

VPLYV TEPELNÝCH DEFORMÁCIÍ PO TEPELNOM SPRACOVANÍ NA REZNÝ PROCES

Ing. Michal Šípek, Doc. Dr. Ing. Miroslav Neslušán, Žilinská univerzita, Strojnícka fakulta,
Katedra obrábania a automatizácie, 010 26 Žilina, Tel: +421-41-513 2785,
E-mail: michal.sipek@fstroj.uniza.sk, miroslav.neslusan@fstroj.utc.sk

Anotácia: Článok sa zaoberá problematikou vplyvu tepelného spracovania na rozmerovú a tvarovú presnosť obrobkov. Poukazuje na skutočnosť, že rôzne režimy tepelného spracovania majú za následok rozdiely vo veľkosti deformácií, rozmerov ako aj veľkosti a rozložení zvyškových napätí. Tieto aspekty potom následne významne ovplyvňujú aj stabilitu rezného procesu, tvarovú a rozmerovú presnosť obrobkov po obrábaní.

Kľúčové slová: deformácie, kalenie, ložisková oceľ

1. Úvod

Väčšina ložiskových materiálov v súčasnosti počas technologického procesu prechádza aj tepelným spracovaním, ktorým je martenzitické kalenie, ktoré nasleduje po mäkkých operáciách. Toto tepelné spracovanie má zabezpečiť požadované vlastnosti ložiskových krúžkov, predovšetkým z hľadiska ich životnosti, hlučnosti, tepelnej stálosti a podobne. Na druhej strane, martenzitické kalenie má aj svoje nevýhody ako je vznik síce tvrdej, ale relatívne málo húževnatej štruktúry, zmeny tvaru a rozmerov predovšetkým tenkostenných krúžkov ako aj vnesenie ťahových zvyškových napätí [1, 2].

V poslednom čase vystupuje do popredia ďalšia možnosť v súvislosti s tepelným spracovaním ložiskových materiálov, ktoré sa bežne celo objemovo kalia. Je ňou tepelné spracovanie ložiskových krúžkov ocelí 100Cr6 na bainitickú štruktúru [1], alebo inak povedané izotermické zušľachtovanie. Výsledkom je štruktúra, ktorej tvrdosť je o 3 až 4 HRC nižšia v porovnaní s martenzitickou, ale na strane druhej s dvojnásobnou húževnatosťou [2]. Predkladaný článok sa preto zaoberá porovnaním zmien rozmerov a tvaru ložiskových krúžkov ložiskovej ocele 100Cr6 tepelne spracovanej na bainitickú štruktúru a jej porovnaním s martenzitickou štruktúrou. Následne príspevok analyzuje vplyv týchto deformácií na stabilitu rezného procesu a kvalitu obrobkov.

2. Podmienky a výsledky experimentov

Pre každý režim tepelného spracovania bolo zhotovených 30 krúžkov vonkajšieho priemeru 49,5 mm, vnútorného priemeru 40 mm a šírky 8 mm. Krúžky boli striedavo nasadené na spoločný trn (*obr.1*) a štyri sady vzoriek boli sústružené, ďalšie dve brúsené na konečný rozmer. Po obrobení bol na krúžkoch zmeraný ich profil (odchýlka kruhovitosti a ovalita krúžkov) a tiež rozmer pomocou komparačnej metódy. Kalenie bolo realizované na produkčnej linke spoločnosti Kinex, a.s. Bytča.

Tab. 1

Režim tepelného spracovania experimentálnych vzoriek [1]

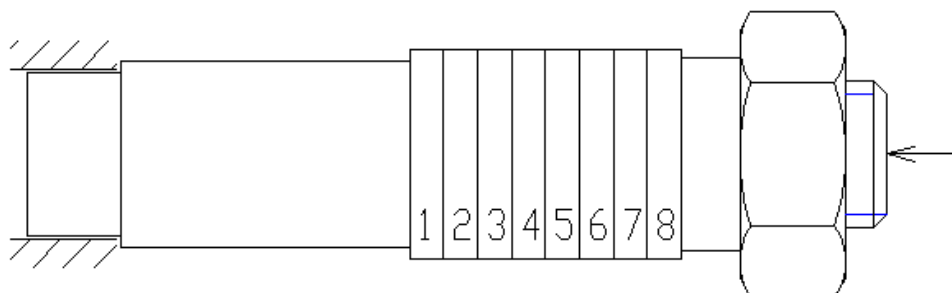
Teplotný režim	Austenitizačná teplota / časová výdrž vzorky na tejto teplote	Kaliace prostredie	Teplota kaliaceho prostredia / časová výdrž vzorky na tejto teplote	Dosiahnutá mikroštruktúra kalenej vzorky
1.	840°C / 25 min.	AS 140	230°C / 3 hod.	Dolný bainit
2.	840°C / 25 min.	Renolin B HM 46	20°C	Martenzit

