Recenzní posudek doktorské práce zpracované

Ing. Lucií Schmidovou

na fakultě strojní katedry obrábění a montáže

Technické university v Liberci

S rozvojem vědy a techniky je stále větší pozornost věnována problematice jakosti strojních součástí. Pod pojmem jakosti je z hlediska technologie výroby chápána jakost rozměru, polohy, geometrického tvaru a fyzikálních jevů, které provázejí činnost funkčních vlastností povrchu dané součásti. Objevují se nové požadavky kladené na úplnější popis nově vytvořeného povrchu funkční plochy. Na to reaguje trh tím, že se objevují nová měřicí zařízení, která umožňují měřit a vyhodnocovat řadu parametrů, které se dříve nevyužívaly, nebo nebyly pokládány za rozhodující.

Podrobné znalosti jakosti povrchové vrstvy mají svůj význam v tom, že vedou k naplňování přesnějších požadavků na funkční plochy při jejich výrobě a využívání.

Jakost povrchu a její význam je dnes zaměřen na opracování konstrukčních materiálů, ale i materiálů o vysoké pevnosti, materiálů žárupevných, korozivzdorných apod.

Konstrukce přichází s novými požadavky na menší tolerance s cílem zabezpečit náročnější funkci součásti, případně splnit funkční vlastnosti nových součástí vystaveným extrémním podmínkám zatěžování.

Během výroby mohou vzniknout na opracované ploše následující změny:

- povrch je plasticky deformován,
- mění se stav povrchové vrstvy,
- vznikají trhliny,
- vznikají zbytková napětí v povrchové vrstvě.

Tyto změny mohou být příčinami vzniku poruch, které snižují spolehlivost obrobených součástí.

V současné době jsou kladeny vysoké požadavky nejen na zvyšování produktivity, ale i vyšší nároky obráběcí stroje a nástroje. Pro hodnocení změn, které mohou nastat v povrchové vrstvě jsou v současné době posuzována ozubená kola a to jako významné elementy pro přenos krouticích momentů i při vysokých obvodových rychlostech.

Z tohoto hlediska je možné konstatovat, že ozubená kola jsou správnou volbou pro hodnocení integrity ozubení. Jedná se o náročné součásti, kde je ale možné ukázat jak je doktorandka připravena na obhajobu své práce.

Na základě analýzy funkčních vlastností ozubených kol byla zvolena metodika řešení celého problému. Toto se dá shrnout do následujících bodů:

- vliv broušení na integritu dynamicky namáhaných součástí pomocí Barkhausenova šumu,
- analýza zbytkových napětí,
- srovnání zbytkových napětí po broušení metodou RTG difrakce a Barkhausenova šumu,
- posoudit možnosti zefektivnění procesu dokončování ozubených kol,
- posouzení vzniku možných trhlin.

Zvolený postup je velice perspektivní a jeho řešení má možnost připravit další podklady pro zlepšení integrity povrchu dynamicky namáhaných součástí. Navržená metoda ukazuje, že doktorandka velice dobře posoudila možnosti hodnocení charakteristik integrity moderními metodami novými postupy. Hlavně využila moderních metod měření, tj. zařízení pro hodnocení Barkhausenova šumu, které se dříve nepoužívalo.

Velmi pečlivě jsou zpracovány kapitoly o vzniku zbytkových napětí, především ve vztazích vzniku zbytkových napětí určovaných pomocí parametrů hysterezních křivek. Toto byla často oblast, která nebyla důsledně využívána.

V současné době jsou již zpracovány magneto-elastické parametry získané jinými metodami měření zbytkových napětí. Pracovníci mají nyní možnost porovnávat uvedená napětí při lepším využití magneto-elastického parametru moderními přístroji. Pro přesné využití poznatků o Barkhausenově šumu bylo zapotřebí porovnat tuto metodu s jinými metodami; jedná se o metodu RTG refrakční analýzy, metodu odvrtávání, případně metodou „$\sin^2$ □“. Všechny tyto metody jsou analyzovány velmi pečlivě, což svědčí o dobrých znalostech doktorandky.

Další kapitola uvádí analýzu výroby čelních ozubených kol. I v této části prokázala doktorandka dobrou znalost technologických podkladů o dělicím a odvalovacím způsobu výrob, a to především s ohledem na vznik a rozložení zbytkových napětí v povrchové vrstvě, kdy tato napětí určují funkční spolehlivost ozubení, které je vystavováno extrémnímu namáhání. Pečlivě je provedena analýza tvorby třísky při broušení včetně průběhu zbytkových napětí.

