evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Sborník příspěvků odborného semináře

evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Obsah

Obsah 2

Poznání nehmotného světa zbytkových napětí 3

Využití rentgenové difrakční analýzy při studiu integrity povrchu 19

Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu 39

Analýza zbytkových napětí polodestruktivními metodami 53

Inteligentný systém pre nedeštruktívne technológie na hodnotenie funkčných vlastností valcovacích tŕňov pre tvárnenie za studena X-ray difraktometriou 66

Analýza integrity povrchu prostredníctvom Barkhausenovho šumu a jeho využitie v praxi 75

Residual Stress after Grinding-Gear Damage 107

Metoda analýzy Barkhausenova šumu 129

Hodnocení vnitřního napětí katodicky vyloučených povlaků kovů 140

Struktura povrchů vytvořených vysokorychlostními vodními paprsky 154

Vliv řezných parametrů na integritu povrchu 177

Identifikace mechanických ekvivalentů, zbytkové napjatosti a konstrukce zatěžovacích diagramů z topografie povrchu generovaného hydroabrazivní technologií 186

Poznání nehmotného světa zbytkových napětí

prof. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.
ČVUT Praha

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Laboratoř strukturní rentgenografie

Poznání nehmotného světa zbytkových napětí

Nikolaj Ganev
nikolaj.ganev@fjfi.cvut.cz

Seminář INTEGRITA, 18. - 19. 2. 2013

Integrita povrchu (IP) – nejvýznamnější faktory charakterizující povrch po obrábění

Integrita povrchu – soubor charakteristik popisujících vliv povrchové vrstvy na funkční vlastnosti součásti. Lze ho chápat jako více méně volný soubor vlastností povrchové vrstvy, které jsou vytvořeny nebo ovlivněny technologickými procesy a u kterých se předpokládá vliv na funkční vlastnosti zkoumané součásti.

Jako nejvýznamnější a nejčastěji analyzované faktory, které charakterizují integritu povrchu po obrábění se obvykle uvádí:

- mikrogeometrie obrobeného povrchu,
- stupeň a hloubka zpevnění,
- strukturní fázové a chemické změny,
- smysl, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí.

Teprve široký soubor experimentálních poznatků o vlivu technologických procesů na integritu povrchu a současně sledování závislosti provozních vlastností součásti na integritě povrchu umožní optimalizovat způsob a podmínky výroby součásti z hlediska požadované spolehlivosti a životnosti.

Napětí a deformace

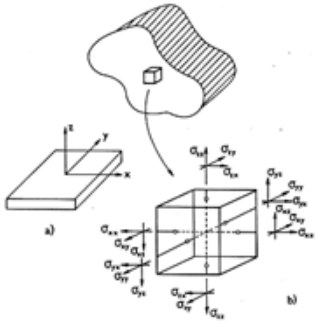
Stav napjatosti jednoznačně charakterizován deviti složkami σ_{ij} (i, j = x,y,z) symetrického tenzoru 2. řádu

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

Vztah mezi složkami tenzoru napětí σ_{ij} a deformace ε_{ij} je dán Hookovým zákonem

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\frac{\nu}{1-2\nu}\left(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}\right)\right],$$

kde E a ν označují Youngův modul elasticity a Poissonovo číslo, $\delta_{ij} = 1$ pro $i = j$ a $\delta_{ij} = 0$ pro $i \neq j$.



a) souřadnicový systém „spojený“ se vzorkem, b) znázornění složek tenzoru napětí

Napětí a deformace

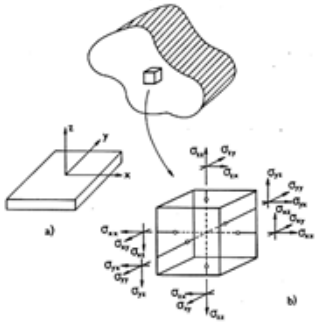
Stav napjatosti jednoznačně charakterizován deviti složkami σ_{ij} (i, j = x,y,z) symetrického tenzoru 2. řádu

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

Vztah mezi složkami tenzoru napětí σ_{ij} a deformace ε_{ij} je dán Hookovým zákonem

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\frac{\nu}{1-2\nu}\left(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}\right)\right],$$

kde E a ν označují Youngův modul elasticity a Poissonovo číslo, $\delta_{ij} = 1$ pro $i = j$ a $\delta_{ij} = 0$ pro $i \neq j$.



a) souřadnicový systém „spojený“ se vzorkem, b) znázornění složek tenzoru napětí

Zbytková mechanická napětí

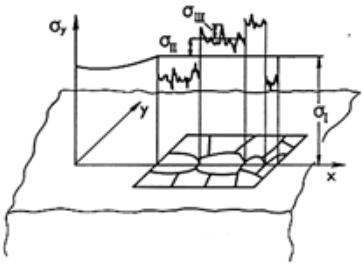
Zbytková napětí jsou mechanická napětí existující v tělese bez působení vnějších sil

Zbytková napětí jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací.

- ***Zbytková napětí I. druhu*** jsou přibližně homogenní ve velké oblasti materiálu.

- ***Zbytková napětí II druhu*** jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků.

- ***Zbytková napětí III. druhu*** jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi.



Schématické znázornění zbytkových napětí I., II. a III. druhu u jednofázového polykrystalického materiálu

Mechanizmy vzniku zbytkových napětí

- ***Mechanické procesy.*** Povrchové opracování jako kuličkování, válečkování, leštění a další deformují povrch materiálu více než vnitřek. V plasticky deformovaném (nataženém) povrchu je po odstranění vnější síly vyvolán stav zbytkové komprese. Vnitřek, ovlivněný opracováním mnohem méně (jeho deformace je převážně pouze elastická), bude naopak vystaven zbytkovým tahům.

- ***Tepelné procesy***. Účinek teplotních gradientů může vyvolat napětí při kalení, odlévání, sváření, výrobě kompozitních materiálů aj. Tepelná napětí jsou doprovázena často také napětím transformačním vznikajícím jako důsledek fázových transformací.

- ***Chemické procesy***. Příkladem chemických procesů, kterými se generují zbytková napětí, jsou oxidace, koroze nebo galvanické pokovování.

- ***Kombinované procesy.*** Tuto kategorii lze ilustrovat např. neideálními podmínkami broušení (tupý brusný kotouč, velký úběr, nevhodné chladicí médium).

Principy tenzometrických měřících metod

K nejrozšířenějším způsobům měření zbytkových napětí patří v současné době metody

- ***mechanické*** (založené na měření deformací doprovázejících porušení napěťové rovnováhy při odstranění části objemu zkoumaného vzorku),
- ***optické*** (fotoelasticimetrie),
- ***magnetické*** (využívající závislost mezi napětím a některými magnetickými charakteristikami),
- ***ultrazvukové*** (vycházející ze vztahu mezi napětím a rychlostí ultrazvukových vln),
- ***difrakční*** (rentgenografické a neutronografické).

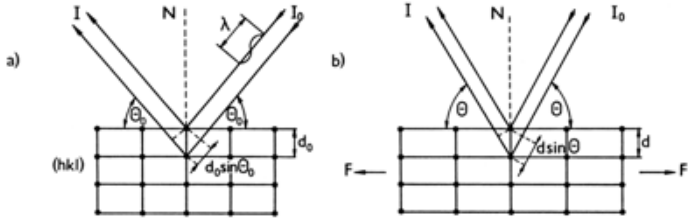
Spolehlivost různých tenzometrických metod

- Žádný ze známých způsobů měření zbytkových napětí není zcela univerzální, jednotlivé metody lze zpravidla úspěšně aplikovat vždy jen na určité druhy materiálu (krystalické, průhledné, feromagnetické atd.).
- Obecně se dá konstatovat, že výsledky relativních měření jsou zpravidla dostatečně spolehlivé nezávisle na tom, která tenzometrická metoda je používána.
- Mezi hodnotami napětí určenými různými metodami mohou však být i řádově rozdíly.
- **Základním předpokladem pro správnou interpretaci závěrů získaných odlišnými tenzometrickými postupy je pochopení podmínek, za nichž byly stanoveny buď deformace, nebo ty veličiny, které lze napětím ovlivnit.**

Základní princip difrakční tenzometrie

Relativní změna meziatomové vzdálenosti $\varepsilon^{mi} = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_\psi - d_0}{d_0} = \frac{d - d_0}{d_0}$.

Tato změna mezirovinné vzdálenosti se projeví změnou Braggova úhlu θ, tj. $d_0 \to d \Rightarrow \theta_0 \to \theta$.



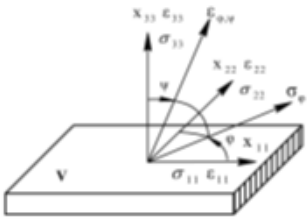
Deformace vzdálenosti mřížkových rovin (hkl) a změny úhlové polohy interferenčního maxima; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F

Stanovené deformace pak přepočteme na napětí pomocí vztahů teorie elasticity.

Vybrané vztahy teorie elasticity

V laboratorním souřadnicovém systému platí

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \left(\varepsilon_{11}\cos^2\varphi + \varepsilon_{12}\sin 2\varphi + \varepsilon_{22}\sin^2\varphi\right)\sin^2\psi + \\ + \varepsilon_{33}\cos^2\psi + \left(\varepsilon_{13}\cos\varphi + \varepsilon_{23}\sin\varphi\right)\sin 2\psi.$$



Systém souřadnic spojený se vzorkem V

Dosadíme-li za ε_{ij} složky σ_{ij} podle Hookova zákona

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{\nu+1}{E}\left(\sigma_{11}\cos^2\varphi + \sigma_{12}\sin 2\varphi + \sigma_{22}\sin^2\varphi\right)\sin^2\psi + \\ + \frac{\nu+1}{E}\sigma_{33}\cos^2\psi + \frac{\nu+1}{E}\left(\sigma_{13}\cos\varphi + \sigma_{23}\sin\varphi\right)\sin 2\psi - \\ - \frac{\nu}{E}\left(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}\right).$$

Základní rovnice rentgenové tenzometrie

Předpoklad: jsme oprávněni ztotožnit rentgenograficky měřené mřížkové deformace s deformacemi, které lze podle teorie elasticity očekávat ve směru φ, ψ, t.j.

$$\varepsilon_{\varphi\psi}^{m'} = -\cot\theta_0 \delta\theta_{\varphi,\psi} = -\cot\theta_0 \left(\theta_{\varphi,\psi} - \theta_0\right) = \varepsilon_{\varphi\psi}.$$

Experimentální metodika spočívá v přesném stanovení mřížkových deformací $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ a v jejich přepočtu na napětí pomocí vztahů teorie elasticity. Podle

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{\nu+1}{E}\left(\sigma_{11}\cos^2\varphi + \sigma_{12}\sin 2\varphi + \sigma_{22}\sin^2\varphi\right)\sin^2\psi +$$
$$+\frac{\nu+1}{E}\sigma_{33}\cos^2\psi + \frac{\nu+1}{E}\left(\sigma_{13}\cos\varphi + \sigma_{23}\sin\varphi\right)\sin 2\psi -$$
$$-\frac{\nu}{E}\left(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}\right)$$

stačí k určení všech složek tenzoru napětí pouze šest nezávislých složek deformace (i = 1,.....6), v praxi se však vychází obvykle z většího počtu měření.

Metoda „sin²ψ“

Nepatrná hloubka vnikání rtg. záření.

Difrakční informace jsou získávány z velmi tenké povrchové vrstvy.

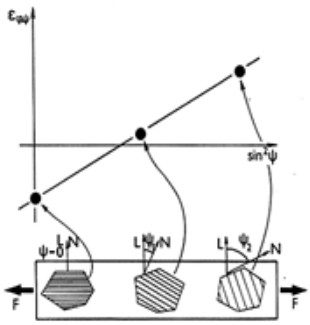
Předpokládáme dvojosý stav napjatosti v rovině povrchu.

Složku napětí $\sigma_{\varphi,\ \psi=0°} = \sigma_\varphi$ lze stanovit z mřížkových deformací pouze ve směru φ. Analytické vyjádření této tzv. metody "$\sin^2\psi$" má tvar:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = -\cot\theta_0\left(\theta_{\varphi,\psi} - \theta_0\right) =$$
$$= \tfrac{1}{2}s_2\sigma_\varphi \sin^2\psi + s_1\left(\sigma_1 + \sigma_2\right)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{-\cot\theta_0}{\tfrac{1}{2}s_2}\frac{d\theta_{\varphi,\psi}}{d\sin^2\psi};$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{\cot\theta_0}{-s_1}\left(\theta_{\varphi,\psi=0} - \theta_0\right).$$



Specifické rysy rentgenové difrakční analýzy napětí

1. Měření jsou omezena jen na krystalické látky nebo na krystalické fáze částečně amorfních materiálů.
2. Difrakční informace sou získány nedestruktivně z relativně velmi tenké (10^{-2} – 10^{-3} mm) povrchové vrstvy.
3. Mřížkové vzdálenosti, které slouží v difrakční tenzometrii jako "měrky", jejichž změnu velikosti určujeme, jsou asi o 8 řádů menší než "měrky" užívané obvyklými mechanickými nebo elektromechanickými metodami.
4. Selektivní povaha difrakce záření dává možnost stanovit napětí na jednotlivých složkách vícefázových soustav.
5. Makroskopická napětí se projevují na difrakčních diagramech změnou polohy difrakčních linií. Vznik mikroskopických napětí je doprovázen rozšířením linií. Difrakční metodou se proto dají napětí I. a II. druhu navzájem separovat.
6. Protože se vzdálenost rovin v krystalické mřížce mění pouze elastickou deformací a nikoliv deformací skluzem, detekuje rentgenová tenzometrická metoda spolehlivě pouze změny mezirovinných vzdáleností odpovídající mechanickým napětím.

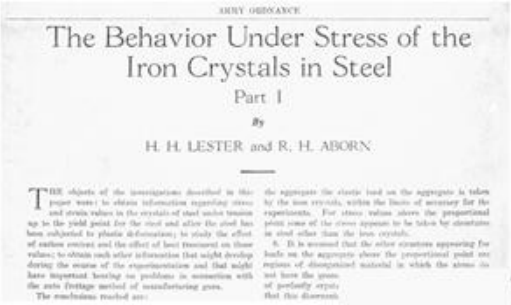
Vývoj metodiky difrakčního stanovení napětí I.

I když princip měření napětí byl Hookovým zákonem „jaké prodloužení, taková síla" formulován již v roce 1678, k jeho difrakční interpretaci došlo však teprve o 250 let později.

Wilhelm Conrad Röntgen (1845 -1923)

Vývoj metodiky difrakčního stanovení napětí II.

- Nejstarši informace o rentgenografickém výzkumu pocházejí z let 1913 – 1924 od Joffeho a Kirpičevové (Sant Petersburg) při určování elastických konstant monokrystalů kamenné soli (NaCl) a síranu vápenatého ($CaSO_4$).
- Pro měření napětí v polykrystalických materiálech aplikovali difrakci rentgenového záření poprvé až Lester a Aborn na přelomu let 1925 – 26 při studiu mřížkové deformace krystalků α-Fe.
- Praktický význam získala rentgenová tenzometrie teprve po roce 1930, kdy se začalo používat uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody na zpětný odraz
- První informace v Čechách – 1931 „Zkoušení materiálů rentgenovými paprsky" (P. Skulari, V. Miklenda).
- Napětí měřila v Československu pomocí rentgenových paprsků pravděpodobně jako první Adéla Kochanovská, když v roce 1936 hledala na žádost Škodových závodů příčinu praskání obalů pancéřových granátů. Protože se získané poznatky týkaly vojenské techniky, nemohly být publikovány.

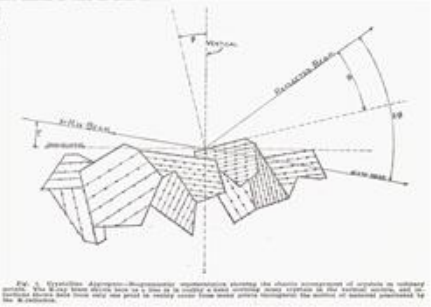

ARMY ORDNANCE

The Behavior Under Stress of the Iron Crystals in Steel

Part I

By

H. H. LESTER and R. H. ABORN



Vývoj metodiky difrakčního stanovení napětí II.

- Nejstarší informace o rentgenografickém výzkumu pocházejí z let 1913 – 1924 od Joffeho a Kirpičevové (Sant Petersburg) při určování elastických konstant monokrystalů kamenné soli (NaCl) a síranu vápenatého ($CaSO_4$).
- Pro měření napětí v polykrystalických materiálech aplikovali difrakci rentgenového záření poprvé až Lester a Aborn na přelomu let 1925 – 26 při studiu mřížkové deformace krystalků α-Fe.
- Praktický význam získala rentgenová tenzometrie teprve po roce 1930, kdy se začalo používat uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody na zpětný odraz.
- První informace v Čechách – 1931 „Zkoušení materiálů rentgenovými paprsky" (P. Skulari, V. Miklenda).
- Napětí měřila v Československu pomocí rentgenových paprsků pravděpodobně jako první Adéla Kochanovská, když v roce 1936 hledala na žádost Škodových závodů příčinu praskání obalů pancéřových granátů. Protože se získané poznatky týkaly vojenské techniky, nemohly být publikovány.

Prof. Adéla Kochanovská - Němejcová (1907-1985)

Vývoj metodiky difrakčního stanovení napětí III.

- V rozmezí let 1957 – 1961 byly vypracovány tři měřicí postupy (*metoda šesti expozic, metoda šikmých snímků a metodou* $\sin^2\psi$) založené na stejném principu.
- V současné době se užívá posledního názvu. Metoda $\sin^2\psi$, která zahrnuje klasické rentgenografické tenzometrické metody jako své speciální případy, představuje dodnes východisko pro hodnocení stavů zbytkové napjatosti.
- Na začátku 70. let byly pozorovány anomálie :
  - ✓ nelinearita závislosti $\varepsilon(\sin^2\psi)$,
  - ✓ různé deformace při úhlech $+\psi$ a $-\psi$ (ψ-rozštěpení).

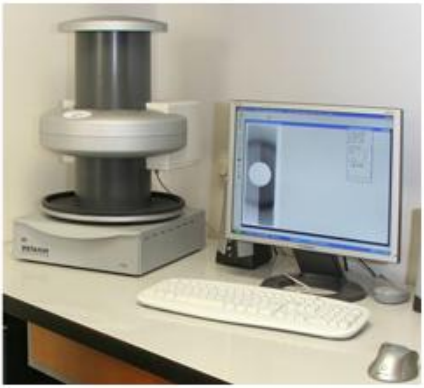
Co vlastně měříme?

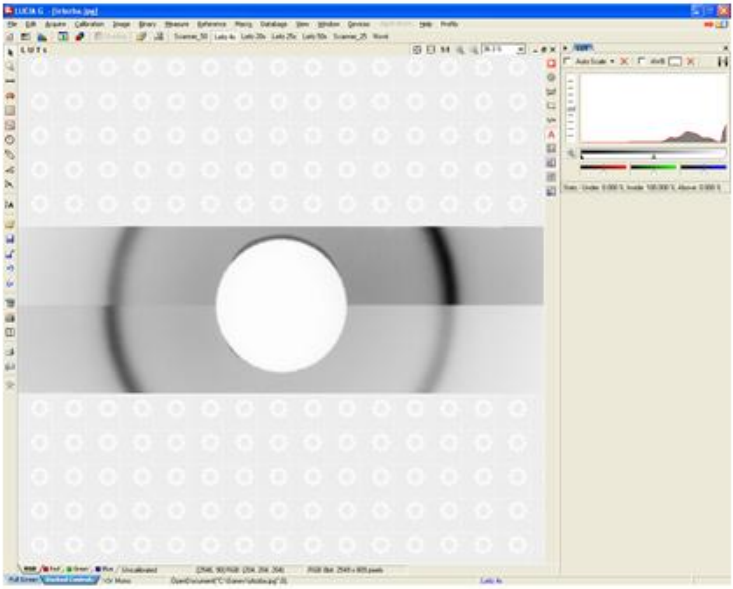
- Přehodnocení vlivu hloubky vnikání rentgenových paprsků do technických materiálů na výsledky měření.
- Efekt rozštěpení byl vysvětlen sklonem roviny hlavních napětí vzhledem k povrchu vzorku.
- Hadovité průběhy mřížkových deformací byly identifikovány jako projev textury.

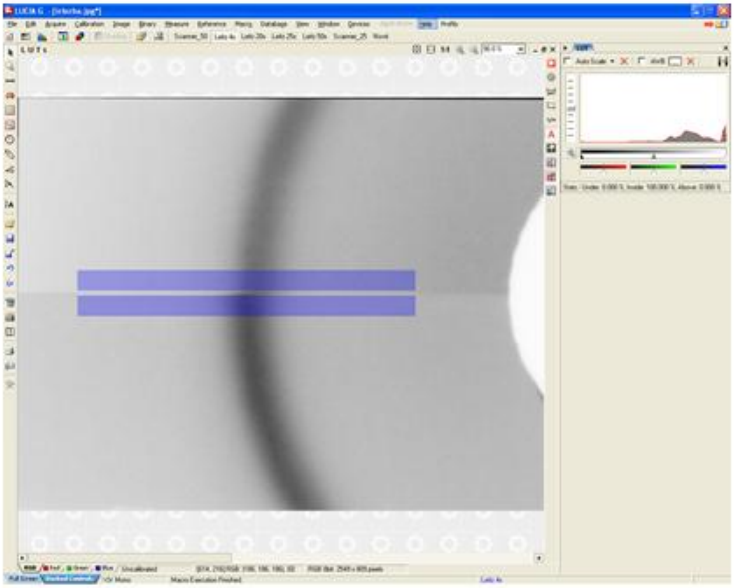
Výhled vývoje metodiky

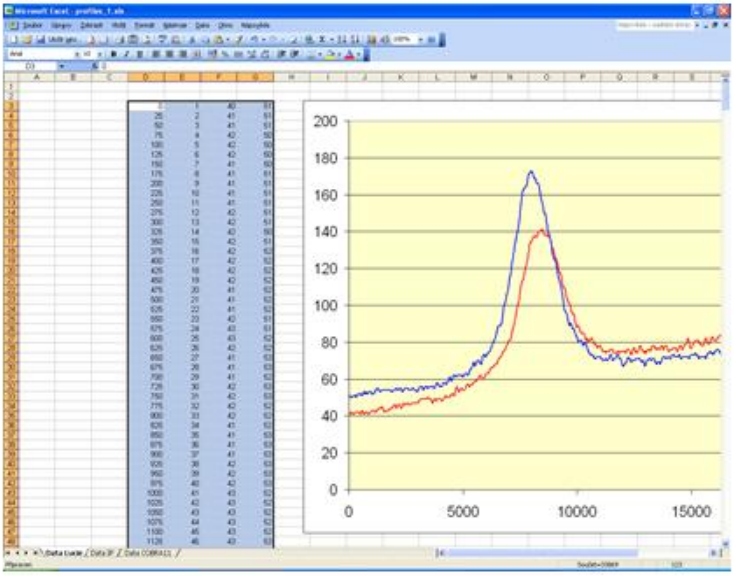
Vývoj metodiky rentgenové tenzometrie v posledních letech je ovlivňován především

- novými konstrukčními řešeními přístrojů („nástup“ θ/θ difraktometrů, mobilní zařízení),
- zdokonalením běžně používaných prvků rtg optiky (vrstevnatá zrcadla poskytující intenzivní paralelní svazek primárního záření),
- vývojem a cenovou dostupností nových typů pozičně citlivých detektorů, které umožňují významným způsobem (řádově) zkrátit dobu měření a
- zvýšeným zájmem o difrakční studium reálné struktury tenkých povrchových vrstev a nanokrystalických materiálů.








200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
5000
10000
15000

Výhled vývoje metodiky

Vývoj metodiky rentgenové tenzometrie v posledních letech je ovlivňován především

- novými konstrukčními řešeními přístrojů („nástup“ θ/θ difraktometrů, mobilní zařízení),
- zdokonalením běžně používaných prvků rtg optiky (vrstevnatá zrcadla poskytující intenzivní paralelní svazek primárního záření),
- vývojem a cenovou dostupností nových typů pozičně citlivých detektorů, které umožňují významným způsobem (řádově) zkrátit dobu měření a
- zvýšeným zájmem o difrakční studium reálné struktury tenkých povrchových vrstev a nanokrystalických materiálů.

“Prediction is very difficult – especially if it is about the future.”

– Niels Bohr

Rentgenografické elastické konstanty

Elastická anizotropie ovlivňuje naměřené výsledky.

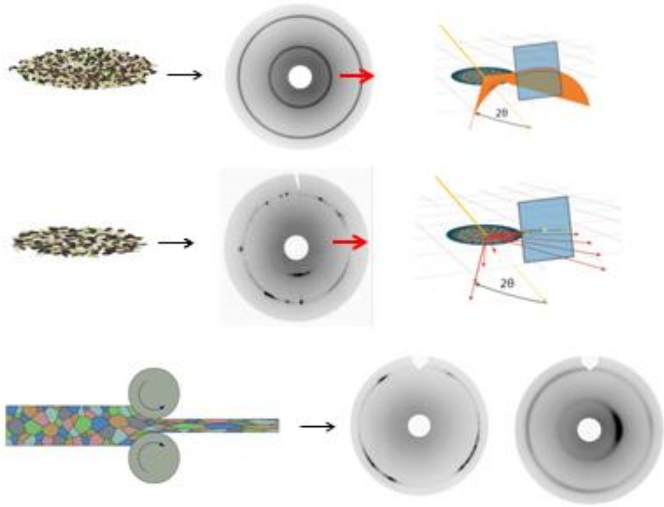
U mechanických měření deformace je efekt anizotropie „zprůměrován“.
Chování objektu lze považovat za kvaziizotropní.

Při rentgenografickém měření je elastická anizotropie respektována pomocí tzv. rentgenografických elastických konstant

$$(s_1)^{rtg} = -\left(\frac{\nu}{E}\right)^{rtg}, \qquad (\tfrac{1}{2}s_2)^{rtg} = \left(\frac{\nu+1}{E}\right)^{rtg}.$$

Jejich hodnoty lze buď vypočítat teoreticky, nebo určit experimentálně na základě měření mřížkových deformací ve vzorcích vystavených známému jednoosému namáhání.

Omezení možnosti aplikace rtg tenzometrie



Mechanické procesy zpevňovaní povrchu

Vhodná intenzita statického nebo dynamického mechanického účinku zajišťuje zpevnění povrchových vrstev provázené příznivým tlakovým pnutím a většinou lepší drsností povrchu. V zásadě existují dvě skupiny metod:

a) tváření povrchu za studena,

b) dynamické zpevňování povrchu volnými tělisky.

Značnou průmyslovou aplikaci v letectví, dopravě a energetice doznalo zpevňování povrchů opakovaným dynamickým rázem sférických tělísek. Úprava povrchů složitě namáhaných součástí dynamickou plastickou deformací má za následek:

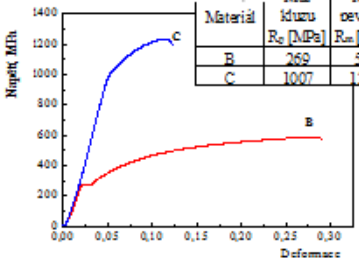
- zvýšení životnosti a spolehlivosti,
- snížení nákladů na dokončovací operace,
- zvýšení namáhání při stejné životnosti,
- snížení velikosti a váhy,
- použití pevnějších materiálů.

Studium distribuce zbytkových makroskopických a mikroskopických napětí v povrchových vrstvách balotinovaných ocelí

Zkušební vzorky 50 × 50 × 5 mm^3 byly vyrobeny z:

- Mn–Cr oceli pro chemicko–tepelné zpracování - ČSN 14 220 (B),
- Cr–Mo speciální korozivzdorné oceli M300 (C).

Materiál	Mez kluzu R_0 [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Max. prodlouž. ε_{max}
B	269	585	0,288
C	1007	1232	0,113



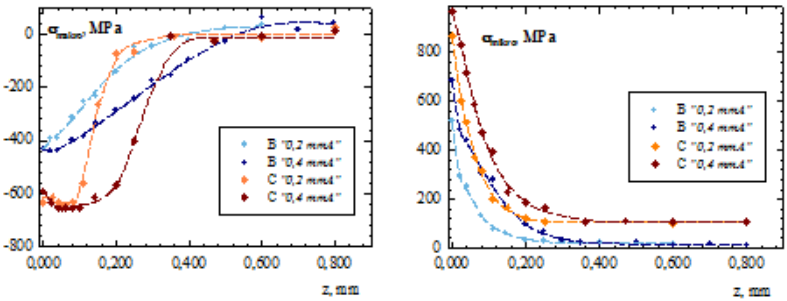
Zkouška analyzovaných vzorků tahem

Balotinování čtvercových povrchů 50 × 50 mm^2 vzorků bylo realizováno se dvěma odlišnými intenzitami dopadajících částic – 0,2 mmA, 0,4 mmA

Makroskopická napětí – metodou „$sin^2\psi$",

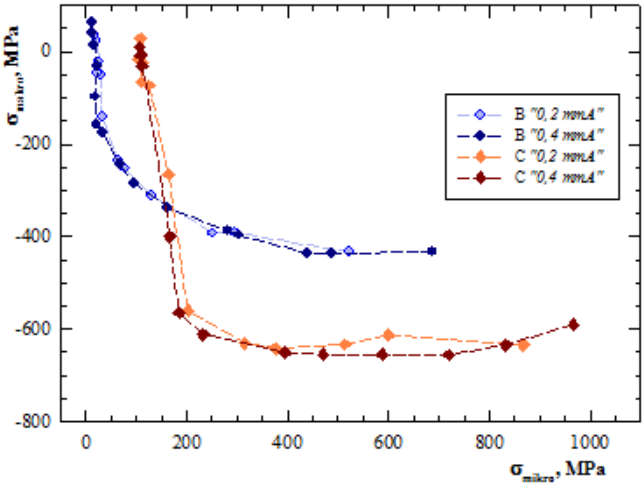
mikroskopické deformace – metodou tvarového faktoru.