Sústruženie:

- použitý obrábací stroj: sústruh SUI 40.
- rezný nástroj rezná platnička z keramiky Al_2O_3+TiC , s povlakom TiN , označenie DNGA150408S01525 6050
- rez. podmienky: $f = 0,09 \text{ mm}$, $v_c = 150 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,25 \text{ m.min}^{-1}$

Brúsenie:

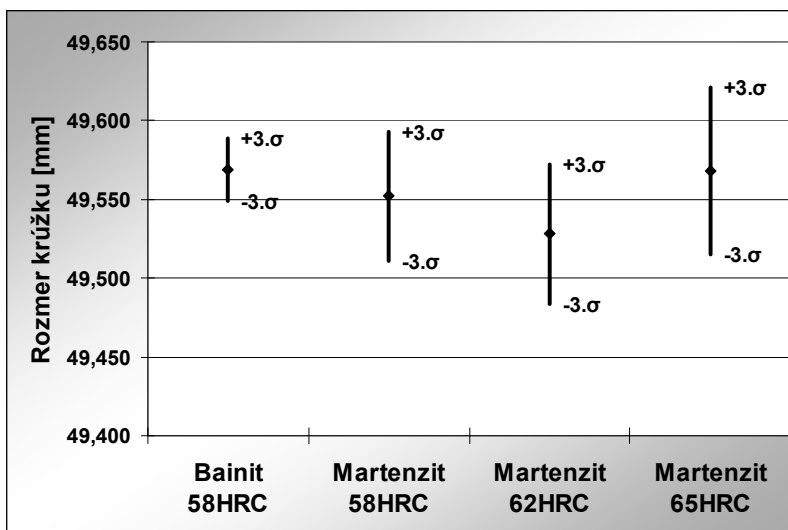
- použitý obrábací stroj: brúska B2uDP2750
- brúsny kotúč: A99 80K 9V 350x20x127
- rez. podmienky: $v_{fr} = 0,005 \text{ mm.s}^{-1}$, $v_c = 30 \text{ m.s}^{-1}$, $v_w = 5,9 \text{ m.min}^{-1}$



Obr. 1 Nákres upnutia krúžkov na trn

Rozmer krúžkov bol meraný komparačnou metódou na prístroji TESA, s použitím koncových mierok na rozmer 49,5mm. Meranie kruhovitosti a ovality bolo vykonávané na meracom stroji Talyrond 73, ktorý bol prepojený so stolovým počítačom, do ktorého sa údaje zaznamenávali pomocou programu Roform. Metóda pre meranie zvyškových napätí pracuje s využitím Barkhausenovho magnetického šumu [3].

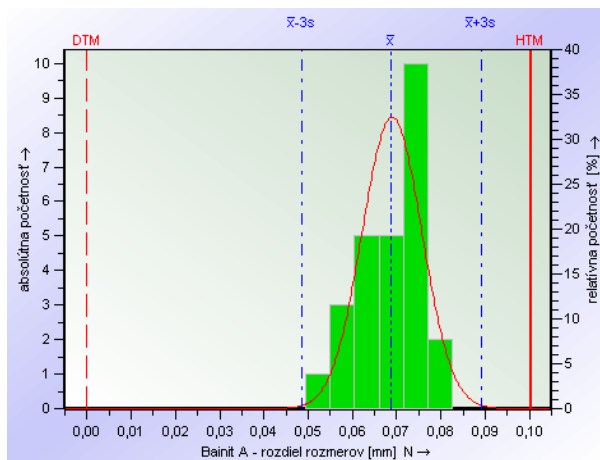
Tepelné spracovanie ložiskových krúžkov má za následok značné zmeny rozmerov. Najväčšie zmeny rozmerov boli namerané pri spracovaní na bainitickú štruktúru tvrdosti 58HRC a martenzitickú štruktúru tvrdosti 65HRC (obr.2). Pri martenzitickej štruktúre tvrdosti 62HRC a 58HRC boli tieto zmeny menšie vplyvom popúšťania vzoriek. Je to spôsobené tým, že pri popúšťaní sa znižuje stupeň tetragonality mriežky martenzitu a tým aj rozmer krúžkov.



