
Porovnanie geometrickej presnosti obrobkov po tvrdom frézovaní a brúsení

Mária Čilliková, doc. Ing., PhD.*

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: maria.cillikova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2784

Anna Mičietová, prof. Ing., PhD.

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: anna.micietova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2781

Miroslav Neslušán, prof. Dr. Ing.

Katedra obrábania a výrobnjej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.neslusan@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2785

Comparison of geometrical precision of machined components after hard milling and grinding

Abstract: This paper deals with surface integrity after hard milling of bearing steel 100Cr6. Surface integrity is expressed in terms of shape deviation as well as *Barkhausen* noise emission. Furthermore, components of cutting forces are also measured as a function of tool wear. Non homogeneity of cutting force distribution within the contact between the milling cutter and workpiece is discussed. The results of measurements indicate that the shape as well as structure remarkable non homogeneity should be expected after hard milling due to missing full contact between milling cutter and workpiece. This non homogeneity can be monitored via *Barkhausen* noise technique. On the other hand, the competitive grinding cycles produced more homogenous surface and surface state is a function of infeed speed.

Keywords: milling, grinding, geometrical precision, machined

ÚVOD

Cyklické premagnetovávanie feromagnetických materiálov inicializuje nevratné a nekontinuálne pohyby *Blochových stien* (*BWs*). Táto diskontinuita je spôsobená interferenciou *BWs* s defektmi kryštalografickej mriežky ako sú precipitáty, dislokácie a iné. Tento jav sa nazýva magnetický *Barkhausenov* šum (*MBN*). *MBN* sa vyžíva v priemysle predovšetkým pri monitorizácii komponentov po brúsení. *MBN* je citlivý na zmenu napäťového stavu, zmeny štruktúry, distribúcie karbidov, dislokačnej hustoty a podobne. Pri brúsení sa využíva efekt tepelného popustenia povrchu, ktorý vedie v znížení dislokačnej hustoty a zmeny stavu karbidov čo sa následne premieta do nárastu *MBN* [1-4].

Už niekoľko rokov sa operácie tvrdého obrábania (sústruženia a frézovania) využívajú ako náhrada brúsenia. Avšak operácie tvrdého obrábania inicializujú

vznik bielych vrstiev (*white layers* - *WL*), ktoré sa vytvárajú aj pri nižších hodnotách opotrebenia nástroja. Obrobený povrch je veľmi ovplyvnený práve opotrebením nástroja a čiastočne aj reznými podmienkami. S nárastom *VB* rastie aj hrúbka *WL* ako aj tepelne ovplyvnenej vrstvy [5, 6]. Na druhej strane proces brúsenia môže spôsobiť tepelné popustenie a brúsené povrchy niekedy vykazujú tepelne popustené zóny (*TOZ*). Avšak hrúbka *WL* a aj *TOZ* je po tvrdom obrábaní oveľa menšia v porovnaní s brúsením. Aj pomer medzi hrúbkou *WL* a *TOZ* je odlišný [5, 7, 8].

Tvrde obrábanie aj z hľadiska *MBN* už bolo v literatúre prezentované [5, 7-9]. Avšak dôležitý aspekt súvisiaci s nehomogenitou povrchu v súvislosti s meniacim sa kontaktom nástroja a obrobku zatiaľ nie. Tento článok je venovaný práve tejto problematike.

