Analýza integrity povrchu broušených ozubených kol pomocí analýzy Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce

Lucie Schmidová

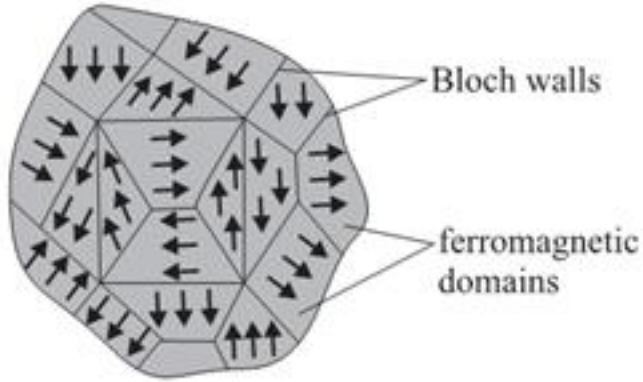
Technická univerzita v Liberci
Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

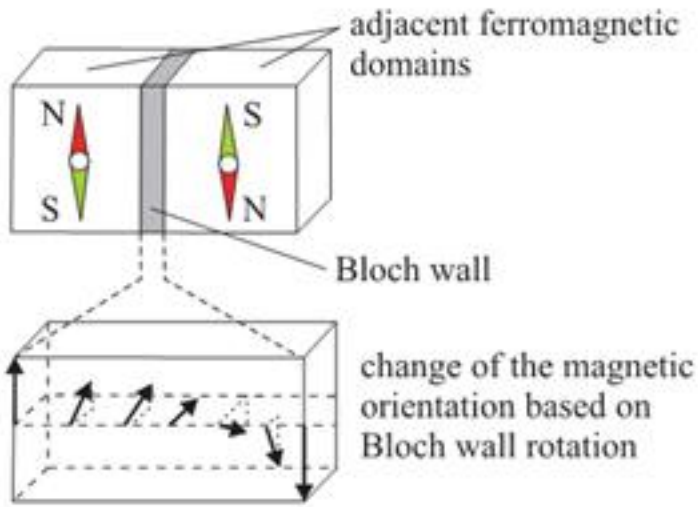
2. mezinárodní podzimní škola povrchového inženýrství, Plzeň, 15. 10. 2013

Úvod

- Metoda analýzy Barkhausenova šumu
  - Nedestruktivní metoda hodnocení integrity povrchu z hlediska zbytkových napětí, tvrdosti vzorků a strukturních a fázových změn.
  - Magnetická metoda → použití pro feromagnetické materiály.
  - Využití ve vědě i v průmyslových aplikacích.
- Rentgenová difrakční analýza
  - Nedestruktivní metoda pro měření zbytkových napětí

Princip analýzy Barkhausenova šumu

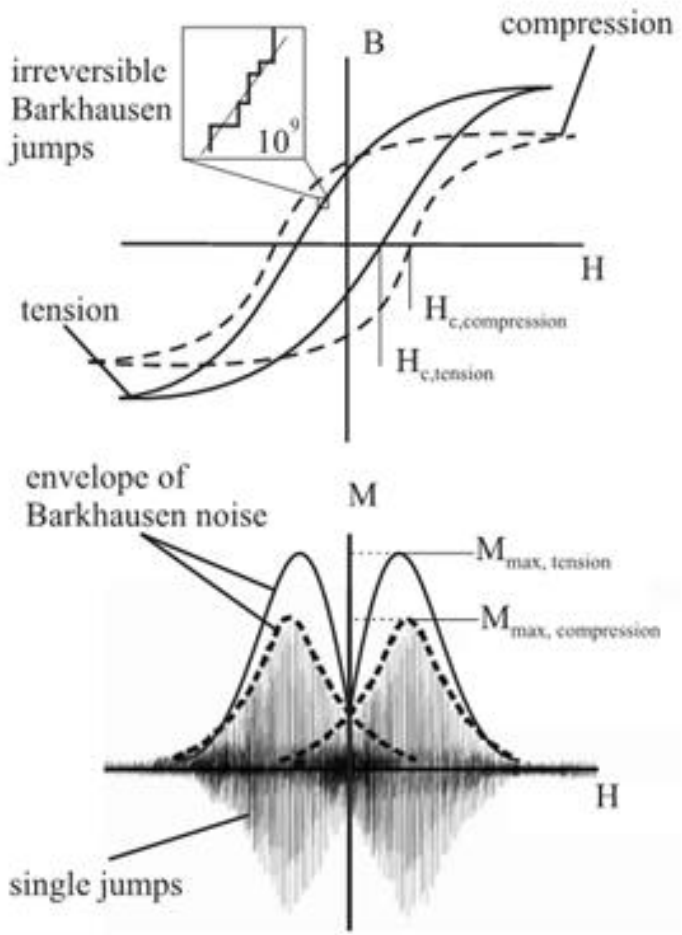




- **Feromagnetické materiály ➲ domény** (malé magnetické oblasti připomínající jednotlivé tyčové magnety). ➲ Každá doména je magnetizována podél určitého krystalografického směru snadné magnetizace.

- Hranice domén ➲ **doménové stěny**. Magnetické pole způsobí pohyb doménových stěn tam a zpět. Výsledkem je **změna celkové magnetizace vzorku**. ➲ indukce elektrických pulsů v cívce

Princip analýzy Barkhausenova šumu



- Proces magnetizace je charakterizován **hysterezní křivkou**, není spojitý, ale skládá se z malých skoků. Shrnutím všech elektrických pulsů vzniká signál zvaný Barkhausenův šum

Ovlivňující faktory

- **Přítomnost a rozložení elastických napětí** – ovlivňují cestu, kterou se domény ubírají za cílem snadné orientace ve směru magnetizace

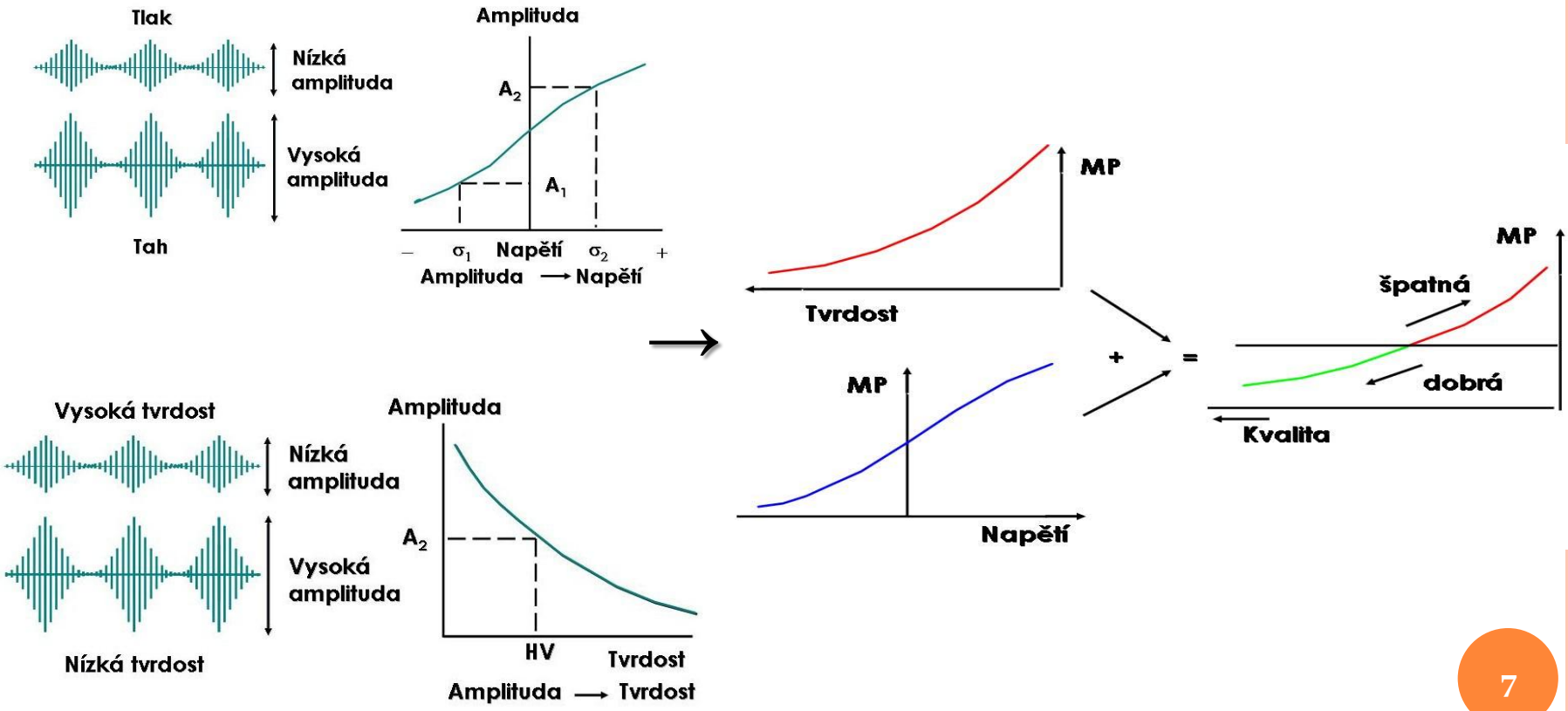
- Tento jev, při kterém elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, nazýváme **magnetoelastická interakce**. Důsledkem této interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí (většina ocelí a železo) je snižování intenzity Barkhausenova šumu tlakovým napětím, zatímco tahové napětí intenzitu zvyšuje. Díky této skutečnosti můžeme z měření intenzity Barkhausenova šumu stanovit zbytková napětí.

- **Metalurgická struktura** – lze hrubě popsat za použití pojmu tvrdost. Intenzita signálu spojitě klesá s rostoucí tvrdostí. Je to důsledkem blokace pohybu doménových stěn na mřížkové úrovni v zásadě stejnými překážkami a defekty jako pohyb dislokací při plastické deformaci.