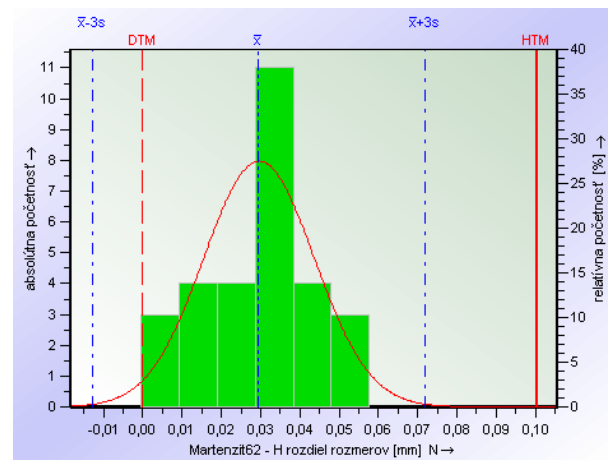
Obr. 2 Rozptyl rozmerov pri rôznych tepelných spracovaniach

Po spracovaní nameraných údajov v štatistickom programe Q-das boli získané grafy rozdelení hustoty pravdepodobnosti spolu s histogramami na obr. 3 a 4, z ktorých sa dá určiť okrem veľkosti zmien rozmerov krúžkov aj rozptyl týchto zmien. Veľkosť prídavkov na nasledujúce operácie sa totiž musí voliť aj s ohľadom na šírku $\pm 3\sigma$. Najväčšie prídavky na

ďalšie opracovanie krúžkov sa musia voliť pri martenzitických krúžkoch (obr.2). Výhodné z hľadiska možnosti voľby menších prídavkov je preto tepelne spracúvať krúžky na bainitickú štruktúru, kde sú hodnoty rozptylu o viac ako 50% menšie v porovnaní s martenzitom.



Obr. 3 Rozdelenie početnosti rozdielov rozmerov pre bainit 58HRC

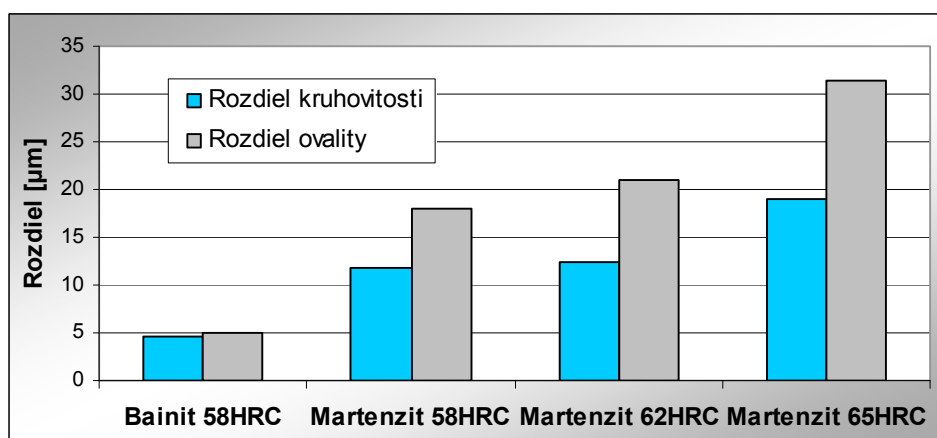


Obr. 4 Rozdelenie početnosti rozdielov rozmerov pre martenzit 62HRC

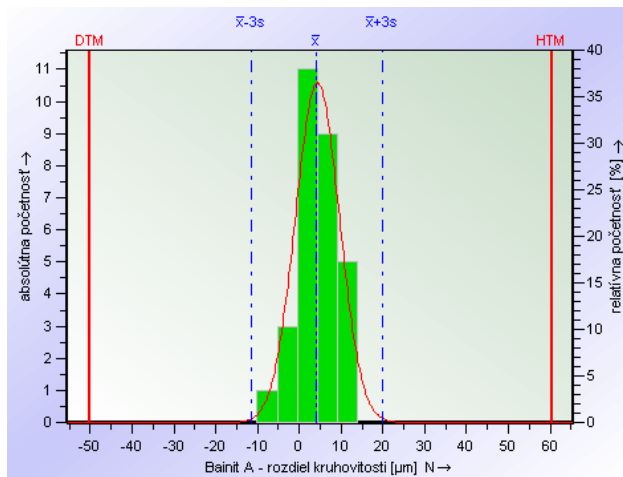
Hodnoty rozptylu súvisia s vysokou intenzitou ochladzovania pri martenzitickom kalení. Odlišná rýchlosť ochladzovania rôznych vrstiev pod povrchom spôsobuje vznik ťahových napätí, ktorých relaxácia vedie k relatívne vysokým deformáciám. Pri bainitickej premene je intenzita ochladzovania výrazne nižšia, ochladzovanie je rovnomernejšie, a preto aj deformácie súčiastok sú výrazne nižšie.