Na základě provedené analýzy byla sestavena metodika experimentů a nastavení měřicích experimentů. Výsledky provedení vlastních zkoušek ukazují správnost postupu a využití získaných poznatků pro uplatnění výhod metody Barkhausenova šumu pro rychlé a spolehlivé určení zbytkových napětí na ozubených kolech.

Metoda Barkhausenova šumu představuje nedestruktivní hodnocení zbytkových napětí feromagnetických materiálů, které jsou vystaveny magnetizaci, kdy výsledkem je získána hysterezní křivka. Tato křivka má různý tvar, který je závislý na složení a stavu krystalové mřížky. Intenzita Barkhausenova šumu je ovlivněna materiálovými parametry, tj. přítomností a rozložení pružných napětí, a metalurgickou strukturou materiálu. Výsledkem měření je získání magneto-elastických parametrů využitelných jako změny integrity povrchu.

Pro podrobnější analýzu metody Barkhausenova šumu zpracovala doktorandka názory na měření zbytkových napětí i dalšími metodami, tj. pomocí RTG difrakce, odvrtáváním a analýzou změn v povrchové vrstvě po technologické operaci broušení. V této kapitole provedla hodnocení vlivu metod obrábění na zbytková napětí, kde se ozubení vyrábí dělicím a odvalovacím způsobem.

Tím bylo potvrzeno rozložení zbytkových napětí především při broušení. Tato část je přínosná v tom, jaký je charakter zbytkových napětí u dokončovacích metod.

Popis zbytkových napětí na bocích zubů ozubených kol je dobrým předpokladem doktoranda, aby ukázal kam nasměrovat případný další výzkum.

Experimentální část disertační práce je zpracována v druhé části, kde řešitelka dokázala, že správně řeší daný problém, že řešení rozumí a má snahu co nejlépe doložit metodiku práce a doplnit jednotlivé kapitoly výsledky experimentů. Konstatuji, že se jí to podařilo. Tím práce dokazuje dobré znalosti teoretické i experimentální.

V druhé části disertační práce prokázala doktorandka, že umí zpracovávat složité technické problémy, že ovládá vědecké metody, má rozsáhlé teoretické znalosti a získanými výsledky dokáže přinášet nové poznatky. Tím prokázala, že je dobře odborně připravena.

Celkový závěr

Posuzovaná disertační práce prokázala, že doktorandka dokáže řešit i složité technické problémy, že umí dobře využít poznatků uváděných v literatuře pro stanovení správné metodiky. To posloužilo ke vhodné volbě postupů provedených experimentů. Doktorandka také ukázala, že umí využívat teoretické a experimentální znalosti pro komplexní řešení zadaného problému. Doktorandka má dobré předpoklady řešit i složité technologické problémy a doplňovat je vhodnými experimenty. Tím je prokázáno, že je dobře připravena zvládnout i složité technické zadání, které určitě přispěje k využití výsledků této disertační práce pro jejich uplatnění v praxi.

Na základě předložené disertační práce splnila doktorandka předpoklady pro získání vědecké hodnosti. Proto doporučuji, aby po obhajobě byl přiznán vědecký titul PhD.

V Brně dne 10.10.2014

Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc

RECENZNÝ POSUDOK
DOKTORANDSKEJ DIZERTAČNEJ

Téma: *Hodnocení integrity povrchu a využití poznatku pro zefektivnění obrábění ozubených kol.*

Autor: *Ing. Lucie Schmidová*

Školiteľ: *doc. Ing. Jan Jersák, CSc.*

Študijny program: P2303 Strojírenská technologie

Vedný odbor: 2303V002 Strojírenská technologie

Školiace pracovisko: *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže*

Recenzent: *prof. Dr. Ing. Miroslav Neslušan*

Pracovisko: *Katedra obrábania a výrobnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita*

Predložená práca rieši problematiku nedeštruktívneho monitorovania povrchov prostredníctvom Barkhausenovho šumu. Uvedená problematika je dnes aktuálna a je v popredí záujmu vedeckého výskumu v súvislosti s intenzifikáciou technologických postupov ako aj zvyšovaním nárokov na presnosť obrokov a hlavne kvalitu povrchov vzhľadom na jej výrazný vplyv na funkčnosť súčiastok pri zaťažovaní. V dnešnej dobe je možné pozorovať, že nedeštruktívne magnetické metódy založené na Barkhausenovom šume (BN) sú v praxi využívané v čoraz širšom meradle o čom svedčí rozrastajúci sa počet reálnych aplikácií s Českej ako aj Slovenskej republike. Predkladaná práca svojim obsahom a zámerom sa snaží skĺbiť problematiku zvýšenia produktivity pri brúsení ozubených kolies ako aj monitorizáciu povrchov.

