační práce.

Kritický rozbor práce

Konstatuji, že autor práce zpracoval výstižný a logicky dobře uspořádaný komentář k problematice habilitační práce, která je sestavena jako soubor 8 publikovaných vědeckých článků a je doplněná o vstupní teoretický komentář s uvedenými výsledky experimentálních měření. V úvodu zdůrazňuje fakt, že zvýšená spotřeba energie vede k hledání nových a obnovitelných zdrojů, především v průmyslu, s cílem snížit využití fosilních paliv. **Spotřebu energie v průmyslu** vhodně popsal v 1. kapitole.

V kapitole 2. **Elektrická energie při obrábění**, se zabývá situací ve výrobním průmyslu, ve kterém jsou hlavními spotřebiteli energie obráběcí stroje a manipulační zařízení poháněné vysokovýkonnými elektrickými pohony. V této oblasti vidí autor možnosti snižování spotřeby a uvádí, že k tomu je nutné znát obráběcí proces i z hlediska energetické náročnosti. Toto považuje za hlavní cíl složitého procesu získávání údajů z různých technologických operací ovlivňovaných mnoha proměnnými, např. stroj, nástroj, obráběný materiál, druh operace, který v dalším rozpracovává. Tento přístup umožní optimalizaci výrobního procesu i z hlediska spotřebované energie. Dále upozorňuje na fakt, že existuje více přístupů k měření a výpočtu sil a momentů potřebných na obrábění.

Uvádí jednu z nejčastějších metod, rozpracovanou v řadě variant, jedná se použití dynamometrů ve vřetenu stroje a analýzu spotřeby energie změřenou v přívodních vodičích k hnacímu elektromotoru, bez analýzy spotřeby posuvového mechanismu a odsávání.

Autor se v dobře zpracovaném rozboru zabývá problematikou měření a hodnocení energetické náročnosti vybraných procesů obrábění dřevěných a kovových materiálů. Obráběcí procesy analyzuje z pohledu energetické náročnosti jednotlivých operací, konstrukčních a funkčních součástí, správně určuje hlavní problémy a jejich význam pro volbu metodiky výzkumu, jehož výsledky jsou uvedené v publikovaných člácích. Výzkum je zaměřený převážně na sledování spotřeby elektrické energie při frézování přírodního a termicky modifikovaného dřeva ve formě řezného příkonu. Autor správně předpokládá při použití moderních řídicích systémů úspory spotřeby elektrické energie až o 50 % ve srovnání s klasickými stroji.

V kap. 2.2 **Modely spotřeby energie při obrábění** rozebírá 11 používaných modelů, u kterých uvádí výpočtové vztahy. Uvádí mezi jinými i vztah (3) Koleda *et al.* (2019, 2020), který je vhodný pro posouzení spotřeby energie řezného procesu frézování dřeva. Dál řeší (kap. 2.3) obecně **energetickou náročnost obrábění** a vztah pro deformační práci A_d , a uvádí faktory ovlivňující řezný odpor K . Tím vytvořil podmínky pro měření a výpočet řezného výkonu P_c a elektrického příkonu motoru P_p . V kap. 2.4 **Řezný výkon** správně uvádí, že při měření je třeba rozeznávat příkon elektromotoru při volnoběhu P_o a příkon při opracování

dřeva P_p , a dále uvádí vztahy pro výkon a řeznou sílu. V kap. 2.5 používá **empiricko-statistický výpočet řezné síly** a spotřeby energie, empirické vztahy vycházející z předpokladů Vasilka (2007). Ke vztahům (15) až (24) nemám připomínky.

V 3. kap. se zabývá **Monitorováním energie spotřebované na obrábění** a problematiku objasňuje na robustním modelu (Abellan-Nebot et al. 2010) umožňujícím popsat řadu oblastí, počínaje monitorováním, návrhem experimentu na modelování procesů a jejich řízení a optimalizaci v reálném čase. Uvádí metodologii o pěti krocích, doloženou tabulkou na Obr. 5. Informativní a výstižný je Obr. 6, Příklad topologie přenosu elektrického výkonu stroje, kde uvádí jak je možno výkon (příkon) vyhodnotit z měření uvedených veličin

1. Měření proudu a napětí v přírodních vodičích
2. Měření sil a kroutícího momentu na vřeteněch a
3. Analyzování veličin sítě pomocí výkonového analyzátoru.