1 PODMIENKY EXPERIMENTOV

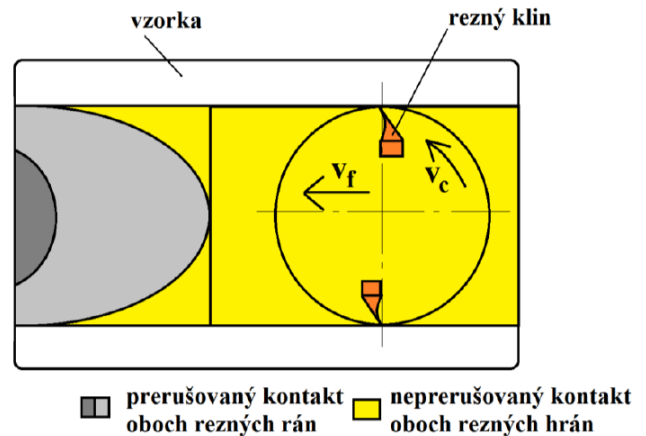
Experimenty boli realizované na ložiskovej oceli 100Cr6. Vzorky rozmeru 100 x 70 x 5 mm boli tepelne spracované na tvrdosť 62 HRC (austenitizačná teplota 830 °C - olej 62 °C, s nasledujúcim popúšťaním počas 2 hodín pri teplote 160 °C). Tvrdé frézovanie bolo analyzované ako funkcia opotrebenia nástroja VB. Rezné podmienky: FA4 AV, za sucha, R300-1240E-PM, R300-050Q22 – 12M 262489 osadená 2 platničkami s vopred pripraveným opotrebením VB (v rozsahu od 0,05 mm do 0,8 mm), $a_p = 0,25$ mm, $v_f = 112$ mm·min⁻¹, $n = 500$ min⁻¹. Na porovnanie boli pripravené aj vzorky procesom brúsenia za nasledovných podmienok: BPH 20, A9860J9V, diamantový orovnávač, $a_p = 0,005$ mm ÷ 0,04 mm (10 prechodov), $v_f = 8$ m·min⁻¹, $v_c = 25$ m·s⁻¹.

MBN merania boli realizované na prístroji RollScan 350 v softvéri ViewScan. MBN pulzy boli merané vo frekvenčnej oblasti od 70 kHz do 200 kHz (magnetizačná frekvencia 125 Hz, magnetizačné napätie 10 V). MBN signál bol meraný v smere reznej rýchlosti a MBN hodnota predstavuje efektívnu hodnotu signálu. MBN meranie bolo realizované v dynamickom móde, čo znamená, že počas merania sa vzorka pohybovala rýchlosťou 5 mm·s⁻¹. Zložky reznej sily boli merané prostredníctvom dynamometra KISTLER. Signál bol vzorkovaný frekvenciou 10 kHz. Priamosť povrchu bola meraná na prístroji MP 60.

2 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

Obrázok 1 a 2 ukazujú typický povrch po frézovaní. Hlavným aspektom je prerušenie plného kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom. Ako ukazujú obr. 1 a obr. 2, v istej pozícii rezná platnička vybieha z kontaktu s obrobenou plochou a charakter povrchu je od tejto polohy odlišný od stavu, keď je tento kontakt plný. Táto poloha je indikovaná sivou farbou na obr. 1 a korešponduje s priemerom nástroja - teda 50 mm. V dôsledku limitovanej tuhosti sústavy sa frézovacia hlava nakloní pod istým uhlom voči obrobenému povrchu, čo vedie k viditeľne odlišnému stavu povrchu, ako to ukazuje obr. 2. Takýto charakter povrchu môže byť zaznamenaný pre všetky VB, ako aj pre rôzne tvrdosti vzoriek. Na obr. 3 je úplný záznam pasívnej zložky reznej sily, ktorá má rozhodujúci vplyv na priamosť povrchu po frézovaní. Na tomto obrázku vidieť kumulatívne všetky fázy kontaktu, ako je nábeh nástroja na obrobok, počiatkové štádium prerušovaného kontaktu, plný kontakt medzi nástrojom a obrobkom a aj rôzne štádiá prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom pri výbehu nástroja (až po stav, kedy sa kontakt medzi nástrojom a obrobkom preruší úplne). Obrázok 4 ukazuje len druhú polovicu frézovacieho cyklu a obr. 5 až obr. 8 detaily jednotlivých štádií kontaktu, vyextrahované zo záznamu, tak ako ich ukazuje

obr. 3, resp. obr. 4. V prípade úplného kontaktu F_p zložka osciluje v rozsahu od 310 N do 1000 N. V okamihu prvého prerušenia kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom klesá hodnota F_p k nulovej hodnote. V ďalšom priebehu F_p postupne ďalej klesá aj v dôsledku toho, že sa postupne skracuje dráha, počas ktorej je rezná hrana a obrobok v kontakte.