Výsledky studia



Hloubkové průběhy podpovrchových zbytkových napětí vzorků B (14220) a C (M300)

- Ve všech analyzovaných případech byl pozorován izotropní rovinný stav zbytkové napjatosti.
- Materiál C má větší povrchové hodnoty zbytkových napětí (jak mikroskopických, tak tlakových makroskopických) než materiál B.
- Intenzita balotinování se z hlediska napětí projevuje zejména gradientem a hloubkou ovlivněné vrstvy.



Děkuji za Vaši pozornost.

Využití rentgenové difrakční analýzy při studiu integrity povrchu

Ing. Kamil Kolařík, Ph.D.

ČVUT Praha

VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU

Kamil Kolařík

seminář „INTEGRITA"

18. 2. 2013

OSNOVA

- SOUČASNÝ STAV RTG DIFRAKČNÍ TECHNIKY
  - LABORATORNÍ „STACIONÁRNÍ" DIFRAKTOMETRY
    - VELIKOST A TVAR OZÁŘENÉ OBLASTI
    - HLOUBKA VNIKÁNÍ RTG ZÁŘENÍ I
- MOŽNOSTI STUDIA REÁLNÉ STRUKTURY POVRCHU POMOCÍ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
    - MOŽNOSTI STUDIA GRADENTŮ
      - IDENTIFIKACE STRUKTURNÍCH NEHOMOGENIT POMOCÍ ZÁŘENÍ RŮZNÉ PRONIKAVOSTI
      - STANOVENÍ HLOUBKOVÝCH PROFILŮ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ
      - PŘÍKLADY KOMBINACE TENZOMETRICKÝCH METOD
    - HLOUBKA VNIKÁNÍ RTG ZÁŘENÍ II
  - MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY
- PŘÍKLADY APLIKACE RENTGENOGRAFICKÉ ANALÝZY V MATERIÁLOVÉM INŽENÝRSVÍ
  - DOPRAVNÍ PRŮMYSL
  - LETECKÝ PRŮMYSL
  - JADERNÝ PRŮMYSL
  - VŠEOBECNÉ STROJÍRENSTVÍ
  - DALŠÍ MOŽNOSTI RTG DIFRAKCE PŘI DIAGNOSTICE STROJNÍCH KOMPONENT

SOUČASNÝ STAV RTG DIFRAKČNÍ TECHNIKY I.

Vývoj metodiky rentgenové tenzometrie v posledních letech je ovlivňován především

- novými konstrukčními řešeními přístrojů („nástup“ θ/θ difraktometrů, mobilní zařízení),
- zdokonalením běžně používaných prvků rtg optiky (vrstevnatá zrcadla poskytující intenzivní paralelní svazek primárního záření),
- vývojem a cenovou dostupností nových typů pozičně citlivých detektorů, které umožňují významným způsobem (řádově) zkrátit dobu měření,
- zvýšeným zájmem o difrakční studium reálné struktury tenkých povrchových vrstev a nanokrystalických materiálů.

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

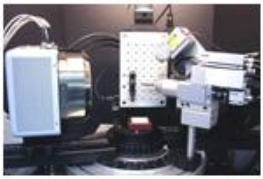
SOUČASNÝ STAV RTG DIFRAKČNÍ TECHNIKY II.

LABORATORNÍ „STACIONÁRNÍ“ DIFRAKTOMETRY

SOUČASNÝ STAV RTG DIFRAKČNÍ TECHNIKY III.

LABORATORNÍ „STACIONÁRNÍ“ DIFRAKTOMETRY

VERTIKÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

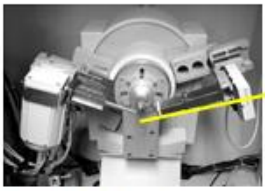


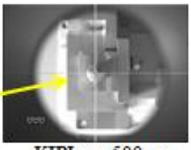
HORIZONTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

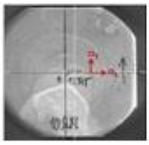
SOUČASNÝ STAV RTG DIFRAKČNÍ TECHNIKY IV.

VELIKOST A TVAR OZÁŘENÉ OBLASTI





KIPL – ø 500 µm



a) klasická měření
b) úzce lokální vlastnosti
c) tenké vrstvy např. 100 nm
d) analýza větších ploch - integrace

e) analýza za působení vnějších vlivů – např. teplota

STANOVENÍ HLOUBKOVÝCH PROFILŮ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

Závislosti složek tenzoru napětí σ_{ij} na vzdálenosti T od povrchu mohou mít pro předpověď pevnostních vlastností výrobků často větší význam než pouze povrchové hodnoty $\sigma_{ij}(0)$. Různé podmínky opracování mohou vést k analogickým povrchovým hodnotám napětí.

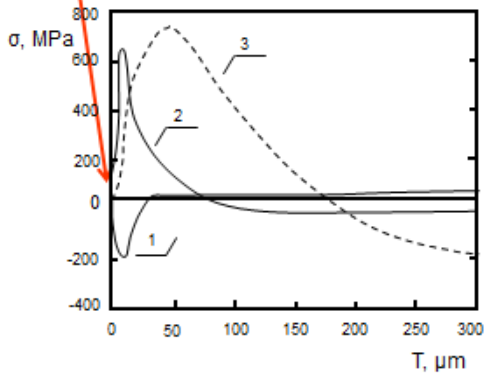
Proto je nutné stanovit jejich hloubkový profil.

Distribuce zbytkových napětí v důsledku broušení kalené oceli;

1 – jemné broušení,

2 – běžné podmínky

3 – hrubování



Residual Stress measurements by X-Ray Diffraction – SAE HS-787. (SAE Information report, 2008 Edition)

HLOUBKA VNIKÁNÍ RTG ZÁŘENÍ I.

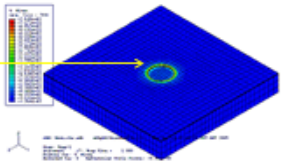
MOŽNOSTI STUDIA GRADENTŮ

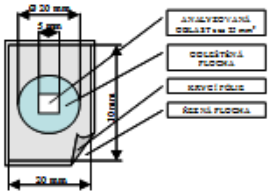
Mechanické metody podávají informaci o hloubkovém průběhu zbytkových napětí.
Efektivní hloubka vnikání I^P u rtg záření při použití chromové anody a ω goniometru je:

- pro difrakční linii {211} α–Fe **4,52 μm,**
- pro difrakční linii {220} γ–Fe **jen 2,73 μm.**

(I^P určuje tloušťku vrstvy, ze které difraktuje 63,2 % energie difraktované vrstvou nekonečné tloušťky).

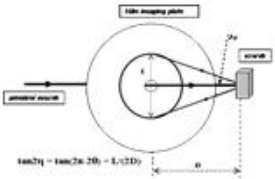
Elektrolytické leštění patří mezi povrchové úpravy kovových materiálů, při které nedochází k mechanickému zásahu do materiálu, čímž je potlačen vznik zbytkových napětí a mikrotrhlin





IDENTIFIKACE STRUKTURNÍCH NEHOMOGENIT POMOCÍ
ZÁŘENÍ RŮZNÉ PRONIKAVOSTI II.

Záření	Ti Kα	Cr Kα	Cu Kα
λ, nm	0,27496	0,22909	0,15412
T^e, µm	6,66	11,22	35,96
θ_{Al} (hkl)	73,03° (220)	78,69° (222)	81,41° (511)



Soustružený povrch

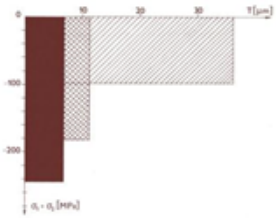
Balotinovaný povrch

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

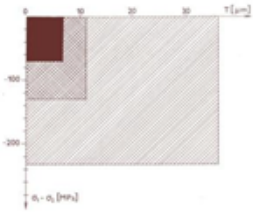
IDENTIFIKACE STRUKTURNÍCH NEHOMOGENIT POMOCÍ
ZÁŘENÍ RŮZNÉ PRONIKAVOSTI II.

Záření	Ti Kα	Cr Kα	Cu Kα
λ, nm	0,27496	0,22909	0,15412
T^e, µm	6,66	11,22	35,96
θ_{Al} (hkl)	73,03° (220)	78,69° (222)	81,41° (511)

Součty hlavních napětí stanovené zářením různé pronikavosti



a) na soustruženém povrchu

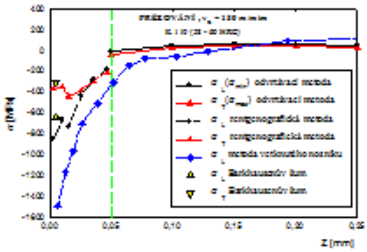


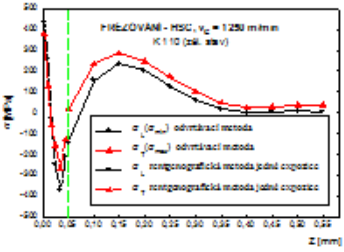
b) na balotinovaném povrchu

prof. Nikolaj Ganev

PŘÍKLADY KOMBINACE TENZOMETRICKÝCH METOD

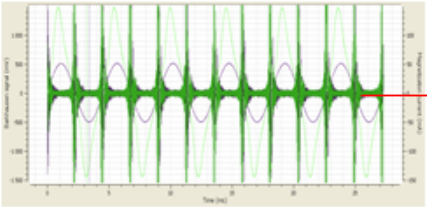
PŘI STANOVENÍ HLOUBKOVÝCH PRŮBĚHŮ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

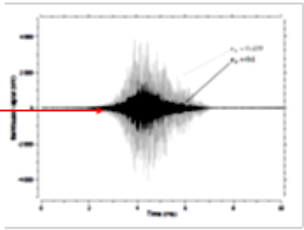


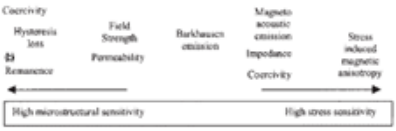


HLOUBKA VNIKÁNÍ

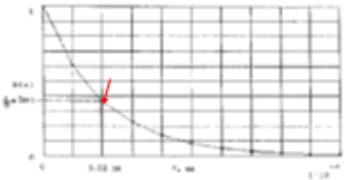
magnetoelastická analýza – Barkhasenův šum







Withers P. J. and Bhadeshia H. K., "Residual stress – part 1," *Materials Science and Technology*, 14(4), pp. 355-365 (2001). ISSN 0267-0836



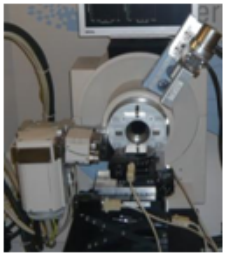
Function. $D(x)$ calculated for $\mu_r = 1000$, $\sigma = 5 \cdot 10^6$ S/m², $f = 70$-200 kHz
$\mu_r(Fe) = 300$ - $10\,000$, $\mu_r(Co) = 80$ - 200

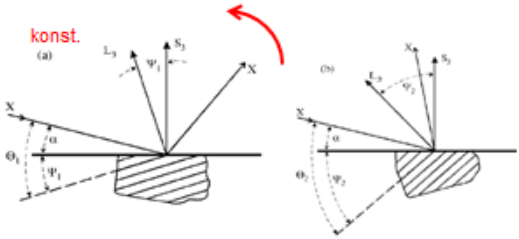
S. Tiitto et al., *Spectral Damping in Barkhausen noise*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-11, No. 6, 1975

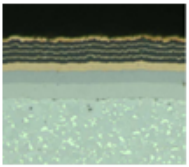
HLOUBKA VNIKÁNÍ RTG ZÁŘENÍ II.

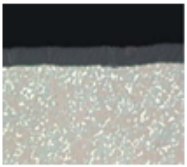
STUDIUM ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V TENKÝCH VRSTVÁCH

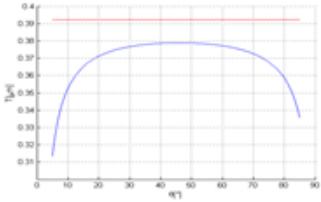
geometrie tečného svazku (GID) - „multi hkl“











Efektivní hloubka vnikání I^p u rtg záření do α–Fe při použití kobaltové anody $\alpha = 2$ °

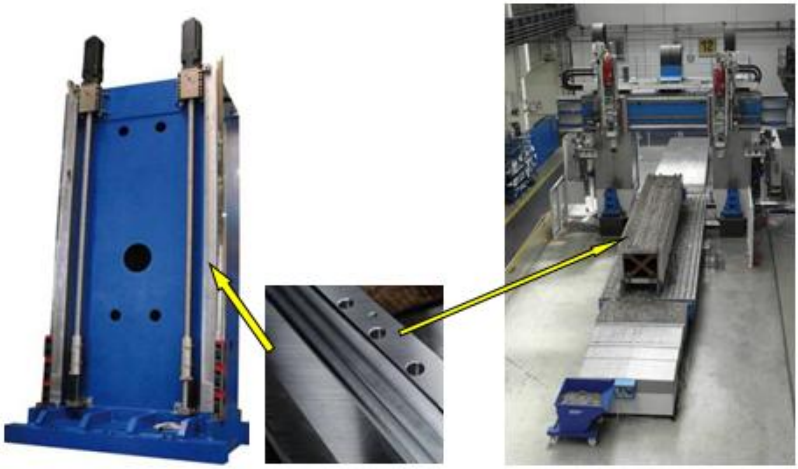
Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY I.

VELIKOST VZORKU

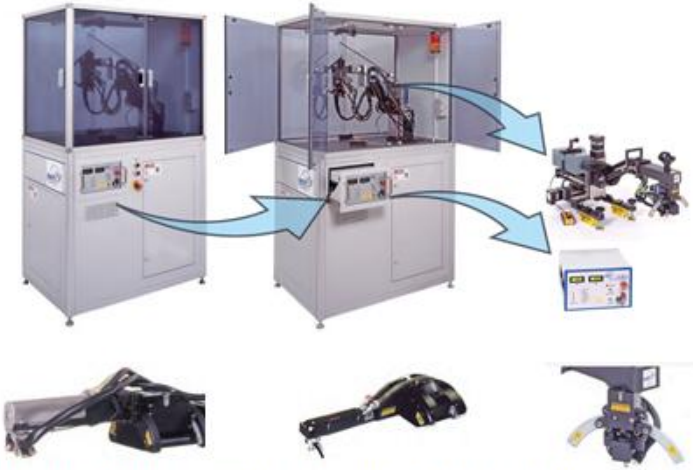
MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY II.

VELIKOST VZORKU



Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY III.

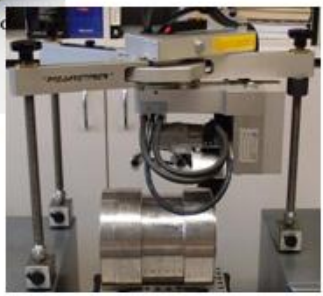


Odlišná uspořádání umožňují díky své konstrukci analyzovat zbytková napětí i místech, která **jsou pro klasicky řešené difraktometry nedostupná**.

MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY IV.

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY V.



Přenosný difraktometr X-STRESS 3000 se skládá z goniometru (G), centrální jednotky (CJ) a software (S)

MOBILNÍ DIFRAKTOMETRY VI.

Nový goniometr G3 umožňuje díky své excentrické konstrukci analyzovat zbytková napětí i místech, která jsou pro klasicky řešené difraktometry nedostupná.

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

PŘÍKLADY APLIKACE RENGENOGRAFICKÉ ANALÝZY V MATERIÁLOVÉM INŽENÝRSVÍ A STROJÍRENSVÍ

Aplikace v dopravním průmyslu

- Broušená a válečkovaná sedla náprav.
- Broušené a válečkované vačkové hřídelů vysokotlakých čerpadel.
- Laserem svařované komponenty kolejových vozidel.
- Kuličkovaná parabolická a šroubová pružina.

Aplikace v leteckém průmyslu

- GT lopatky leteckého motoru M 601 (frézování, broušení, balotina, tep. zatěžování).
- Vliv řezné rychlosti a typu nástroje při soustružení - polotovary pístnic leteckého podvozku.
- Příruba leteckého difuzoru přídavného motoru BOEING (frézování, EDM).

Aplikace v jaderném průmyslu

- Relaxace zbytkových napětí po působení korozního a radioaktivního zatížení v prostředí reaktoru.

Aplikace ve všeobecném strojírenství

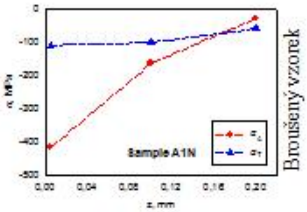
- Optimalizace řezného technologického procesu frézování vodicích ploch obráběcích center za účelem náhrady operace broušení.
- Popis reálné struktury po aplikaci elektroerozivního hloubení nástrojových ocelí.

Další možnosti rtg difrakce při diagnostice strojních komponent

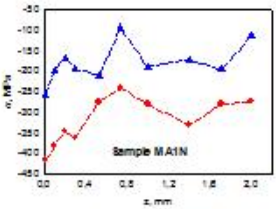
- Fázové složení loží horizontálních center při opakovaných problémech s opotřebením a vylamováním řezných nástrojů.
- Vliv textury (přednostní orientace zrn) při lisovacích technologiích.

BROUŠENÁ A VÁLEČKOVANÁ SEDLA NÁPRAV

Zadavatel požadoval měření axiálních a tangenciálních zbytkových napětí na povrchu a v hloubkách 0,1, 0,2 a 0,3 mm (broušený vzorek). U válečkovaného vzorku měl zadavatel zájem o stanovení zbytkových napětí v hloubkách 0,3 – 2 mm.



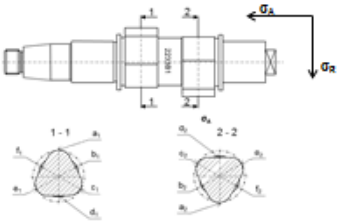
Broušený vzorek

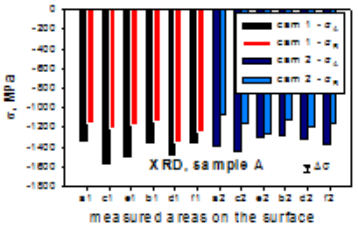


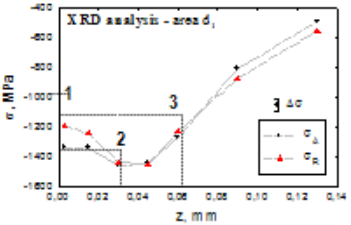
Válečkovaný vzorek

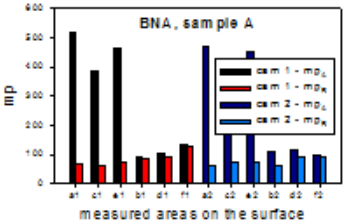
BROUŠENÉ A VÁLEČKOVANÉ VAČKOVÉ HŘÍDELE VYSOKOTLAKÝCH ČERPADEL

Difrakční experimenty byly provedeny za účelem ověření vlivu broušení a válečkování na stav zbytkové napjatosti v podpovrchových vrstvách vačkových hřídelí vysokotlakých čerpadel.



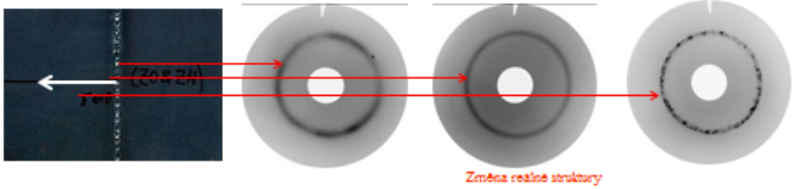


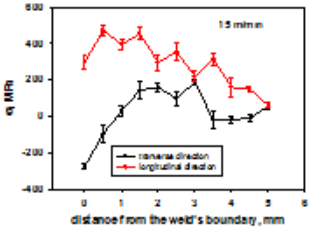


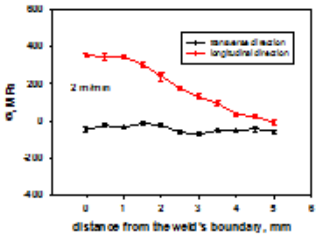


LASEROVĚ SVAŘENÉ KOMPONETY KOLEJOVÝCH VOZIDEL

Předmětem tohoto zadání bylo stanovení povrchových gradientů zbytkových napětí v okolí laserem vytvořeného sváru (odlišné posuvy laserového svazku) na deskách z oceli *S355*.







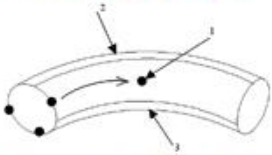
Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

KULIČKOVANÁ PARABOLICKÁ A ŠROUBOVÁ PRUŽINA

Vzorky byly odebrány z kuličkované parabolické pružiny. První list byl kuličkován odlišnou intenzitou než druhý vzorek.

Tenzometrická analýza byla provedena v **podélném směru přibližně** uprostřed na tahové straně listu

Předmětem tohoto zadání bylo stanovení hloubkového profilu zbytkového napětí vzorku odebraného z kuličkované šroubové pružiny. Vzorek byl okuličkován a odmáčknut na blok (závit na závit). **Vnější strana** byla kuličkována odlišnou intezitou než vnitřní strana.

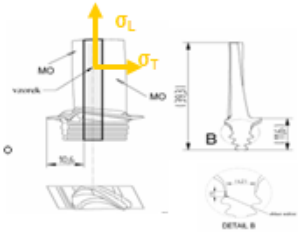


Rtg tenzometrická analýza byla realizována ve třech místech, a to na vnitřním (1), vnějším (2) a spodním (3) povrchu, vždy ve směru kolmém k **vnitřnímu vláknu pružiny**.

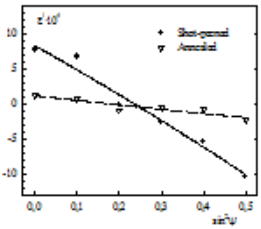
Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

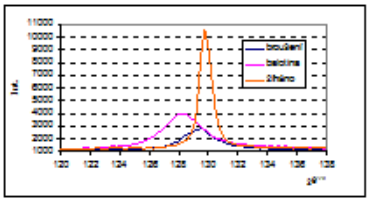
GT LOPATKY LETECKÉHO MOTORU M 601

Předmětem tohoto zadání bylo stanovení povrchových hodnot zbytkových napětí na GT lopatkách z Ni slitiny Nimonic (ŽS6K – VI) po finálních technologiích (frézování, broušení a balotinování) a tepelném zatěžování.



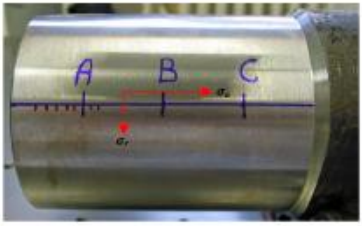
Technologie	σ_L, MPa	σ_T, MPa
Frézování	400 ± 23	-----
Hrubé broušení	451 ± 50	-21 ± 36
Jemné broušení	7 ± 89	- 528 ± 30
Balotina	- 615 ±122	- 684 ± 83
Žíhání (650 °C/100 hodin)	- 110 ±45	- 117 ±29

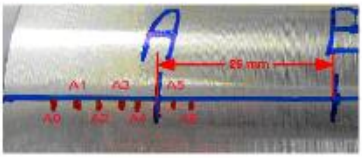


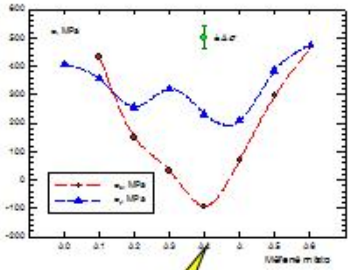


POLOTOVARY PÍSTNIC LETECKÉHO PODVOZKU

Předmětem těchto difrakčních experimentů bylo stanovení vlivu rozdílných pracovních podmínek a typů nástrojů při soustružení na rozložení povrchového zbytkového napětí.





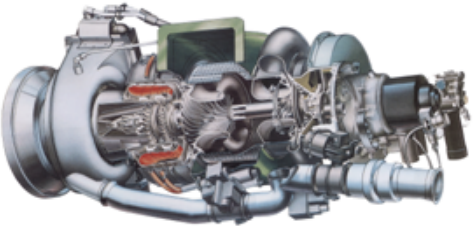


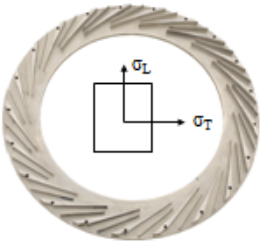
Náhlý pokles je způsoben: nestabilitou řezu nebo místní materiálovou nehomogenitou obrobku.

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

PŘÍRUBA LETECKÉHO DIFUZORU PŘÍDAVNÉHO MOTORU BOEING

Difrakční experimenty byly provedeny za účelem ověření zavedení nové technologie (EDM) která vedla ke snížení nákladů výroby (frézování). Ni slitina Inconel 718.





Zkoumaná technologie	σ_T, MPa	σ_L, MPa	a_e [nm]
EDM grafitová elektroda -dokončování	+483 ± 64	+433 ± 47	0,35973
EDM Cu elektroda -dokončování	0 ±15	-1 ± 62	0,36034
EDM grafitová elektroda - hrubování	+388 ± 59	+292 ± 64	0,35936
EDM Cu elektroda -hrubování	+217 ± 34	+321± 77	0,35845
Čelní **frézování** - sousledné	-798±57	-343±24	0,36167
Čelní **frézování** - nesousledné	-546±47	-405±67	0,36170

Difuzor - přeměna kinetické energie na energii tlakovou (součást kompresoru proudového motoru).

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

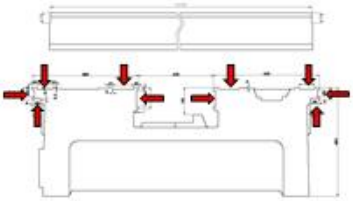
RELAXACE ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ PO APLIKACI WJP a FLP

Tenzometrická analýza opracovaných povrchů Ni slitiny Inconel 600 po aplikaci WJP a FLP při studiu relaxace zbytkových napětí po působení korozního a radioaktivního zatížení v prostředí reaktoru.

Used surface treatment	State of the specimen	σ_T, MPa	σ_L, MPa
Water jet peening	Before	–442 ± 41	–501 ± 32
	After	–293 ± 24	–320 ± 25
Fiber laser peening	Before	–640 ± 57	–334 ± 37
	After	–436 ± 37	–166 ± 48

VEDENÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ TOS PRIMA I

Optimalizace řezného technologického procesu frézování za účelem náhrady operace broušení.



Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

VEDENÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ TOS PRIMA I

Sample	a_p [mm]	d [mm]	f [mm·min^{-1}]	v_c [m·min^{-1}]	f_z [mm]
SE2	0.5	63	1050	350	0.10
SE3	0.3				
SA2	0.5	100	570	300	0.10
SA3	0.3				
WA2	0.5	160	500	60	0.17
WA3	0.3				

sample	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]	$\varepsilon^{micro} \times 10^4$	Ra [μm]	HV 0.2
SE2	−353	−125	24.7	0.09	762
SE3	+31	+311	30.4	0.14	758
SA2	−113	−137	29.7	0.23	769
SA3	−150	−179	28.4	0.22	762
WA2	−451	−520	35.9	0.75	835
WA3	−390	−395	36.7	0.71	818

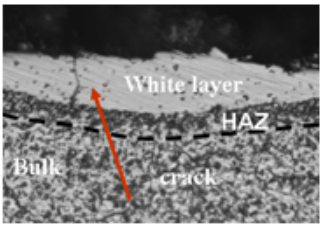
ELEKTOREROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Zkušební vzorky 150 × 30 × 8 mm³ byly vyrobeny z nástrojové oceli *W 300* (výrobce Böhler; ČSN 19 552) jak v základním (Z) tak i v zušlechtěném (K) stavu.

Elektroerozivní obrábění (EDM) bylo realizováno na stroji s impulsním generátorem pracujícím v režimu nepřímé polarity (nástroj +, obrobek -).

a) **Dokončování** bylo provedeno grafitovou a měděnou elektrodou. Cílem bylo dosažení drsnosti povrchu $Ra \approx 1{,}8$ µm,

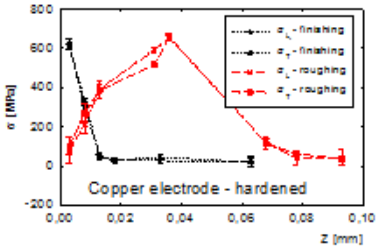
b) **hrubování** - grafitovou a měděnou elektrodou.Cílem hrubovacího cyklu bylo dosažení povrchu Ra ≈ 6,3 µm.