Poté řeší postup, jak parametry naměřit a dopočítat výkony a kroutící momenty. Součástí postupu je i popis vlastností měniče momentu a dynamometrů. Vlastnosti elektrické sítě analyzuje pomocí proudových svorek (U , I , $\cos \phi$) nebo frekvenčním měničem. Autor používá výkonový analyzátor, který zapojil, vybavil programem (viz vývojový diagram na Obr. 16, zdrojový kód části programu) a přizpůsobil k měření výkonu. Uvádí rovněž na konkrétním příkladu použití při měření příkonu elektromotoru spodní vřetenové frézky aparaturou, která sestává z frekvenčního měniče UNIFREM 400 M a sinusového filtru, které jsou zapojeny v přírodních vodičích elektromotoru dle Obr. 17 a Obr. 18. a záznam naměřeného příkonu a výkonu při frézování a chodu na prázdno. Uvádí i použití frekvenčního měniče dle literatury (Vonkomer 2015), včetně blokového schématu a výsledků měření. Přínosem je uvedení postupů měření spotřeby ve sledu operací dle Li et al. (2007). Vyzdvihl i experimentální měření řezných sil a příkonu dle (Zhang et al. 2020). Při analýze procesu obrábění se de přistupuje ke kombinaci různých zapojení v součinnosti se senzory i jiných veličin (teplota, vibrace...), což rozšíří informace k měření opotřebení nástroje. Hodnotím tyto části jako významný přínos autora k měření.

Kap. 4. řeší přehled **vlivu činitelů na energetickou náročnost obrábění**. Uvádí se v ní mimo jiné práce autorů, kteří prováděli výzkum vlivu technicko-technologických parametrů kovových a dřevěných materiálů na spotřebu energie s dosáhnutím požadovaných rozměrových a kvalitativních vlastností výrobků. Výsledky dostupné v literatuře porovnává s výsledky experimentálně zjištěnými a ověřenými uvedených v přílohách předložené práce.

V **závěru** práce sumarizuje autor výsledky rozboru a konstatuje, že se zabývá hodnocením procesu obrábění z pohledu jeho energetické náročnosti. V rámci jeho výzkumu byla realizována experimentální měření, ze kterých byla energetická náročnost rovinného frézování přírodního a modifikovaného dřeva stanovena pomocí vypočítaného řezného příkonu. Obecně na problematiku energetické náročnosti existuje více pohledů. Autor volí metodiku měření elektrického příkonu vhodným analyzátozem v přírodních fázových vodičích, nebo frekvenčním měničem s cílem odlišit spotřebu energie při zapnutí nebo vypnutí příslušných mechanismů. Uvádí, že největší vliv na energetickou náročnost mají výkonové elektropohony mechanismů, dále je nutné vzít do úvahy i další činitele jako kvalitu vytvořeného povrchu a výrobní kapacitu.

Metodika sledování a vyhodnocení umožní díky vytvořenému softwaru stanovit vhodný postup sledování všech prováděných experimentů. Uvádí přehledným tabulkovým způsobem převedeným do grafů výsledky měření zvolených parametrů a jejich vzájemného porovnání. Hodnocení výsledků měření je provedené zdárně, nemám k němu připomínky. Autor provádí vzájemné porovnání výsledků z hlediska vlivu na spotřebu energie a kvalitu

povrchu a rovněž provádí porovnání vlastních výsledků s výsledky autorů, kteří se obdobnou problematikou zabývali dříve.

Odborná a vědecká úroveň práce

V seznamu použité literatury je uvedeno 59 literárních pramenů, které svědčí o rozsáhlých odborných znalostech autora, a které jsou v práci citovány podle zvyklostí. Vysokou vědeckou úroveň své práce dokladuje v přílohách 1až 8 velmi zdařilých publikací uvedených práci. V seznamu vlastních publikací uvádí 11 článků, ve kterých je hlavním autorem. Všechny články jsou psány ve spoluúčasti s dalšími řešiteli výzkumu a ve 4 člancích je uveden jako další autor. Z toho je 5 článků otištěno ve vědeckých časopisech uvedených v databázích CCC, WOS, Scopus, což dokladuje dobrou vědeckou úroveň vlastní práce. Zbytek jsou články z výzkumu VEGA publikované v ostatních vědeckých karentovaných časopisech, což hodnotím jako nadprůměrnou publikační aktivitu.