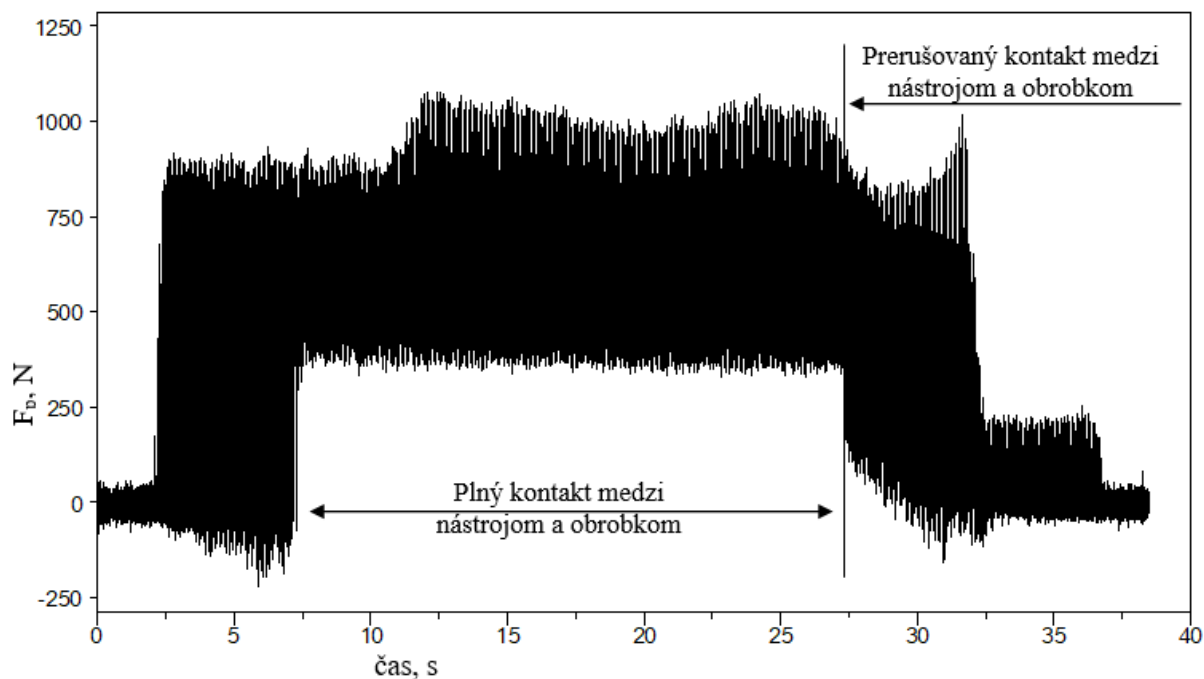


Obr. 1. Prerušenie kontaktu medzi reznou hranou a obrobkom počas frézovania

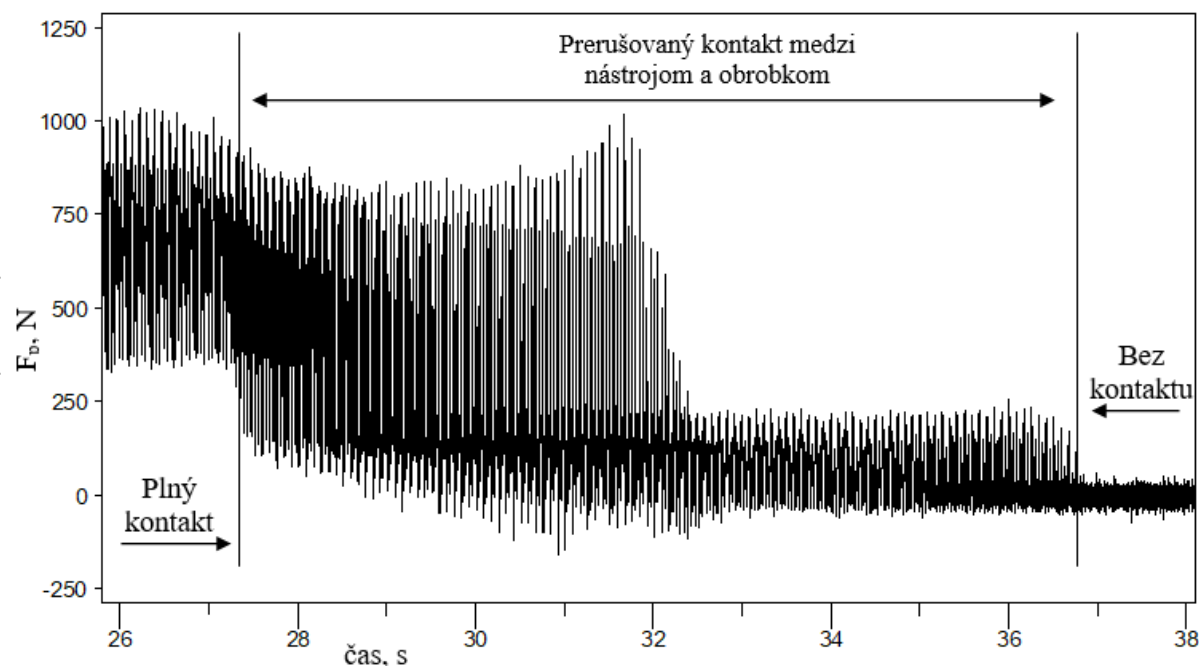


Obr. 2. Fotografia povrchu po tvrdom frézovaní, šírka vzorky 70 mm

Ďalšie merania tvrdo frézovaného povrchu po frézovaní nástrojom s rôznymi stupňom opotrebenia VB poukazujú tak na tvarovú, ako aj štruktúrnú nehomogenitu povrchu. Obrázok 9 ukazuje záznamy profilu povrchu po tvrdom frézovaní, kde je možné jednoznačne rozpoznať jednotlivé fázy frézovania. Pre úplný kontakt je charakteristické, že výška profilu je viac menej obdobná, nasledovaná oblasťou prudkého poklesu výšky profilu v oblasti prerušenia kontaktu. Ako ukazuje obr. 9, je oblasť, v ktorej dochádza k prudkému poklesu výšky profilu v podstate rovnaká, pretože je daná priemerom frézy. Pomerne veľké rozdiely v stave povrchu pri rôznych režimoch (fázach) frézovania sú spôsobené veľkou pasívnou zložkou reznej sily F_p , ktorá je typická pre operácie tvrdého frézovania a ktorá sa následne negatívne premieta do presnosti súčiastok.