Predložená práca cituje v teoretickej časti predovšetkým domáce literárne zdroje. Zahraničné citované práce sú v obmedzenom a bezprostredne problematiky BN sa týkajú len 4 zdroje. Rozsah citovaných prác napr. z Web of Science mal byť oveľa širší a detailná rešerš z oblasti BN mi v práci chýba. Autorka inak vcelku prehľadne poskytuje čitateľovi stručný prehľad poznatkov z oblasti, ktoré sa práce bezprostredne dotýkajú. Možno objektívne konštatovať, že autorka sa pri vypracovaní doktorandskej dizertačnej práce oboznámila so všetkými podstatnými aspektmi, ktoré chce aj vo svojej práci do budúcna riešiť (niektoré detailnejšie, iné stručnejšie).

Práca je rozčlenená do 8 kapitol + 2 príloh. Hneď v druhej kapitole autorka prezentuje cieľ práce. V tretej a štvrtej kapitole sa venuje dostupným poznatkom z oblasti integrity povrchu a výroby ozubených kolies. V šiestej kapitole sa autorka venuje podmienkam experimentov. Nosnou časťou celej práce je siedma kapitola, v ktorej sú uvedené výsledky získané pri experimentálnom štúdiu vyššie uvedenej

problematiky. V závere práce autorka poskytuje v jednoduchej a stručnej forme základné výstupy práce.

Je potrebné konštatovať, že uvedená problematika je veľmi náročná na interpretáciu údajov, korelačnú analýzu vzhľadom na to, že BN je dosť zložitý fyzikálny jav. BN je korelovaný predovšetkým s napäťovým stavom. Práca nie je základným, ale aplikovaným výskumom a je zameraná na využitie poznatkov z oblasti BN do reálnej praxe pri výrobe ozubených kolies. Z tohto hľadiska oceňujem, že práca je v konečnom dôsledku prínosná aj pre prax a využiteľná v reálnych podmienkach brúsenia ozubených kolies. Poskytuje niektoré veľmi cenne výstupy, predovšetkým čo sa týka stability procesu brúsenia, ale hlavne pieskovania a guličkovania na integritu povrchu vyjadrenú v BN hodnotách. Rovnako tak oceňujem veľký rozsah experimentálnych prác, ktoré idú možno až nad rámec rozsahu 1 dizertačnej práce. Práca je štylisticky dobrá, má logický sled, je v zásade prehľadná. Vzhľadom na to, že je napísaná v autorkinom materinskom jazyku (češtine) neviem posúdiť jej jazykovú úroveň.

V práci sa vyskytujú niektoré formálne nedostatky, ktoré výrazne jej kvalitu neznižujú:

- V práci sa vyskytuje budúci čas, napr. str. 44 a ďalej,
- Obr.6.2 na str. 45 je zle čitateľný,
- V tab. 10 by malo byť 45 μm a nie 55 μm,
- V grafoch je popis nad ním ako aj dole v popise obrázku – zbytočná duplicita,
- V práci sa vyskytuje duplicita informácii – tabuľka ako aj graf, myslím, že tabuľky mohli ísť do príloh,
- Na str. 86 preklep – pcro – malo byť pro.

Obsahové pripomienky k práci:

- Na str. 40 sa uvádza, že brúsenie ovplyvňuje drsnosť povrchu a zvyškové napätia (ZN), treba si uvedomiť, že brúsenie ovplyvňuje súčiastku komplexne a ide o zmenu rozmeru, tvaru, ZN, drsnosti ale aj niekedy štruktúry a podobne,
- Obr. 7.20 až 7.22 ako aj ďalej všade, kde sú hĺbkové profily by mali tie profily ako body spojené čiarou,
- Niektoré vyjadrenia v práci sú tak trochu dohady nepodložené údajmi – (dizertačná prác ako práca vedecká je prácou exaktnou), napr. str. 67 „rozdiely na bokoch spôsobené kmitaním“, str. 63 „nerovnomerné rozloženie ZN“, mnohé z týchto vyjadrení sú správne na základe nepriamych indikácii, ale niektoré by si vyžadovali experimentálne verifikácie,
- Prínosy práce sú napísané príliš všeobecne,
- Nemôžem súhlasiť, že BN merania preukázali vzťah medzi BN a vznikom trhlín – takéto vyhlásenie je priveľmi smelé a nepodložené. Autorka ukázala len 1 príklad z ktorého nie je možné

robiť všeobecnejšie závery ako je to v práci (na to by sa musel urobiť oveľa rozsiahlejší výskum). Za správnu považujem informáciu, že vysoké BN hodnoty indikujú zvýšené tepelné zaťaženie povrchu a s tým spojené zvýšené riziko vzniku trhlín (sám mám takúto experimentálnu skúsenosť), ale nemôžem súhlasiť s tým, že vysoká BN hodnota = trhlina povrchu, takto to nefunguje.