Ovlivňující faktory

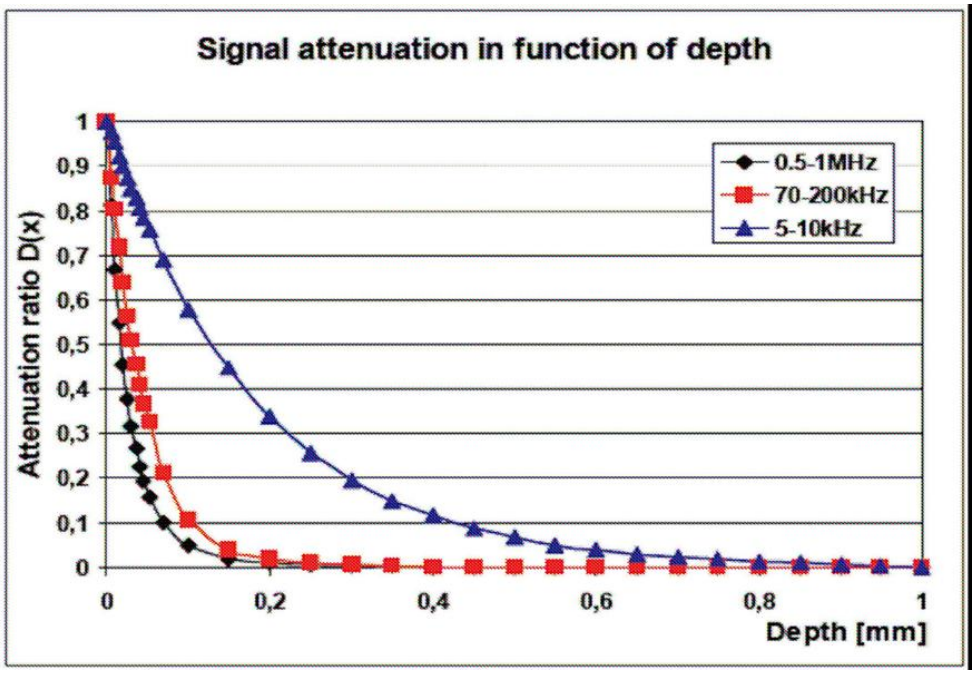
- **Vliv tvrdosti a zbytkového napětí na hodnotu MP**
  - Metoda využívá účinku mechanického napětí na posun stěn oddělujících navzájem Weissovy oblasti. Má-li těleso kladnou magnetostrikci (magnetostrikce je kladná nebo záporná podle toho, zda se těleso ve směru pole zkracuje nebo prodlužuje), budou po vložení napětí vzrůstat oblasti s vhodnou orientací směru spontánní magnetizace na úkor oblastí s oblastí nepříznivou. Při větších napětích domény s nepříznivou orientací magnetického pole vymizejí.
  - Napjatý vzorek za působení magnetického pole
    → stejný směr tahových napětí i magnetického pole → **zvětšení** signálu Barkhausenova šumu (posun stěn, předcházející rotaci vektoru spontánní magnetizace do směru pole, se ještě více usnadní)
    → tlaková napětí → **pokles** signálu Barkhausenova šumu (posun stěn oblastí je brzděn).
  - Velikost a počet Barkhausenových impulzů závisejí tedy na velikosti a znaménku působícího mechanického napětí a na jeho orientaci vzhledem ke směru vnějšího magnetického pole.

Ovlivňující faktory

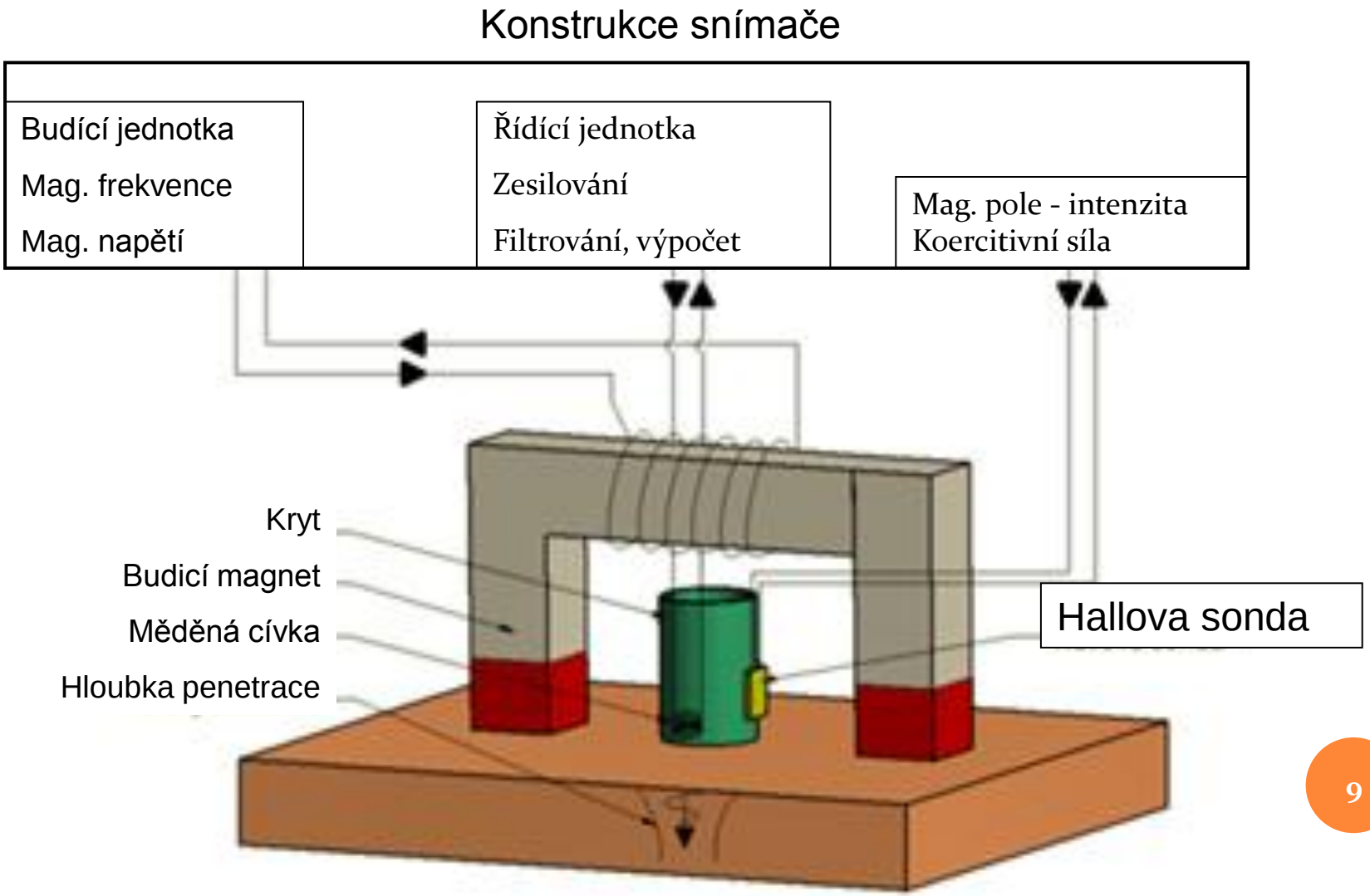


ÚTLUM SIGNÁLU

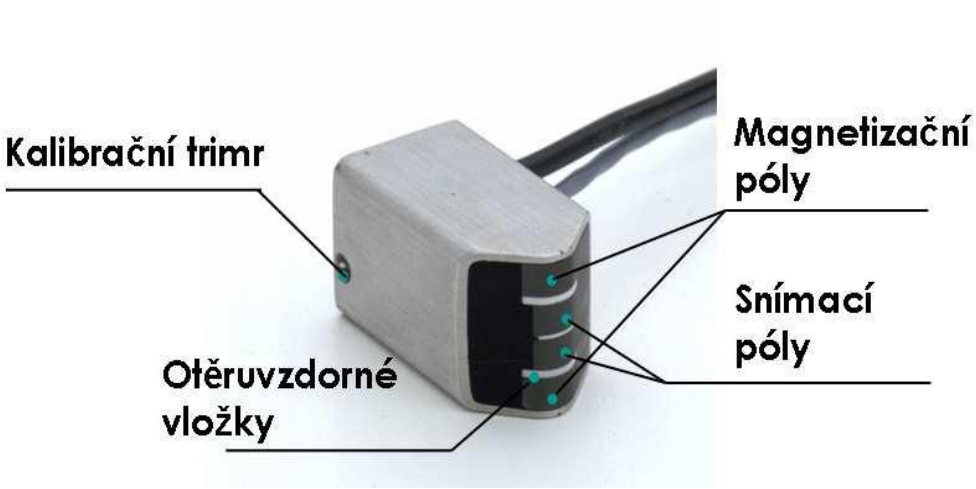
- Je exponenciální v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Příčinou tlumení signálu jsou vířivé proudy, které jsou indukovány při šíření signálu ➲ určuje se tzv. **měřicí hloubka**.



Konstrukce snímače



Konstrukce snímače



RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA

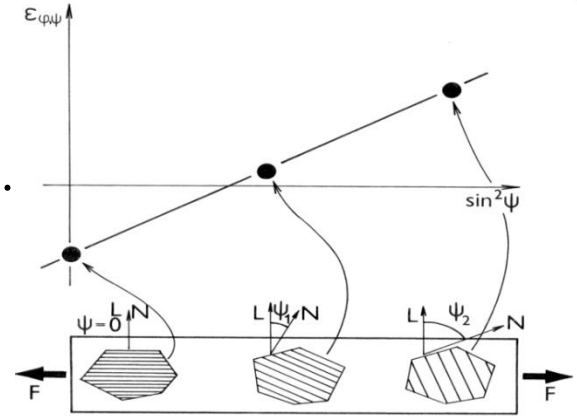
- Působení mechanického napětí vede ke změně mezirovinné vzdálenosti d_{hkl} a úhlové polohy - mřížková deformace ε.

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0}$$

- Pro případ dvouosé napjatosti platí pro mřížkovou deformaci lineární závislost se $\sin^2\psi$:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu+1}{E}\sigma_\varphi \sin^2\psi - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11}+\sigma_{22}) = \cot g\theta_0(\theta-\theta_0)$$

- Je měřena vzdálenost určitého systému mřížkových rovin v různých
a různě orientovaných krystalcích. Čím je počet reflektujících krystalků větší, tím je získaná informace reprezentativnější a spolehlivější.
- Získaná napětí jsou střední hodnotou elastických zbytkových napětí mezi volenými krystalografickými rovinami (hkl) v ozářeném objemu.
- Kombinací rtg měření s postupným elektrochemickým odleptáváním lze hodnotit hloubkové profily zbytkových napětí.



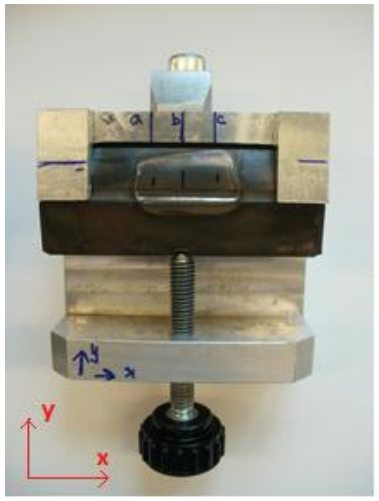
Vzorky

- Studium broušených ozubených kol z 18CrNiMo7-6 oceli použité na větrné elektrárny pro účely podpory (služba).