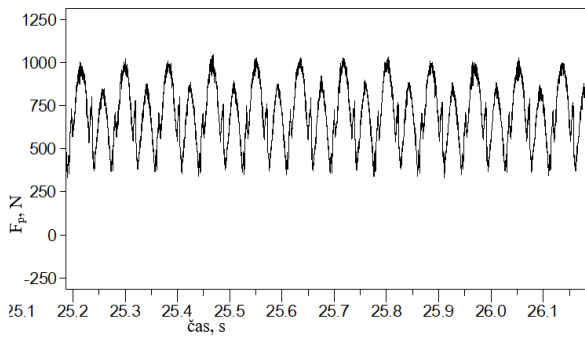
Obr. 3. Úplný záznam pasívnej zložky reznej sily



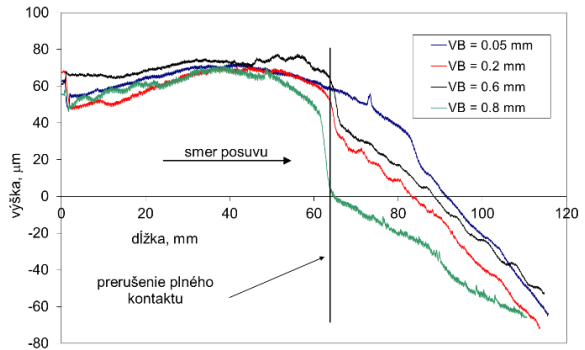
Obr. 4. Časť záznamu pasívnej zložky reznej sily, kde sa plný kontakt medzi nástrojom a obrobkom mení na prerušovaný - rôzne stupne prerušenia kontaktu

Obrázok 9 tiež ukazuje, že do profilu povrchu po tvrdom frézovaní sa premieta aj veľkosť opotrebenia nástroja, keďže predovšetkým veľkosť pasívnej zložky s VB prudko rastie. Veľké rozdiely vo výške profilu v rôznych miestach majú zásadný vplyv na nasledujúcu operáciu brúsenia. Tvrdé frézovanie sa obvykle využíva ako hrubovacia operácia pred dokončovacím brúsením. Aj napriek tomu, že nasledovné brúsenie odstráni nedostatky dané hrubovacím frézovaním veľké rozdiely vo výške profilu výrazne zvyšujú prídavky na brúsenie