Deformácie súčiastok po tepelnom spracovaní majú teda priamy dopad na voľbu prídavkov na nasledujúce operácie. Prídavok musí byť dostatočne veľký na to, aby umožnil odstránenie nežiadúcich nepresností a dosiahnutie požadovanej drsnosti, rozmerovej a geometrickej presnosti (rozhodujúcu úlohu tu zohráva veľkosť $\pm 3\sigma$ či už z hľadiska rozmerov alebo profilu). Po spracovaní hodnôt kruhovitosti a ovality v štatistickom programe Q-das (obr.6 a 7) bolo zistené, že pri tepelnom spracovaní krúžkov na bainitickú štruktúru sú zmeny kruhovitosti a ovality voči stavu pred tepelným spracovaním najmenšie (obr. 5), čo je spôsobené najmä rovnomerným ochladzovaním krúžkov v solnom roztoku.

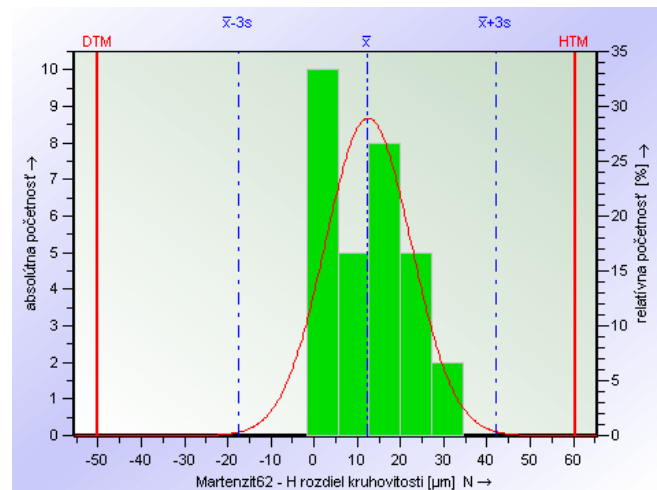
Pri spracovaní na martenzit so stúpajúcou tvrdosťou stúpa aj veľkosť zmeny kruhovitosti a ovality, čo znamená, že vplyvom popúšťania martenzitickej štruktúry sa aj zmeny kruhovitosti a ovality znižujú. Väčšie zmeny pri vzájomnom porovnaní kruhovitosti a ovality boli zaznamenané pri meraní ovality. Aj z tohto dôvodu sa v niektorých spoločnostiach volí ako hlavné kritérium hodnotenia deformácií krúžkov ich ovalita.



Obr. 5 Aritmetické priemery rozdielov kruhovitosti a ovality pri sústružených vzorkách.



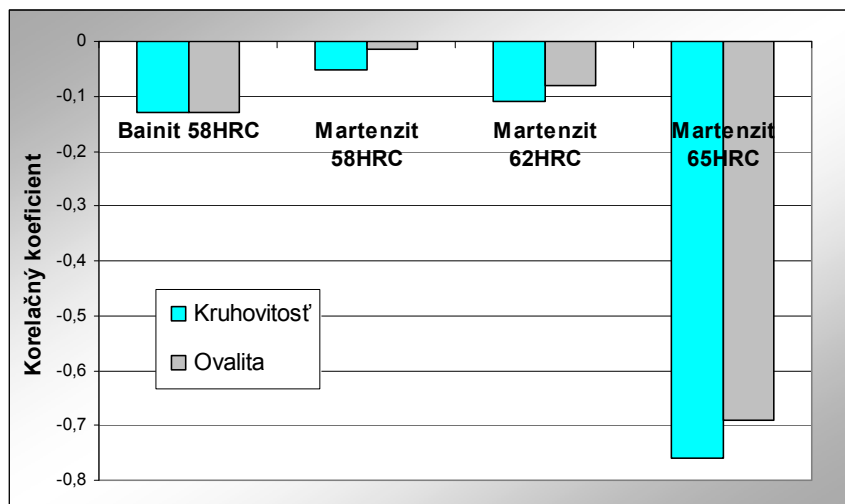
Obr. 6 Rozdelenie početnosti rozdielov kruhovitosti pre bainit 58HRC