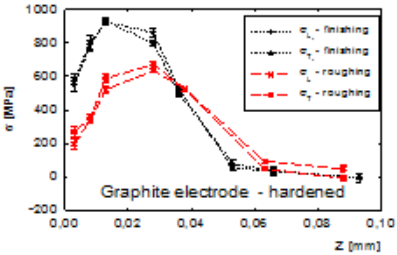


%	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
1	2.18	0.88	0.26	3.14	1.09	91.60
2	2.27	1.09	0.21	3.32	1.09	91.25
3	1.14	1.07	0.24	4.01	0.19	92.27

Kamil Kalafík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

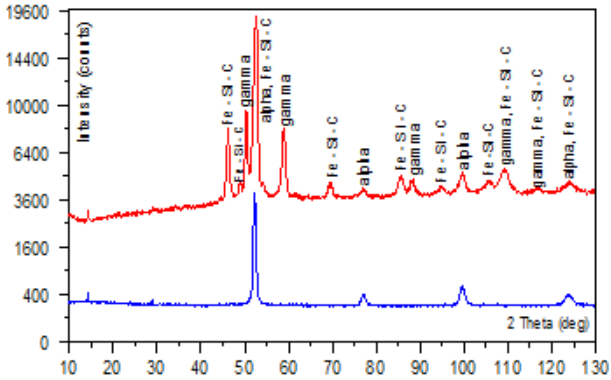
ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ





- Na všech vzorcích opracovaných EDM byl identifikován **dvojosý izotropní stav** zbytkové makroskopické napjatosti, tj. $\sigma_L \approx \sigma_T$.
- Povrchová zbytková napětí vzniklá po režimu hrubování jsou systematicky nižší v porovnání s výslednými povrchovými zbytkovými napětími vzniklými po režimu dokončování.
- Nižší hodnoty zbytkových napětí získané na povrchu v porovnání z vyššími hodnotami pod povrchem jsou důsledkem vzniku trhlin, které vznikly překročením meze pevnosti.
- Další pokles zbytkových napětí z maximální hodnoty je výsledkem rovnováhy mezi deformovanými vrstvami a elastický napjatou vrstvou základního materiálu.

ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ



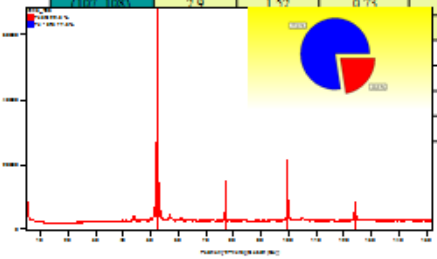
Difrakční záznam: povrch – bílá vrstva (červeně), základní materiál (modře). EDM (K) Gr-H.

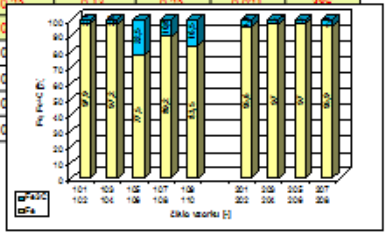
Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

DALŠÍ MOŽNOSTI RTG DIFRAKCE PŘI DIAGNOSTICE STROJNÍCH KOMPONENT I

Analýza fázového složení litiny při opakovaných problémech s opotřebením a vylamováním řezných nástrojů.

	C	Si	Mn	S	P	Cr	As	HB
Obsah	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[---]
Bílá litina	2,4 - 4,5	0,3 - 1,6	0,4 - 1	--------	--------	--------	--------	--------
Šedá litina	2,8 - 3,6	1,4 - 2,8	0,5 - 1	max 0,15	0,2 - 0,6	--------	--------	--------
(101, 102)	3,8	1,76	0,77	0,09	0,10	0,08	0,005	167
(103, 104)	3,2	1,36	1,00	0,11	0,06	0,10	0,011	189
(105, 106)	3,2	1,50	0,74	0,26	0,14	0,26	0,026	368
(107, 108)	2,9	1,52	0,73	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]



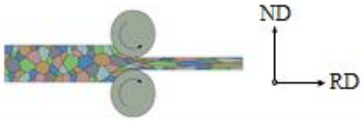


DALŠÍ MOŽNOSTI RTG DIFRAKCE PŘI DIAGNOSTICE STROJNÍCH KOMPONENT II

TEXTURA = přednostní orientace krystalitů, anizotropní vlastnost.

Některé vlastnosti (např. elastické, elektrické) se mohou vlivem textury měnit o 20 – 50 %.

Vytváření textury při válcování plechů.



Vliv textury na vytváření „oušek" při tažení plechů.

Kamil Kolařík
VYUŽITÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY PŘI STUDIU INTEGRITY POVRCHU
LABORATOŘ STRUKTURNÍ RENTGENOGRAFIE
Katedra inženýrství pevných látek
FJFI, ČVUT v PRAZE

ZÁVĚR

- **Hlavním záměrem tohoto příspěvku bylo uvedení příkladů aplikací rtg difrakční analýzy** při studiu zbytkových napětí vznikajících v důsledku povrchového technologického opracování strojních komponent z různých druhů ocelí a Ni slitin.
- **Rtg difrakce v kombinaci s elektrolytickým leštěním** (bezsilový způsob odstranění materiálu) je vhodná převážně **ke studiu gradientů tenkých povrchových vrstev**, vniklých po technologických „dokončovacích" operací.
- **Rtg difrakční techniky nejsou omezené do takové míry tvarem a mechanickými vlastnostmi** (např. tvrdost) strojních komponent jako je tomu u jiných tenzometrických metod. Navíc mohou poskytovat **informace o zastoupení jednotlivých fází a textuře – přednostní orientaci zrn** (vznikající např. při technologii válcování a protlačování) na analyzované řezné ploše.

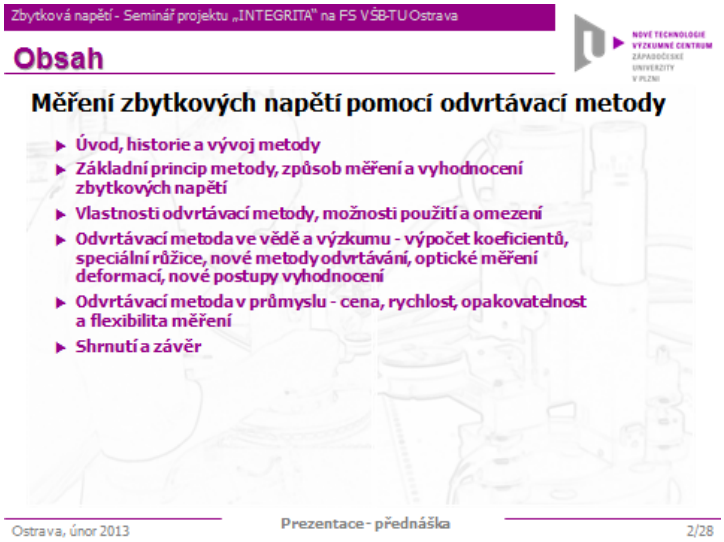
Děkuji za Vaši pozornost.

kipl.fjfi.cvut.cz

Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu

Ing. Michal Švantner, Ph.D.

ZČU Plzeň



Úvod, historie a vývoj

NOVÉ TECHNOLOGIE VÝZKUMNÉ CENTRUM ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

Zbytková napětí

- Jsou v materiálu bez působení vnějších sil
- Vznikají v důsledku technologických postupů výroby a zpracování materiálu nebo při jeho namáhání v provozu
- Mají vliv na pevnostní, únavové nebo další charakteristiky materiálu
- Podle lokální prostorové změny se zbytková napětí rozdělují na makroskopická, mikroskopická a submikroskopická
- **Makroskopická zbytková napětí**
  - Jsou homogenní na oblastech řádově větších než je velikost zrna
  - Pojí se s vnějším zatížením tělesa a ovlivňují jeho pevnostní vlastnosti

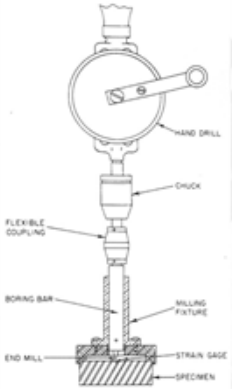
- Mohou se **uvolňovat (relaxace) nebo přerozdělovat** (např. při mechanickém namáhání, **porušení materiálu**, vlivem stárnutí, snížením meze kluzu (ohřev) apod.
- Relaxace zbytkových napětí může být spojena s vnější změnou tvaru nebo deformací tělesa

Úvod, historie a vývoj

NOVÉ TECHNOLOGIE VÝZKUMNÉ CENTRUM ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

- **1934, Mathar**, první návrh na měření zbytkových napětí pomocí odvrtání otvoru
- **1949, Soete**, použití tenzometrů pro měření uvolněných deformací v okolí otvoru
- **1966, Rendler a Vigness**, systematická a opakovatelná procedura aplikace odvrtávací metody
- **Rozvoj metody** z hlediska technik odvrtávání, měření deformací a vyhodnocení zbytkových napětí
- **1981, Schajer**, použití numerických metod (MKP) k vyhodnocení zbytkových napětí z uvolněných deformací
- **Další rozvoj díky využití MKP metod**
  - Zbytková napětí nekonstantní po hloubce
  - Nehomogenní materiály - např. povlaky
  - ....
- **ASTM E 837** - standardizace základního provedení metody pro homogenní napětí po hloubce (Americká společnosti pro mechaniku)

Jedna z nejpopulárnějších metod pro měření zbytkových napětí - až. 30 %
(studie National Physical Lab., Teddington, UK, 2001)



Odvrtávací zařízení
Ilustrace z článku Rendler N. J., Vigness I., Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses, Experimental Mechanics, 6 (12), 577-586, 1966

Princip a použití metody

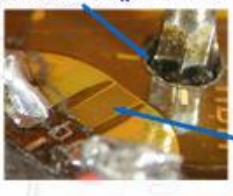
Princip metody

- Odvrtání otvoru ⇨ uvolnění zbytkových napětí uvnitř materiálu
- Uvolnění napětí ⇨ deformace v okolí otvoru
- Měření uvolněných deformací v okolí otvoru ⇨ většinou pomocí tenzometrů
- Uvolněné deformace ⇨ výpočet původních zbytkových napětí v materiálu

Hlavní body experimentu:

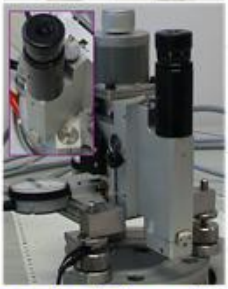
- Odvrtávání
- Měření deformací
- Vyhodnocení zbytkových napětí

Schéma principu odvrtávací metody



Princip a použití metody

Odvrtávání - běžná konfigurace - komerční měřicí systémy



Odvrtávací frézy a měřicí zařízení HBM SINT MTS3000

- **Odvrtání otvoru s definovanou geometrií a minimalizací vnesení dalších napětí**
- **Přesné umístění otvoru** (střed tenzometrické růžice) **a přesně definovaná hloubka**
- **Čelní válcová fréza - průměr otvoru cca 2 mm**
  - ⇒ Wolfram-karbidové nástroje
  - ⇒ Diamantové brusné nástroje
- **Vysokorychlostní odvrtávání ⇒ minimalizace vnesení dalších napětí**
  - ⇒ Pohon frézy pomocí vzduchové turbínky
  - ⇒ Rychlost nástroje až 300 tis. ot. za min
- **Přesné umístění otvoru pomocí zaměřovacího mikroskopu** (výklopná hlava s uchycením nástroje)
- **Řízení hloubky otvoru pomocí krokového motoru** (postupné odvrtávání otvoru po inkrementech cca 20 um až do hloubky 0.5 mm

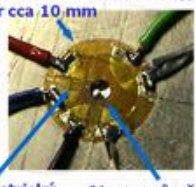
Využívají se i jiné konfigurace (např. jiné typy nástrojů, elektrický pohon zařízení apod.), zařízení dodává více firem.

Princip a použití metody

Měření deformací - komerční senzory pro měření zbytkových napětí

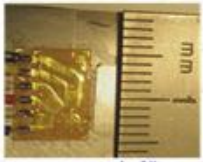
- **Měření deformací minimálně ve 3 nezávislých směrech ⇨ vyhodnocení velikosti a směru hlavních napětí** (nejčastěji tenzometrické elementy posunuté o 45°)
- **Odporové tenzometry** - tenzometrické růžice (různé tvary a typy, přesnost cca 0.1 um/m)
- Standardní postupy úpravy povrchu, lepení a využití doplňujících materiálů (např. krycích materiálů)
- **Úprava povrchu před nalepením tenzometru ⇨ nesmí být ovlivněna zbytková napětí!!!**
- Standardně se využívá můstkové zapojení (tenzometrický půlmost nebo plný most) ⇨ vyšší přesnost než v případě jiných typů zapojení
- Sběr a uložení dat ⇨ analogové nebo digitální měřicí ústředny

Tenzometrická růžice HBM, typ A, průměr cca 10 mm



Tenzometrický element

Otvor, průměr cca 2 mm



Tenzometrická růžice pro měření v blízkosti překážek (typ C)

Digitální měřicí ústředna HBM Spider8

Princip a použití metody

Vyhodnocení zbytkových napětí

- **Měření - průběhy uvolněných deformací v závislosti na hloubce otvoru**
- **Vyhodnocení - výpočet původních zbytkových napětí**

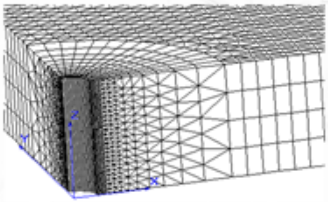
Průchozí otvor a homogenní zbytkové napětí (konstantní po hloubce)

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos(2\theta)$$

$$\sigma_{x,y} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2}$$

$$P = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_2}{4A} \qquad T = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{4B} \qquad Q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4B}$$

$$A = -\frac{1+\nu}{2E}\frac{1}{R^2} \qquad B = -\frac{1+\nu}{2E}\left(\frac{4}{1+\nu}\frac{1}{R^2} - \frac{3}{R^4}\right)$$



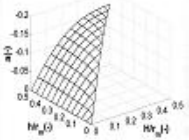
Koeficienty A, B

- **Stanoveny analyticky**
- Závislé pouze na rozměrech tenzometrické růžice, rozměrech otvoru a materiálových vlastnostech měřeného materiálu
- **Konstantní pro dané měření**

Princip a použití metody

Vyhodnocení zbytkových napětí

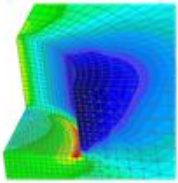
$$\varepsilon(h,H) = \int_0^h A(h,H)\cdot\sigma(H)\,dH \Rightarrow \varepsilon_i = \sum_{j=1}^{i} A_{i,j}\,\sigma_j$$



- Otvor konečné hloubky s proměnným napětím po hloubce
- Postup vyhodnocení vychází z průchozího otvoru a homogenních napětí
- Nutné uvažovat celkovou hloubku otvoru i hloubku působení příspěvku uvolněných napětí
- **Koeficienty** - integrální funkce rozměrů tenzometrické růžice, rozměrů otvoru a materiálových vlastností měřeného materiálu, hloubky otvoru a místa (hloubky) působení napětí v otvoru

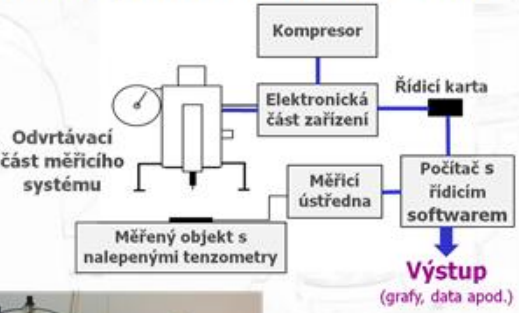
Koeficienty A, B

- **Stanoveny numericky - MKP výpočet**
- Integrální hodnoty - diskretizace (deformace ⇨ vektory, koeficienty A, B ⇨ matice)
- Postup experimentu a nároky na vyhodnocení ⇨ **metoda vyhodnocení**
  - ⇨ Metoda ekvivalentních homogenních napětí (ASTM)
  - ⇨ Integrální metoda
  - ⇨ další .... metoda průměrného napětí, metoda přírůstku deformace, Kockelmannova metoda, spline metoda, metoda mocninných řad ...



Princip a použití metody

Experimentální systém HBM SINT MTS3000



Pracoviště pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou (měřicí zařízení HBM Restan SINT MTS3000)

Princip a použití metody

Postup provedení experimentu

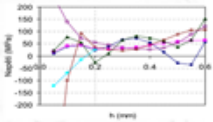
Příprava měření
příprava povrchu vzorku, nalepení tenzometrů, připájení vodičů, zapojení, příprava zařízení, nastavení nulové hloubky, vyvážení tenzometrického můstku)

Provedení odvrtávání
postupné odvrtávání po cca 20 um, mezi jednotlivými kroky pauza pro dochlazení, celková hloubka cca 0.5 mm, proměření otvoru

Kalibrační koeficienty
Výpočet koeficientů, zpracování a transformace kalibračních matic, příprava pro zvolenou metodu vyhodnocení

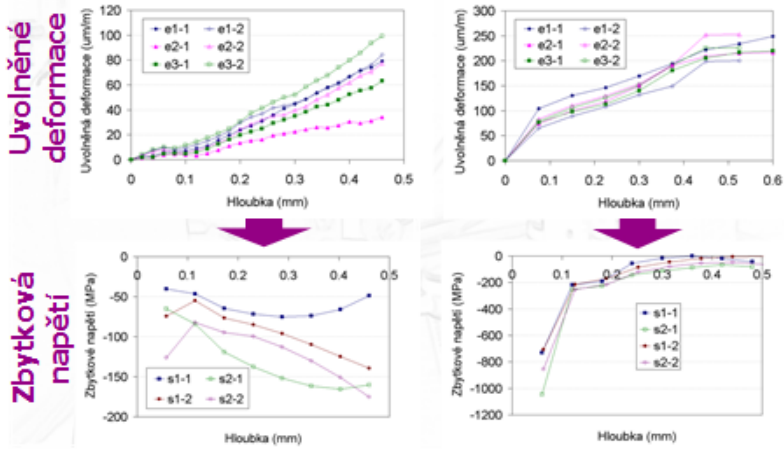
Vyhodnocení zbytkových napětí
zpracování naměřených deformací, výpočet zbytkových napětí podle zvolené metody

Výstup
hodnoty zbytkových napětí, grafy, zprávy apod.



Princip a použití metody

Příklad výstupu měření zbytkových napětí



Vlastnosti, možnosti a omezení metody

- **Semidestruktivní** - dochází k částečnému poškození materiálu (odvrtaný otvor 1-2 mm) ⇨ poškození v některých případech neovlivňuje další použití vzorku (technologické přídavky).
- **Dvouosé napětí - makronapětí v rovině povrchu materiálu.**
  - Lze měřit gradient napětí po hloubce od povrchu.
  - Při gradientech napětí po povrchu měřené plochy výrazně roste nejistota měření.
  - Přesnost v závislosti na podmínkách měření - rozlišení standardně jednotky MPa.
- **Prostorové rozlišení 1-2 mm²**. Předpokládá se, že rozměry měřené plochy jsou alespoň 200 mm².
- **Hloubkové rozlišení**
  - Minimální analyzovaná hloubka cca. 20 um (standardně 20-50 um).
  - Maximální hloubka cca. 0.5 mm (závisí na konfiguraci měřicího zařízení - průměru otvoru).
- **Materiál**
  - Metoda z principu není omezena typem materiálu ⇨ omezení možností odvrtání a měření deformací.
  - Předpokládá se homogenní materiál. V případě malých nehomogenit se měří průměrná hodnota, u nehomogenit na úrovni prostorového rozlišení metody výrazně roste nejistota měření.
  - Je nutná znalost **modulu pružnosti a Poissonova čísla**.
  - Lze měřit zbytková napětí do cca 70 % meze kluzu materiálu (vliv plasticity při vyšších hodnotách).
- **Vzorek**
  - V ideálním případě homogenní vzorek, s dostatečně velkou (cca. 10 až 20-ti násobek velikosti otvoru) a rovnou plochou pro měření.
  - Jiné vzorky (malé rozměry, malá tloušťka apod.) lze měřit také, je ovšem nutné stanovit odpovídající kalibrační koeficienty pro vyhodnocení a snižuje se přesnost měření.

Vlastnosti, možnosti a omezení metody

- **Způsob použití** - Zařízení lze použít jako laboratorní i jako přenosné (v závislosti na použitém měřicím systému).
- **Doba měření**
  - Závisí na požadavcích na přesnost měření, materiálu a možnostech měřicího systému.
  - Přesné laboratorní měření cca. 2-4 hod.
  - Je nutné uvažovat další časové nároky na stanovení kalibračních koeficientů, přípravu měření a vyhodnocení.
- **Náklady**
  - Pořizovací náklady na moderní měřicí systém cca. 1 až 1.5 mil. Kč (jednodušší měřicí zařízení lze pořídit i levněji).
  - Náklady na spotřební materiál na jedno měření až několik tisíc Kč (odvrtávací frézy, opotřebení vzduchové turbínky, tenzometrické růžice, lepidla apod.).
- **Známé problémy a nedostatky**
  - Ideální podmínky pro použití metody nejsou vždy splněny (např. tvar otvoru, parametry měřeného vzorku apod.) - klesá přesnost metody a zvyšuje se nejistota měření.
  - Vysokorychlostní technikou nelze odvrtávat některé materiály - např. plasty.

Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

- **Rozvoj stávajících technik měření**
  - Vyšší efektivita a přesnost měření
  - Nové postupy vyhodnocení měření
  - Rozšíření možností použití odvrtávací metody
  - Řešení známých problémů
- **Vývoj nových technik a přístupů provedení měření odvrtávací metodou**
  - Rozvoj bezkontaktních metod měření deformací
  - Nové možnosti odvrtání otvoru - laserové odvrtávání

Použití metody pro výzkum → **Výzkum metody**

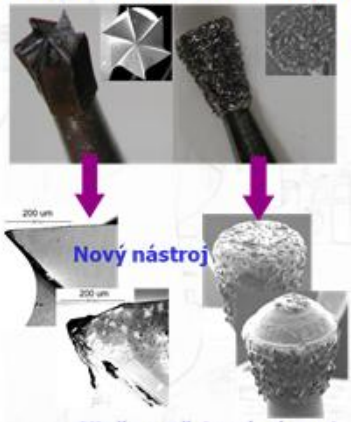
- **Velký význam především z hlediska dalšího vývoje metody a odstranění nebo určení některých zdrojů nepřesností.**
- **Řešení specializovaných projektů.**
- **Využití postupů pro standardní měření většinou brání především vyšší náklady a časové nároky na provedení měření a vyhodnocení zbytkových napětí.**

Zbytková napětí - Seminář projektu „INTEGRITA" na FS VŠB-TU Ostrava

Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

NOVÉ TECHNOLOGIE VÝZKUMNÉ CENTRUM ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI

Výzkum vlivu opotřebení nástroje



Silně opotřebený nástroj

Wolfram-karbidový a diamantový nástroj pro měření zbytkových napětí

- **Změna procesů v průběhu odvrtávání a možnost nežádoucího ovlivnění vzorku ⇒ vnesení přídavných napětí**
- **Nežádoucí ohřev vzorku při odvrtávání**

Výsledkem jsou návrhy vhodného postupu odvrtávání nebo použití vhodného nástroje pro danou aplikaci

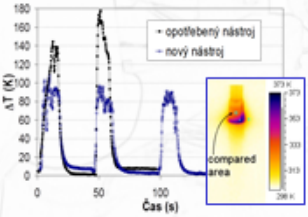
Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Výzkum vlivu teploty

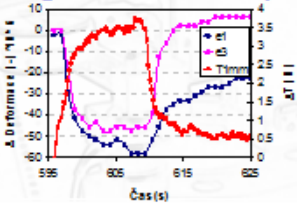
- **Vliv opotřebení nástroje a vlastností měřeného materiálu na teplotu**
- **Možný nežádoucí vliv tepelných deformací a vnesení nebo relaxace zbytkových napětí v materiálu v důsledku zvýšené teploty a tepelných deformací**

- **Výsledek** - návrhy vhodného postupu odvrtávání pro různé materiály, především doba čekání mezi dvěma následnými kroky.
- **Důsledek** - různé celkové délky měření pro různé materiály (např. ocelové vzorky cca 2 hodiny, keramické vzorky až 4 hodiny)

Teplota nástroje při odvrtávání



Teplota tenzometru a tepelné deformace v průběhu odvrtávání (jeden krok - cca 20 um)

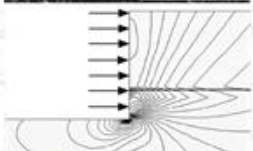


Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Vyhodnocení - koeficienty pro nestandardní úlohy

- **Standardní podmínky pro použití odvrtávací metody**
  - Homogenní, izotropní a lineárně elastický materiál
  - Rovnoměrné napětí po ploše měřeného povrchu
  - Rovinná a dostatečně velká oblast na měřeném povrchu
- **Reálné případy**
  - Nehomogenní materiály - např. povlaky
  - Nerovnoměrné napětí po ploše měřeného povrchu - např. v blízkosti svarů
  - Měření v blízkosti hran a okrajů vzorku

- **Výpočetní postupy pro stanovení koeficientů pro specifické aplikace** (povlaky, výskyt plasticity, nerovné plochy, nehomogenní napětí apod. apod.)
- **Vývoj nových metod vyhodnocení zbytkových napětí z měřených deformací**



Žárový nástřik povlaků (proces nástřiku, odvrtaný otvor v lomu, kontury napětí - MKP výpočet)

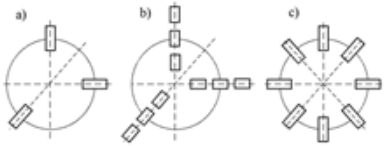
Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Modifikované nástroje a tenzometrické růžice

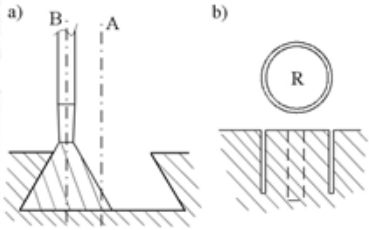
- **Vývoj metod pro speciální růžice s více elementy** (např. pro měření napětí nehomogenních po ploše nebo pro neizotropní materiály apod.)
- **Speciální nástroje a postupy odvrtávání** (např. pro zvýšení citlivosti, přesnosti nebo možnosti stanovit zbytková napětí do větší hloubky)

Je nutné stanovit (MKP výpočet) odpovídající kalibrační koeficient nebo kompletně změnit metodiku a postup vyhodnocení

Typy tenzometrických růžic
- měření zbytkových napětí (a), speciální růžice s více měřicími elementy (b, c)



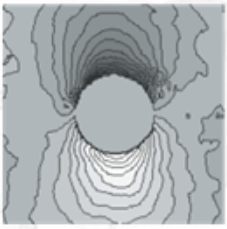
Modifikace odvrtávací metody
- Taper hole drilling, Ring-core drilling



Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Bezkontaktní měření deformací

- **Měření uvolněných deformací pomocí tenzometrů**
  - Standardní a dostupný způsob
  - Nutnost úpravy povrchu materiálu bez ovlivnění původních zbytkových napětí
  - "Bodové" měření deformace (průměrování na ploše tenzometru)
  - Vyšší finanční náklady - tenzometr je jednorázové čidlo
- **Optické měření deformací**
  - Nižší provozní náklady
  - Možnost měřit celé pole deformací v okolí otvoru
  - Nízká přesnost v porovnání s odporovými tenzometry
  - Vysoké vstupní náklady (nákup zařízení)
  - Problémy s konfigurací odvrtávacího a měřicího zařízení



Pole posuvů měřené ESPI metodou
Ilustrace z článku G. Focht and K. Schiffner, Determination of Residual Stresses by an Optical Correlative Hole-drilling Method, Experimental Mechanics, 43 (1), 97-104, 2003

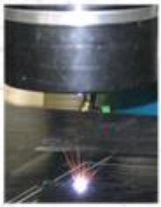
Vývoj

Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Laserové odvrtávání

- **Standardní (mechanické) odvrtávání**
  - Vysokorychlostní odvrtávání – minimální ovlivnění materiálu
  - Rychlé opotřebení nástroje (na jedno použití) i turbínky (na několik použití)
  - Otvor velmi často nemá požadované tvarové parametry
  - Některé materiály touto metodou prakticky nelze odvrtat (plasty, keramiky apod.)
- **Laserové odvrtávání**
  - Možnost odvrtávat materiály, které standardní metodou nelze odvrtávat
  - Úspora provozních nákladů
  - Snadná modifikace pro alternativní postupy, např. ring-core metodu nebo metodu drážky
  - Lepší podmínky pro využití bezkontaktních (optických) metod měření uvolněných deformací
  - Ideální proces působení laserového paprsku je studená ablace ⇨ výkonné pulzní lasery (vysoké vstupní náklady)
  - Řízení procesu z hlediska hloubky a tvaru otvoru
  - Tepelné ovlivnění materiálu

Wolfram-karbidová fréza – otvor v plastu

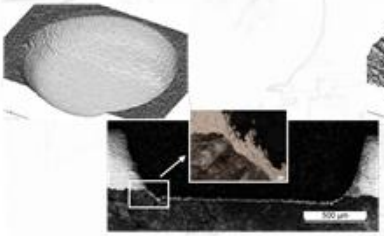


Laserové odvrtávání

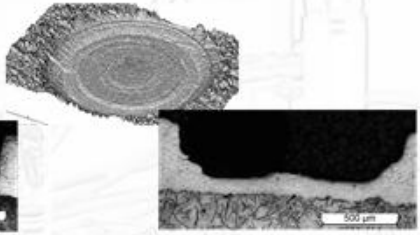
Odvrtávací metoda ve vědě a výzkumu

Laserové odvrtávání

Laserové odvrtávání (cermet)



Diamantová fréza (cermet)



- **Laserem lze vytvořit pravidelné otvory požadovaného tvaru i do materiálů, které lze mechanicky jen velmi složitě odvrtat**
- **S použitým laserem docházelo k natavování stěn otvoru ⇨ tepelné ovlivnění napětí a deformací**
- **Nevhodný typ laseru**

Vývoj

Odvrtávací metoda v průmyslu

- **Použití stávajících technik**
  - Rychlost, opakovatelnost a efektivita měření
  - Co nejnižší náklady na měření
  - Flexibilita - možnost měření v laboratoři i na pracovišti zadavatele

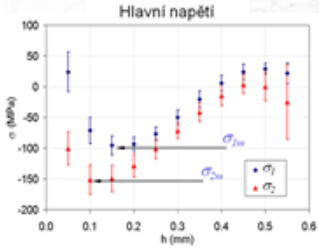
"Rutinní měření"

- **Řeší se zejména provozní problémy** - jak přizpůsobit průběh experimentu požadavkům zákazníka při co nejnižších nákladech a v co nejkratším čase.
- **Podmínky pracoviště partnera/zákazníka na provedení měření, pokud se provádí na jeho pracovišti.**
- **Logistika při měření mimo laboratoř.**

Odvrtávací metoda v průmyslu

Příklad - opakovatelnost měření

- **Měření zbytkových napětí na litinové součásti**
- **Odlitek, plocha po obrobení ⇒ sériově vyráběná součást**
- **Standardní měřicí zařízení HBM SINT MTS3000**
- **Měření třech podobných součástí (jiní výrobci) ⇒ porovnání výrobců**
- **Měření provedeno na každé součásti na cca 17 místech (celkem cca 50 míst)**



- **Dodrženy všechny podmínky pro použití odvrtávací metody**
- **Získán hloubkový profil z každého měření ⇒ souhrnné průměrné výsledky**
- **Rozptyl hodnot cca 20 MPa** (vyšší rozptyl v těsné blízkosti povrchu - vliv vlastností povrchu a od hloubky >0.5 mm - nízká citlivost metody)

Měření na jedné součásti – souhrnné výsledky

Odvrtávací metoda v průmyslu

Příklad - externí měření

- Měření zbytkových napětí na žebrech ocelového hradila
- Místo ⇨ prostranství venkovního skladu, Vranov nad Topľou (SK)
- Komplikovaná logistika a příprava měření v exteriéru
- Měření na silně zkorodovaných plochách ⇨ nutnost očistit měřený povrch aniž by bylo ovlivněno původní zbytkové napětí

Ocelové žebro hradidla – patrná silná koroze až do hloubky materiálu

- Odvrtávací metodou pro stanovení zbytkových napětí lze provádět i exteriérová měření nebo měření na pracovišti zákazníka (partnera)

Měřicí stanoviště

Odvrtávací metoda v průmyslu

Odvrtávací metoda se kromě výzkumných a vědeckých projektů využívá v mnoha průmyslových technologiích výroby a zpracování materiálu.