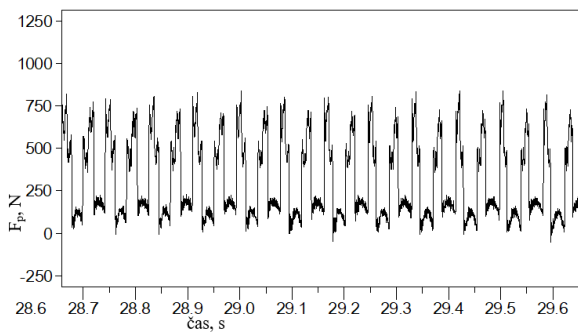
a zbytočne tento proces predlžujú a predražujú. Obrázky 10 až 12 ukazujú, že výška profilu rastie s veľkosťou prísuvu do rezu, čo je dané vyššou pasívnou zložkou reznej sily. Tieto obrázky však predovšetkým ukazujú, že po brúsení výška profilu a s tým súvisiaca odchýlka priamosti je rádovo nižšia v porovnaní s frézovaním. Obrázok 13 ukazuje, že nehomogenita povrchu po tvrdom frézovaní nie je zjavná len čo sa týka tvarovej a rozmerovej presnosti, ale má aj výrazný vplyv na nehomogenitu stavu štruktúry a zvyškových napätí po frézovaní. Tento as-



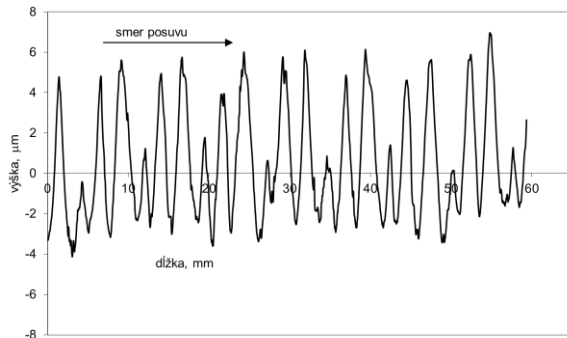
Obr. 5. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - fáza plného kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



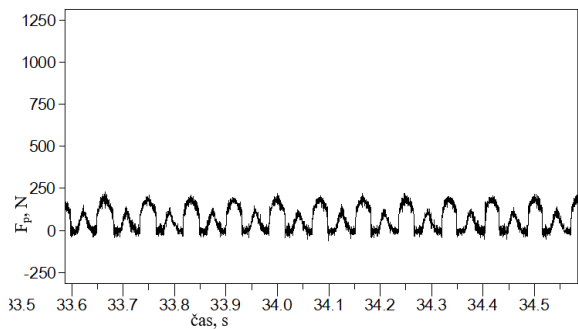
Obr. 9. Záznam profilu povrchu po tvrdom frézovaní - vplyv opotrebenia nástroja VB



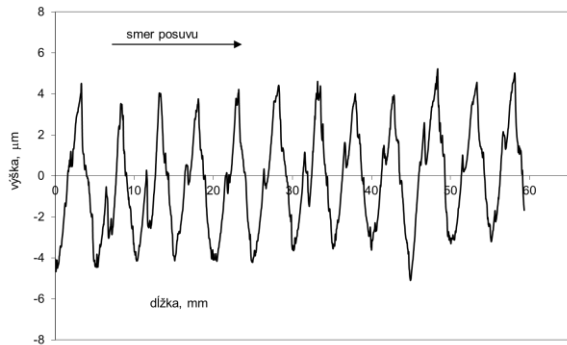
Obr. 6. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - počiatočná fáza prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



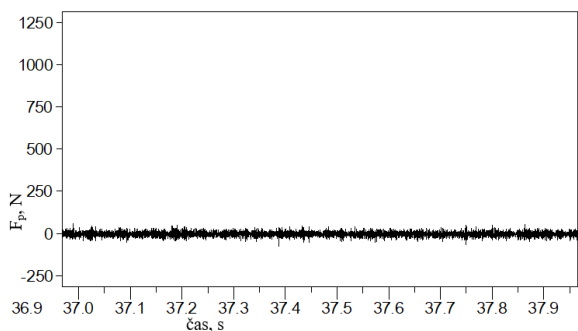
Obr. 10. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,04 \text{ mm}$