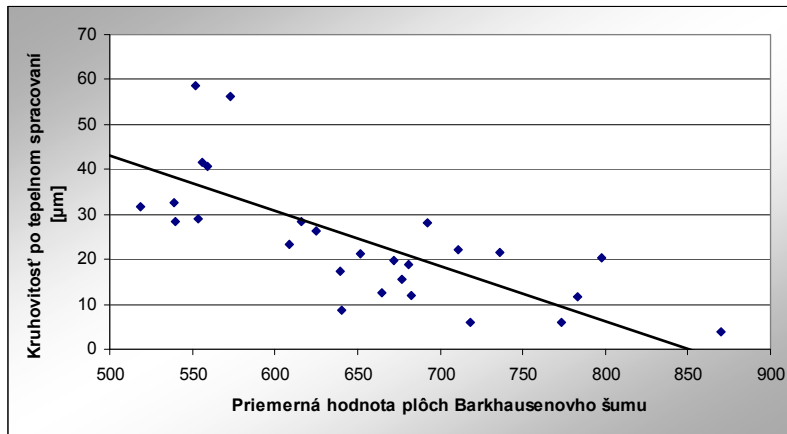
Obr. 7. Rozdelenie početnosti rozdielov kruhovitosti pre martenzit 62HRC

V štúdiu bola ďalej analyzovaná korelácia medzi tvarom krúžku a rozložením zvyškových napätí identifikovaného nepriamo prostredníctvom plochy Barkhausenovho šumu. Taktiež bola hodnotená korelácia medzi zmenou kruhovitosti a veľkosťou zvyškových napätí v krúžkoch. Plochy Barkhausenovho šumu boli merané po 45° po celom obvode krúžku, čo vytvorilo profil týchto plôch (obr. 12a).

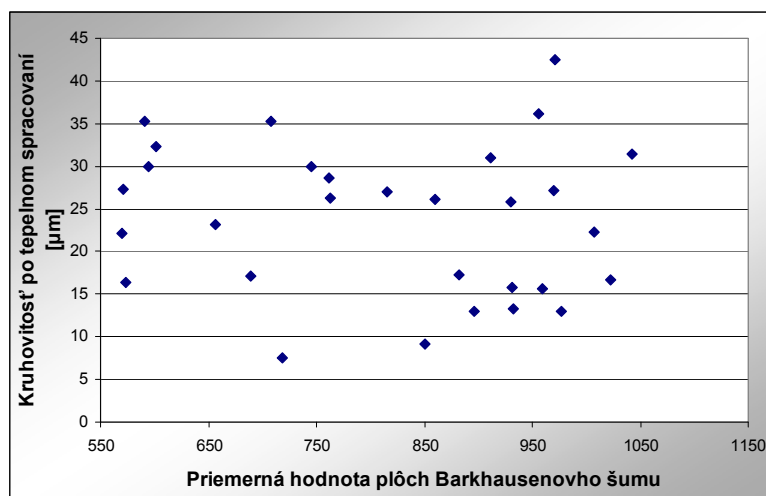
Z nameraných hodnôt plôch Barkhausenovho šumu bolo zistené, že plochy Barkhausenovho šumu korelujú s veľkosťou kruhovitosti a ovality iba pri nepopustených krúžkoch (obr. 8 a 9) a veľkosť korelačného koeficientu je pri kruhovitosti $k \approx -0,76$ a pri ovalite $k \approx -0,69$. Vplyvom popustenia krúžkov sa korelácia medzi plochami Barkhausenovho šumu a kruhovitosťou/ovalitou stráca (obr. 10).



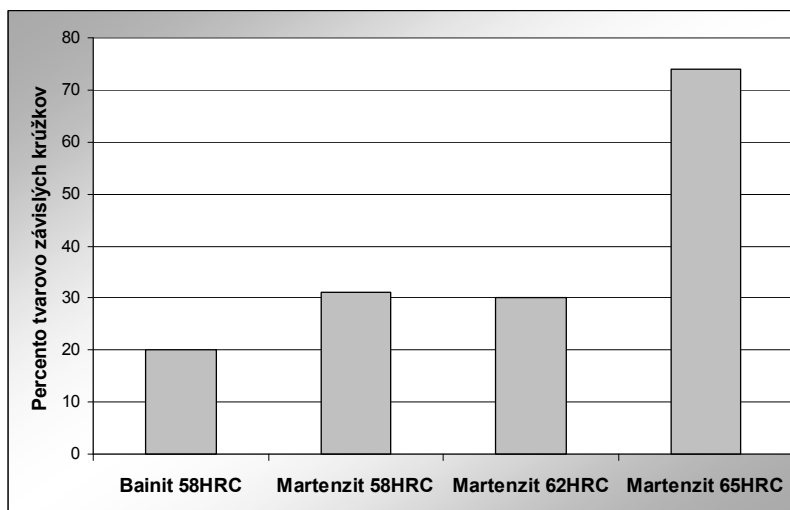
Obr. 8 Veľkosť korelácie plôch Barkhausenovho šumu a kruhovitosti/ovality