Otázky k práci:

1/ Obr. 7.1 a 7.2 ukazujú zmenu BN v závislosti od mag. napätia, respektíve frekvencie. Neviem ako sa exaktne došlo na napätie 6,6 V. Nepáči sa mi graf, kde je BN v závislosti od frekvencie (7.2), BN by od cca 225 Hz malo klesať. Nameraná BN na bokoch zubov sú niekde nad 100 mV, ale tieto grafy (7.1 a 7.2) majú oveľa menšie BN – nerozumiem prečo to tak je. Jednoducho BN kalibrácie nesedí s BN zo zubov. BN na zuboch sú o 1 rád vyššie. Vysvetlite.

2/ Autorka uvádza vplyv kmitania sústavy na BN hodnoty. Myslím, že tento záver je správny, aj keď experimentálne nie je doložený (vzhľadom na aj tak veľký rozsah práce). Ako by bolo možné zvýšenú intenzitu kmitania experimentálne overiť – ako technikou?

3/ Autorka v teoretickej časti práce správne uvádza, že BN závisí od ZN, štruktúry (tvrdosti - ale to u ocelí len iné vyjadrenie štruktúry). V práci však ide len o koreláciu medzi BN a ZN a vplyv štruktúry chýba (možno aj vzhľadom na obmedzený rozsah práce – mal som možnosť recenzovať autorkine 2 publikácie, kde mikroštruktúry uvedené boli). Problematike BN v oblasti brúsenia sa venujem dlhodobo a vyplýva z mojich rozsiahlejších štúdií, že BN je o pohyblivosti dislokácií a tá je v oceliach predovšetkým závislá od hustoty dislokácii a rozloženia karbidov, ZN zohrávajú často až sekundárnu úlohu. Vezmime si napríklad vznik trhlín. Autorka indikovala trhliny na povrchu pri ZN niekde nad 800 MPa (obr. 7.43), ale pevnosť ocele tvrdosti cca 60 HRC uvedenej v práci je nad 2000 MPa. To čo spôsobuje vznik trhlín pri brúsení často ani nie sú napätia makroskopické ako mikroskopické (teda vplyv štruktúry), čiže kolízie fáz (austenit, martenzit, karbidy) a kolízie medzi zrnami pri rýchlom zohriati a ochladení pri brúsení. Skúste zaujať stanovisko a doložte pri obhajobe fotografie štruktúr tepelne popustených brúsením ako dôkaz, že ste sa aj touto problematikou zaoberali.

Po preštudovaní celej doktorandskej dizertačnej práce môžem konštatovať, že je táto spracovaná po obsahovej ako aj formálnej stránke na dobrej úrovni, podľa všetkých požiadaviek na ňu kladených. Metodicky je predložená doktorandská dizertačná práca spracovaná správne. Autorka využila metodicky správny prístup a moderné nástroje experimentálnych analýz. Autorka správne vyhodnotil získané údaje a ich v zásade správne interpretovala. Výsledky práce sú priamo a ihneď využiteľné v praxi, čo si vysoko cením.

Záver

Doktorandka splnil cieľ a úlohy, ktoré boli určené témou jej doktorandskej dizertačnej práce a študovaným vedným odborom. Dosiahnuté výsledky môžu slúžiť ako podklad pre ďalšie rozvíjanie danej problematiky. Ciele práce, tak ako boli navrhnuté boli splnené a práca prináša nové poznatky v odbore. Doktorandka preukázala, že ovláda vedecké metódy a má teoretické poznatky z daného odboru. Z tohto pohľadu možno konštatovať, že predložená doktorandská dizertačná práca spĺňa podmienky kladené na dizertačné práce.