- **Tepelné zpracování materiálu.** Především kalení, žíhání nebo popouštění. Metodu lze použít, je nutné provést vhodnou úpravu povrchu před aplikací tenzometrů.
- **Mechanická a tepelná úprava povrchu materiálu.** Metody vytvrzování povrchu materiálu jako např. kuličkování, laserové kalení nebo tzv. ultrazvukové zpevňování. Vysoké tlakové napětí při povrchu materiálu ⇨ blízkost meze kluzu materiálu a možnost ovlivnění výsledků plastickou deformací v okolí otvoru.
- **Obrábění.** Technologie obrábění ve většině případů ovlivňují především podpovrchové napětí do hloubky cca. 500 um. Zbytková napětí lze dobře měřit, vyjma napětí v těsné blízkosti povrchu (v řádech jednotek um).
- **Povlaky a vrstvené kompozitní materiály.** Povlaky - tlusté povlaky (několik desítek až stovek um) vytvořené některou z technologií žárového nástřiku. Kompozity - velikost homogenní části musí být větší než rozlišení metody. Problémem jsou nehomogenní případně neizotropní materiálové vlastnosti.
- **Svařování.** Teoreticky lze použít pro měření zbytkových napětí v okolí svaru nebo přímo ve svaru. Problémy: velmi vysoká napětí a nebezpečí výskytu plastické deformace, chybné stanovení materiálových vlastností, vysoké gradienty zbytkového napětí v rovině povrchu měřeného materiálu, nehomogenita materiálu.

Shrnutí a závěr

Odvrtávací metoda

- **Poměrně spolehlivá** pro velký rozsah materiálů, bez velkých nároků na znalosti materiálových vlastností, jejich strukturu apod.
- **Provedení může být laboratomí**, s vysokou přesností vyhodnocení a delší dobou měření, nebo **provozní**, rychlé, orientační měření. Velmi dobré výsledky z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření lze dosáhnout, pokud jsou splněny odpovídající podmínky měření.

- Měřit lze i pokud tyto podmínky splněny nejsou - výsledky jsou v mnoha případech dostačující, nejistota měření je ovšem vyšší.
- **Cena zařízení je relativně nízká**, náklady na měření jsou vyšší vzhledem k ceně tenzometrických růžic a odvrtávacích fréz. Pro plné využití možností metody je potřeba dále uvažovat také náklady na zařízení pro experimentální nebo numerickou kalibraci.

- **Omezení z hlediska hloubky, velikosti analyzované plochy a nároků na rozměry, tvar a homogenitu měřené oblasti** - např. je problematické řešení zbytkových napětí ve svarech
- **Omezení z hlediska použití tenzometrů a odvrtávací techniky**, s použitím vysokorychlostního odvrtávání je např. problematické měření plastů.

Kontakt

Michal Švantner
Západočeská univerzita v Plzni
Výzkumné centrum Nové technologie
oddělení Termomechanika technologických procesů

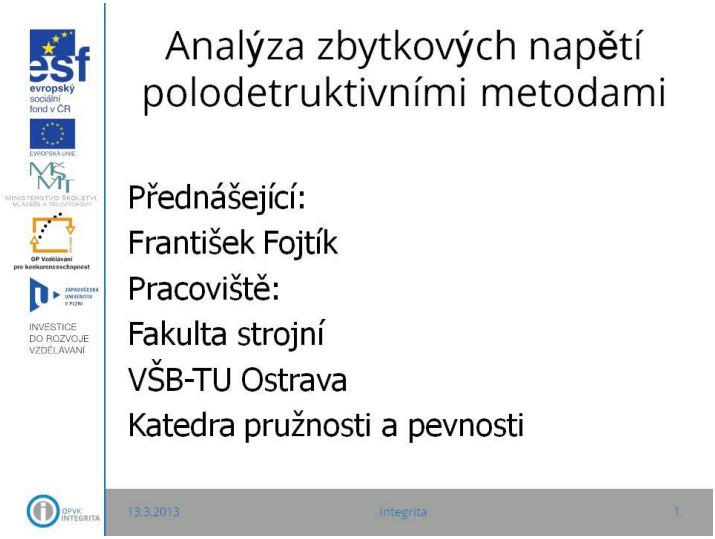
Univerzitní 8
306 14 Plzeň
Česká republika
http://ttp.zcu.cz/cz

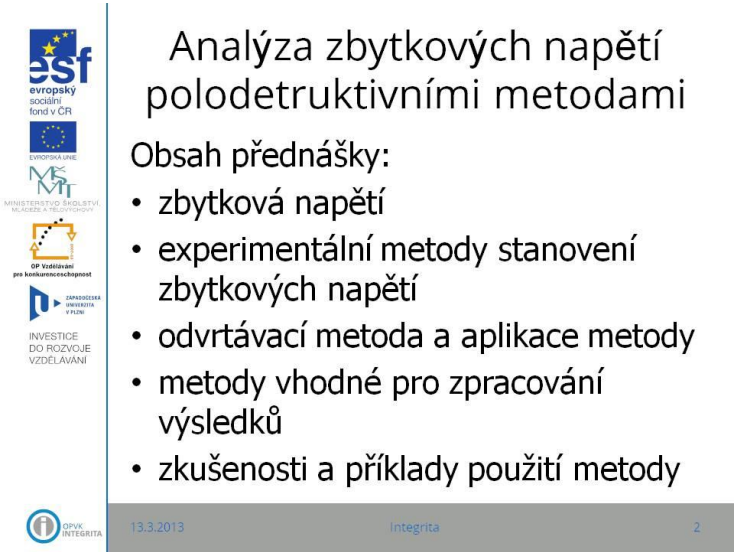
T: +420 377 634 721
E: msvantne@ntc.zcu.cz

Analýza zbytkových napětí polodestruktivními metodami

Ing. František Fojtík, Ph.D.

VŠB-TU Ostrava





Zbytková napětí

- **V konstruktérské praxi je obvykle materiál považován za homogenní izotropní kontinuum.**
- **K deformaci těles a vzniku napjatosti dochází zejména z důvodu:**

  1. ***Vzájemného silového působení těles***

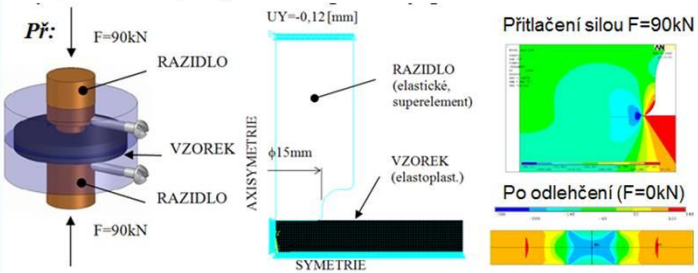
  2. ***Působením teplotního pole***

  - **homogenního** **(napjatost vzniká, je-li zabráněno teplotní dilataci tělesa)**
  - **nehomogenního** **(vznik napjatosti i v případě volné teplotní dilatace tělesa)**

- **Není-li v daném případě splněna podmínka plasticity, jsou působící napětí v pružné oblasti a po odstranění příčiny svého vzniku zcela vymizí.**

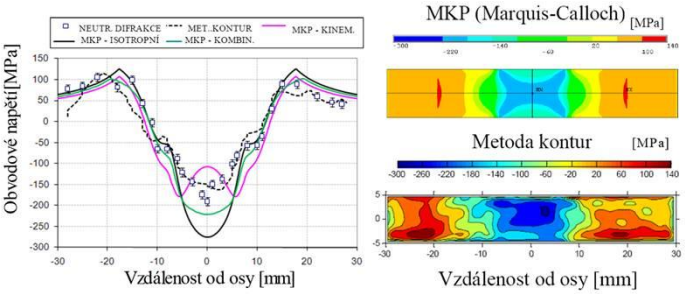
Zbytková napětí

- **Jestliže dojde ke vzniku (pružně) plastického stavu v některém bodě tělesa, potom po odstranění příčiny vzniku napjatosti (silová, deformační či teplotní), zůstanou v tělese jistá** ***zbytková (residuální) napětí.***



Zbytková napětí

- **Vyhodnocení v řezu diskem**



Numerické stanovení zbytkových napětí je možné, ale stěžejní je použití robustního materiálového modelu, který umožní zachytit komplikované napěťově deformační chování materiálu

Zbytková napětí

- **V konstrukčních materiálech existuje v důsledku jejich technologie výroby téměř vždy jistá zbytková napjatost.**
- *Zbytková napětí mohou být:*

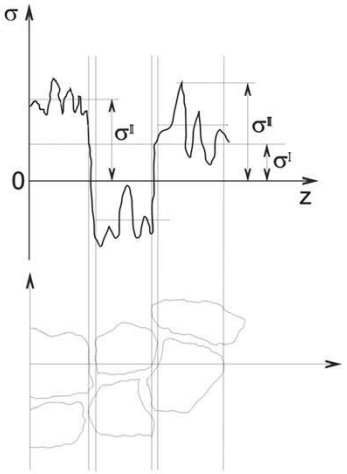
1. *Užitečná* – **např. kuličkováním se vnesou tlaková napětí v povrchové vrstvě, která vedou k prodloužení životnosti součásti.**
2. *Škodlivá* – **vznik trhlin, napěťová koroze, snížení meze únavy či křehkolomové odolnosti (negativní vliv zejména u tahových zbytkových napětí).**

- **Vysoká tahová napětí, vyvolaná například v okolí svarů chladnutím a fázovými transformacemi, mohou způsobit vznik trhliny i bez dodatečného působení vnějších sil.**
- *Vyšetřování zbytkových napětí je tedy v tech. praxi důležité*

Zbytková napětí

Dle velikosti objemů, v nichž se zbytková napětí nemění co se týče velikosti a směru působení, lze je kategorizovat na:

- *Zbytková napětí I. druhu (makroskopická)* – jsou přibližně homogenní v makroskopické oblasti (v mnoha zrnech) materiálu.
- *Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická)* – jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých zrn.
- *Zbytková napětí III. Druhu (submikroskopická)* - jsou nehomogenní v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi.



Zbytková napětí

- **<u>Zbytková napětí I. druhu</u> mohou být způsobena například:**

- výrobní technologií (obrábění, spojování, lití, tváření, tepelné zpracování, povrchové úpravy povrchu)

- montážním, dopravním, provozním, zkušebním či jiným zatížením různého charakteru

- **<u>Zbytkové napětí II. druhu vznikají</u>:**

- při tepelných procesech v materiálu s fázemi majícími rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti

- při deformaci materiálu skládajícího se buď z jedné fáze (jejíž zrna jsou však různě orientovány k silovému toku a jejichž mez kluzu je anizotropní) nebo z více fází s různými mech. vlastnostmi

- **<u>Zbytková napětí III. druhu:</u>**

- jsou důsledkem strukturních poruch (bodových, čárových,…)

Experimentální metody stanovení zbytkových napětí

Podle míry narušení celistvosti vyšetřovaného tělesa:

- *Destruktivní* –**úplné znehodnocení tělesa,**
- *Polodestruktivní* – **pouze částečné znehodnocení tělesa, nemající vliv na jeho funkci a spolehlivost, příp. znehodnocení odstranit**
- *Nedestruktivní*

Podle principu:

- *Mechanické* - **odvrtávací metoda, metoda sloupků, dělící metoda, metoda odstraňování vrstvy materiálu …**
- *Fyzikální* - **difrakční, ultrazvukové, magnetické metody, metoda měření mikrotrdosti, fotoelasticimetrické, …**
- *Chemické* - **využívají změn vyvolaných chemickými procesy – difuze vodíku, koroze pod napětím …**

Experimentální metody stanovení zbytkových napětí

METODA	DĚLÍCÍ	ODVRTÁVACÍ	RENTGENOGRAFICKÁ	ULTRAZVUKOVÁ
Základní předpoklad	prostorová napjatost	rovinná napjatost	izotropní homogenní materiál, polykrystalický, jemnozrnný	izotropní homogenní materiál, homogenní napjatost
Kategorie zbytk.napětí	I.druhu	I.druhu	I. a II. nebo III druhu	I.+II.+III.druhu
Měřený parametr	povrchové přetvoření nebo deformace	povrchové přetvoření nebo deformace	změna meziatomových vzdáleností polykryst.mater.	změna rychlosti ultrazvukových vln
Min.velikost vyšetř. oblasti	100mm^2	0,5mm^2	0,5mm^2	obvykle 30mm^2
Min. analyz.hloubka	1-2mm	20μm	několik μm	15-300 μm
Problémy s hrubozrnností	ne	ne	ano	ano

Metoda sloupků

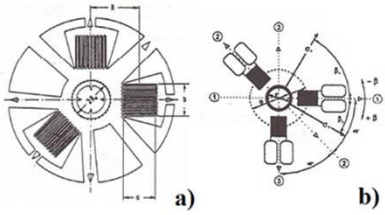
- **Princip metody je založen na tom, že frézováním je uvolňován sloupek materiálu o průměru 15-150 mm o hloubce 0,25 – 1,5 mm průměru sloupku.**
- **Uvolněné deformace se měří odporovými tenzometry.**
- **Vyhodnocení při homogenní napjatosti pomocí konstitutivních vztahů.**
- **Lze použít i pro vyšetřování zbytkové napjatosti proměnné s hloubkou pod povrchem.**

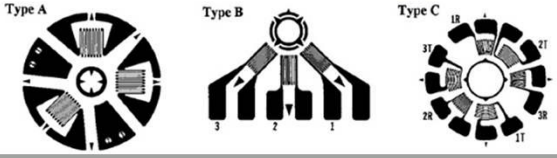
Nutné kalibrační koeficienty získané MKP nebo experimentálně.

zdroj: www.sintechnology.com

Odvrtávací metoda

- **Princip metody je založen na tom, že odvrtáním otvoru v materiálu se zbytkovou napjatostí se v okolí otvoru změní rozložení vnitřních sil a tím i deformací, kteréžto změny deformací můžeme měřit tenzometrickou metodou.**
- **Pro měření se používají speciální tenzometrické růžice.**
  - **tříprvkové**
  - **šestiprvkové**

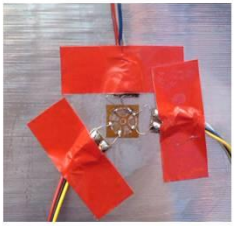




Odvrtávací metoda

Vybavení:

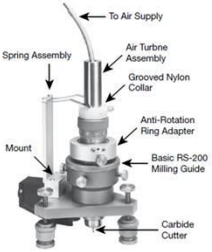
- **Tenzometrické růžice**
- **Příslušenství k jejich nalepení**
- **Vrtací souprava a nástroje**
- **Měřicí aparatura**
- **Metodika vyhodnocení měření**



Odvrtávací metoda

Vrtací souprava:

- **RS 200**



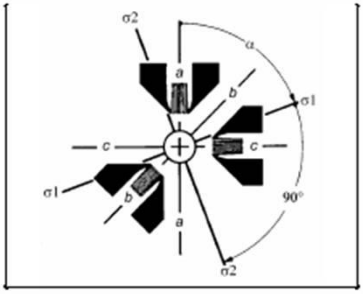
- **Vlastní konstrukce**

- **MTS 3000**

Odvrtávací metoda

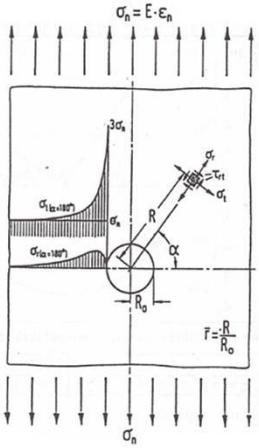
- **Výsledkem měření jsou uvolněné poměrné deformace v závislosti na vrtané hloubce**

Z	Z/D	εa	εb	εc
mm		μS	μS	μS
0,254	0,050	146	93	43
0,508	0,100	283	164	113
0,762	0,149	362	266	178
1,016	0,199	405	301	208
1,27	0,249	425	318	225
1,524	0,299	439	333	238



Metody vhodné pro zpracování výsledků

- Původní vztahy pro výpočet zbytkových napětí z naměřených deformací tenzometrů růžice vychází z předpokladu nejdříve jednoosého stavu napjatost v okolí průchozího kruhového otvoru



Metody vhodné pro zpracování výsledků

Historie:

- **Matharova metoda 1934**
- **Metoda Soeteova a Vancrombruggeova 1950**
- **Riparbelliho metoda 1952**
- **Boitenova a Ten Gateova metoda 1952**
- **Kelseyho metoda 1956**
- **Nisidova a Takabayashiho metoda 1965**
- **Rendlerova a Vignessova metoda 1966**
- **První verze normy ASTM E 837 1966**

Metody vhodné pro zpracování výsledků

- **Bathgateova metoda 1968**
- **Bertova metoda 1968**
- **Cordiánova a Salernova metoda 1969**
- **Schewchukova metoda 1976**
- **Schajerova metoda (Integrální metoda) 1981**
- **Mocninná metoda**
- **Norma ASTM E 837 – 08 (2008)**

Metody vhodné pro zpracování výsledků

Norma ASTM E 837 – 08 (2008)

- **Použitelnost normy:**

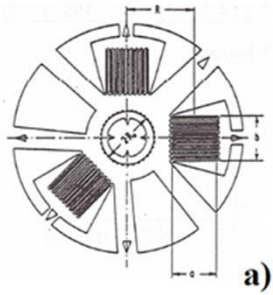
- Je omezena na tloušťku (t) měřené součásti k charakteristickému rozměru požité tenzometrické růžice

$t \leq 0{,}4 * D = 2 * R$

- Průměrné napětí po tloušťce → průchozí otvor

$t \geq 1{,}2 * D = 2 * R$

- Rozložení napětí v závislosti na hloubce → slepý otvor



Metody vhodné pro zpracování výsledků

Norma ASTM E 837 – 08 (2008)

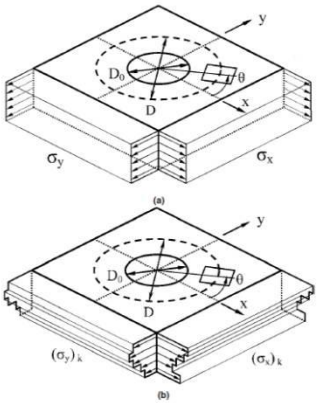
- **Rozložení napětí v závislosti na hloubce může být:**

- rovnoměrné (a)

- nerovnoměrné (b)

Z tohoto rozdělení vyplývá i volba metodiky vyhodnocení zbytkových napětí.

Rozhodující pro volbu je průběh změřených uvolněných deformací.



Metody vhodné pro zpracování výsledků

Norma ASTM E 837 – 08 (2008)

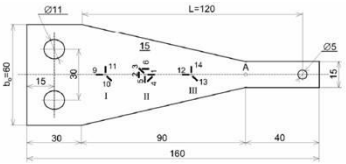
- **Kalibrační koeficienty:**
- **Numericky pomoci MKP**
- **Experimentálně**

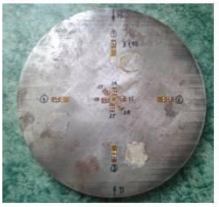
Rosette A	a				
Blind hole	Hole Diameter, D_0/D				
Depth/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080
0.10	.059	.081	.108	.138	.176
0.15	.085	.115	.151	.192	.238
0.20	.101	.137	.177	.223	.273
0.25	.110	.147	.190	.238	.288
0.30	.113	.151	.195	.243	.293
0.35	.113	.151	.195	.242	.292
0.40	.111	.149	.192	.239	.289
Through Hole	.090	.122	.160	.203	.249

Tahová zkouška

Ohybová zkouška

Stlačení kruhového disku



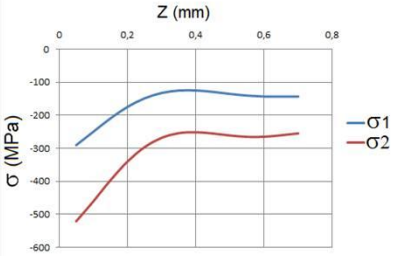


Metody vhodné pro zpracování výsledků

Norma ASTM E 837 – 08 (2008)

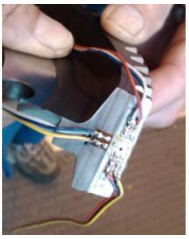
- **Výsledkem jsou pak vypočtená hlavní napětí a úhel jejich sklonu od definovaného směru**

Hloubka [mm]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	α [°]
0,050	-290,4	-520,7	40,0
0,100	-250,0	-460,7	41,9
0,150	-209,6	-396,9	43,4
0,200	-174,8	-340,1	44,7
0,250	-148,8	-296,5	45,7
0,300	-132,5	-268,2	46,7
0,350	-125,2	-254,1	47,6
0,400	-125,0	-251,2	48,4
0,450	-129,2	-255,1	49,1
0,500	-135,2	-261,1	49,6
0,550	-140,4	-265,2	50,1
0,600	-143,3	-265,0	50,4
0,650	-143,7	-260,4	50,7
0,700	-143,1	-254,7	50,9



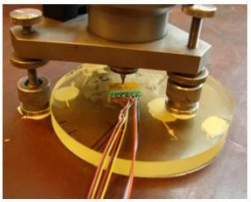
evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

zkušenosti a příklady použití metody



evropský sociální fond v ČR
EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

zkušenosti a příklady použití metody



Použitá literatura

- ASTM E 837 – 08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method
- Macura, P.: Experimentální metody v pružnosti a plasticitě, Skripta VŠB – TU Ostrava, 2001, 107s
- Macura, P.: Sbírka úloh z experimentální pružnosti, Skripta VŠB – TU Ostrava, 2008, 96s
- http://www.vishaypg.com/, TN-503-5 Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method. Vishay – Measurements Group
- http://www.hbm.cz/, Firemní materiál firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- Trebuňa, F., Šimčák, F.: Kvantifikácia zvyškových napati tenzometrickými metódami, TU Košice, 2005, 134s
- Trebuňa, F., Šimčák, F.: Príručka experimentálnej mechaniky, TU Košice, 2007, 1536s
- Vlk, M, a kol.: Experimentální mechanika, Brno, 2003, 147s
- Havlůj, V., Marek, P., Považan, J., Vlastní pnutí v ocelových konstrukcích, ČSVTS, 1975
- Lu, J. (Editor): Handbook of Measurement of Residual Stresses. The Fairmont Press Lilburn 1996
- Schajer, G. S.: Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements. Transactions of the ASME, ser. H – Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 103, No. 2, pp. 157-163, 1981
- Schajer, G. S.: Measurement of Non-Uniform Residual-Stresses Using The Hole- Drilling Method .Part II - Practical Application of the Integral Method Transactions of the ASME, ser. H -Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, No.4, pp. 344-349, 1988
- Schajer, G. S.: Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole- Drilling method Part I - Stress Calculation Procedures Transactions of the ASME, ser. H – Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, No.4, pp. 338-343, 1988
- www.sintechnology.com

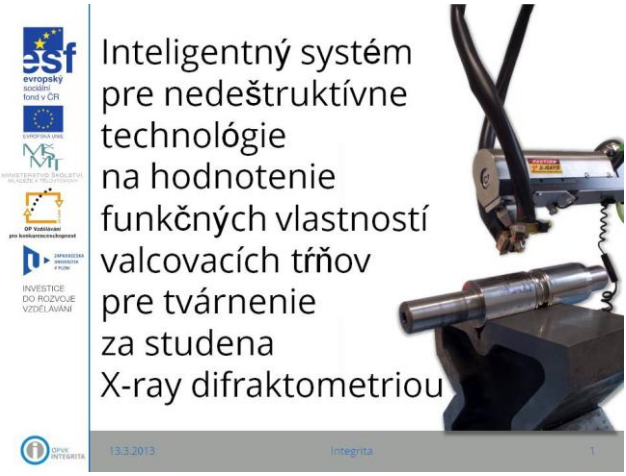
Analýza zbytkových napětí polodetruktivními metodami

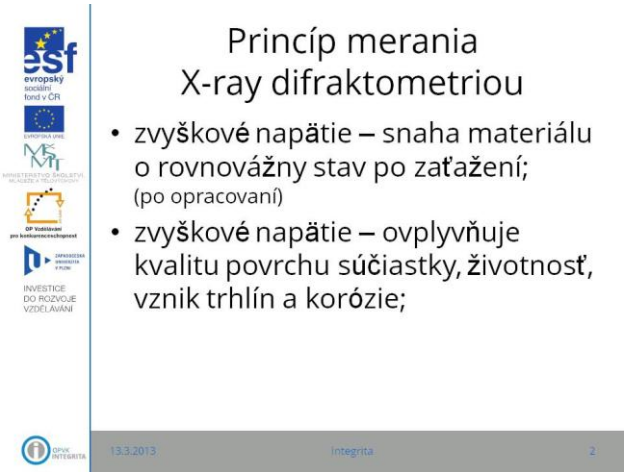
Děkuji za pozornost

Inteligentný systém pre nedeštruktívne technológie na hodnotenie funkčných vlastností valcovacích tŕňov pre tvárnenie za studena X-ray difraktometriou

doc. Ing. Andrej Czán, Ph.D.; Ing. Michal Šajgajík, Ph.D.

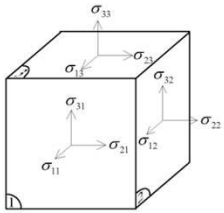
ŽU Žilina





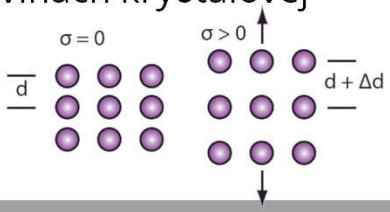
Princíp merania X-ray difraktometriou

- zvyškové napätie – ťahové a tlakové;
- zvyškové napätie – normálové, šmykové;
- celkovo 6 smerov v každom bode materiálu.