Obr. 9 Závislosť kruhovitosti a plôch Barkausenovho šumu pri martenzite 65HRC



Obr. 10 Závislosť ovality a plôch Barkausenovho šumu pri martenzite 62HRC

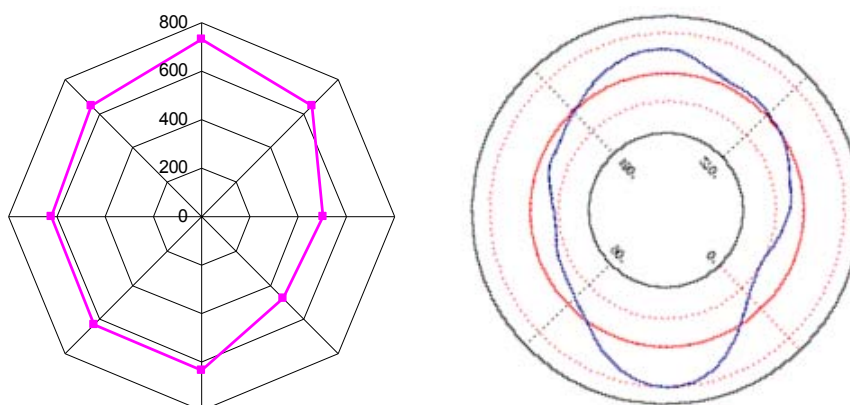


Obr. 11 Tvarová závislosť plôch Barkausenovho šumu a kruhovitosti/ovality.

Okrem korelácie hodnôt kruhovitosti a ovality s plochami Barkausenovho šumu bola analyzovaná aj korelácia medzi tvarom rozloženia týchto plôch po obvodu krúžku a tvarom ovality krúžku. Najväčšia korelácia medzi tvarom krúžku a rozložením zvyškových napätí bola opäť dosiahnutá pri nepospustených vzorkách ako ukazuje obr. 11.

Tvar rozloženia plôch Barkausenovho šumu u týchto krúžkov bol podobný ako tvar ovality krúžku (obr. 12). Taktiež platí, že vplyvom popúšťania sa tvar jednotlivých krúžkov

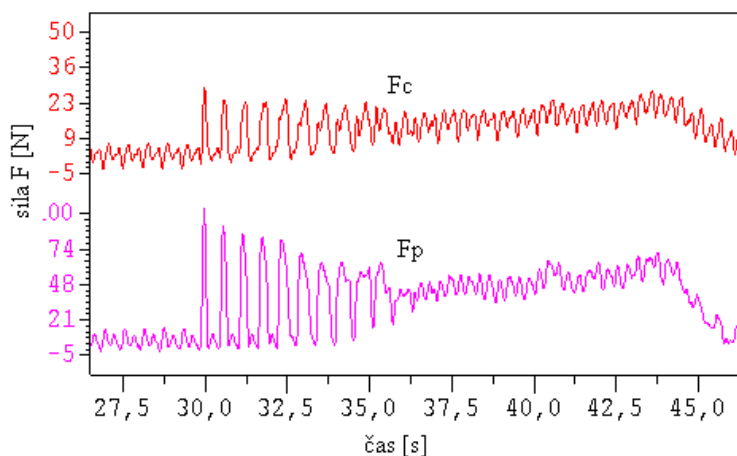
deformoval a prestala tu byť tvarová podobnosť s rozložením plôch Barkhausenovho šumu. Výrazné rozdiely vo veľkosti deformácií po tepelnom spracovaní sa prejavujú aj do stability rezného procesu, respektíve dĺžky časového intervalu, ktorý je potrebné pri operácii na odstránenie týchto deformácií. Ako ukazuje *obr. 13*, rezný proces pri brúsení má spočiatku prerušovaný charakter, je to fáza odstraňovania deformácií po tepelnom spracovaní. Potom nasleduje fáza kedy je rezný proces stabilnejší a kontakt medzi brúsnym kotúčom a obrobkom nie je prerušovaný. Z *obr. 13 a 14* taktiež vidieť, že v dôsledku menších deformácií po tepelnom spracovaní je fáza prerušovaného kontaktu nástroja a obrobku pri brúsení izotermicky zušľachtených vzoriek kratšia (6,2 sekundy) v porovnaní s priamo kalenými súčiastkami (9 sekúnd). Taktiež veľkosť silového pôsobenia je pri brúsení priamo kalených obrobkov väčšia v dôsledku ich väčšej tvrdosti. Tieto aspekty sa následne premietajú aj do profilu brúsených súčiastok, kde dosiahneme lepšie hodnoty odchýlok kruhovitosti pri bainitických vzorkách v porovnaní s martenzitickými.