- Cementování
  - vede ke zpevnění pouzdra zatímco jádro je měkké
  - zvyšuje odolnost proti opotřebení a únavovou pevnost

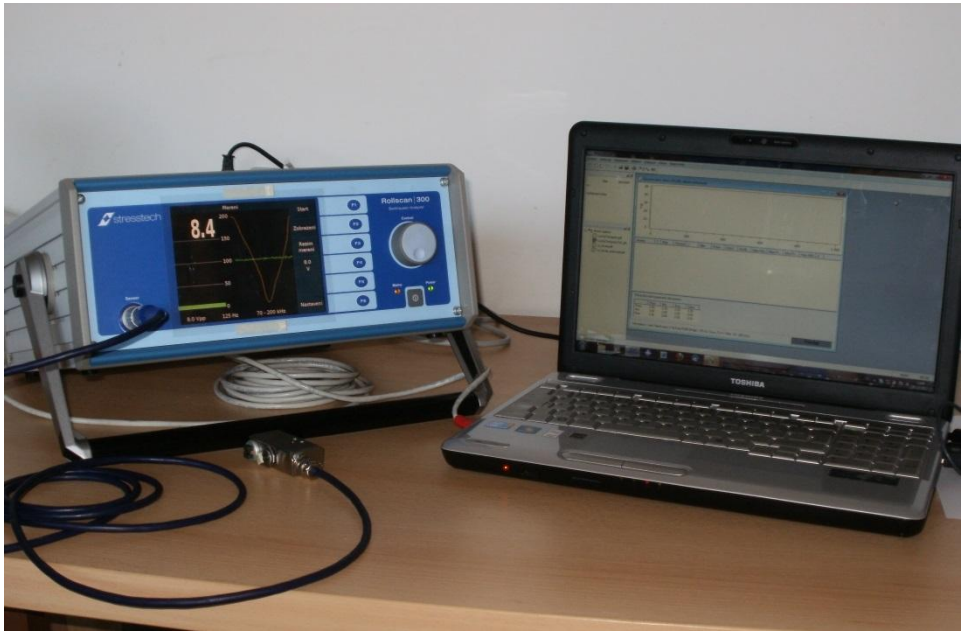
- Cíl
  - korelace mezi podmínkami broušení, zbytkovými napětí a strukturou a magnetoelastickým parametrem

Vzorky ozubených kol



Experimentální postup

- Metoda analýzy Barkhausenova šumu
  - Rollscan 300 (Stresstech Oy) se senzorem S1-164-16-11
  - MicroScan – určení RMS (MP) hodnoty a FWHM z BN
  - ViewScan – měří přeběhy magnetizačního napětí (MVS) a přeběhy magnetizační frekvence (MFS)



Experimentální postup

- Rentgenová difrakce
  - Xstress 3000 (Stresstech Oy)
  - Stanovení zbytkových napětí a FWHM

Experimentální postup

- Elektrolytické odleptávání
  - LectroPol-5 a MoviPol-3 (Struers)

Cíle

- Zhodnocení
  - Vlivu řezné rychlosti
  - Vlivu počtu třísek při broušení (tj. hloubka třísky)
  - Vlivu dodavatelů tepelného zpracování (tj. i mikrostruktury)

Vliv řezné rychlosti

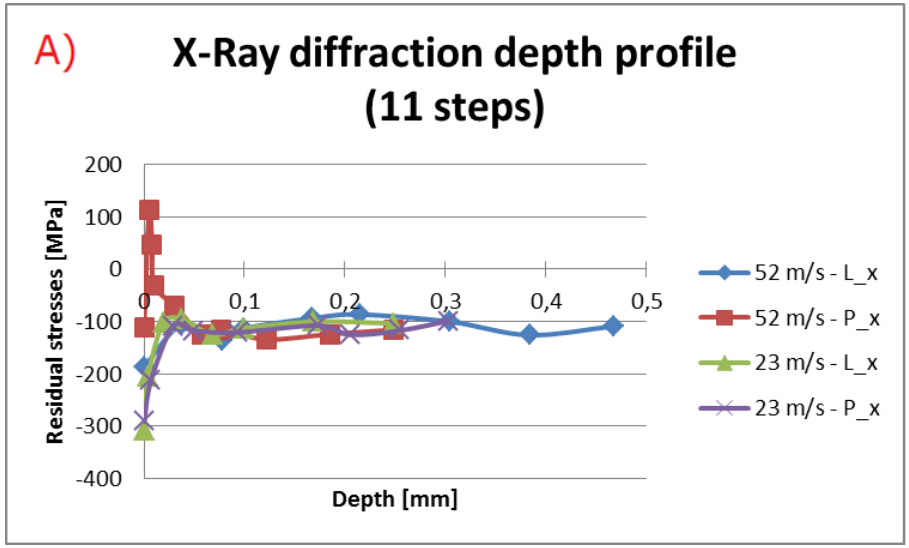
- Srovnání bylo provedeno pro broušená ozubená kola stejné šarže tepelného zpracování a stejným počtem třísek při odstraňování materiálu

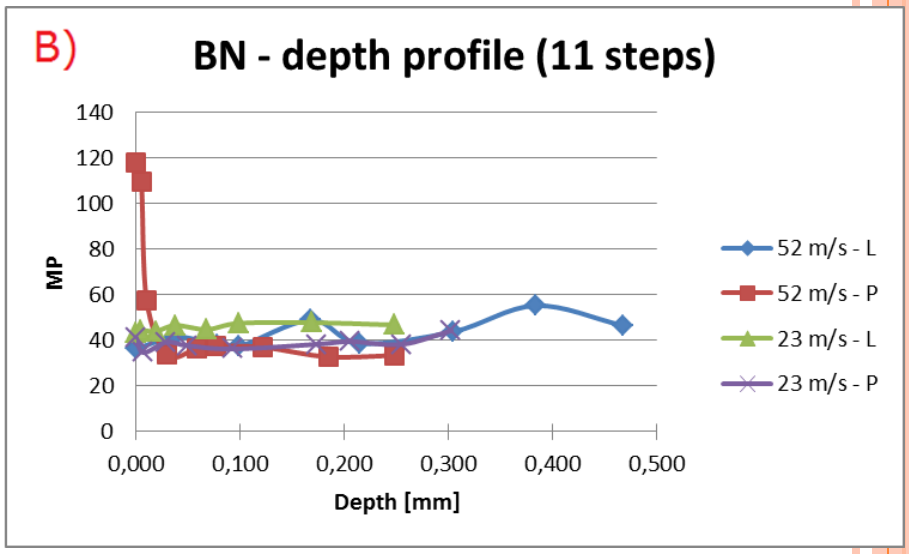
- Současná řezná rychlost 23 m/s

- Další řezné rychlosti
  35 m / s
  52 m / s

Vliv řezné rychlosti

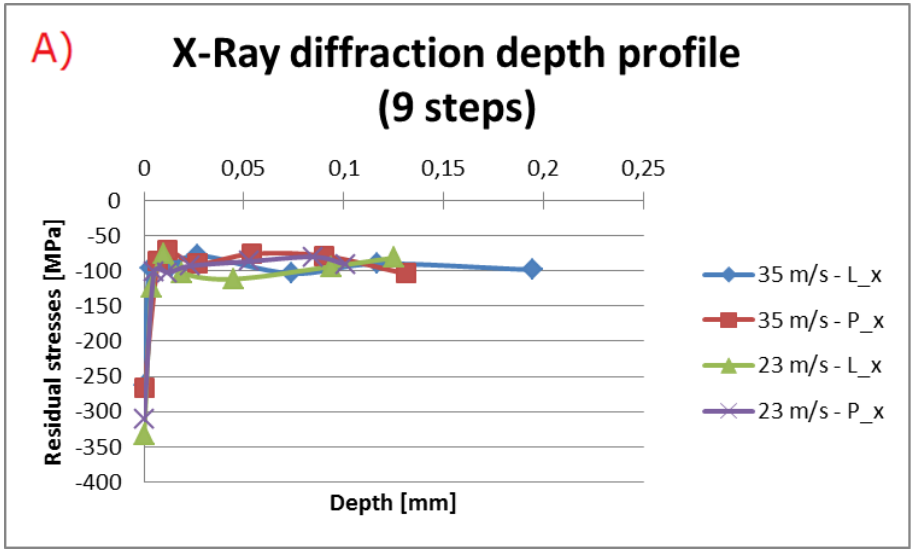
- 11 třísek při odstraňování materiálu (současný stav)