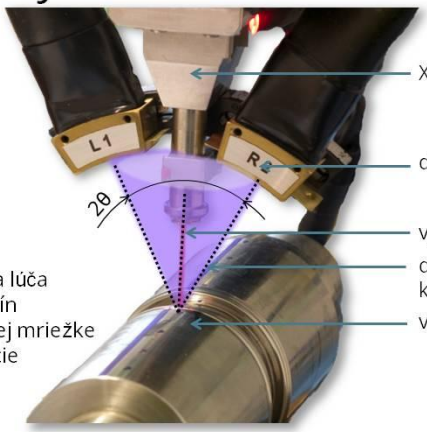


Princíp merania X-ray difraktometriou

- určenie mriežkových deformácií a ich prepočet na napätie pomocou lineárnej teórie elasticity;
- podľa Bragga je difrakcia odraz rtg. lúčov na rovinách kryštálovej mriežky.



Princíp merania X-ray difraktometriou



$n\lambda = 2d \sin \theta$

λ – vlnová dĺžka lúča
d – rozstup rovín v kryštalickej mriežke
θ – uhol difrakcie

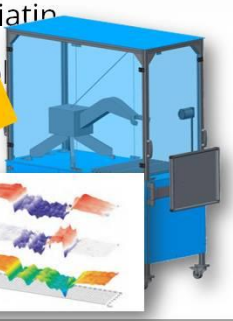
X-ray difraktometer

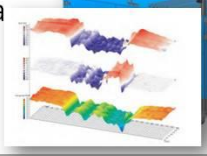
* - podľa skúmaného materiálu, Cr: Fe a Al zliatiny

X-ray difraktometer

tí merania:

a Co zliatin





Skúmané vzorky

- nástroj pre tvárnenie za studena krúžkov valivých ložísk;
- nástrojová oceľ STN 41 9830 (HS 6-5-2); (0,9%C; 0,25%Si; 0,3%Mn; 4,1%Cr; 5,0%Mo; 1,8% V; 6,4%W)
- kalené: ohrev na 1200°C v 3 stupňoch, 2x ochladzovacie prostredie soľný kúpeľ 500-550°C;
- vyrobené tvrdým sústružením.

Podmienky experimentov

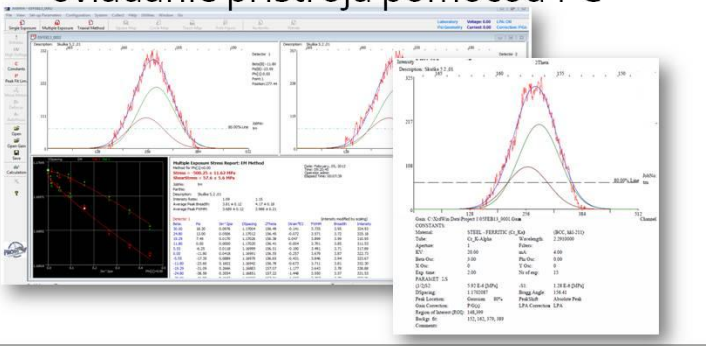
- sústruženie: f=0,05mm; a_p=0,1mm
  - v_c=100m.min^{-1}
  - v_c=150m.min^{-1}
  - v_c=200m.min^{-1}
- stroj: Mazak Nexus 100-II
  - výkon vretena: 7,5kW
  - ot. vretena: max. 6000ot^{-1}
  - hmotnosť stroja: 3800kg
  - počet nástrojov: 12
  - osi: 3 (X,Z,C) + 1 (PH) + 1 (PV)
  - max. obrábaný Ø: Ø280mm
  - max. obrábaná dĺžka: 385mm

Podmienky experimentov

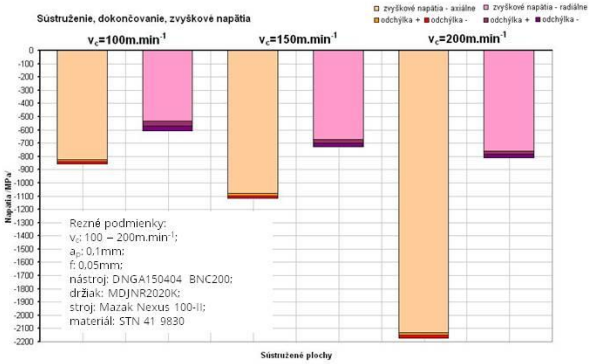
- v radiálnom a axiálnom smere do hĺbky 12μm;
- veľkosť kolimátora: Ø0,5mm;
- expozícia: 15x2s β: 30° 2θ: 156,3°.

Podmienky experimentov

- XRDWin v2.0 – softfvér na ovládanie prístroja pomocou PC

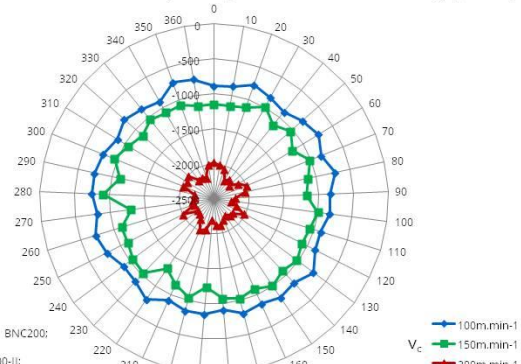


Vyhodnotenie merania zvyškového napätia po obvode



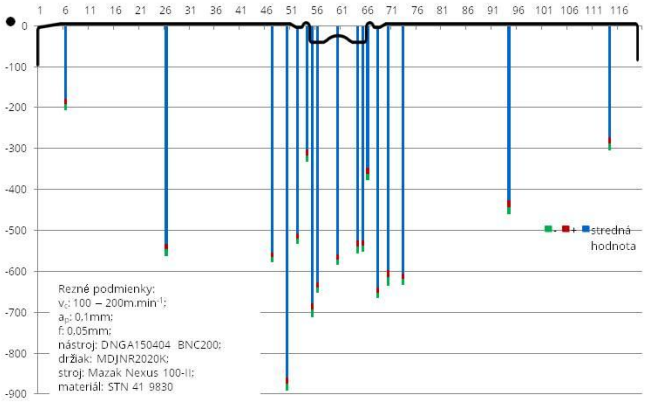
Vyhodnotenie merania zvyškového napätia po obvode

Zvyškové normálové napätia po obvode súčiastky [MPa]



Rezné podmienky:
v_c: 100 – 200m.min^{-1};
a_p: 0.1mm;
f: 0.05mm;
nástroj: DNGA150404 BNC200;
držiak: MDJNR2020K;
stroj: Mazak Nexus 100-II;
materiál: STN 41 9830

Normálové napätie v axiálnom smere



Rezné podmienky:
v_c: 100 – 200m.min^{-1};
a_p: 0.1mm;
f: 0.05mm;
nástroj: DNGA150404 BNC200;
držiak: MDJNR2020K;
stroj: Mazak Nexus 100-II;
materiál: STN 41 9830

Zhodnotenie

- XRD:
  - umožňuje meranie a mapovanie:
    - zvyškových napätí v akomkoľvek smere;
    - meranie zvyškového austenitu;
  - nedeštruktívna univerzálna metóda;
  - absolútne hodnoty v každom bode súčiastky.

Žilinská univerzita
v Žiline
Strojnícka fakulta

ITMS: 26220220101

Inteligentný systém pre nedeštruktívne technológie na hodnotenie funkčných vlastností súčastí X-ray difraktomertriou

evropský sociální fond v ČR

EVROPSKÁ UNIE

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ďakujem za pozornosť

OPVK INTEGRITA

13.3.2013 Integrita 17

Analýza integrity povrchu prostredníctvom Barkhausenovho šumu a jeho využitie v praxi

prof. Dr. Ing. Miroslav Neslušan

ŽU Žilina

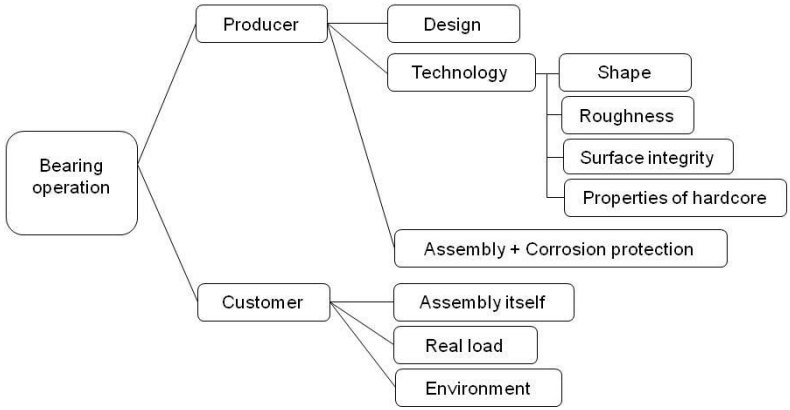
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
STROJNÍCKA FAKULTA
KATEDRA OBRÁBANIA A VÝROBNEJ TECHNIKY

Analýza integrity povrchu prostredníctvom Barkhausenovho šumu a jeho využitie v praxi

Seminár Ostrava, 18.2 2013 Miroslav Neslušan

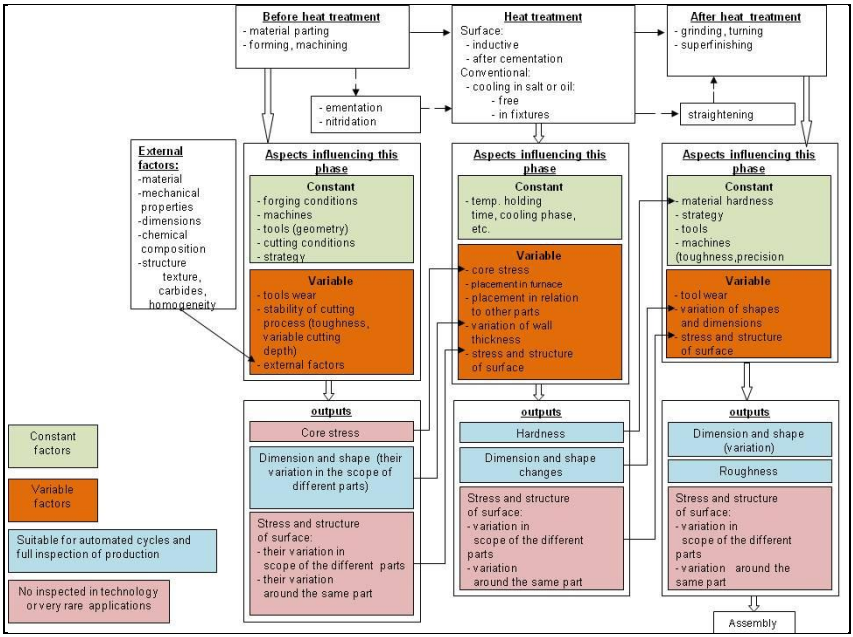
Štruktúra prednášky

- Prečo testovať
- Laboratórne analýzy – brúsenie,
  - sústruženie
- Využite v praxi
- Obecne využiteľnosť
- Výhody a nevýhody – ako ďalej
- video

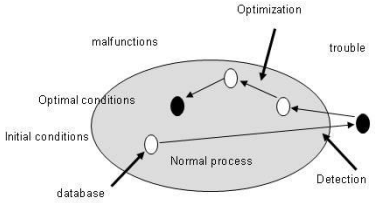


Factors affecting bearing operation

Veľké ložiská – 20 rokov záruka
– výmena ložiska stojí až 300 000 eur



Quality (life time) of bearing vary

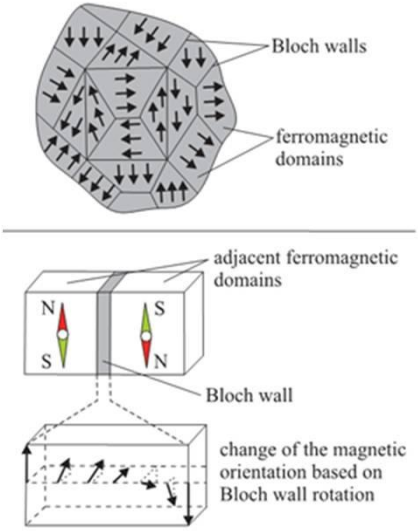


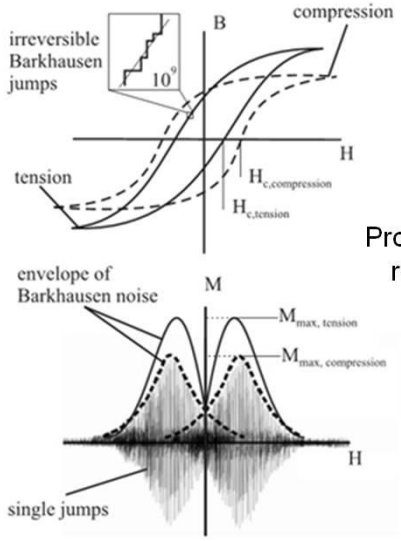
Monitoring system role

	non destructive	**destructive**
Structure	X – ray diffraction ultrasound methods micromagnetic methods	optical metallographic observation
Hardness	ultrasound methods micromagnetic methods	Conventional hardness measurements
Residual stresses	X – ray diffraction ultrasound methods micromagnetic methods	Mechanical method X – ray diffraction sectioning

Basic methods for analysis of some parameters of surface integrity

Teória Barkhausenovho šumu

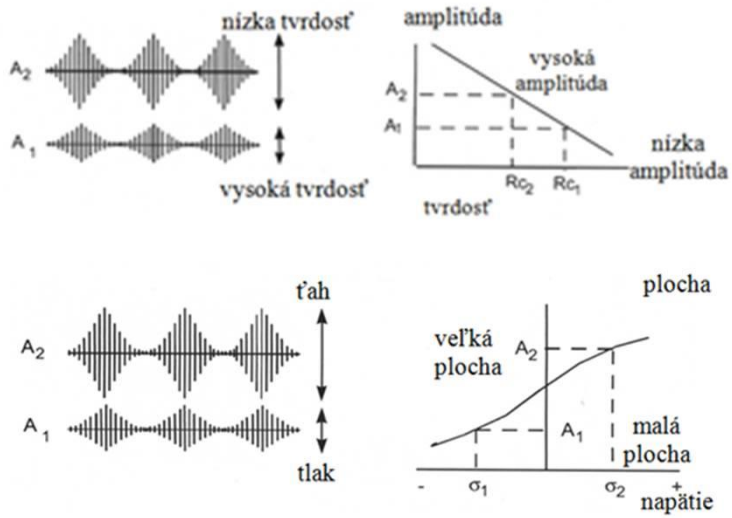


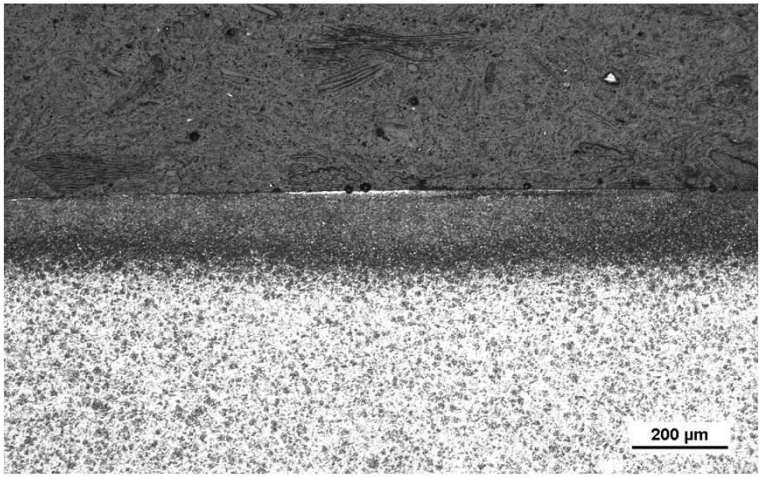


Prof. Barkhausen – objav z roku 1919 – zosilňovač (akustický prejav)

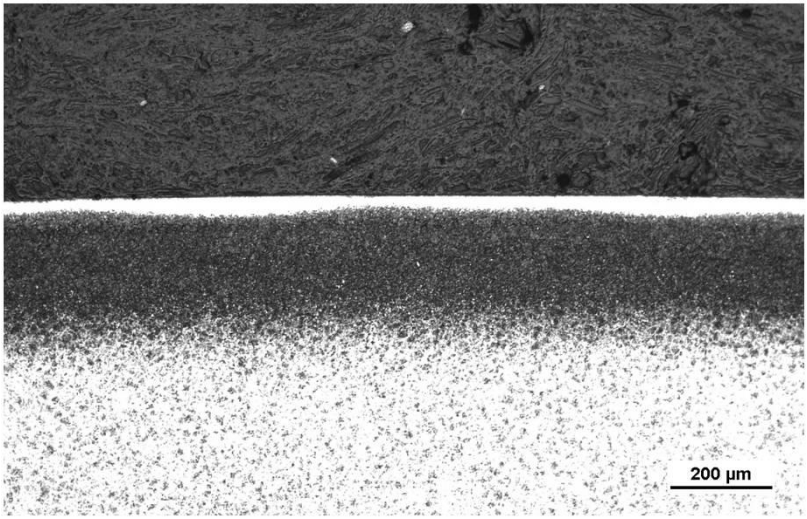
Laboratórne analýzy

brúsenie

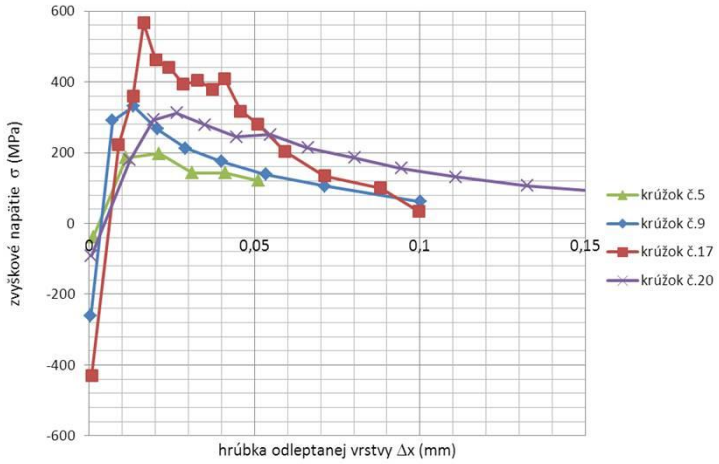

nízka tvrdosť
A2
A1
vysoká tvrdosť
amplitúda
vysoká amplitúda
A2
A1
nízka amplitúda
Rc2
Rc1
tvrdosť
ťah
A2
A1
tlak
plocha
veľká plocha
A2
A1
malá plocha
-
σ1
σ2
+
napätie



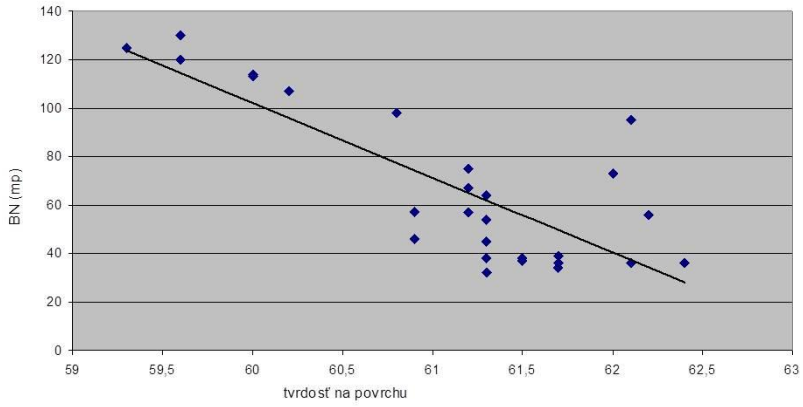
Mikroštruktúra povrchu po brúsení



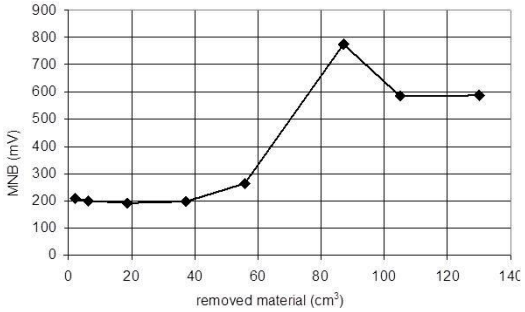
Mikroštruktúra povrchu po brúsení



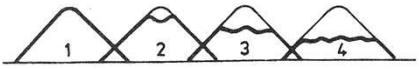
Priebeh zvyškových napäti po brúsení sady krúžkov



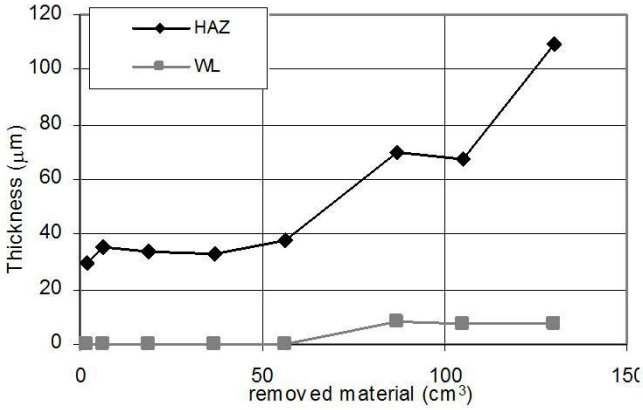
Zmena RMS hodnoty BN v závislosti od tvrdosti na povrchu



Influence of grinding wheel wear on area of Barkhausen noise during grinding



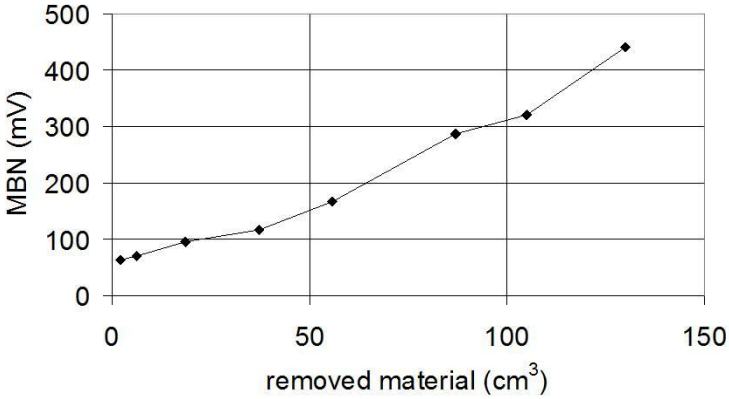
Stages of grinding grain wear



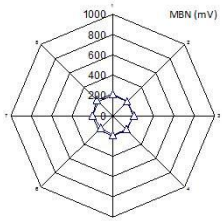
Influence of grinding wheel wear on thickness of heat affected zone and white layers during grinding, HAZ – heat affected zone, WL – white layers

a) ring n.1, V = 3,1 cm^3

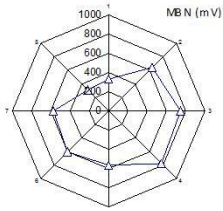
b) ring n.21, V = 105 cm^3

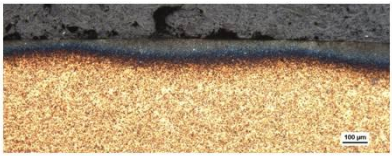


Variance of stress distribution around the ground parts



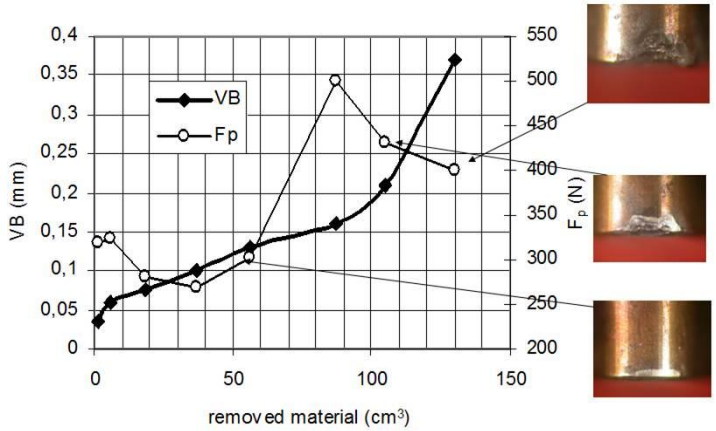
a) ring n.24, *V* = 130 cm3 - position 4





b) ring n.24, *V* = 130 cm3 - position 8

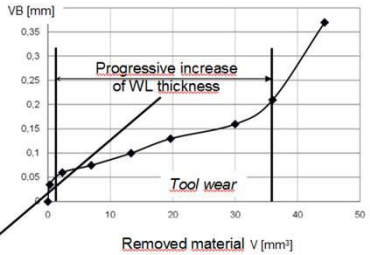
Tvrdé sústruženie, resp. frézovanie

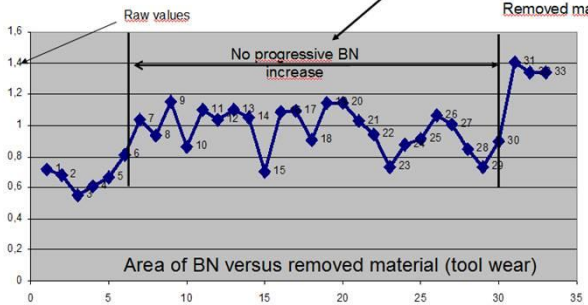


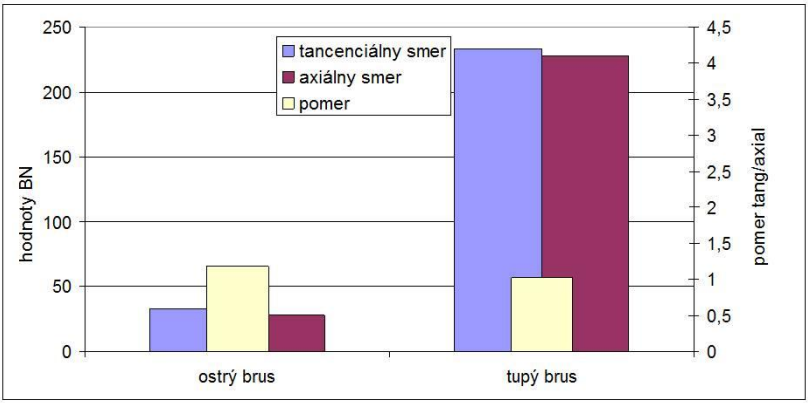
Influence of removed material on *VB* and thrust force F_p for tuning

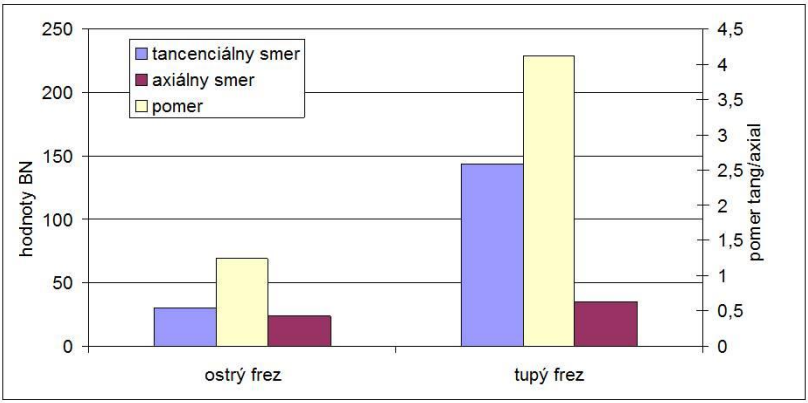
2. Experiment focused on hard tuning only v_c = 100 m/min

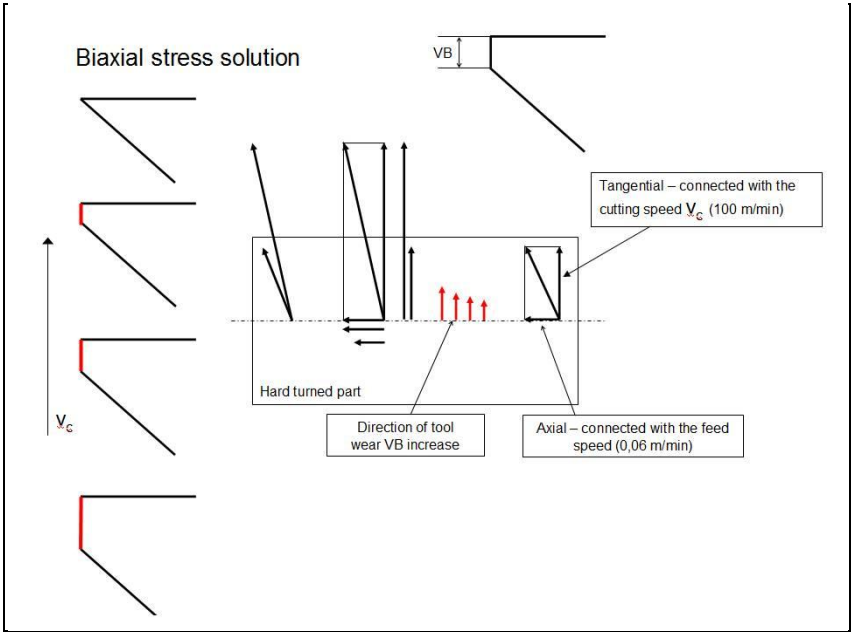
Something goes wrong and conventional data processing of BN fails