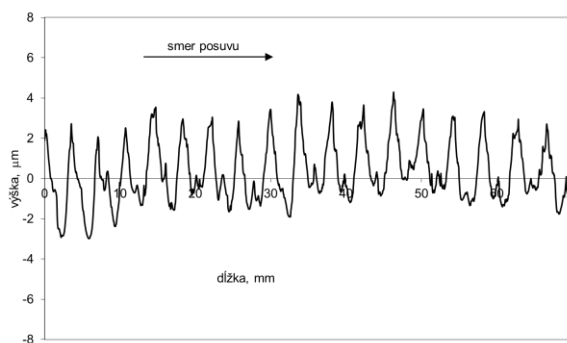
Obr. 7. Záznam pasívnej zložky reznej sily, detail - záverečná fáza prerušenia kontaktu medzi nástrojom a obrobkom



Obr. 11. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,02 \text{ mm}$

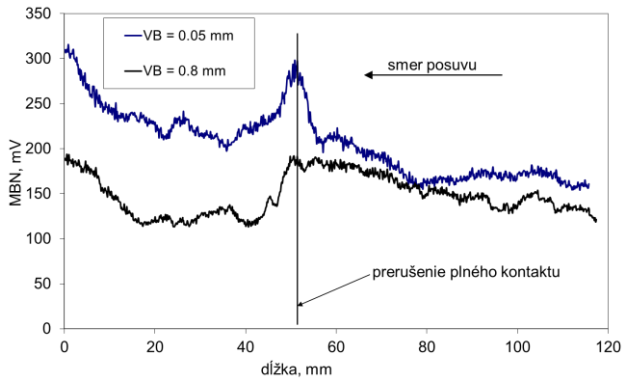


Obr. 9. Záznam profilu povrchu po tvrdom frézovaní - vplyv opotrebenia nástroja VB



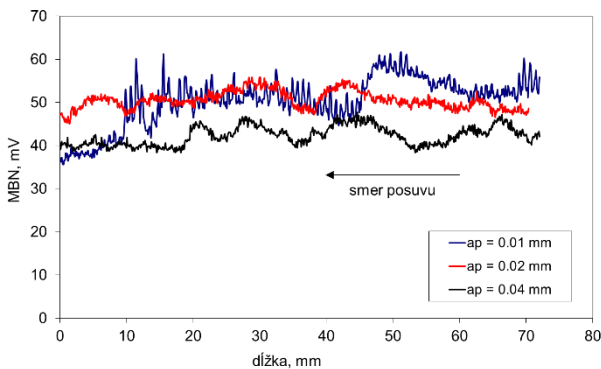
Obr. 12. Záznam profilu povrchu po rovinnom brúsení - $a_p = 0,01 \text{ mm}$

pekt potvrdzujú *MBN* záznamy tak, ako ich ukazuje obr. 13.



Obr. 13. Dynamický záznam *MBN* po frézovaní - vplyv *VB*

Ako už bolo uvedené, *MBN* je citlivý na zmeny štruktúry a napätový stav. Vzhľadom na to aj obr. 13 poukazuje na to, že charakter povrchu v oblasti úplného kontaktu je z tohto hľadiska odlišný od oblasti, kde je kontakt medzi reznou hranou a obrobkom prerušovaný.



Obr. 14. Dynamický záznam *MBN* po brúsení - vplyv prísuvu do rezu a_p

V podstate obdobné *MBN* hodnoty (berúc do úvahy 1 vzorku) je možné vidieť v oblasti plného kontaktu nástroja a obrobku. Na druhej strane v oblasti prerušovaného kontaktu je možné vidieť zmenu vo vývoji *MBN* hodnôt v závislosti od opotrebenia nástroja. V porovnaní obr. 9 a obr. 13 je možné vidieť, že tak ako klesá výška profilu kontinuálne, tak v tejto oblasti dochádza k nemonotónnej, ale zjavnej zmene hodnôt *MBN*. Rozdiely v charaktere zmien *MBN* hodnôt sú dané odlišným stavom povrchu pre rôzne stupne opotrebenia nástroja. V prípade nízkych *VB* hodnôt sa na povrchu ložiskovej ocele tvrdosti 62 HRC vytvára veľmi tenká *WL*, ktorá nie je kontinuálna a aj tenká tepelne popustená oblasť. V prípade rastúceho *VB* sa na povrchu vytvorí tenká kontinuálna *WL*, ktorej hrúbka s *VB* postupne rastie. To isté je možné konštatovať aj o charaktere a hrúbke tepelne ovplyvnenej oblasti. V súvislosti s tým je odlišný aj charakter zmien *MBN* hodnôt v oblasti prerušovaného kontaktu.