Výzkum, jehož výsledky jsou obsaženy v přílohách práce, je zaměřený především na sledování spotřeby elektrické energie při frézování přírodního a termicky modifikovaného dřeva, kdy energie je uvažována ve formě rezného příkonu. Elektrický příkon se měřil při chodu frézky naprázdno a při frézování, které bylo prováděno v dílnách TU ve Zvolenu v rámci řešení několika grantových úloh metodou analýzy elektrického příkonu do elektromotoru pomocí frekvenčního měniče a výkonovým analyzátozem. Autor byl klíčovým řešitelem grantu, ve kterém byla použita metoda výpočtu rezného příkonu, konkrétně v projektu VEGA Výzkum relevantních vlastností termicky modifikovaného dřeva při kontaktních jevech v procesu obrábění s predikcí získání optimálního povrchu. Přínosem jsou výsledky výzkumu energetické náročnosti operací rovinného frézování domácích dřevin dub letní a smrk a exotické dřeviny meranti.

Původnost a aktuálnost práce

Předloženou práci pokládám za aktuální, autor pokračoval v řešení široce diskutované problematiky, ve které do značné hloubky rozpracoval metody provádění a vyhodnocení experimentů. To vyžaduje zvládnutí a rozpracování teorie, která je, jak ukazuje literární průzkum, dostatečně publikovaná v literatuře a autor z ní zdařile čerpal. Kladně hodnotím skutečnost, že přístup autora je komplexní a práce je v některých částech zcela původní. Přínosné je praktické provedení zkoušek na vlastním experimentálním zařízení, kde autor po rozboru a vyhodnocení charakteru experimentu dokladuje dosažení původních výsledků.

Formální úprava

Nemám připomínky a námítky k logické stavbě práce, práce obsahuje výstižný rozbor současného stavu, který je využitý při stanovení metodik experimentů a jejich vyhodnocení. Po formální stránce je práce zpracována s minimem překlepů a drobných chyb, je logicky i formulačně dobře zvládnutá. Kladně hodnotím i zpracování většiny obrázků, tabulek a grafů.

Připomínky

- Překlepy str. 8, odst. 4, chybí písmeno *s* ve slově existuje, str. 14, v poslední větě chybí slovo, asi *musí*.

-

Dotazy

1. Vysvětlete, jak je ve vaší práci provedeno měření drsnosti dřeva bezdotykovou metodou.
2. V návaznosti na použití empiricko-statistický výpočet rezné síly, uveďte i další metody a rozeberte možnosti jejich použití ve vaší práci.
3. Jak hodnotíte vlastní přínos?

Závěr

Předložená habilitační práce řeší aktuální problematiku, je zpracována přehledně a systematicky, formálně správně a obsahuje původní řešení problematiky měření a hodnocení energetické náročnosti procesů obrábění a věnuje pozornost i stanovení vlivu parametrů na kvalitu povrchu a energetičnost obrábění. Z hlediska spotřeby stroje použil metodiku měření jednotlivých operací, využil měření elektrického příkonu vhodným analyzátozem v přívodních fázových vodičích, nebo frekvenčním měničem, který analyzuje elektrické veličiny tak, že je možno odlišit zapnutí/vypnutí mechanismů a odlišit jejich spotřebu. Přínos je možno vidět v rozpracování metod zkoušení a nové metody vyhodnocování vlivu vybraných parametrů na drsnost a obrobeného povrchu versus spotřeba energie. Práce svým pojetím a zpracováním představuje značný posun v rozšíření znalostí v oboru a je vzhledem k dobře provedeným experimentům využitelná pro další rozvoj teorie, ale především pro praxi.

Na základě posouzení předložené habilitační práce konstatuji, že habilitant prokázal schopnost a připravenost k samostatné vědecké i řídicí činnosti v oblasti výzkumu a vývoje. Práce odpovídá požadavkům habilitačního řízení k udělení vědecko-pedagogického titulu docent v oboru Výrobní technika.

prof. Ing. Miroslav Rousek, CSc.

V Brně, 13. 11. 2020

Adresa: Fakulta lesnická a dřevařská, Mendelova univerzita v Brně,
Zemědělská 3, 613 00 Brno, mail: rousek.miroslav1@seznam.cz

Prof. Ing. Miroslav Rousek, CSc.

Kuršova 4

635 00 Brno

Děkan Technické fakulty Technické univerzity ve Zvolenu

doc. Ing. Pavel Beňo, PhD.

Študentská 26

960 53 ZVOLEN

V Brně, dne 13. 11. 2020

Věc. Zaslání posudku habilitační práce

V příloze Vám zasílám Vámi vyžádaný posudek habilitační práce Ing. Petra Koledu, PhD. z katedry výrobní a automatizační techniky.

Přikládám současně vyplněnou dohodu o vykonání práce ve dvou výtiscích.

S pozdravem

prof. Ing. Miroslav Rousek, CSc.