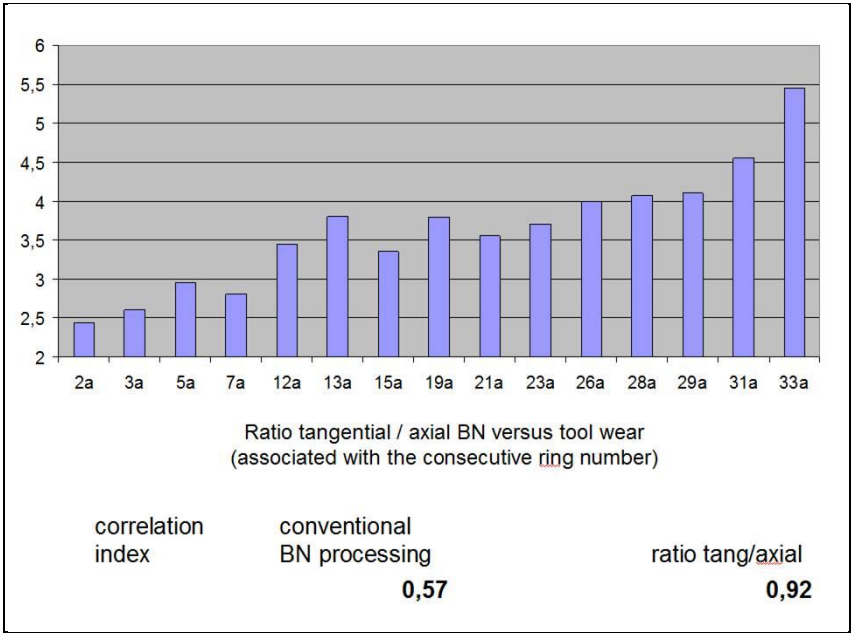





250
200
150
100
50
0
hodnoty BN
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
pomer tang/axial
tancenciálny smer
axiálny smer
pomer
ostrý brus
tupý brus


250
200
150
100
50
0
hodnoty BN
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
pomer tang/axial
tancenciálny smer
axiálny smer
pomer
ostrý frez
tupý frez





correlation index	conventional BN processing	ratio tang/axial
	0,57	**0,92**

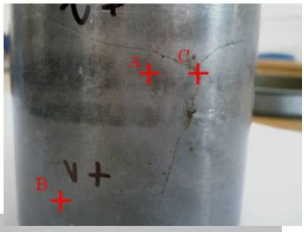
Využite v praxi

1. **Overovanie tepelného poškodenia povrchu po brúsení**
2. **Kalibrácia systému pre potreby monitorovania stavu povrchu**
3. **Optimalizácia technologických procesov a odhaľovanie problémových miest**

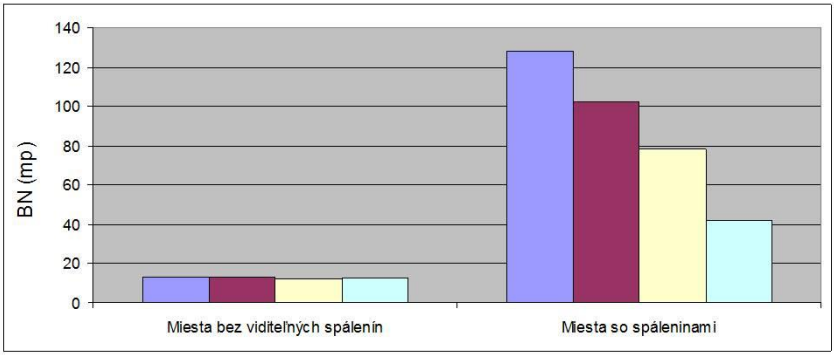
3 stavy po brúsení z hľadiska povrchu

- Povrch je vyhovujúci a nie je vizuálne poškodený,
- Povrch nie je vyhovujúci a je vizuálne poškodený,

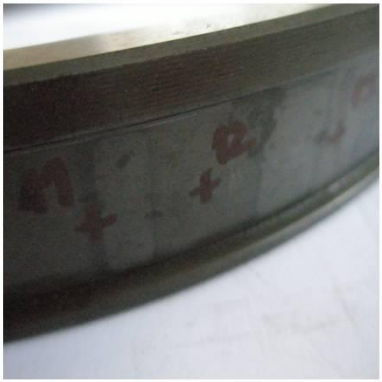
- Povrch nie je vyhovujúci a nie je vizuálne poškodený (spálený) – <u>potreba detekovať tieto stavy.</u>



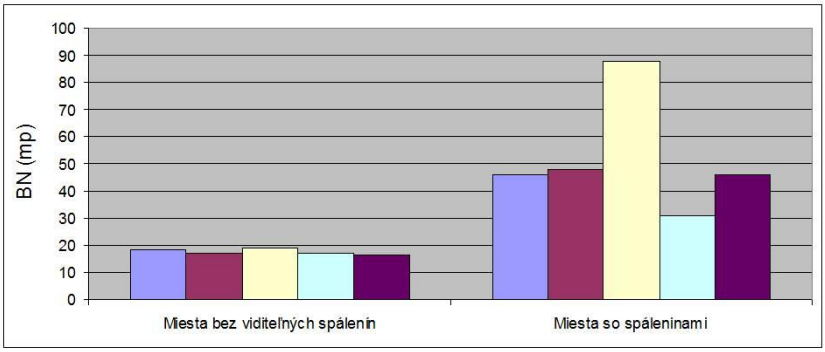
Charakter povrchu vonkajšej plochy vonkajšieho ložiskového krúžku a odberu údajov



Namerané hodnoty BN na rôznych miestach krúžku



Charakter povrchu obežnej dráhy

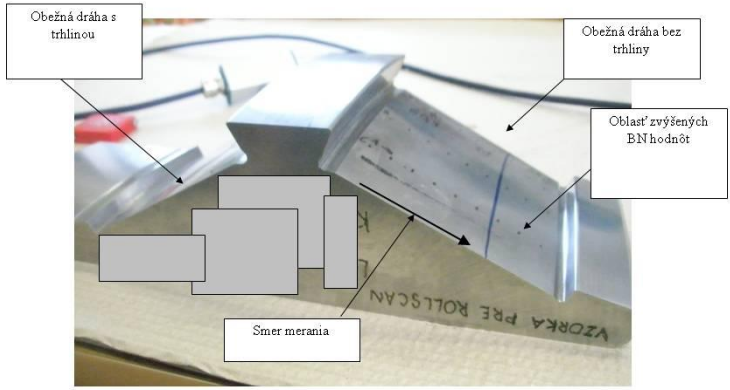


Namerané hodnoty BN na rôznych miestach krúžku

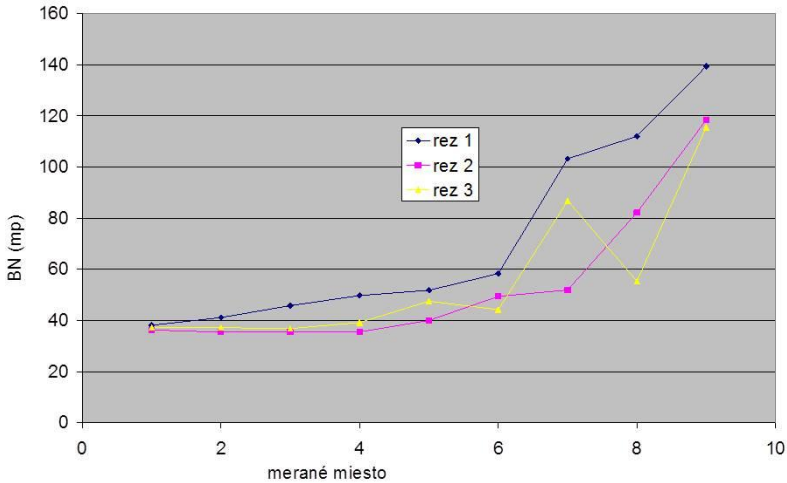
Overovanie tepelného poškodenia povrchu

na veľkorozmerových krúžkoch

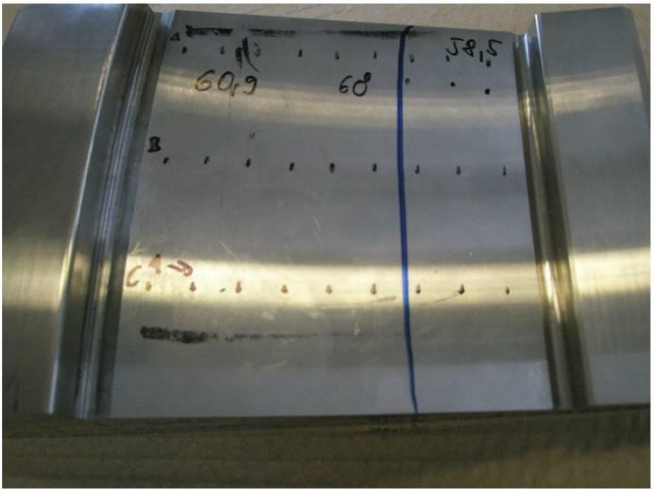
<u>Veľké telesá by si vyžadovali veľké nádoby s chemikáliami</u>



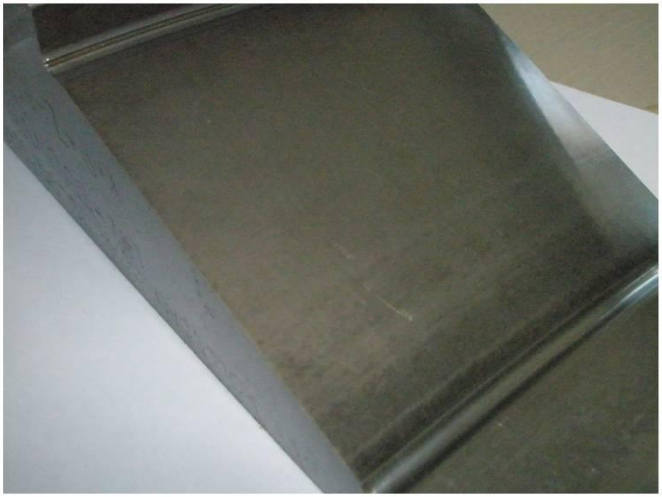
Výrez z veľkorozmerového krúžku



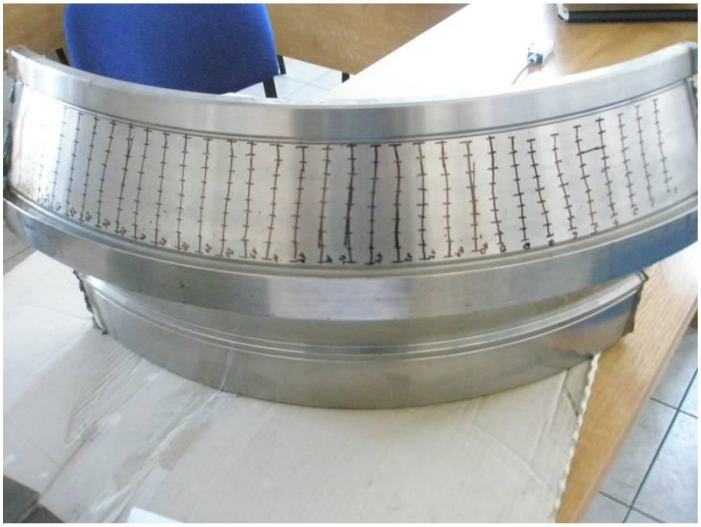
Namerané hodnoty BN na rôznych miestach obežnej dráhy bez detekovanej trhliny



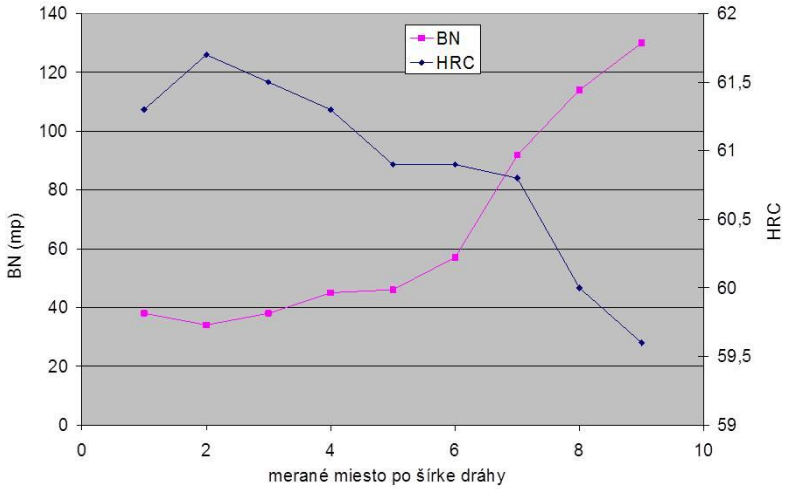
Merané miesta na obežnej dráhe bez trhliny a tvrdosti namerané v rôznych zónach



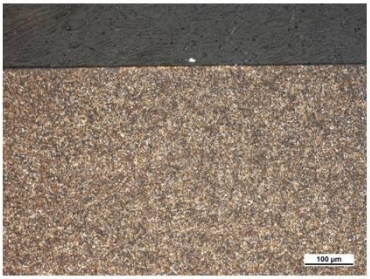
Výrez krúžku po leptaní s tmavšou zónou v oblasti zvýšených hodnôt BN



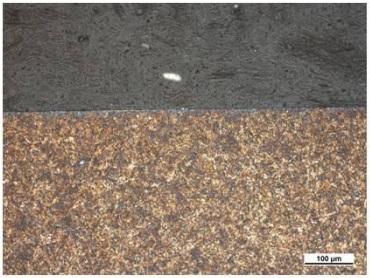
Rozloženie meraných bodov po obvode krúžku



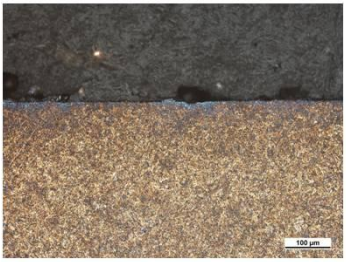
Namerané hodnoty BN a tvrdosti po šírke obežnej dráhy v mieste č.1 – (rez v ktorom boli zvýšeného hodnoty BN len v okrajovej zóne)



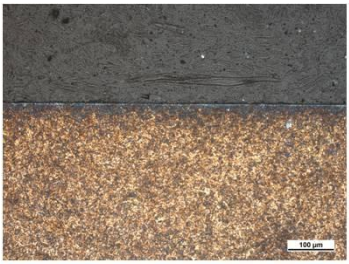
*Plocha čela krúžku (Č.1) - RMS BN **16***



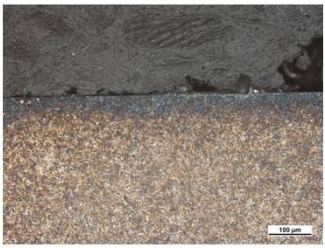
*Otvor krúžku OB - RMS BN **33***



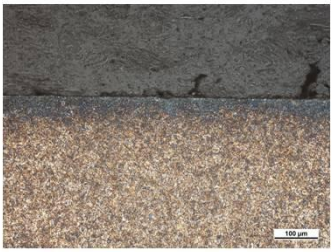
*Obežná dráha (2a 8b) - RMS BN **52***



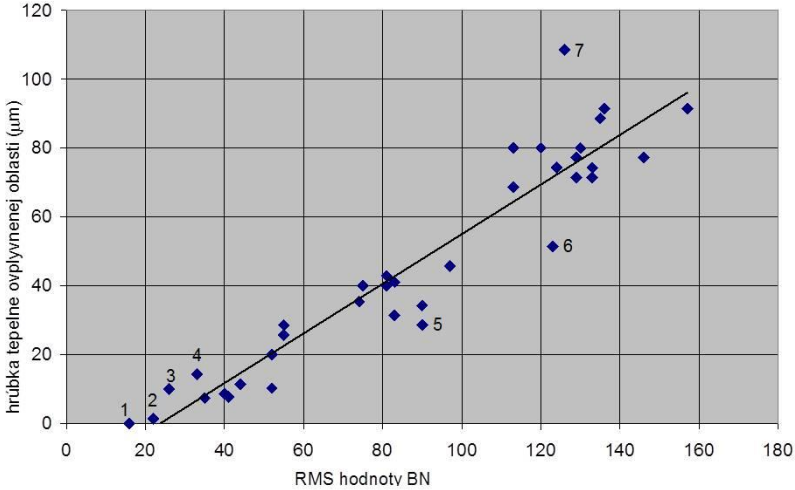
*Obežná dráha (1a 3b) - RMS BN **75***



*Obežná dráha (1a 1b) - RMS BN **124***

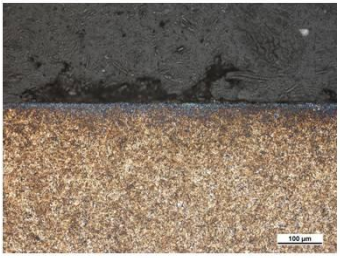


*Obežná dráha (1a 1a) - RMS BN **146***

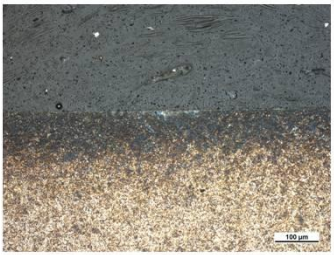


*Ak sa nastaví prahová hodnota BN je možné povrchy **monitorovať***
Prebrusovanie a párovanie poškodených telies

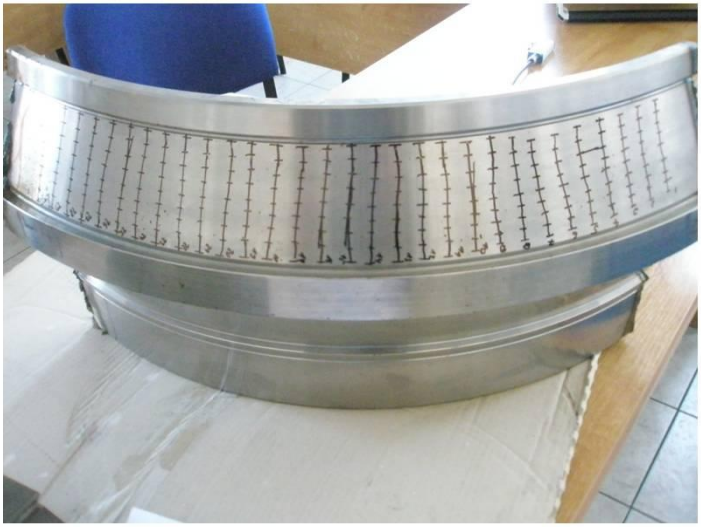
Zmena štruktúry pod povrchom nemá vždy rovnaké prejavy, podobné hodnoty BN, ale hrúbka tepelne ovplyvnenej vrstvy je odlišná



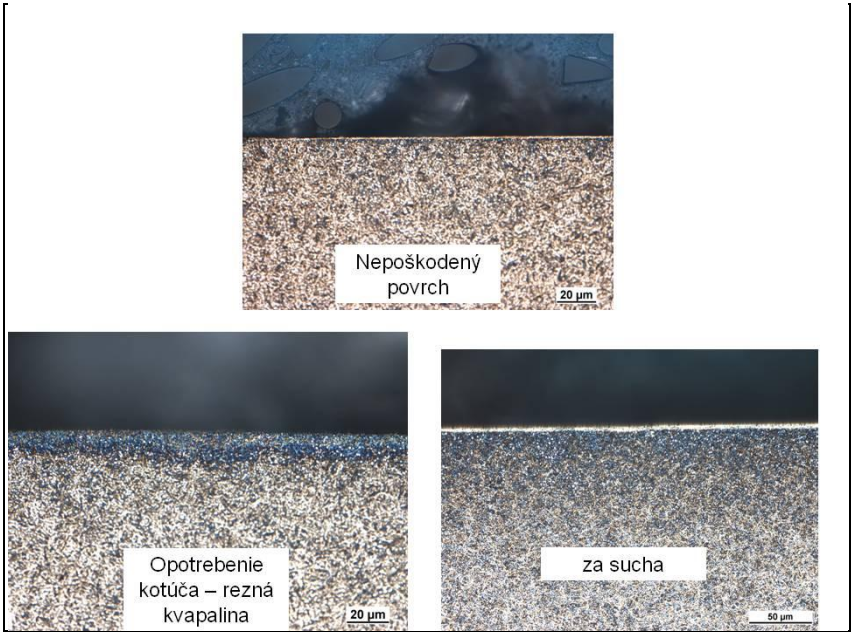
*Obežná dráha (1d 2d2) - RMS BN **123***

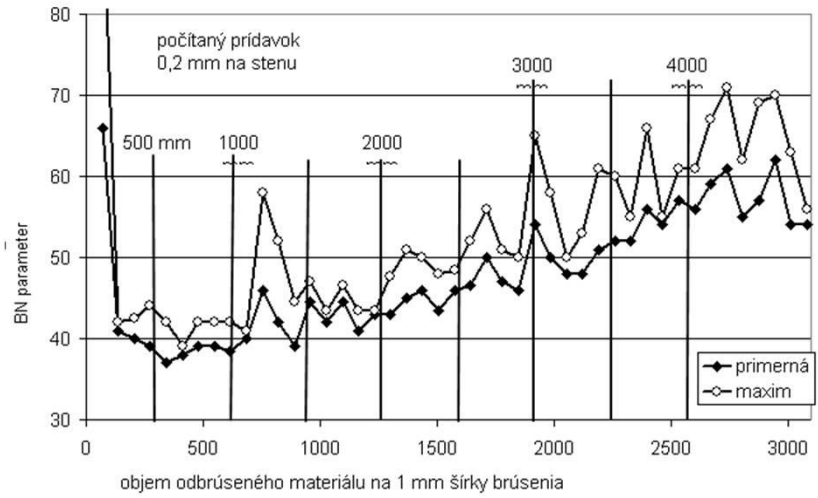


*Obežná dráha (3a 3B) - RMS BN **126***

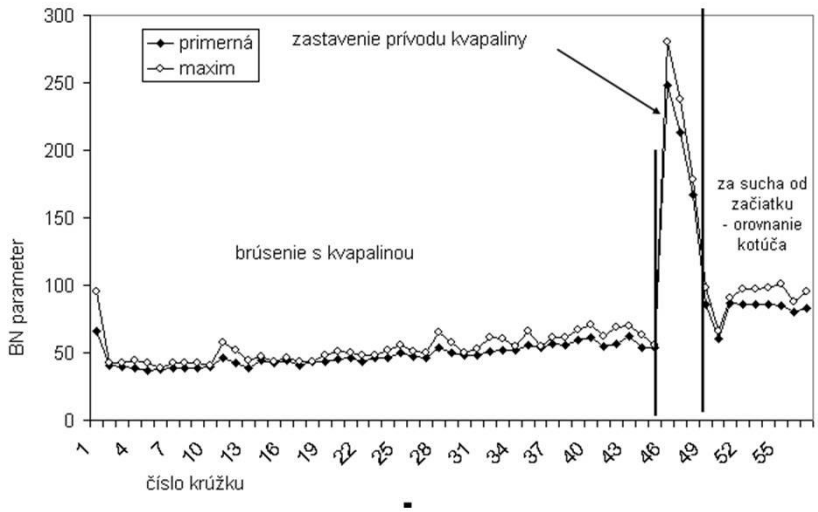


Rozloženie meraných bodov po obvode krúžku





Optimalizácia brúsenia



Kvapalina je slabé miesto

Konkurencieschopnosť

- odberateľ produkcie si vyžaduje kontrolu na popáleniny
- Preto musia existovať interné vnútropodnikové normy pre monitorizáciu povrchu – predpis ako kontrolovať
- Podlieha auditu odberateľov
- Ak to nie je výrobok nie je možné predať
- Integrácia Barkhausenovho šumu je bežný štandard vyspelých výrobných procesov v krajinách na západ od SR a ČR

- Tepelné spracovanie + deformácie telies
- Degradácia povrchov – únava, trecie procesy, korózia
- Povrchové úpravy
- Tvárnenie
- Fázové premeny
- Zvarové spoje
- iné

Výhody a nevýhody – ako ďalej

Prednosti Barkhausenovho šumu

- Prenosný systém
- Rýchla odozva
- Vysoká citlivosť
- Možnosť monitorovania veľkého počtu telies a plôch bez obmedzenia toku výroby
- Veľké možnosti adaptovať systém na konkrétnu úlohu
- Možné využiť v rámci automatizovaných cyklov a robotických buniek

nevýhody Barkhausenovho šumu

- Relatívna metóda – referenčné povrchy
- Len na feromagnetické materiály
- Závislé od geometrie povrchu a senzora
- Závislé od nastavenia systému
- Niekedy problematická interpretácia údajov
- Šum je údaj, v ktorom je informácia o tvrdosti, napätí a štruktúre (3 v jednom)

Kedy použiť Barkhausenov šum – ohľadom praktického využitia

- Operácie brúsenia a spevňovania povrchov
- **Potreba monitorovať povrch veľkého počtu súčiastok, alebo prescanovanie rozsiahlych plôch (ozubenia) v krátkom čase (hlavne kritické povrchy – vačkové hriadele, ložiská a pod.)**
- **Vysoké požiadavky na kvalitu povrchu**
- **Porovnávacie analýzy – dobrý/zlý**
- Feromagnetický materiál - odmagnetovaný

Kedy nepoužiť Barkhausenov šum – ohľadom praktického využitia

- Materiál nie je feromagnetický
- Jednorazové nastavenie technológie
- Trhliny na povrchu
- Potreba analyzovať veľké hĺbky pod povrchom
- Na integritu povrchu nie sú vysoké nároky

Čo ďalej

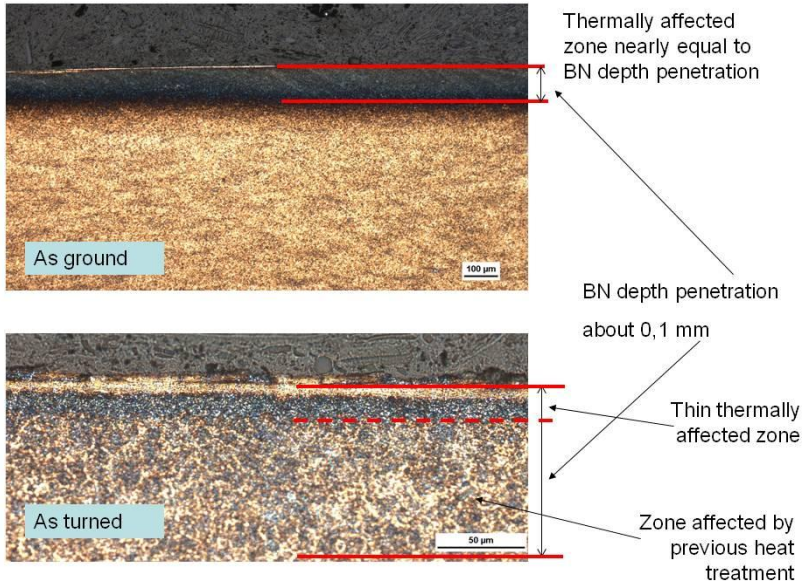
Kam sa uberá výskum v tejto oblasti a ako Barkhausenovské aplikácie v praxi fungujú

Tvrdé sústruženie a frézovanie

- Teploty v zóne rezania nad Currieho teplotou, kedy sa stráca feromagnetizmus
- Pri ochladzovaní sa nové Blochove steny vytvárajú prednostne v smere reznej rýchlosti
- Vytvára sa magnetická anizotropia a jej stupeň by mal korelovať s opotrebením nástroja a teda aj hrúbkou bielych vrstiev pod povrchom

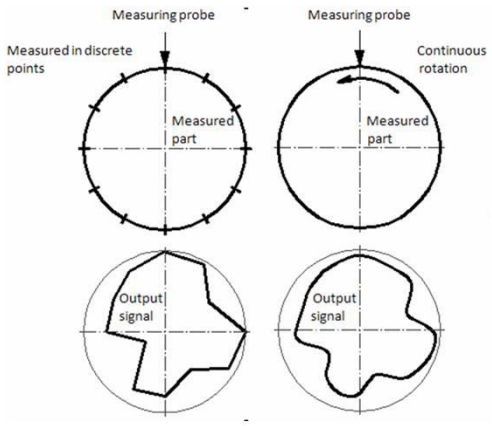
Základný výskum

- Interakcia Blochových stien s diskoláciami a rekryštalizácia
- Konfigurácia Blochových stien (AFM)
- Charakter Blochových stien v martenzite
- Hrúbka vrstvy z ktorej dostávame signál a útlm signálu – príspevok vrstiev



Praktické aplikácie

- Štúdium relaxácie napäti
- Analýzy degradácie povrchu
- Štúdium tenkých vrstiev
- Vplyv dynamické snímania na intenzitu signálu



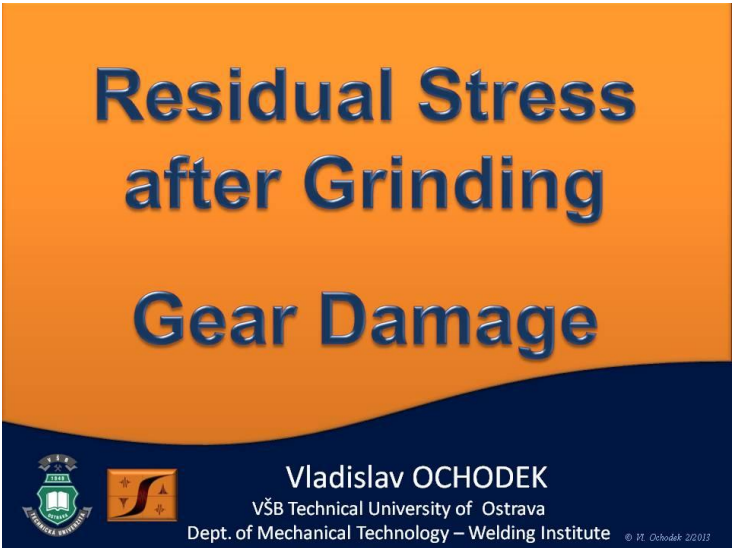
Dynamický a statický mód snímania povrchu

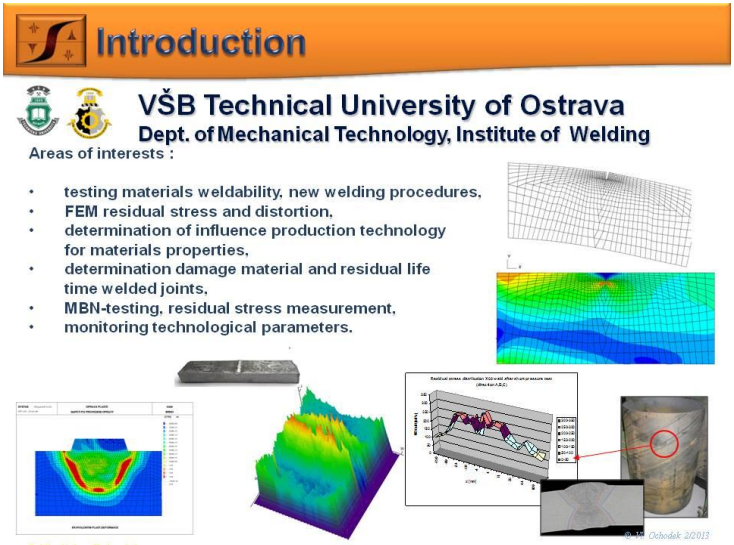
- Vo forme automatozovaných cyklov a robotických buniek

Residual Stress after Grinding-Gear Damage

Ing. Vladislav Ochodek

VŠB-TU Ostrava





Presentation contents :

1. Introduction
2. Residual stress after grinding – way to the gear damage
3. MBN Inspection
4. Gear samples
5. Hole drilling method
6. MBN Inspection - results
7. MBN Inspection - envelope
8. Conclusion

© Vl. Ochodek 2/2013

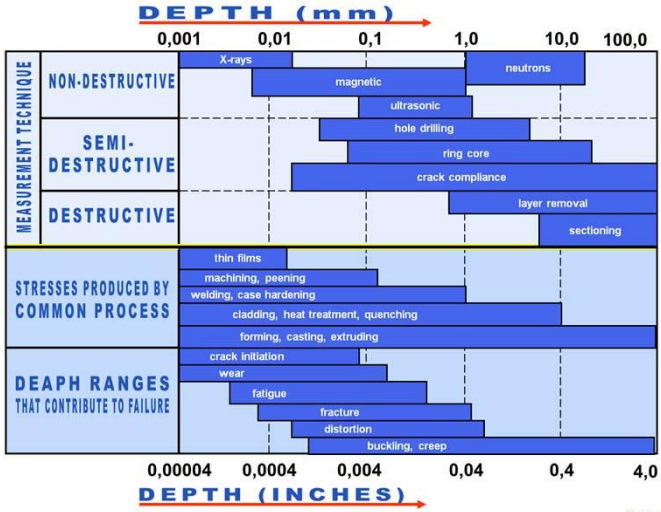
Residual Stress after Grinding

Gear Damage

Věnováno památce na prof. Ing. Pavla Macuru, DrSc.