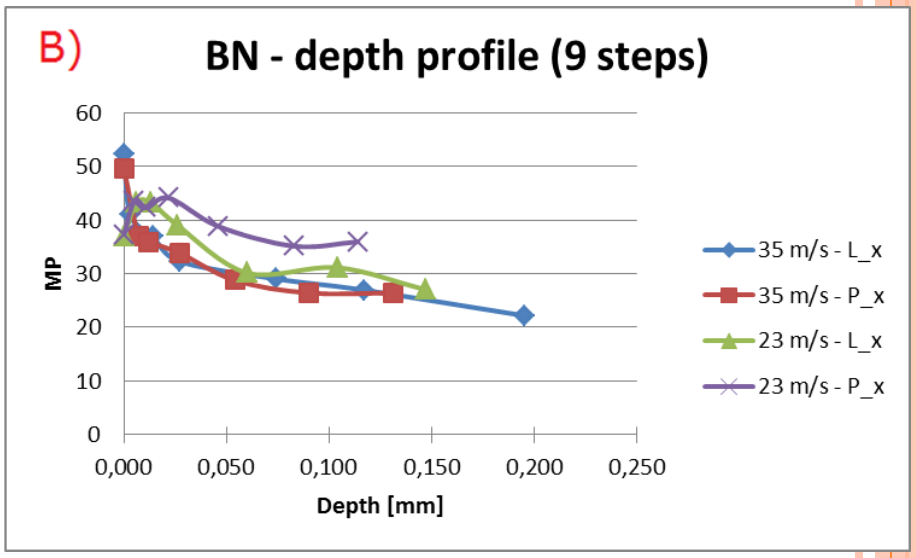




Vliv řezné rychlosti

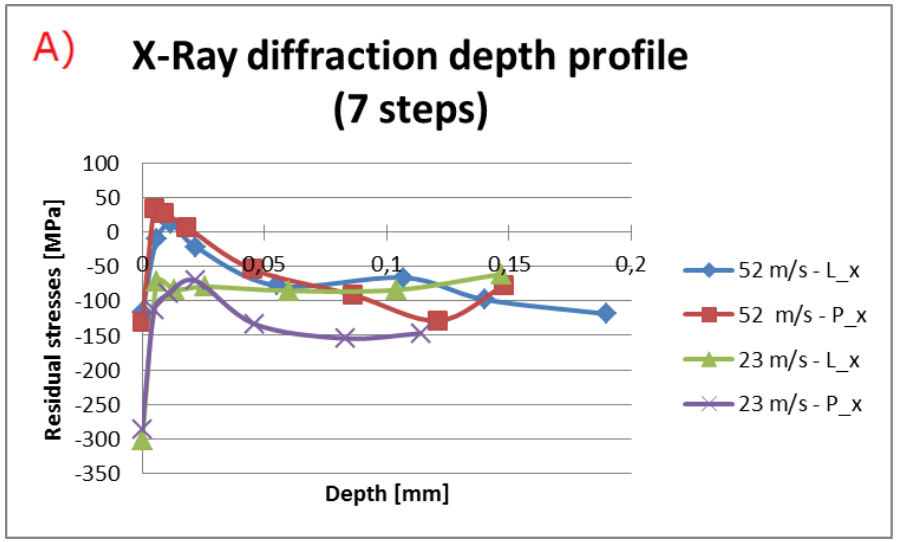
- 9 třísek při odstraňování materiálu

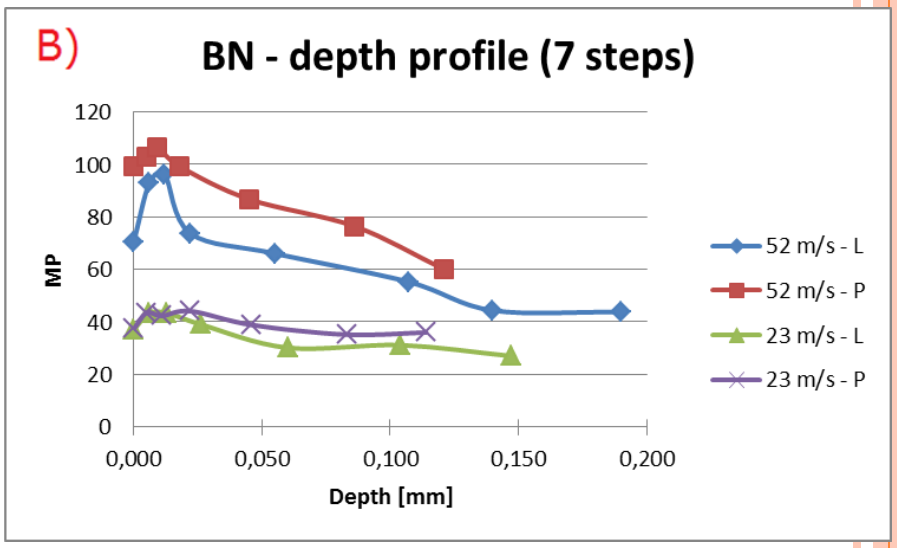




Vliv řezné rychlosti

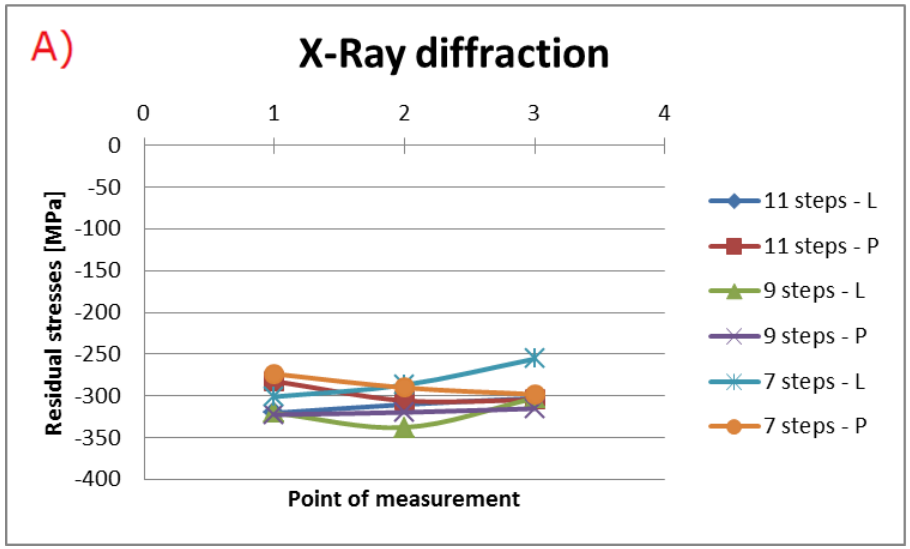
- 7 třísek při odstraňování materiálu

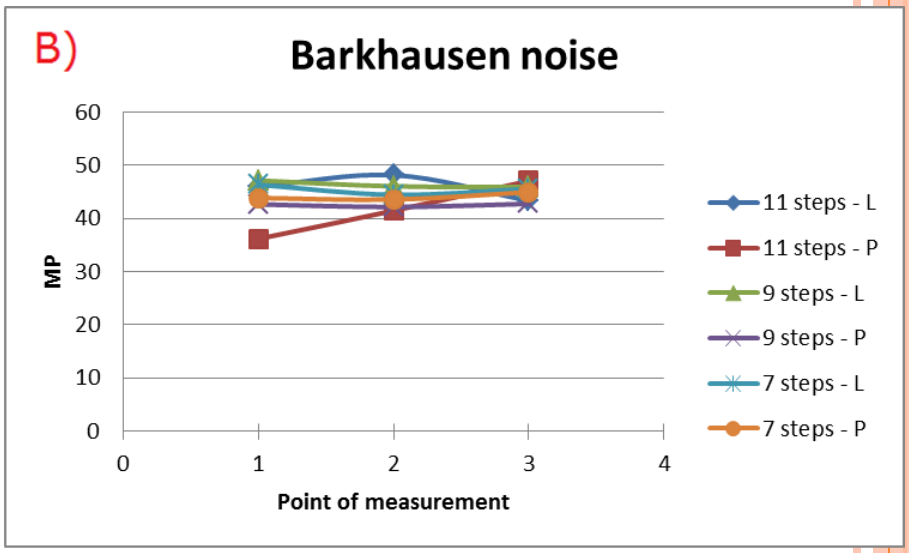




Vliv počtu třísek při odstraňování materiálu

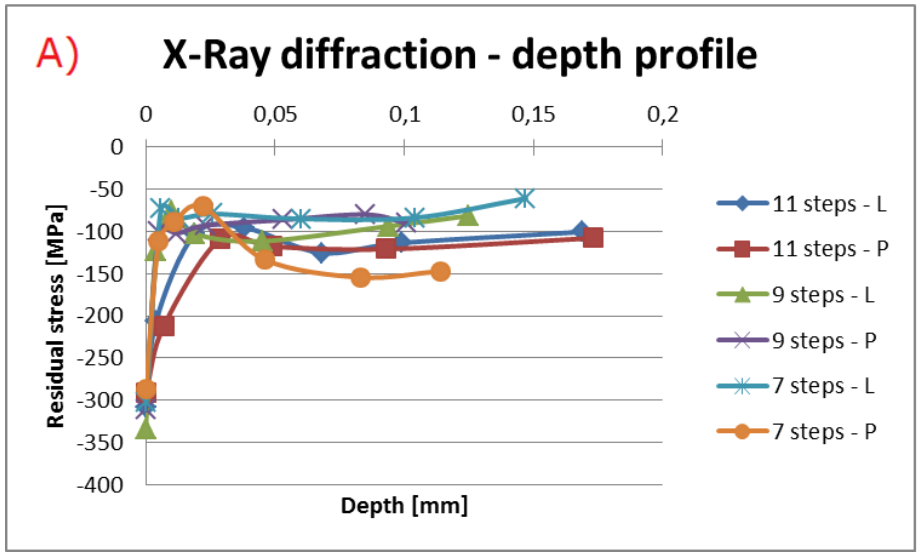
- řezná rychlost 23 m.s^{-1}

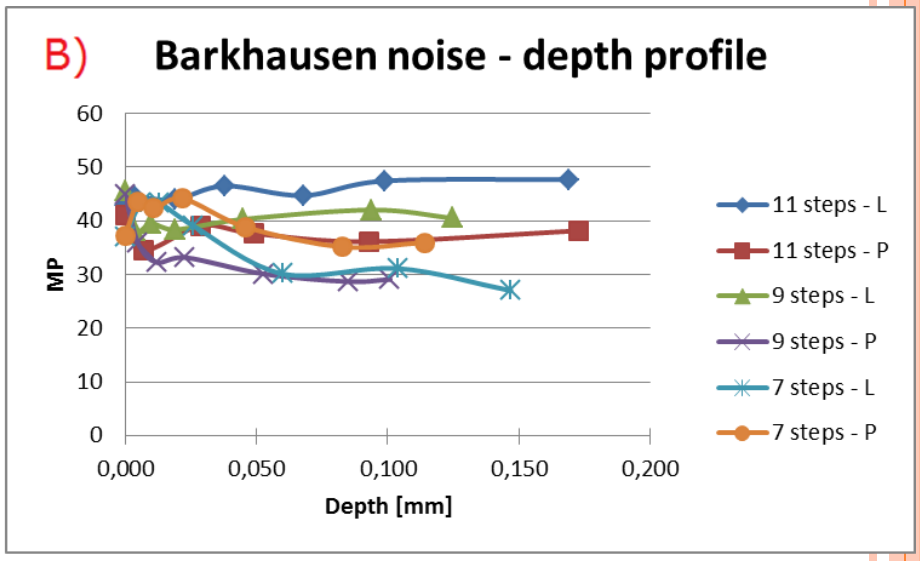




Vliv počtu třísek při odstraňování materiálu

- Hloubkové profily



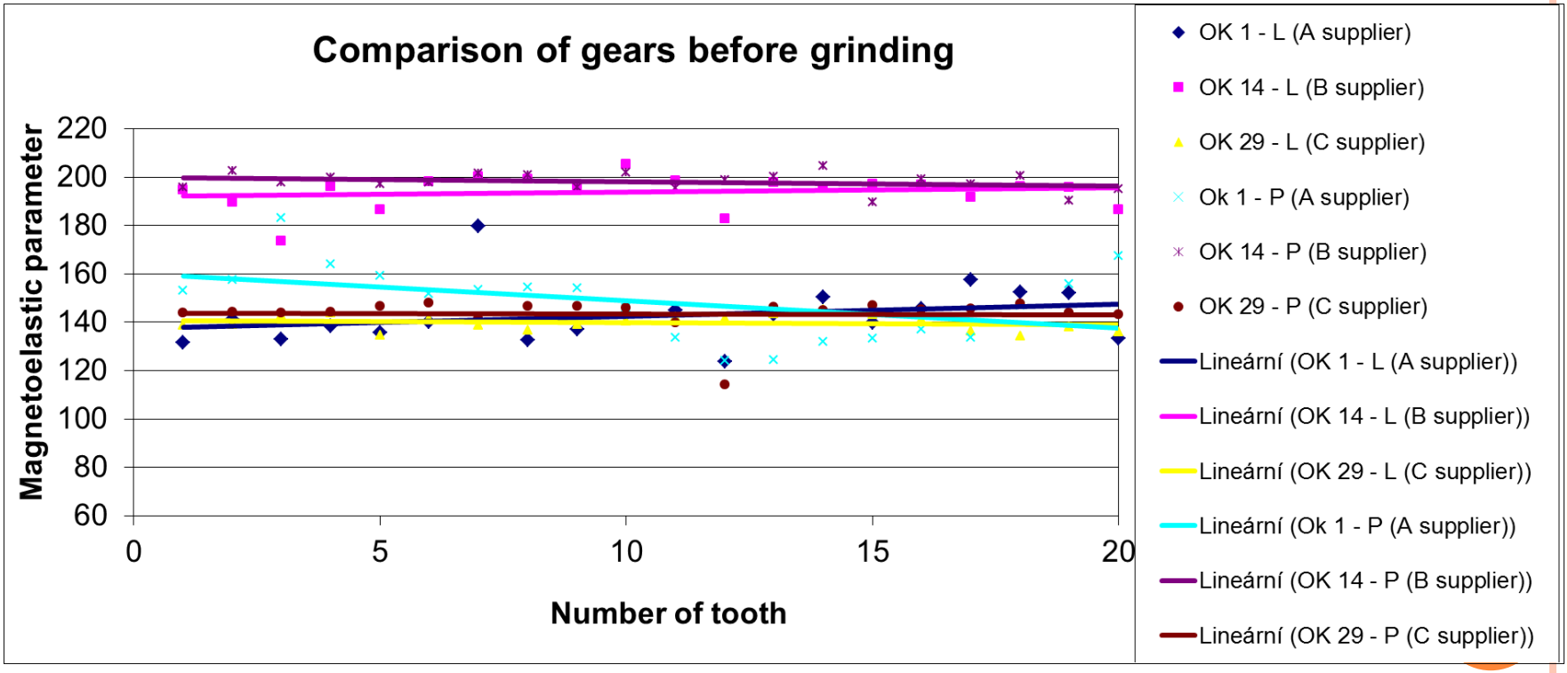


Vliv dodavatelů tepelného zpracování

- Ozubená kola jsou cementována s hloubkou cementační vrstvy (CHD) 1,25 - 1,5 mm a tvrdostí 58+4 HRC.
  - Dodavatel A – ozubená kola jsou jemně pískována
  - Dodavatel B – ozubená kola nejsou pískována
  - Dodavatel C – ozubená kola jsou kuličkována