Navrhujem, aby bol Ing. Lucii Schmidovej udelený titul " P h D " v študijnom programe Strojírenská technologie.

v Žiline: 19.9.2014

prof. Dr. Ing. Miroslav Neslušan
recenzent

OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce Ing. Lucie Schmidové

„HODNOCENÍ PARAMETRŮ INTEGRITY POVRCHU A VYUŽITÍ POZNATKŮ PRO ZEFEKTIVNĚNÍ OBRÁBĚNÍ OZUBENÝCH KOL"

vypracoval doc. RNDr. Pavol Šutta, PhD.
v Plzni, dne 6. října 2014

Předmětem disertační práce Ing. Lucie Schmidové bylo hodnocení parametrů integrity povrchu a využití poznatků pro zefektivnění obrábění ozubených kol.

a) Na kvalitu výroby ozubených kol pro různé aplikace jsou v dnešní době kladeny vysoké požadavky jak z hlediska optimalizace užitných parametrů, zvyšování produkce výroby, tak i z hlediska životnosti jejich součástí. Mezi často hodnocené vlastnosti zejména části ozubení jsou: stav struktury, drsnost povrchu a zbytková napětí.

b) Cíle disertační práce jsou formulovány takto: Základním cílem byla verifikace možnosti aplikace metody analýzy Barkhausenova šumu pro hodnocení integrity povrchu broušených ozubených kol. Tento základní cíl obsahuje několik dílčích cílů, zejména hodnocení vlivu podmínek broušení pro dynamicky namáhané součásti oceli 18CrNiMo7-6 na integritu povrchu pomocí analýzy Barkhausenova šumu, analýzu zbytkových napětí po broušení oceli rentgenovou difrakcí, porovnání výsledků analýz Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce, analýzu hloubkových profilů hodnocených veličin, posouzení možnosti efektivity procesu obrábění ozubených kol a verifikace detekce podpovrchových trhlin. Konstatuji, že cíle práce byly vesměs splněny. K tomu byly použity již zmíněné experimentální techniky (i) Barkhausenova šumu, která dává informace o magneto-elastických vlastnostech materiálu a (ii) rentgenové difrakce, která v tomto případě byla využita zejména na měření makroskopických (mřížkových) zbytkových napětí na povrchu a v hloubce ozubení.

c) Výsledky experimentů ukázaly, že parametry integrity povrchu součástek mohou být spolehlivě a opakovaně posouzeny analýzou Barkhausenova šumu. Metoda je nedestruktivní a je citlivá na kvalitu povrchu broušených součástí, čemuž předcházely různé technologické operace (kuličkování, pískování apod.) a je také schopna detekovat podpovrchové vady materiálu. Výsledky disertační práce se dají využít v procesu výroby ozubených kol na kontrolu kvality přímo v průmyslových podmínkách. Spolehlivost výsledků analýz byla potvrzena měřením mřížkových zbytkových napětí metodou rentgenové difrakce.

d) Práce má velmi dobrou grafickou úpravu a po jazykové stránce je rovněž na velmi dobré úrovni. Nicméně mám k ní několik méně závažných připomínek. V seznamu použité

literatury chybí položka [44]. Práce obsahuje příliš mnoho tabulek, přičemž ve většině případů jsou hodnoty v nich obsažené vyjádřené také graficky, tudíž některé tabulky by se mohly vložit do příloh. Některé grafy, např. na str. 59 nemají označenou osu *x*, i když nakonec se to dá domyslet. Není matematicky definován magnetoelastický parametr. V kapitole 6. Metodika experimentů, při popisu experimentů byl použit budoucí čas, což budí dojem jako by se ty experimenty měly teprve provést.

e) V seznamu publikací na str. 113-116 (Seznam použité literatury) uvádí doktorandka pouze 1 svoji publikaci. Předpokládám, že publikací bylo víc a při obhajobě disertační práce předloží doktorandka kompletní seznam publikací a prezentací své práce na konferencích apod.

Při obhajobě disertační práce žádám doktorandku, aby uvedla, definici magnetického momentu proudové smyčky, definici magnetického momentu atomu, vektoru magnetizace a magnetoelastického parametru.

Závěrem konstatuji, že **Ing. Lucie Schmidová**, autorka disertační práce „**Hodnocení parametrů integrity povrchu a využití poznatků pro zefektivnění obrábění ozubených kol**" prokázala způsobilost samostatně a úspěšně řešit vědecké problémy, ovládá vědecké metody a má teoretické vědomosti jakož i experimentální zručnosti na vysoké úrovni. Proto **doporučuji** tuto disertační práci předložit k obhajobě.

Doc. RNDr. Pavol ŠUTTA, PhD.