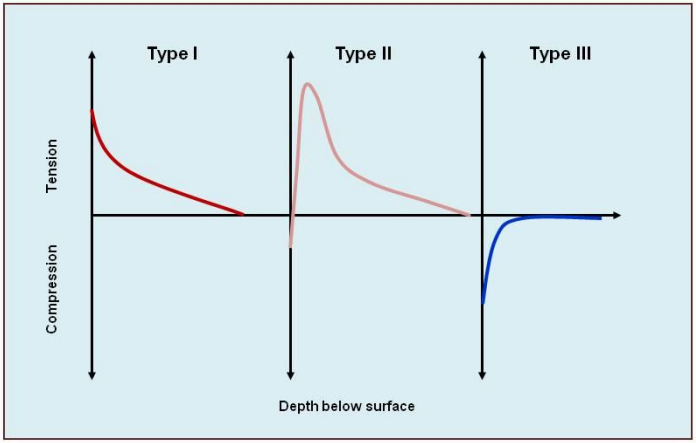
© Vl. Ochodek 2/2013

Residual Stresses Mesurement



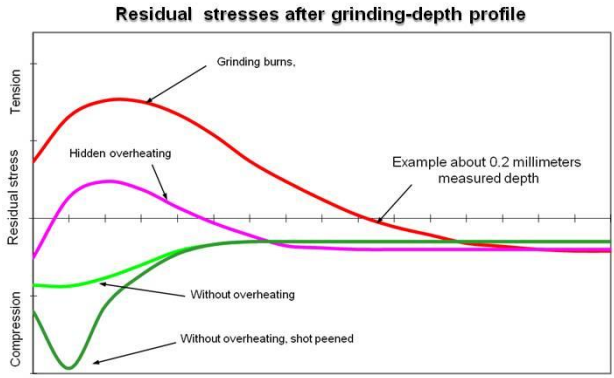
© W. Ochodek 2/2013

Residual Stresses after Grinding



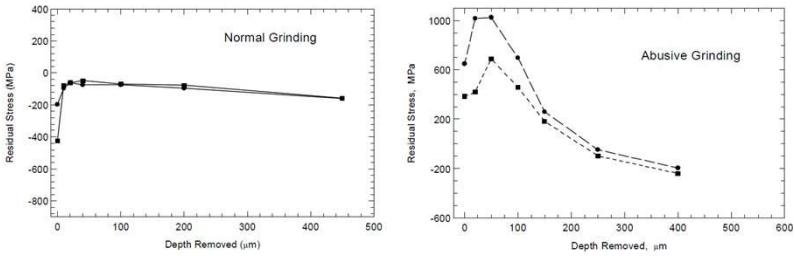
© W. Ochodek 2/2013

Residual Stresses after Grinding



© Vl. Ochodek 2/2013

Residual Stresses after Grinding



Residual stress profiles observed for normal and abusive grinding showing high tensile residual stresses sub-surface as a result of grinding damage.

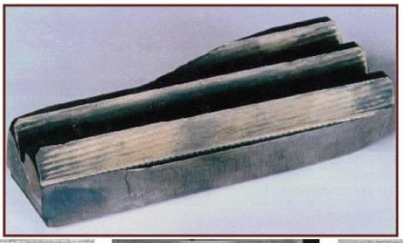
WOJTAS ,A.S.,SHAW ,B.A., EVANS,J.T., SUOMINEN,L Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method.ICBM-1. September 1-2, 1998, Hannover - Germany

© Vl. Ochodek 2/2013

Grinding Burns

© W. Ochodek 2/2013

Grinding Burns

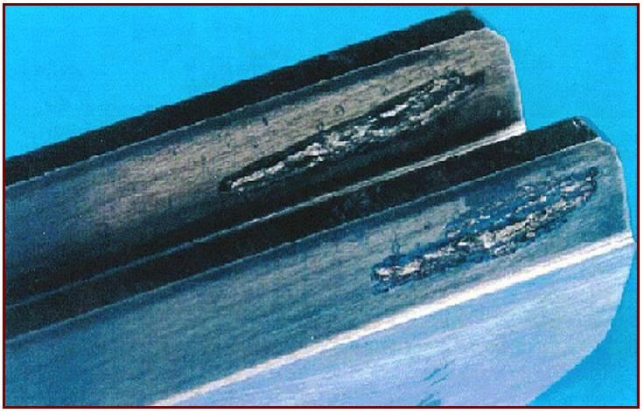


An etched gear tooth showing bands indicating damage and higher magnification images showing the contrast being due to localised microstructural changes.

SHAW, B.A, BENSON,M.,HOFMANN,D.A. Calibration of the Barkhausen Noise Method as a Tool for Assessing the Surface Integrity of Gear Steels, ICBM 2. October 25 - 26 1999,Newcastle Upon Tyne, UK

© W. Ochodek 2/2013

Gear Damage

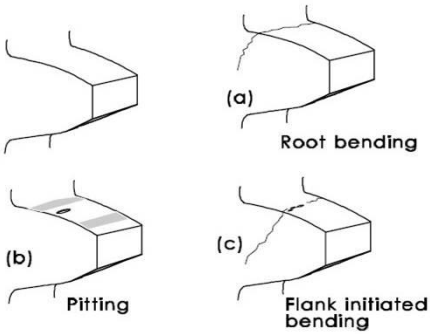


Example of damage which developed after abusive grinding.

SHAW, B.A, BENSON,M.,HOFMANN,D.A. Calibration of the Barkhausen Noise Method as a Tool for Assessing the Surface Integrity of Gear Steels, ICBM 2. October 25 - 26 1999,Newcastle Upon Tyne, UK

© Vl. Ochodek 2/2013

Fail Gear Wheels



Examples of common failure modes observed on gears. Modes b and c are often linked to grinding damage.

SHAW, B.A, BENSON,M.,HOFMANN,D.A. Calibration of the Barkhausen Noise Method as a Tool for Assessing the Surface Integrity of Gear Steels, ICBM 2. October 25 - 26 1999,Newcastle Upon Tyne, UK

© Vl. Ochodek 2/2013

Inspection Methods

Comparison of the Inspection Methods

	Barkhausen Method	Temper Etch	Micro Hardness
Nondestructive	Yes	No	Yes
Use of Chemicals	No	Yes	No
Automated	Yes	No	No
Reliable	Yes	No	No
Evaluation Through Coatings	Yes	No	No
Danger of Hydrogen Embrittlement	No	Yes	No
Influenced by Both Stress and Microstructure	Yes	No	No

Comparison of Nital (Temper) Etch, Micro Hardness and Barkhausen Noise Analysis.

WOJTAS ,A.S.,SHAW,B.A., EVANS,J.T., SUOMINEN,L. Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method.ICBM-1. September 1-2, 1998, Hannover - Germany

© W. Ochodek 2/2013

Nital Etch

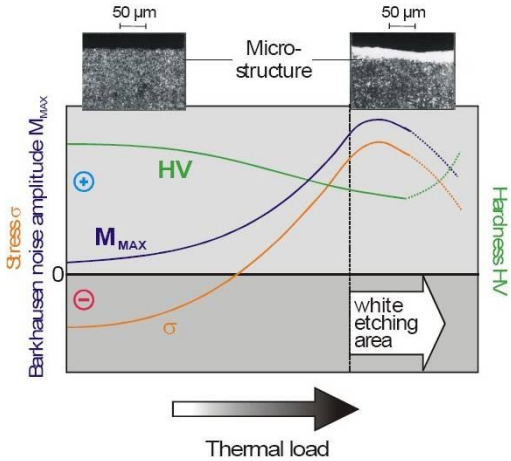
Ratings by Nital etch corresponding to different strength of thermal damage.

Appearance of surface	Nital Rating	Description	Strength of damage
	1	Sound surface.	None
	2	Thermal damage with appearance of tempering.	Low
	3	Thermal damage with appearance of re-hardening.	Medium
	4	Thermal damage characterised by a re-hardening island surrounded by a border of tempering.	Strong

MARCO MOURGLIA,M.,WOJTAS,A.BRUNO,E. Improvement of the Quality Inspection of Aerospace Bearings using the Magnetic Barkhausen Noise Analysis.ICBM-4, July 3 – 4, 2003, Brescia , Italy.

© W. Ochodek 2/2013

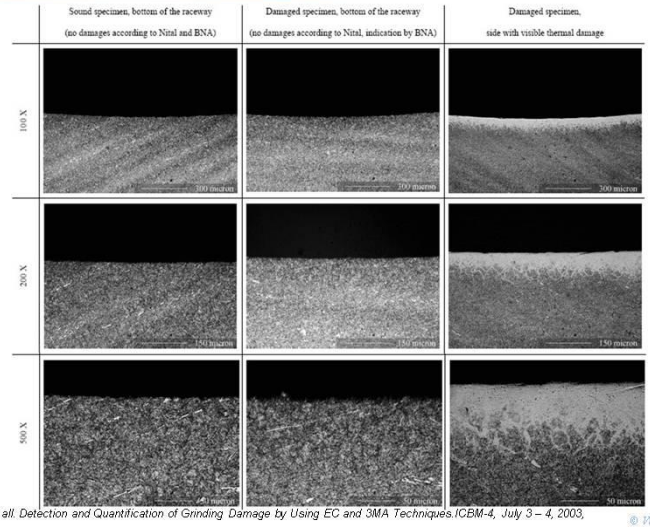
MBN - HV - σ



WOLTER,B., at all. Detection and Quantification of Grinding Damage by Using EC and 3MA Techniques.ICBM-4, July 3 – 4, 2003, Brescia , Italy.

© Vl. Ochodek 2/2013

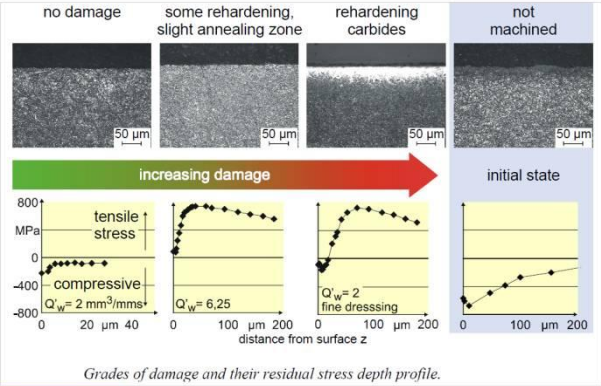
Microstructure



WOLTER,B., at all. Detection and Quantification of Grinding Damage by Using EC and 3MA Techniques.ICBM-4, July 3 – 4, 2003, Brescia , Italy.

© Vl. Ochodek 2/2013

Residual Stress



Grades of damage and their residual stress depth profile.

H. K. TÖNSHOFF, K.,H.,MANDRYSCH, T. Quality control in profile grinding of large gears using micromagnetic techniques.ICBM-3, July 2003, Tampere-Finland

© Vl. Ochodek 2/2013

Barkhausen Noise Inspection MBN

© Vl. Ochodek 2/2013

Factor Influencing the Magnetization Process

Domain structure is determined by the lowest magnetic energy:

E Total = E microstructure + E stress induced alignment + E Applied magnetic field + (- E demagnetising field)

Factors affecting this include:

- Microstructural features
  - Grain boundaries, second phase precipitates
  - Average size and distribution
- Applied / residual stress
  - Tensile or compressive and magnitude
  - Through depth stress gradient
- Plastic deformation
  - Dislocation density
  - Arrangement of dislocation structure

© Vl. Ochodek 2/2013

MBN

The effective voltage (RMS) of the induced Barkhausen Signal is further referred to as the Magnetoelastic Parameter (abrev. MP or MBN)

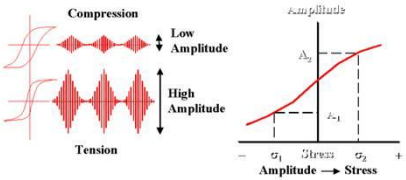
It can be calculated from the following formula:

$$MBN = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} x_i^2}$$

© Vl. Ochodek 2/2013

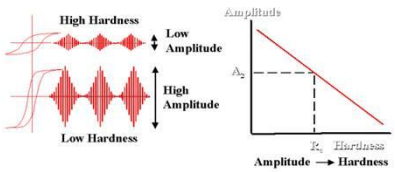
Effect of Stress & Hardness on MBN

Effect of Stress



Barkhausen Noise Amplitude vs. Stress

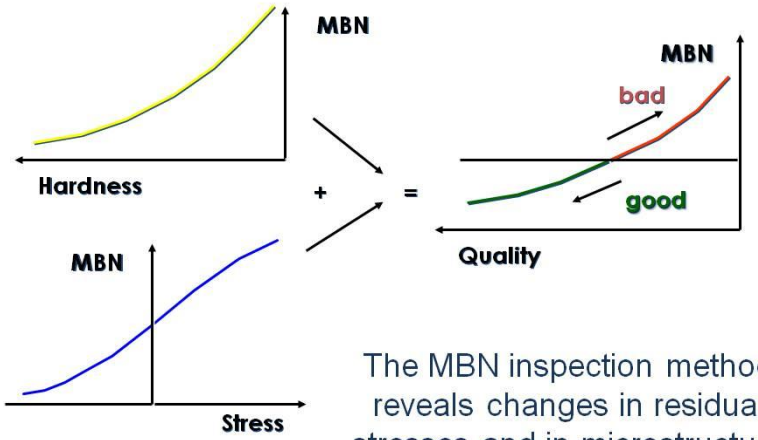
Effect of Hardness



Barkhausen Noise Amplitude vs. Hardness.

© Vl. Ochodek 2/2013

MBN Inspections

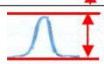
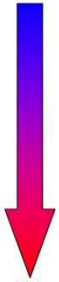
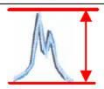
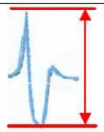


The MBN inspection method reveals changes in residual stresses and in microstructure

© Vl. Ochodek 2/2013

MBN Inspections - value

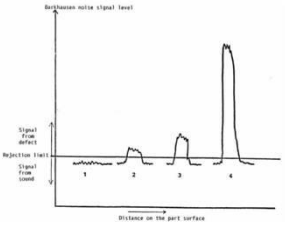
Barkhausen Noise parameters significant in the evaluation of the strength of the thermal damage.

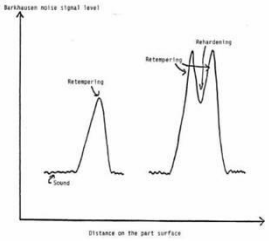
Barkhausen Noise results		Description	Strength of damage
MP plot	*Max-Min*		
	Low	Sound surface.	None
		Barkhausen Noise plot show a peak in the damaged zone.	Low
		Barkhausen Noise plot show a subsequent maximum, minimum and maximum in the damaged zone, with strong variations.	Medium
	High	Barkhausen Noise plot is similar to that of medium thermal damage, but the variations are also stronger.	Strong

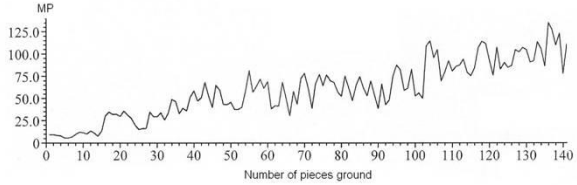
MARCO MOURGLIA,M.,WOJTAS,A.BRUNO,E. Improvement of the Quality Inspection of Aerospace Bearings using the Magnetic Barkhausen Noise Analysis.ICBM-4, July 3 – 4, 2003, Brescia , Italy.

© W. Ochodek 2/2013

MBN Inspections - value

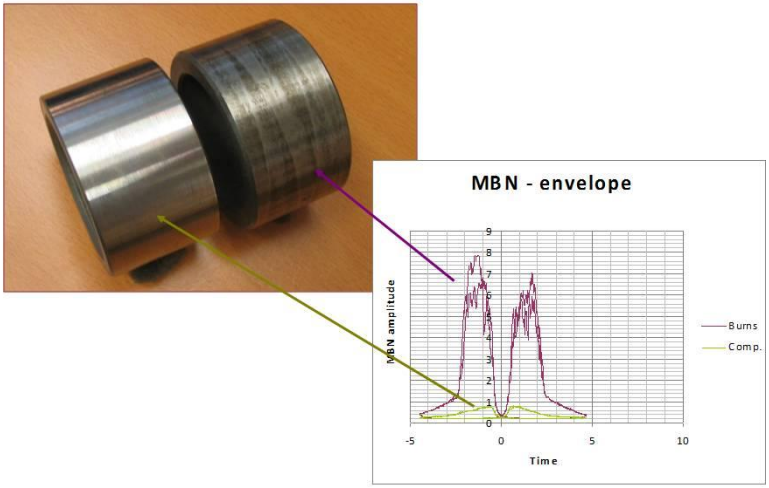






© W. Ochodek 2/2013

MBN Inspections-envelope



© Vl. Ochodek 2/2013

Gear Samples

© Vl. Ochodek 2/2013

Samples

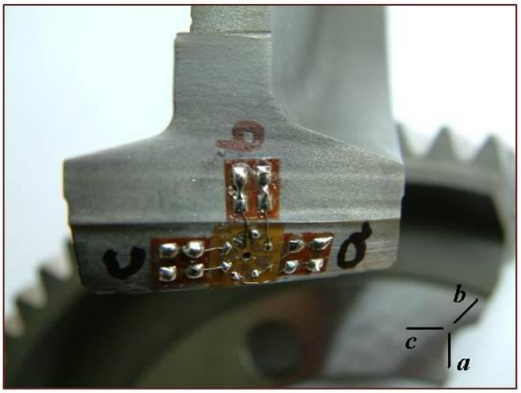
Wheel A - u Win
Wheel B- nano Win

© Vl. Ochodek 2/2013

Hole Drilling Method

© Vl. Ochodek 2/2013

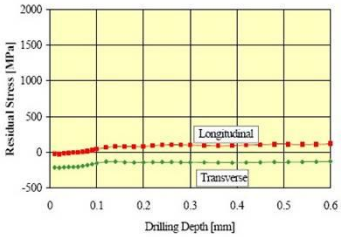
Residual Stress (H.Dr.M.)

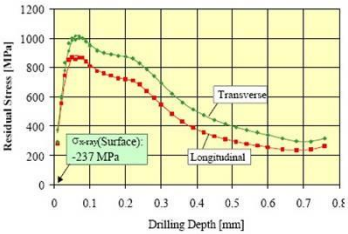


Location and orientation of strain gauge rosettes.

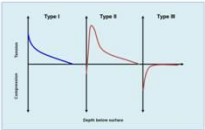
© Vl. Ochodek 2/2013

Residual Stress (H.Dr.M.)





Residual stress pattern measured on a gear tooth with the hole drilling method for surfaces without and with grinding defect



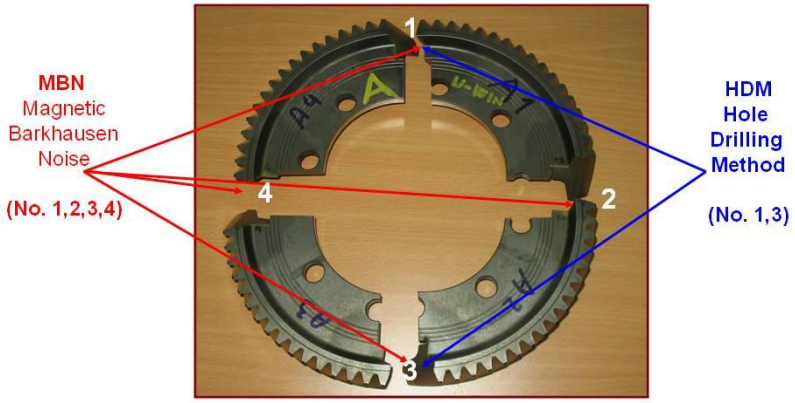
WOLTER, B., at all. Detection and Quantification of Grinding Damage by Using EC and 3MA Techniques.ICBM-4, July 3 – 4, 2003, Brescia , Italy.

© Vl. Ochodek 2/2013

Barkhausen Noise Inspection Results

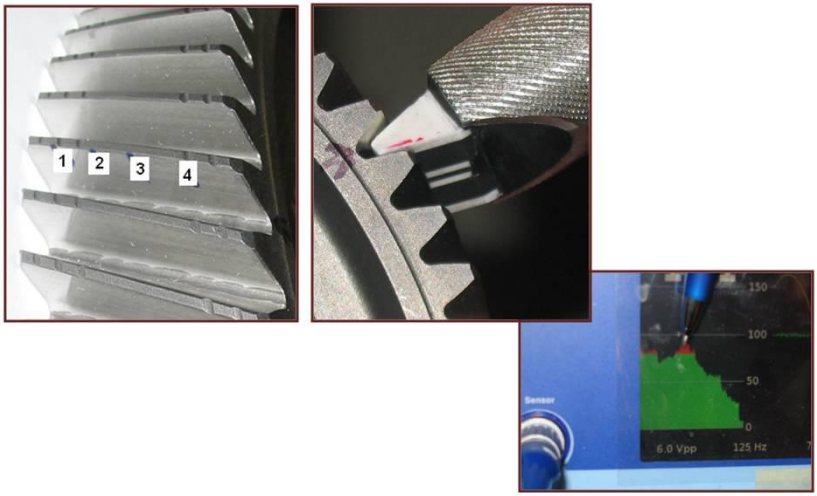
© M. Ochodek 2/2013

Samples



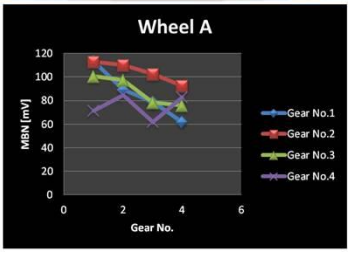
© M. Ochodek 2/2013

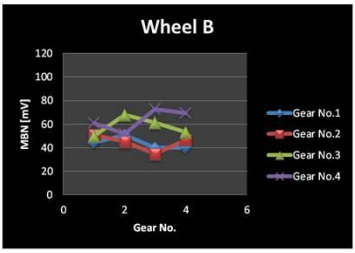
MBN Inspections

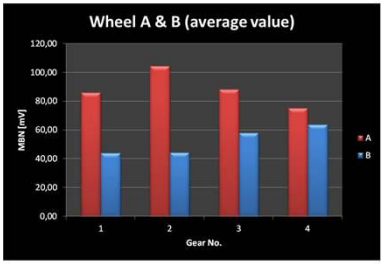


© M. Ochodek 2/2013

MBN Inspections







MBN A = 88

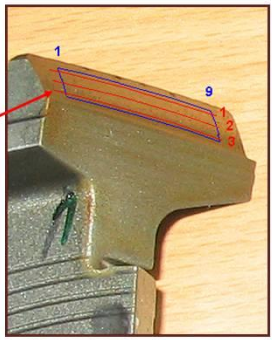
MBN B = 52

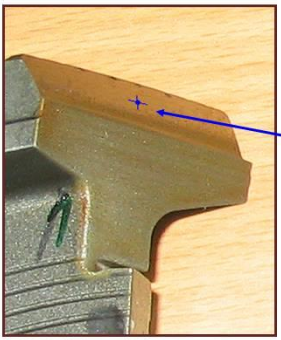
© M. Ochodek 2/2013

MBN Inspections

MBN
Magnetic
Barkhausen
Noise

(No. 1,2,3,4)



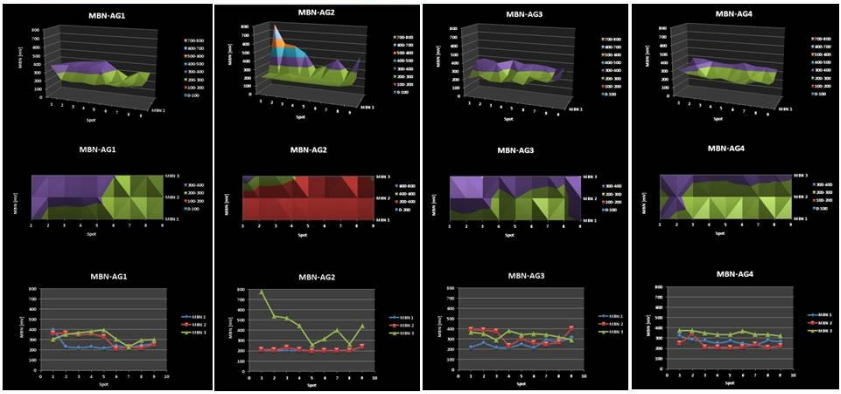


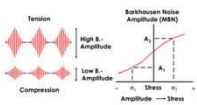
HDM
Hole
Drilling
Method

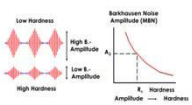
(No. 1,3)