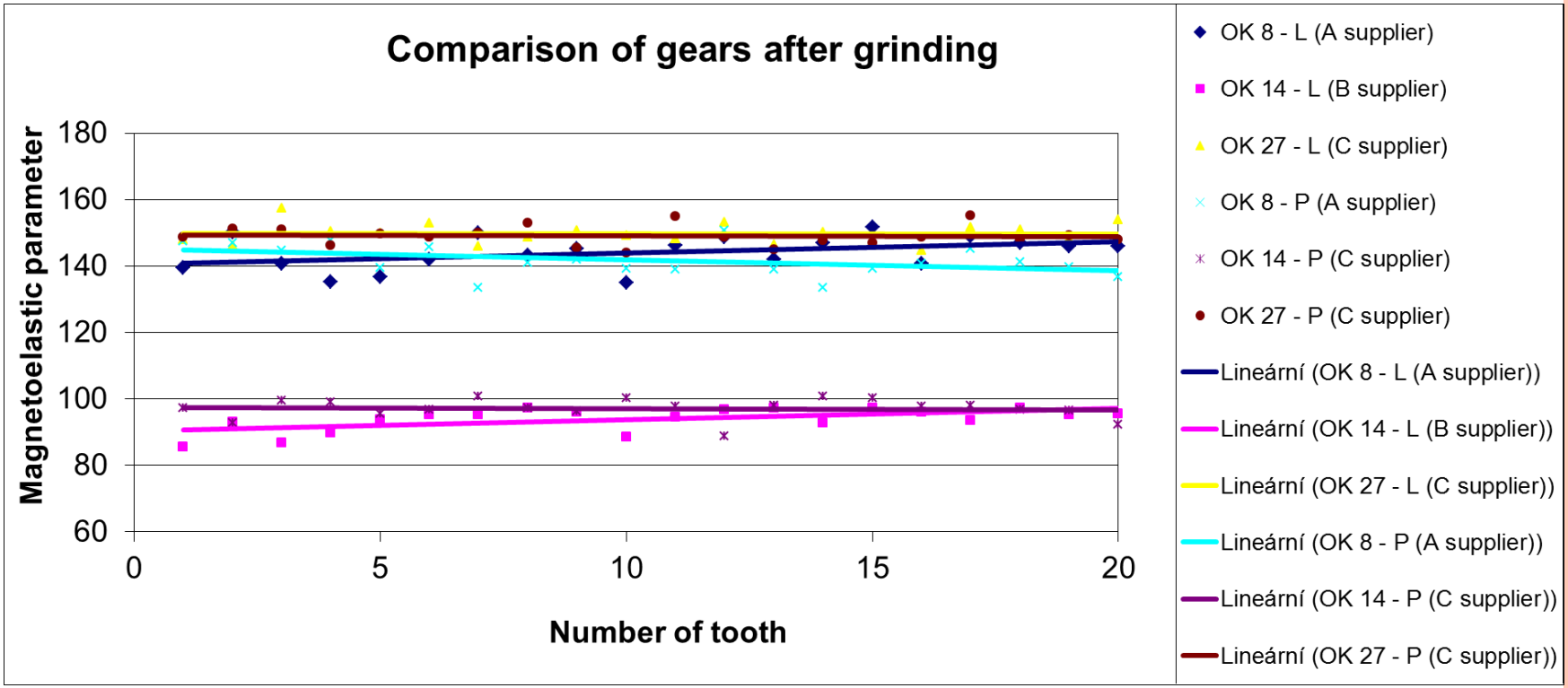
Vliv dodavatelů tepelného zpracování

- Před broušením



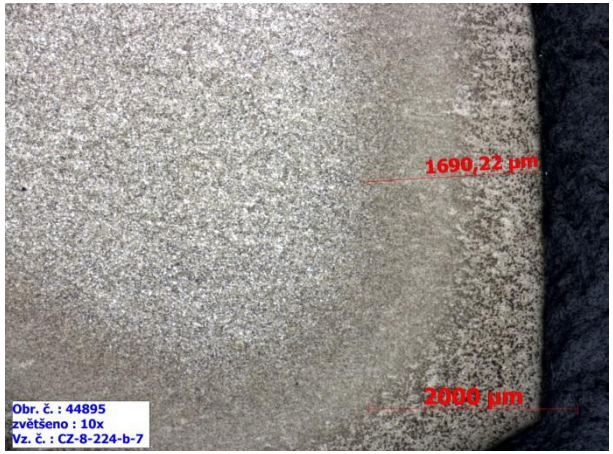
Vliv dodavatelů tepelného zpracování

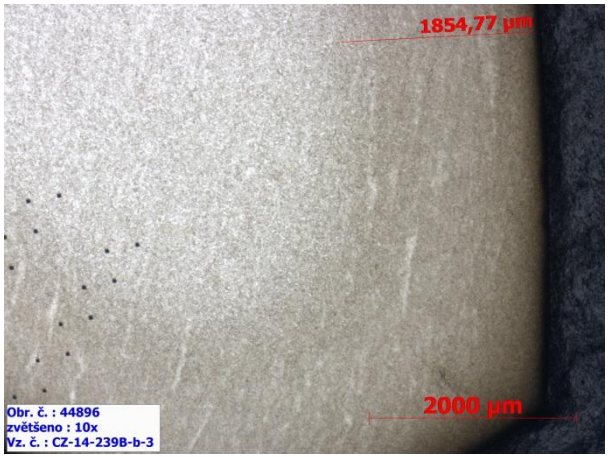
- Po broušení

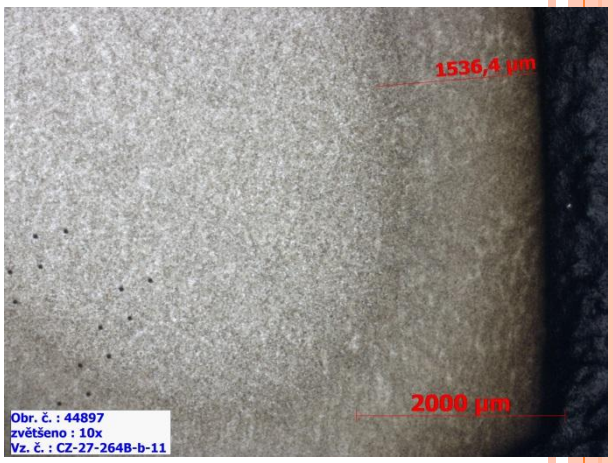


Vliv dodavatelů tepelného zpracování

- Mikrostruktura



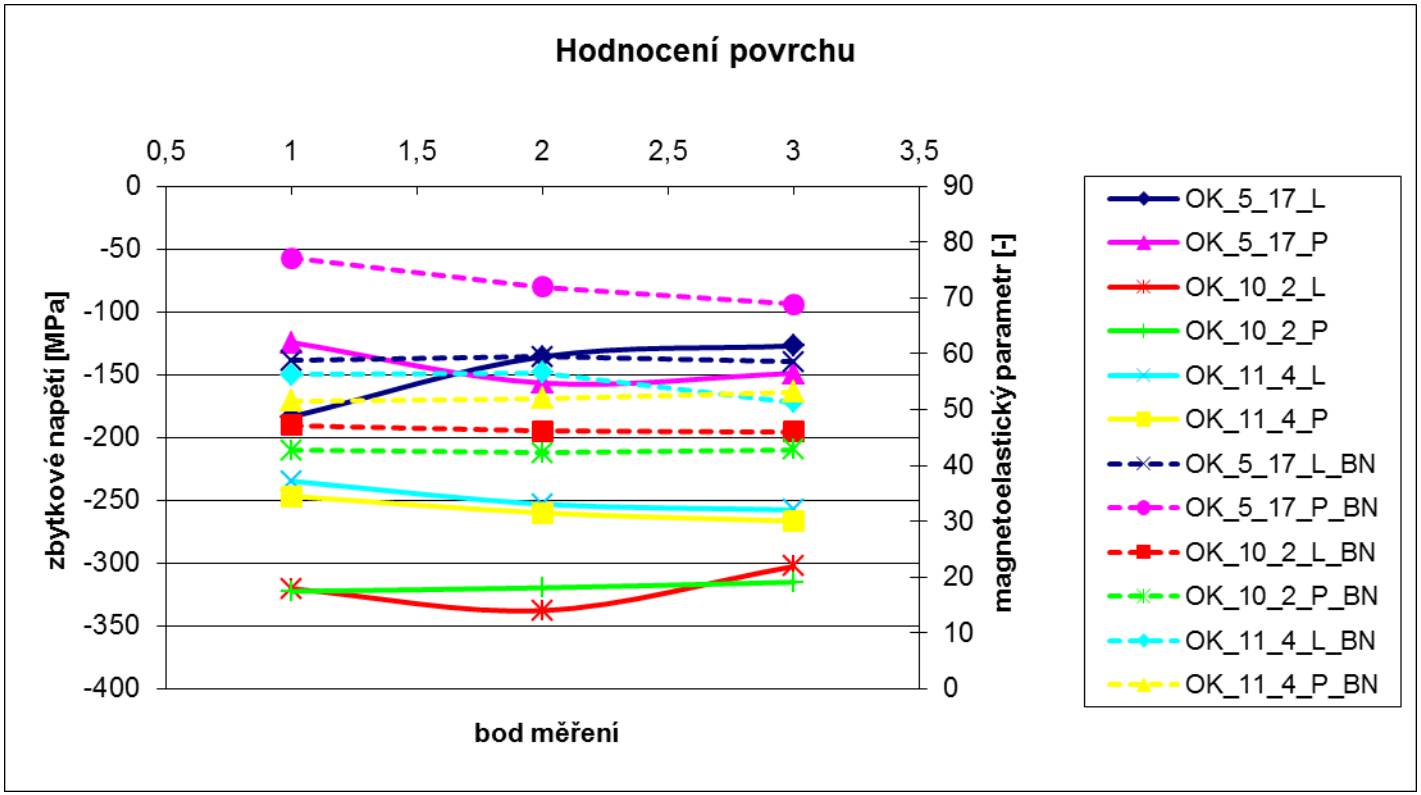




Struktura bainitu

Struktura jehličkovitého martenzitu a zbytkového austenitu

Korelace BNA a RTG difrakce



OK 5 – 3000 ot/min, 7 třísek
OK 10 – 1300 ot/min, 9 třísek
OK 11 – 2000 ot/min, 9 třísek

ZÁVĚRY

- Výsledky získané metodou analýzy Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce velmi dobře korelují a odráží stav integrity povrchu.