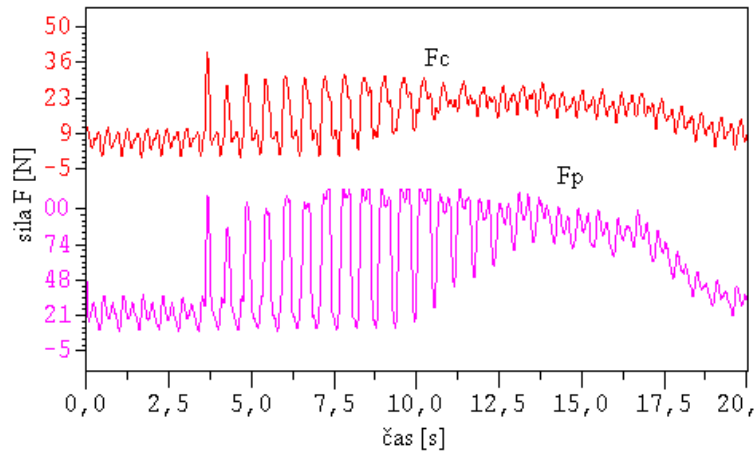
a) Tvar rozloženia plôch Barkhausenovho šumu

b) Tvar ovality krúžku

Obr. 12 Závislosť rozloženia plôch Barkausenovho šumu s tvarom krúžku

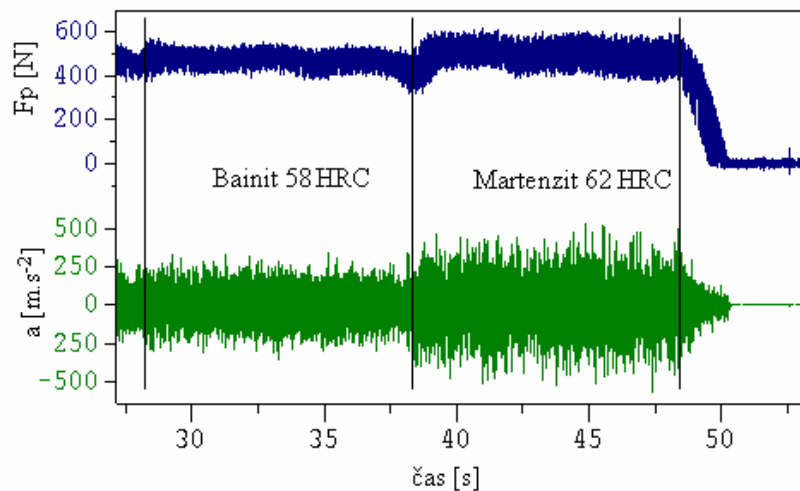


Obr. 13 Záznam zložiek reznej sily pri zapichovacom brúsení bainitickej vzorky



Obr. 14 Záznam zložiek reznej sily pri zapichovacom brúsení martenzitickej vzorky