Obrázok 14 ukazuje, že *MBN* a s tým súvisiaci stav povrchu je oveľa homogénnejší po brúsení

v porovnaní s frézovaním. *MBN* hodnoty sú oveľa nižšie pre všetky prísuvy do rezu. Na druhej strane s narastajúcim prísuvom do rezu môže dôjsť výraznejšiemu tepelnému popusteniu brúsenému povrchu alebo dokonca k jeho sekundárnemu zakaleniu, ktorý je sprevádzaný výraznou oxidáciou ako to ukazuje obr. 15. Je známe, že sekundárne zakalenie prispieva k zníženiu *MBN* hodnôt po brúsení, keďže vedie k vytvoreniu *WL*, ktorá je mechanicky, a preto aj magneticky tvrdšia ako hlbšie vrstvy pod povrchom [3].

Je treba dodať, že charakter *WL* po brúsení a frézovaní je odlišný. V prípade tenkej *WL* po frézovaní sú charakteristické zvýšené *MBN* hodnoty v súvislosti s preferenčným usporiadaním matrice do smeru reznej rýchlosti [9]. Ak však hrúbka *WL* s rastúcim *VB* rastie, tak *MBN* klesá, vzhľadom na to, že v obrobenom povrchu prudko rastie podiel zvyškového austenitu, ktorý veľmi blokuje pohyb *BWs*.



Obr. 15. Fotografia povrchu po brúsení - vplyv prísuvu do rezu, šírka vzorky 70 mm

ZÁVER

Táto štúdia poukazuje na niektoré nevýhody tvrdého frézovania. Výrazná nehomogenita povrchu komplikuje, resp. predlžuje následné dokončovacie brúsenie. Okrem toho sa môže negatívne premietnuť aj do monitorovania povrchov po brúsení prostredníctvom *MBN*. Po brúsení zvýšené *MBN* hodnoty indikujú tepelné popustenie povrchov.

Typické hodnoty prídavkov na dokončovacie brúsenie sú 0,2 mm ÷ 0,3 mm. Avšak v prípade veľkých komponentov sa v praxi stáva, že proces brúsenia v niektorých miestach neodstráni preferenčné usmernenie povrchu po tvrdom obrábaní. Potom je obvykle príliš zložité odlišiť, či zvýšené MBN hodnoty pochádzajú z tepelného popustenia inicializovaného brúsením, alebo pochádza ešte z predchádzajúceho hrubovacieho cyklu tvrdého obrábania. Následkom toho môžu byť niektoré komponenty detegované ako nevyhovujúce (tepelne poškodené) aj napriek tomu, že proces brúsenia bol realizovaný korektne.

Pod'akovanie

Táto štúdia vznikla s finančnou podporou KEGA projektu č. 010ŽU-4/2021 a VEGA projektu č. 1/0052/22.

LITERATÚRA

[1] KARPUCHEWSKI, B. (1998): *Introduction to micro magnetic techniques*. ICBM conference 01, Hanover.

[2] MIČÚCH, M. et al. (2014): *Micro magnetic study of cutting conditions and grinding wheel wear influence on surface integrity*. Manufacturing Technology, Vol. 14, p. 66-71.

[3] MOORTHY, V. et al. (2001): *Evaluation of heat treatment and deformation induced changes in material properties in gear steels using magnetic Barkhausen noise analysis*. ICBM conference 03, Tampere.

[4] NESLUŠAN, M. et al. (2017): *Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production*. J. Mater. Proc. Technol., Vol. 240, p.104-117.

[5] GUO, Y.B. - SAHNI, J. (2004): *A comparative study of hard turned and cylindrical ground white layers*. Int. J. of Mach. Tool & Manuf., Vol. 44, p. 135-145.

[6] BRANDT, D. (1995): *Randzonenbeeinflussung beim Hartdrehen*. PhD. Dissertation, Universität Hannover.