- Metodu analýzy Barkhausenova šumu (hodnoty MP) lze použít pro optimalizaci podmínek broušení.

- Pro libovolnou hodnotu MP 80 předepsanou zákazníkem se zbytková napětí pohybují kolem nuly.

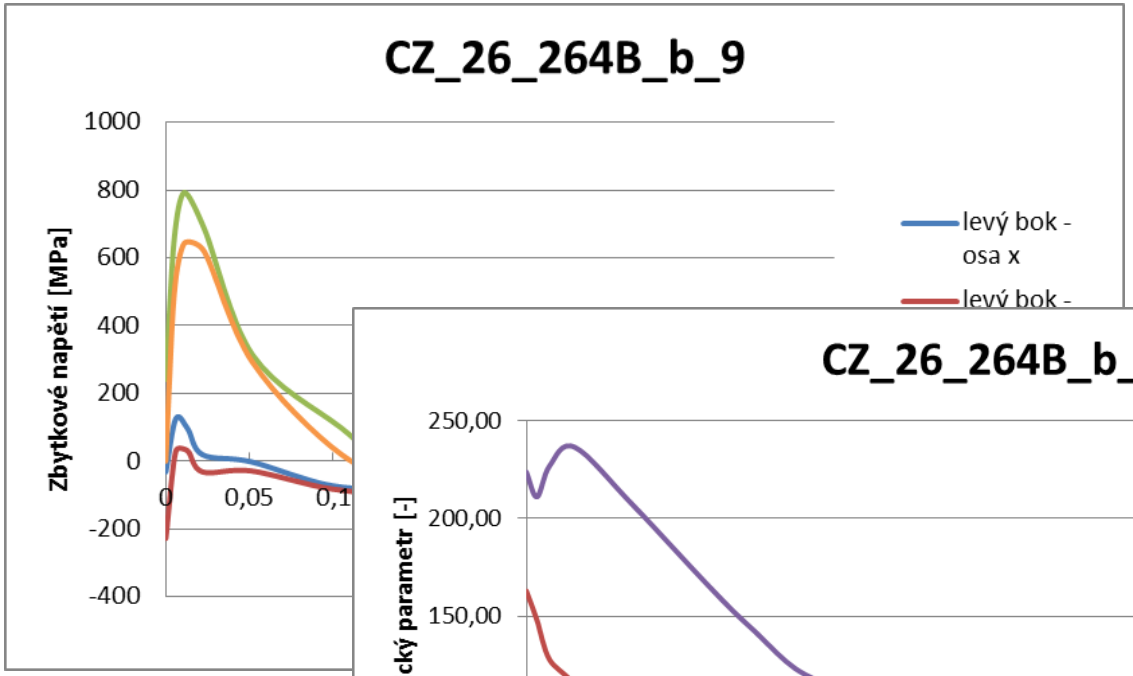
Závěry

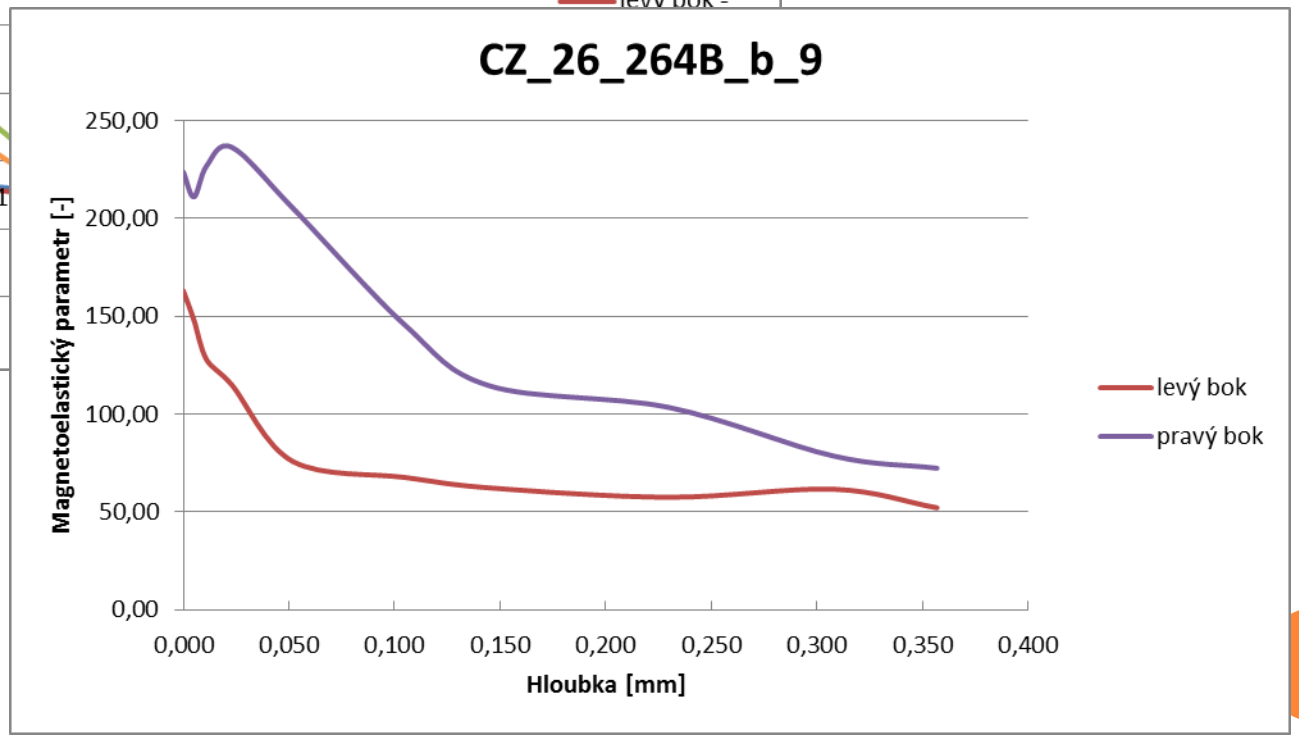
- Pravý bok zubu je systematicky horší oproti levému kvůli geometrii při kontinuálním odvalovacím broušení čelního ozubení.

- Polotovary od dodavatele C jsou systematicky horší oproti ostatním dodavatelům.

- Výsledky prokázaly, že díky nastavení při procesu broušení, která jsou k dispozici ve výrobě, lze proces optimalizovat tak, aby nebyla překročena hraniční hodnota MP (80) stanovená zákazníkem (Rollscan 300, S1-164-16-11 senzorovým typ, magnetizační frekvence 125 Hz, magnetizační napětí 6,6 V).

Extrémní výsledky
OK 26 – 2500 ot/min, 6 třísek





Extrémní výsledky
OK 26 – 2500 ot/min, 6 třísek

0,006 mm

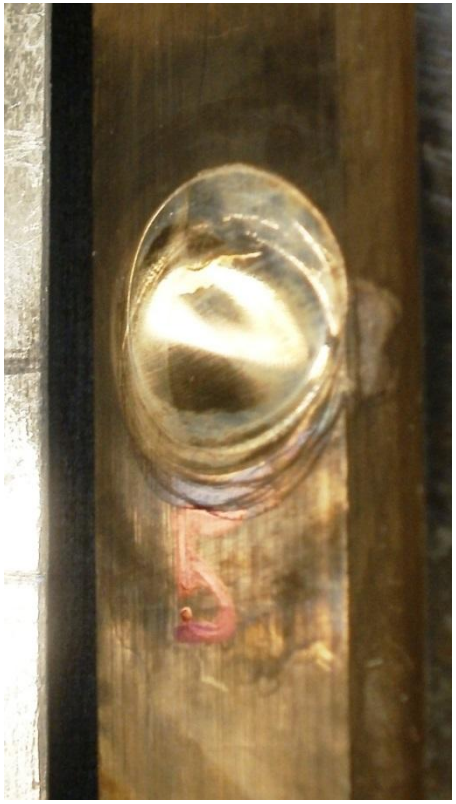
0,013 mm

0,022 mm

Extrémní výsledky
OK 26 – 2500 ot/min, 6 třísek

0,051 mm

0,100 mm



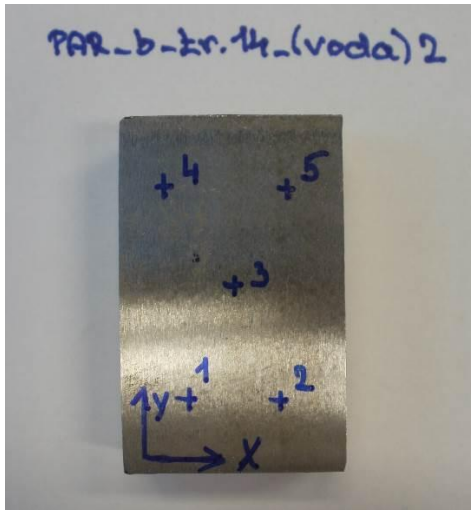
Další průmyslové aplikace

1.) Účinek procesních kapalin při broušení

- PK01 … obsahovala polyalkylenglykol střední viskozity,
- PK02 … obsahovala polyalkylenglykol nižší viskozity,
- PK03 … obsahovala polyalkylenglykol velmi vysoké viskozity,
- PK04 … obsahovala směs polyalkylenglykolů střední a nižší viskozity a vysokotlakou přísadu založenou na esterech kyseliny fosforečné,
- PK05 … obsahovala směs polylkylenglykolů střední a nižší viskozity a vysokotlakou přísadu založenou na solích thiokyselin.
-
- Dále bylo provedeno broušení vzorků s vodou a za sucha.
- Pro všechny experimenty obrábění byl připraven 5% roztok vody a emulzního koncentrátu. Koncentrace PK byla kontrolována pomocí ručního refraktometru Brix 0 – 18 % ATC.