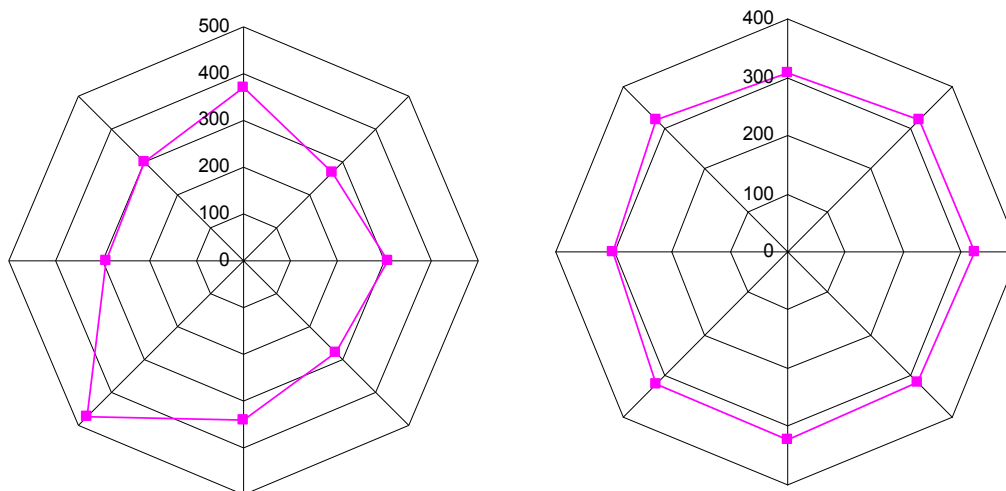
Rovnako je možné pozorovať oveľa stabilnejší charakter rezného procesu pri sústružení izotermicky zušľachtených vzoriek ($RMS F_p$ pre martenzit 41 N, pre bainit 27 N, RMS zrýchlenia pre martenzit $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a pre bainit $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) v porovnaní s priamo kalenými, ako to ukazuje aj záznam F_p z dynamometra KISTLER a záznam zrýchlenia z akceleračného snímača ACC PS2 (obr. 15).



Obr. 15 Záznam F_p a zrýchlenia pri sústružení krúžkov po TS

V dôsledku deformácií po tepelnom spracovaní má rezný proces tvrdého sústrużenia kváziprerušovaný charakter. Pri sústružení priamo kalených súčiastok sú prejavy nestability výraznejšie (väčšie deformácie) v porovnaní so sústružením izotermicky zušľachtovaných súčiastok. Rovnako ako pri brúsení sa nestabilita rezného procesu aj pri tvrdom sústružení premieta do sústruženého profilu. Pri porovnaní profilov po sústružení je odchýlka kruhovitosti po sústružení martenzitických obrobkov väčšia v porovnaní s bainitickými vzorkami [4].

Pre porovnanie rozloženia plôch Barkhausenovho šumu po brúsení a sústružení tepelne spracovaných vzoriek platí, že plochy Barkhausenovho šumu sú po brúsení oveľa rovnomernejšie rozložené po obvode (obr.16). Je to spôsobené najmä menšími silami pri brúsení a odoberaním materiálu postupne po vrstvách na celom povrchu krúžku. Naopak pri sústružení nástroj vchádza a vychádza zo záberu a je odtlačaný väčšími silami, čo spôsobí nerovnomerné rozloženie zvyškových napätí.



a, sústružený bainit 58HRC

b, brúsený bainit 58HRC

Obr. 16 Rozloženie plôch Barkhausenovho šumu po obrábaní krúžkov

3. Záver

Štúdium deformácií po tepelnom spracovaní je dôležitým aspektom technológie výroby nielen valivých ložísk, ale vo všeobecnosti. Ako ukazujú dosiahnuté výsledky, priamo ovplyvňuje stabilitu rezného procesu a následne kvalitu obrobkov danú jej rozmermi ako aj odchýlkami tvaru. Na druhej strane je potrebné podotknúť, že rozmerovú a tvarovú presnosť pri tvrdom sústružení ovplyvňujú aj iné faktory ako je opotrebenie nástroja, tepelná stabilita rezného procesu ako aj silová (súvisí napríklad s vytváraním segmentovej triesky). Navyše je problematika obrobeného povrchu pri tvrdom sústružení zložitejšia v súvislosti relaxačným charakterom procesu a vysokou teplotou v zóne rezania. Tieto javy sú predmetom ďalšieho výskumu.

Literatúra:

- [1] HOZÁK, M. - CHALUPOVÁ, M. - DURMIS, I.: *Izotermické zušľachtovanie Cr-Mn ocele na valivé ložiská*, In: Doksem 2004 – Medzinárodný seminár, Terchová – Šípková, 2004, s. 5 – 9.
- [2] JECH, J.: *Oceli na valivé ložiska a jejich tepelné spracování*, Praha: SNTL, 1968
- [3] SKOČOVSKÝ, P. – BOKŮVKA, O. – KONEČNÁ, R. – TILLOVÁ, E.: *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*. Žilina: EDIS, 2001, ISBN 80–7100–831–1
- [4] ŠÍPEK, M.: *Štúdium deformácií po tepelnom spracovaní ložiskových ocelí*, DP, SjF ŽU 2008
- [5] NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*, EDIS Žilina 2007, ISBN 9788080707118
- [6] MINÁRIK, M.: *Brúsenie ocele 100Cr6 tepelne spracovanej na bainitickú štruktúru*, Projekt DDP, ŽU, SjF, 2005