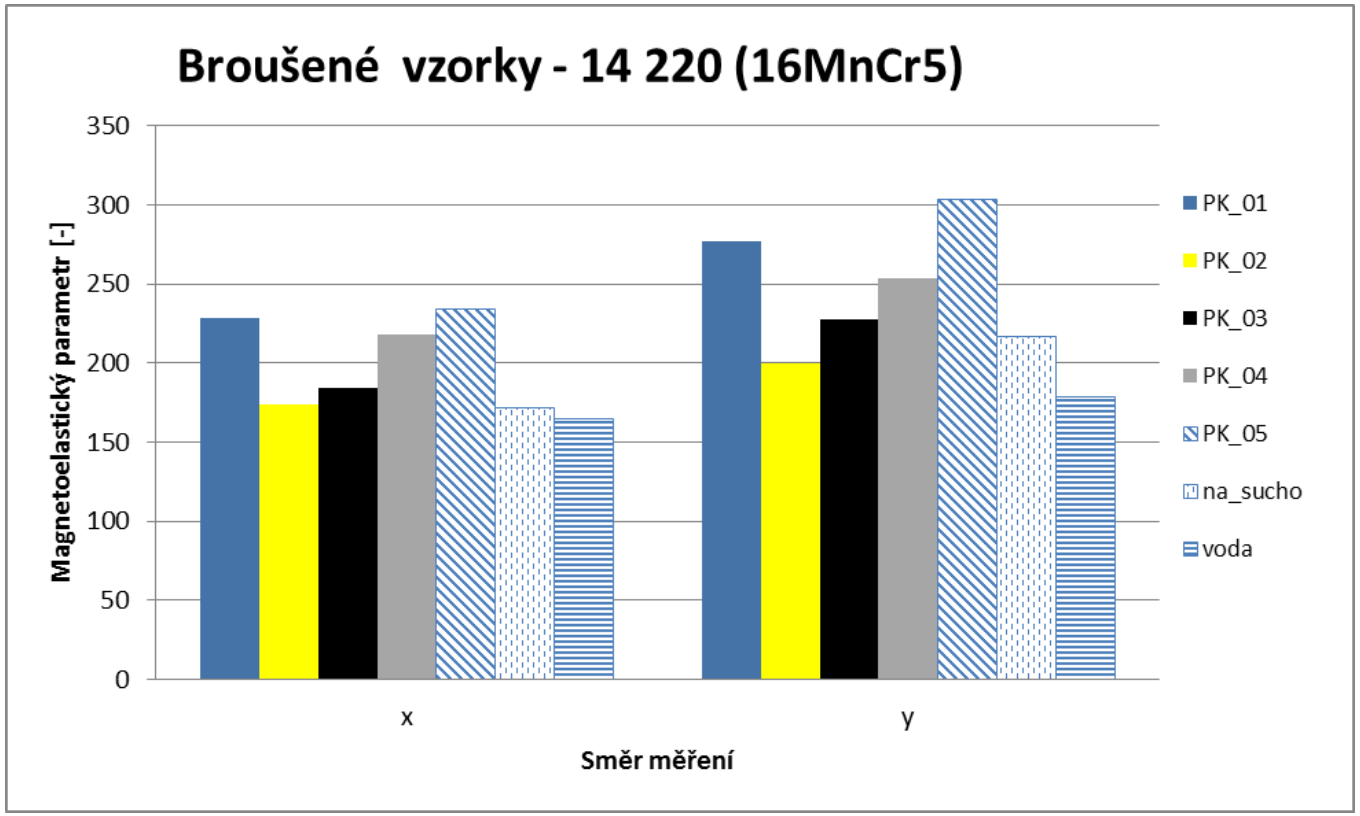
1.) Účinek procesních kapalin při broušení

- Vzorky z ocele 14 220.3 (16MnCr)



- brousicí kotouč 98A 46K9V01 o průměru 250 mm a šířce 26 mm
- rovinná bruska BPH 320A
- orovnání brousicího kotouče - jednokamenový diamantový orovnávač
- řezné podmínky:
  otáčky brousicího kotouče 2 500 ot/min,
  posuv stolu brusky 15,5 m/min
  pracovní radiální záběr 0,01 mm

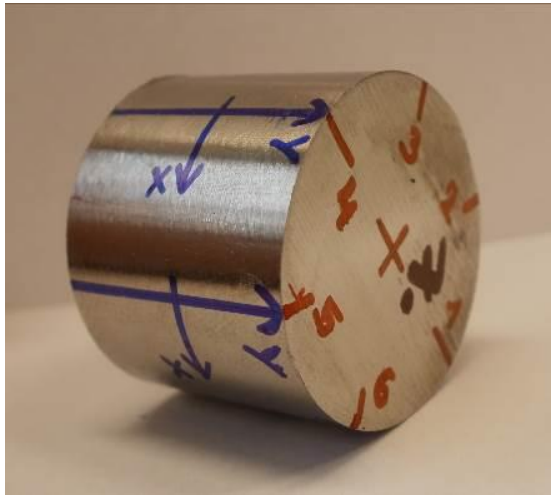
1.) Účinek procesních kapalin při broušení



- Nejlepší výsledky vykazuje procesní kapalina PK02, která obsahovala polyalkylenglykol nižší viskozity.

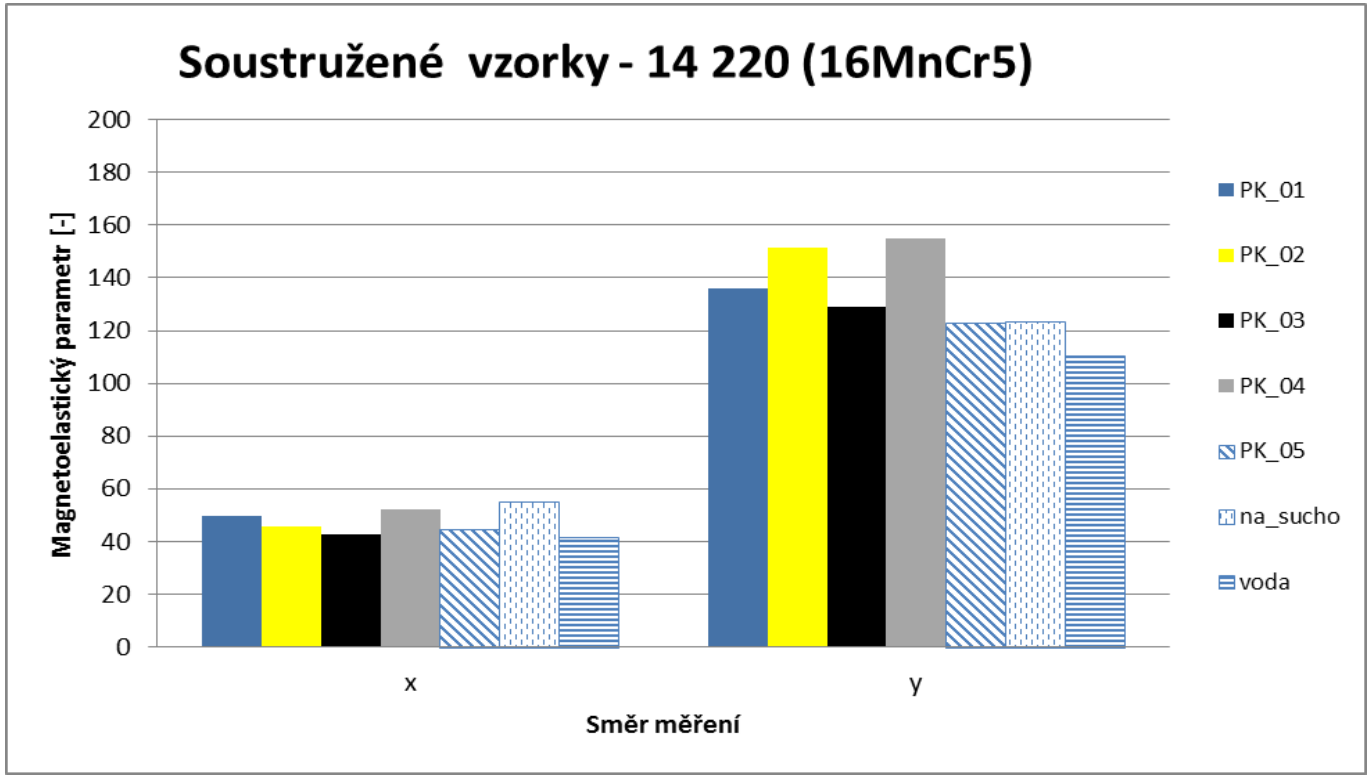
2.) Účinek procesních kapalin při soustružení

- Vzorky z ocele 14 220.3 (16MnCr)



- CNC soustruh CHEVALIER FCL-2140
- nástroj CTAPR 20x20 K16 opatřený vyměnitelnou břitovou destičkou TPUN 160304 S26.
- Řezná rychlost 245 $m.min^{-1}$
  posuv na otáčku 0,1 mm
  hloubka záběru 0,5 mm.

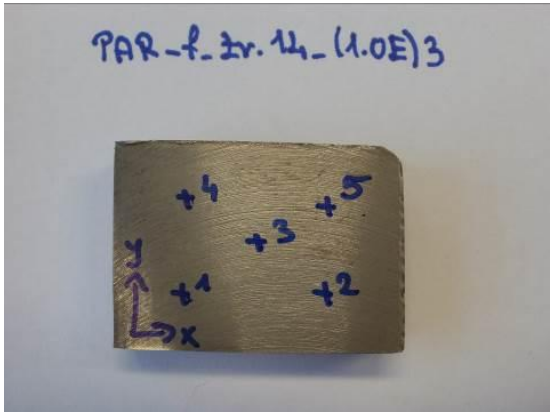
2.) Účinek procesních kapalin při soustružení



- PK05 - obsahuje směs polyalkylenglykolů střední a nižší viskozity a vysokotlakou přísadu založenou na solích thiokyselin.

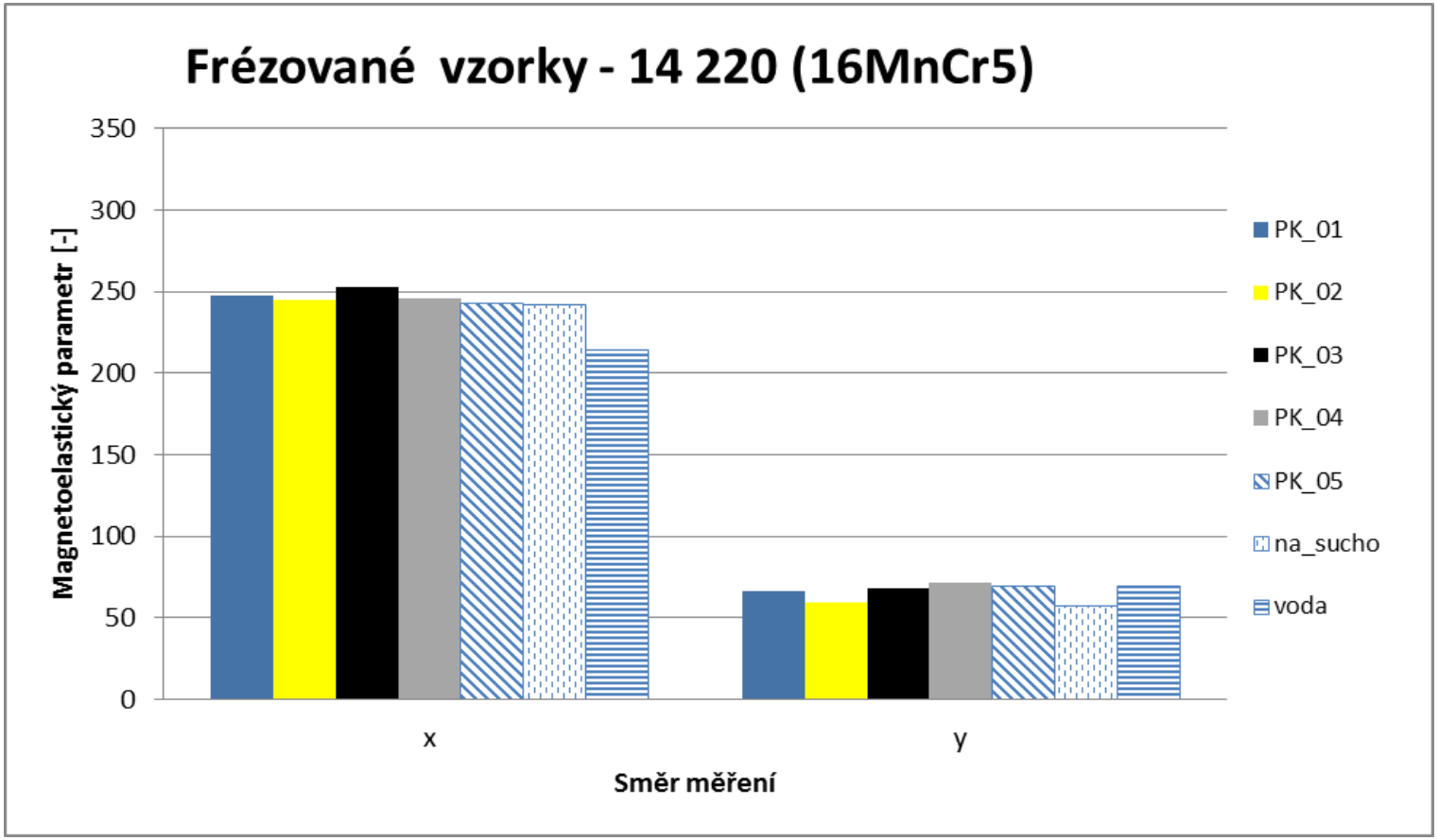
3.) Účinek procesních kapalin při frézování

- Vzorky z ocele 14 220.3 (16MnCr)



- Frézka FNG 32
- negativní čelní fréza Narex 2460.12 o průměru Ø D = 63 mm
- osazena jednou vyměnitelnou břitovou destičkou PRAMET SNUN 120412; 8230.
- Řezná rychlost při nesousledném čelním frézování činila 87,1 m.min^{-1}
  - posuv na zub 0,1 mm
  - hloubka záběru 1,0 mm

3.) Účinek procesních kapalin při frézování



- Nejlepší výsledky vykazuje procesní kapalina PK02, která obsahovala polyalkylenglykol nižší viskozity.

ZÁVĚRY – PROCESNÍ KAPALINY

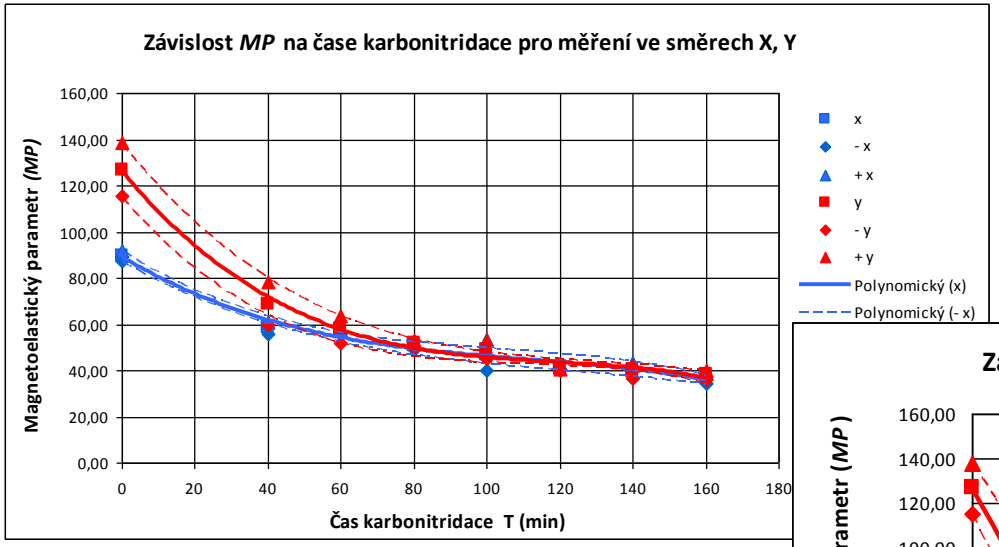
- Ve většině případů bylo zjištěno, že nejlepší výsledky dosahují vzorky obráběné za použití vody. Voda jako procesní kapalina je však z řady důvodů pro obrábění nevhodná.
- Celkově nejlepší výsledky vykazuje procesní kapalina PK02, která obsahovala polyalkylenglykol nižší viskozity.
- Oproti tomu jako nejméně vhodná procesní kapalina se jeví PK04, jež obsahovala směs polyalkyleng-lykolů střední a nižší viskozity a vysokotlakou přísadu založenou na esterech kyseliny fosforečné.

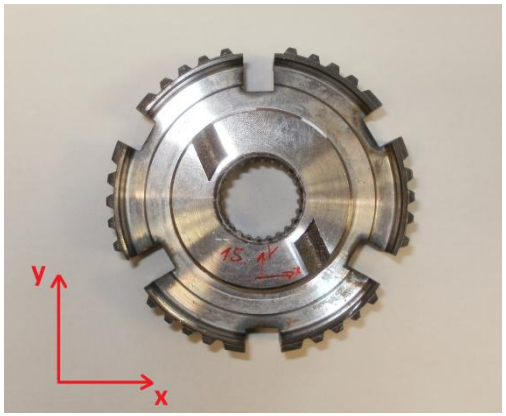
4.) Vliv technologických podmínek

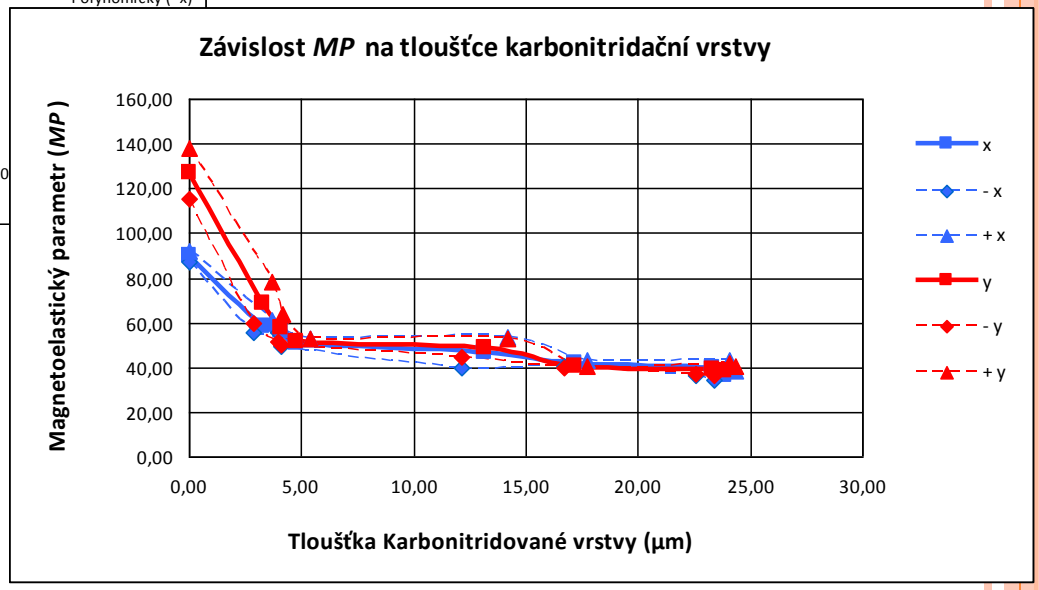
- Vliv technologických podmínek na amplitudu BN - broušení s chladící kapalinou a bez chladící kapaliny, materiál ocel 100Cr6 a jiné technologické podmínky bylo shodné

- Během broušení dominuje vliv teploty. Ohřátá povrchová vrstva má během ochlazování tendenci ke smršťování, ale spodní vrstvy, které si udržují nízkou teplotu, svůj objem nemění a zabraňují tedy smršťování povrchových vrstev → v povrchové vrstvě dochází ke vzniku tahových zbytkových napětí → Hodnota magnetoelastického parametru narůstá.

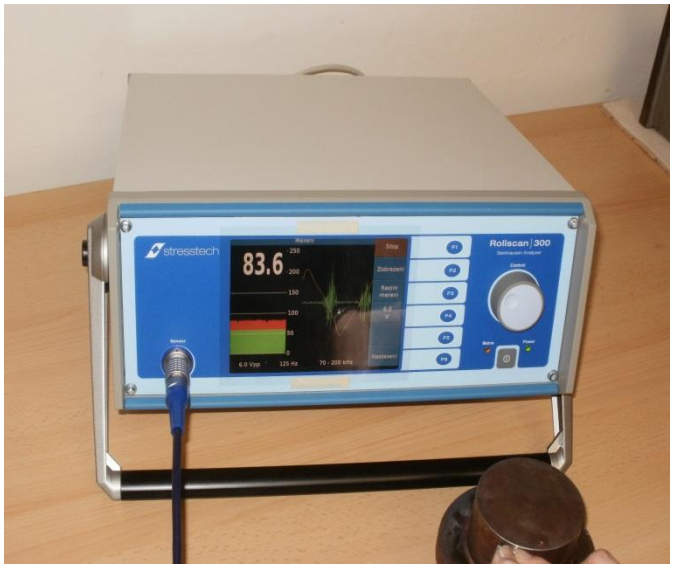
5.) Využití Barkhausenova šumu pro kontrolu tloušťky karbonitridované vrstvy





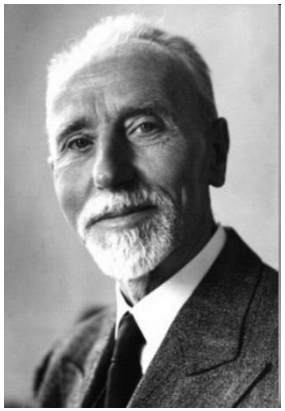


6.) Detekce trhlin u cementovaných vzorků



Shrnutí

- Metoda analýzy Barkhausenova šumu je využívána nejen k výzkumným účelům, ale nachází své uplatnění v průmyslových aplikacích.



Heinrich Georg Barkhausen

Děkuji za pozornost!