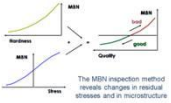
© W. Ochodek 2/2013

MBN Inspections - A



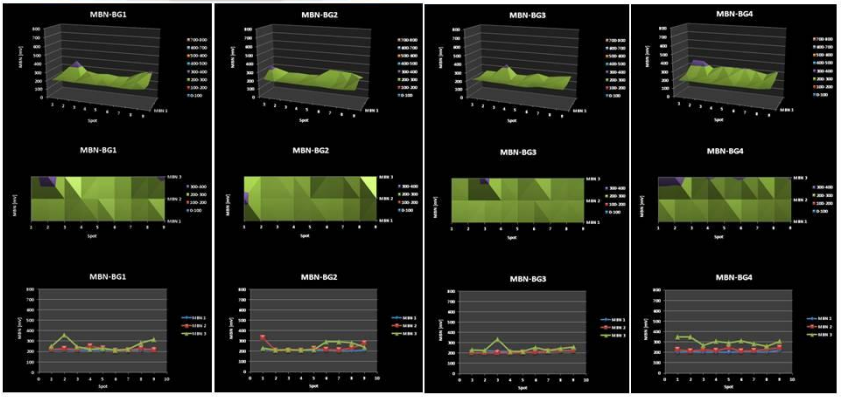


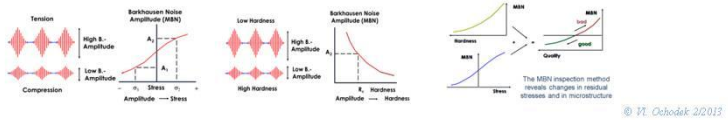




© W. Ochodek 2/2013

MBN Inspections - B



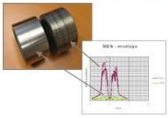


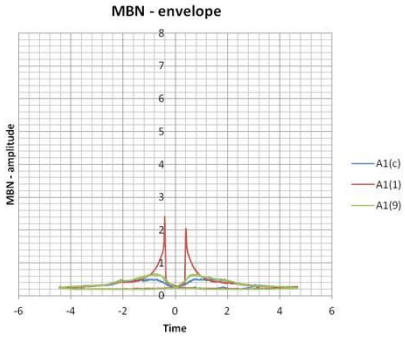
© M. Ochodek 2/2013

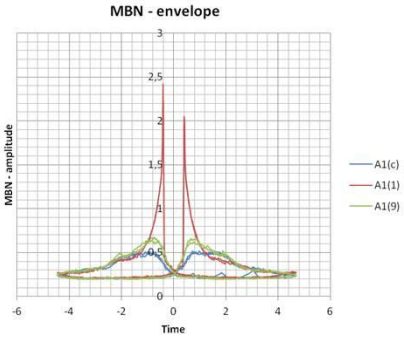
Barkhausen Noise Envelope

© M. Ochodek 2/2013

MBN - envelope A

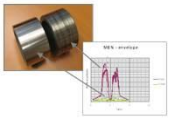


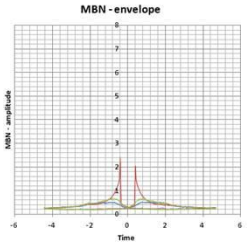


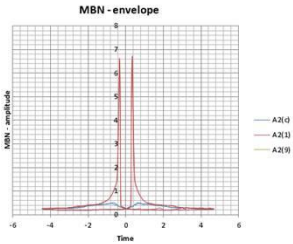


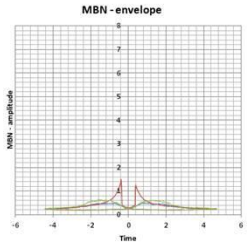
© Vl. Ochodek 2/2013

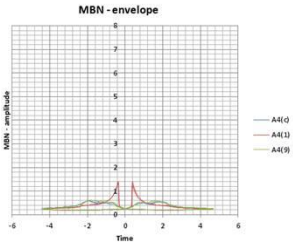
MBN - envelope A





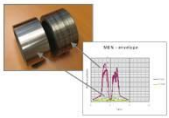


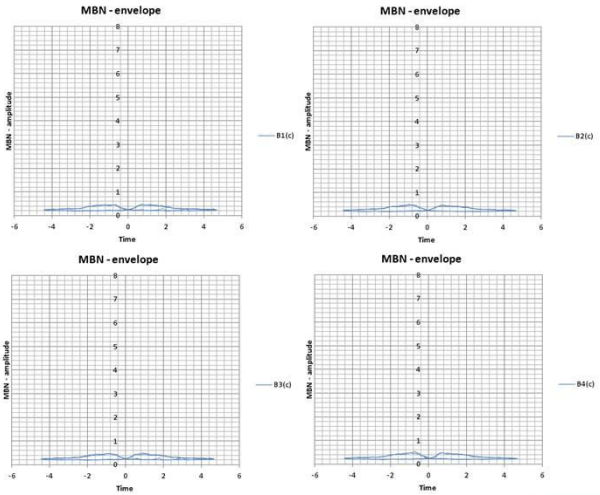




© Vl. Ochodek 2/2013

MBN - envelope B





© W. Ochodek 2/2013

Conclusion's

On the surface all grinded wheels was indicated compressive residual stress.

B-Nano-Win - compressive stress, equal and low value MBN.

A-U-Win - compressive stress, local high value MBN, occurrence of tensile stresses.

Both wheels were not detected grinding burns.

© W. Ochodek 2/2013

Contact

VŠB Technical University of Ostrava
Dept. Of Mechanical Technology

vladislav.ochodek@vsb.cz

Prezentace je duševním vlastnictvím autora a jakékoliv rozmnožování celé prezentace nebo její části je bez jeho souhlasu je nepřípustné. Poskytování prezentace případně jejich částí osobám třetím je bez souhlasu autora nepřípustné.

© V. Ochodek 2/2013

Metoda analýzy Barkhausenova šumu

Ing. Lucie Vrkoslavová

TU Liberec

ÚVOD

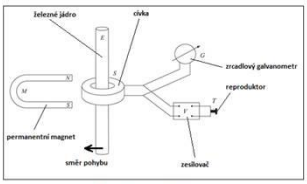
- Nedestruktivní metoda hodnocení integrity povrchu z hlediska zbytkových napětí, tvrdosti vzorků a strukturních a fázových změn.
- Magnetická metoda → použití pro feromagnetické materiály.
- Využití ve vědě i v průmyslových aplikacích.

2

HISTORIE

Heinrich Georg Barkhausen

- Barkhausenův šum objevil v 1919 profesor Heinrich Georg Barkhausen.
- Přiblížíme či vzdálíme-li magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Tento šum, jak ukázal paralelní vývoj kvantové mechaniky v oněch dávných dobách, souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetika.



Původní uspořádání

3

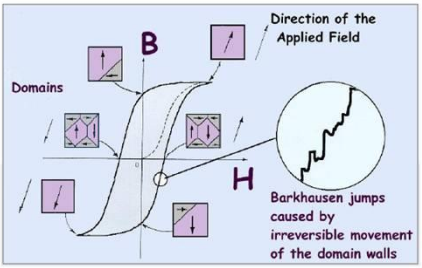
PRINCIP ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU

- **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

4

PRINCIP ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU

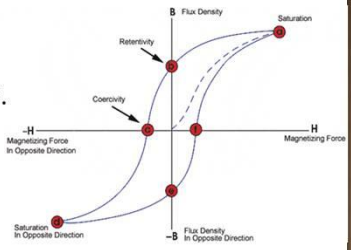
- Proces magnetizace je charakterizován **hysterezní křivkou**, není spojitý, ale skládá se z malých skoků. Shrnutím všech elektrických pulsů vzniká signál zvaný Barkhausenův šum.



5

PRINCIP ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU

- **Hysterezní smyčka** vyjadřuje závislost mezi magnetickou indukcí (*B*) a intenzitou magnetické (*H*)
- **Remanentní** (zbytková) **indukce** B_r (bod b) zůstává i po snížení intenzity magnetického pole na nulu (po tom, co materiál přestaneme magnetovat).
- **Koercitivní síla** H_c (bod c) -je potřebná k odmagnetování materiálu (zrušení B_r). Čím je koercitivita větší, tím je materiál tzv. magneticky tvrdší.
- **Saturace** (bod a) - dochází k magnetickému nasycení materiálu. Pokud zvýšíme intenzitu magnetického pole nad tuto hodnotu, magnetická indukce se již nezvýší.



B = μ.H

6

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.

7

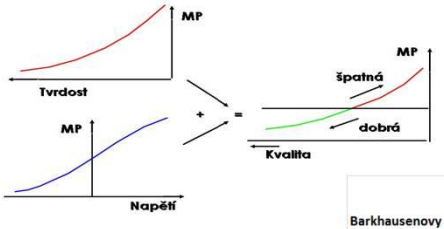
OVLIVŇUJÍCÍ FAKTORY

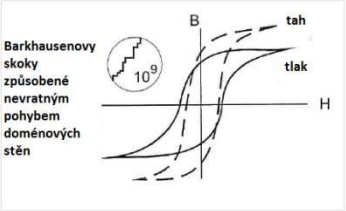
- **Metalurgická struktura** – lze hrubě popsat za použití pojmu tvrdost. Intenzita signálu spojitě klesá s rostoucí tvrdostí. Je to důsledkem blokace pohybu doménových stěn na mřížkové úrovni v zásadě stejnými překážkami a defekty jako pohyb dislokací při plastické deformaci.

8

OVLIVŇUJÍCÍ FAKTORY

Vliv tvrdosti a zbytkového napětí

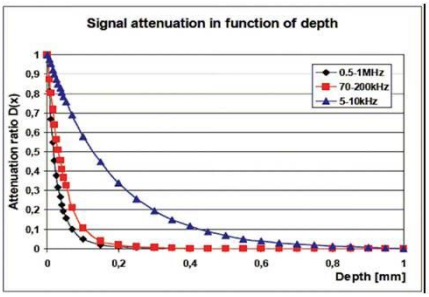




9

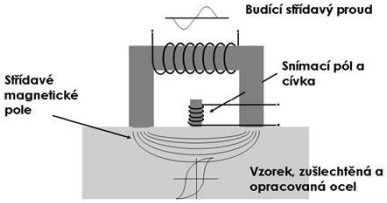
ÚTLUM SIGNÁLU

- 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. ***měřící hloubka***.



10

KONSTRUKCE SNÍMAČE



11

MICROSCAN 600

- digitální analyzátor Barkhausenova šumu
- kontrola kvality povrchu a podpovrchových vad týkajících se změn v napětí a mikrostruktuře
- Viewscan
- Microscan
- různé druhy snímačů

12

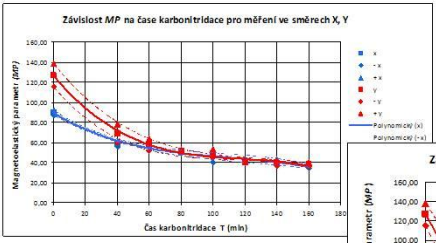
APLIKACE

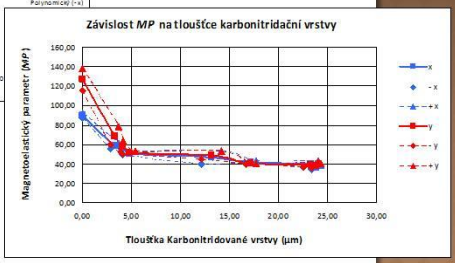
- 1) Cementovaný vzorek s trhlinkami

13

APLIKACE

- 2) Karbonitridované vzorky

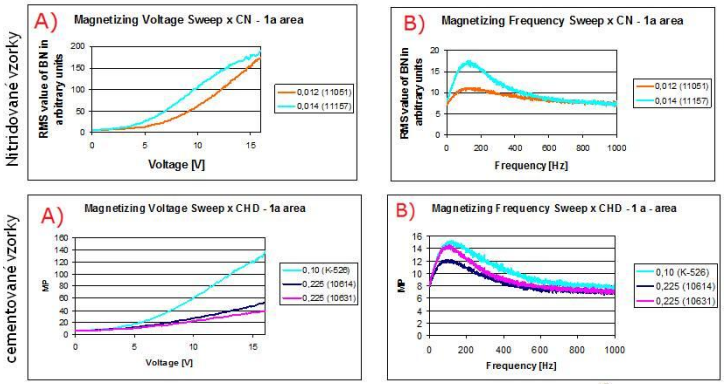




14

APLIKACE

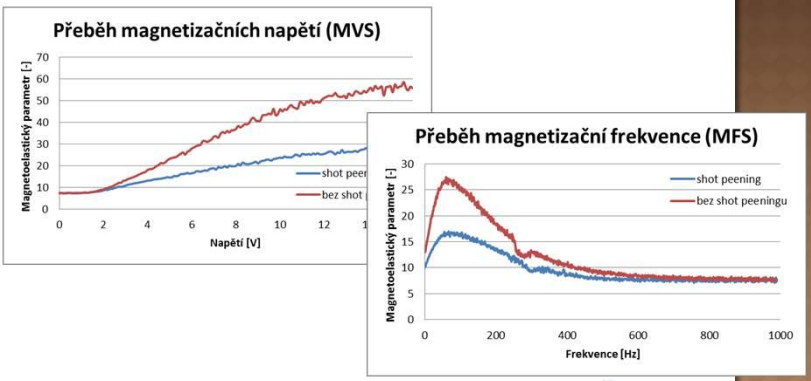
- 3) Využití přeběhů magnetizačního napětí a magnetizační frekvence k hodnocení vzorků



15

APLIKACE

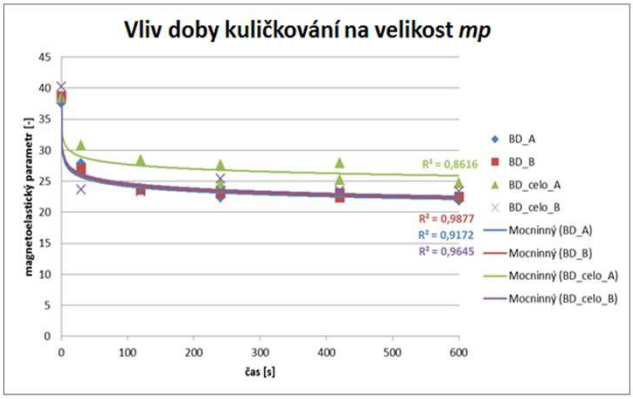
- 4) Vliv kuličkování na velikost magnetoelastického parametru (*mp*)



16

APLIKACE

- 4) Vliv kuličkování na velikost *mp*



17

APLIKACE

- 5) Korelace RTG difrakce vs. Barkhausenův šum

- cementovaná a následně broušená ozubená kola
- hodnocení boků zubů analýzou Barkhausenova šumu a metodou rentgenové difrakce
- korelace povrchových měření i hloubkových profilů

18

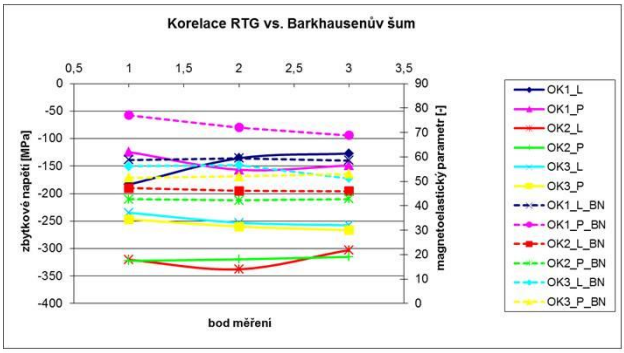
APLIKACE

- 5) Korelace RTG difrakce vs. Barkhausenův šum
  - Mobilní difraktometr X3000

19

APLIKACE

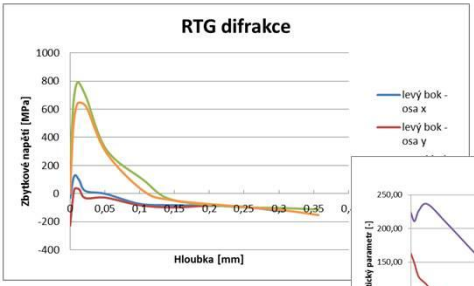
- 5) Korelace RTG difrakce vs. Barkhausenův šum

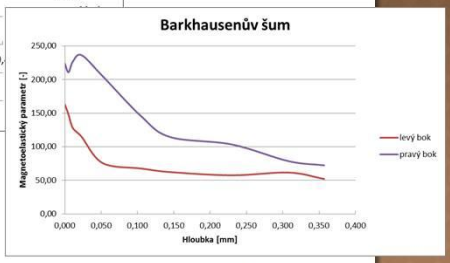


20

APLIKACE

- 5) Korelace RTG difrakce vs. Barkhausenův šum





21

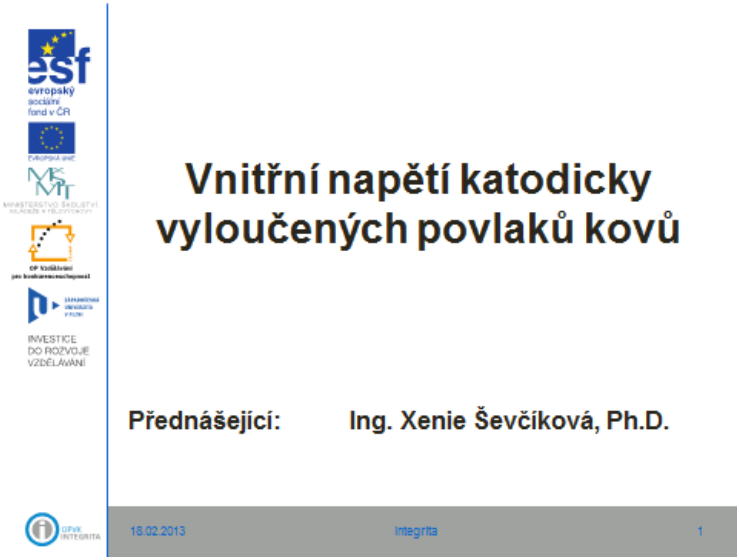
Děkuji Vám za pozornost!

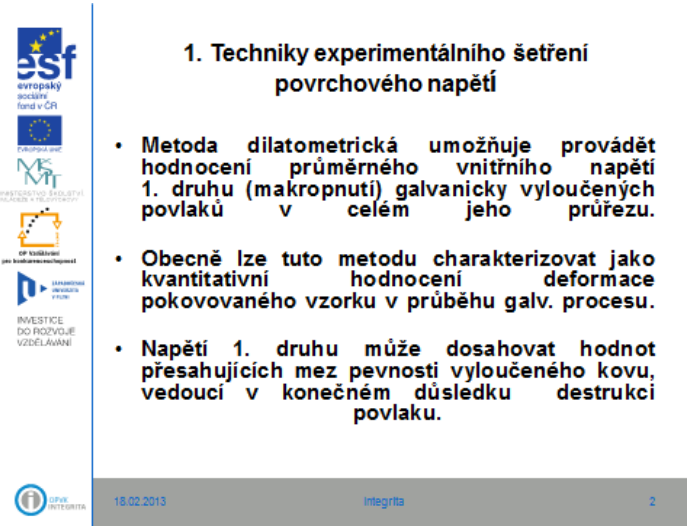
22

Hodnocení vnitřního napětí katodicky vyloučených povlaků kovů

Ing. Xenie Ševčíková, PhD.

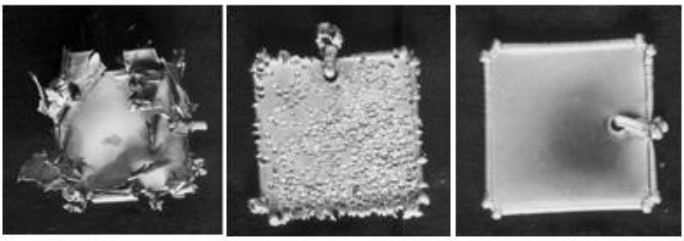
VŠB-TU Ostrava





1. 1 Techniky experimentálního šetření povrchového napětí

Vliv přísad na vlastnosti a vzhled povlaků

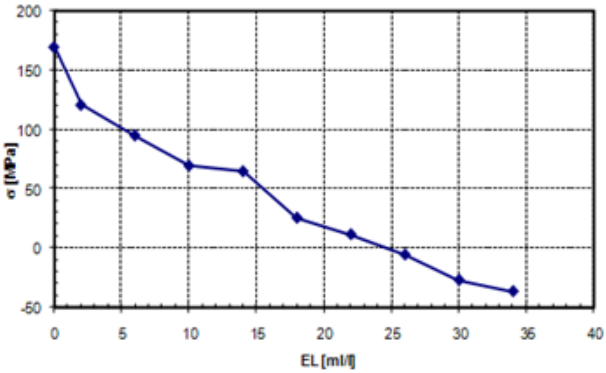


Obr. 1 Vliv vnitřních napětí povlaku Ni-Fe na jeho vzhled při různém obsahu přísady snižující vnitřní napětí

1. 2 Techniky experimentálního šetření povrchového napětí

- Vnitřní napětí je důsledkem mřížkových poruch a deformací mřížky, ke kterým dochází během procesu galvanického vylučování kovů.
- Dilatometrickou metodou lze zjišťovat pouze vertikálně orientovaná napětí.
- Průběh napětí ve směru příčném a ve směru růstu vrstvy tímto způsobem měřit nelze.
- Rostoucí napětí může v některých případech snížit kvalitu přilnavosti a korozní odolnosti vyloučené vrstvy.

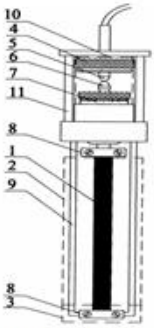
2. Vliv přísad na vlastnosti a vzhled povlaků

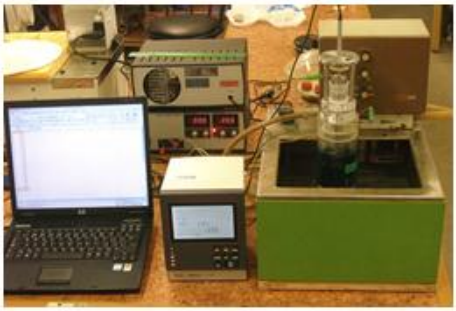


Obr. 2 Vliv komerční přísady (EL) na vnitřní napětí povlaku Ni-Fe

3. Příprava a průběh měření

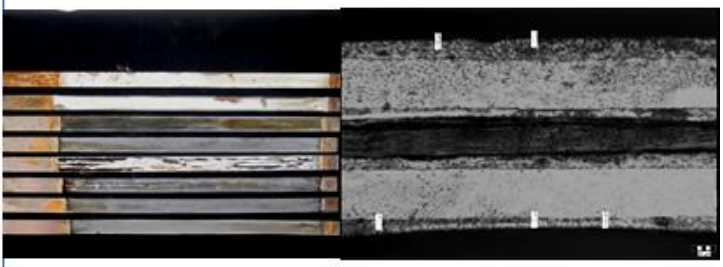
ČSN 03 8162 *Elektrolyticky vyloučené kovové povlaky – Metoda stanovení vnitřního napětí.* Praha: Český normalizační institut, 1987.





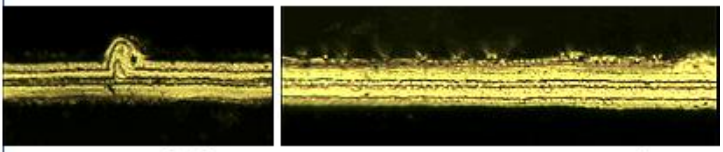
Obr. 3 Schéma , komponenty dilatometrického měření, IS – metr, měřicí pracoviště

4. Povlaky vyloučeny z elektrolytu na bázi Fe



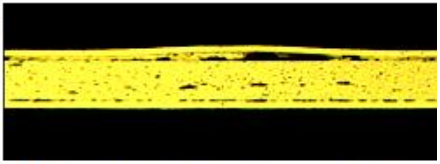
Obr. 4 Nerovnoměrný povlak. Příčinou může být nižší teplota chloridové lázně s kombinací nízké proudové hustoty. Vzorek byl vyloučen při proudové hustotě 2 A/dm² a teplotě 80°C. Na zkušebním vzorku bylo provedeno několik měření k získání střední hodnoty tloušťky vyloučené Fe vrstvy. Tato hodnota byla 15,2 µm.

5. Povlaky vyloučeny z elektrolytu na bázi Ni-Fe

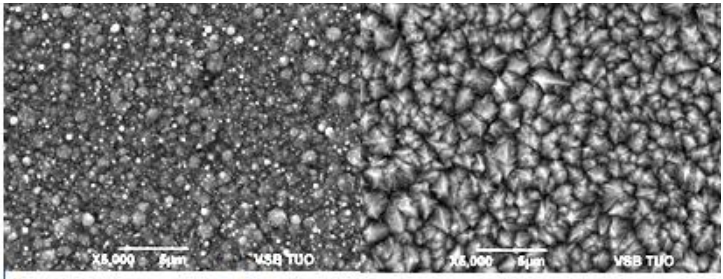


Obr. 5 Lamelární struktura Ni-Fe povlaku, lehce vroubkovaná v důsledku nečistot povlaku (M 200:1)

Obr. 5. 1 Vodíkový pitting Ni-Fe povlaku.



Obr. 5. 2 Anomální průběh prvotního vyloučení mezivrstvy Ni charakteru (M 20:1)

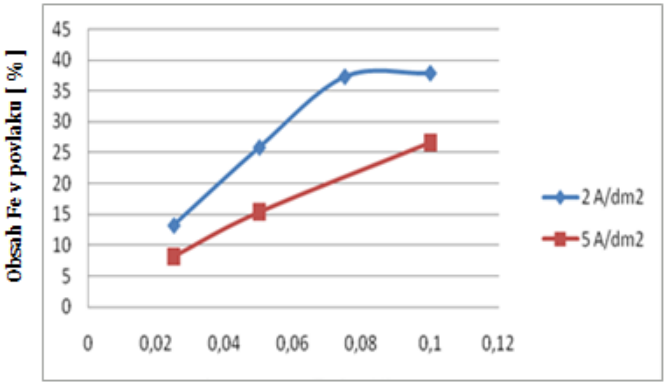


Obr. 5. 3 Vlevo: slitinový povlak Ni-Fe, vpravo: galv. povlak Fe

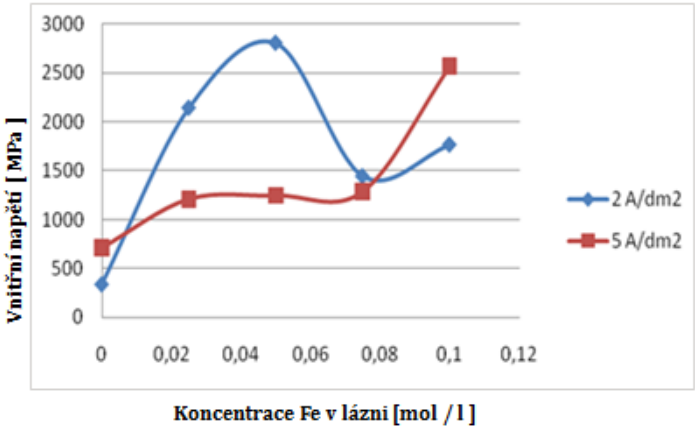
Tab.1 Hodnoty obsahu Fe a Ni ve slitinovém povlaku povlaku

WEIGHT %			Fe	Ni
1			13,24	86,76
2			8,22	91,78
3			25,81	74,19
4			37,22	62,79
5			15,38	84,62
6-Fe povrch	Si 0,70	Mn 0,91	98,40	
7-Ni-Fe pov.			26,60	73,40

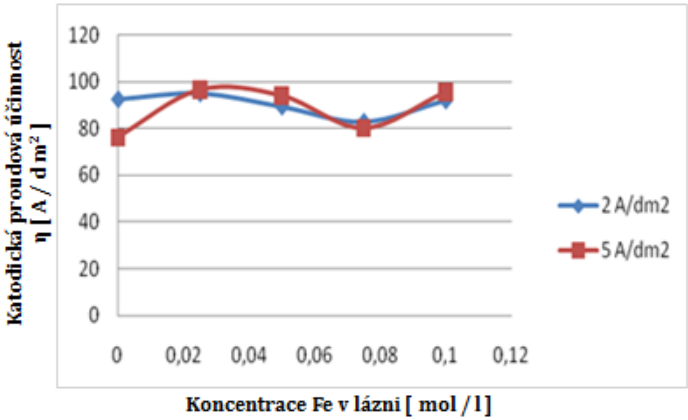
6. Závislost obsahu Fe v povlaku v návaznosti na obsahu železa v elektrolytu



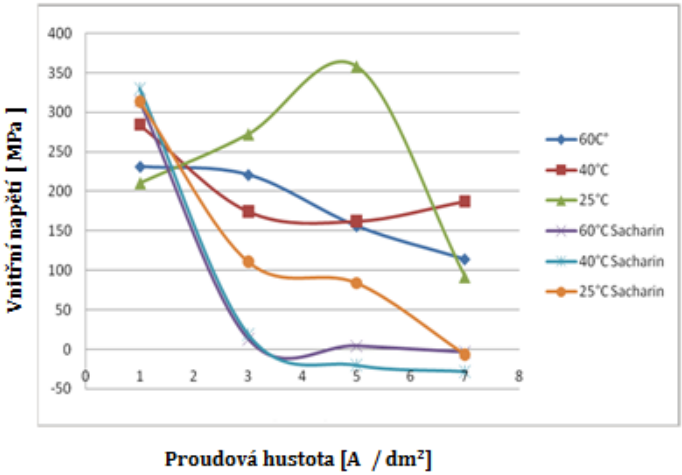
6. 1 Závislost koncentrace Fe v elektrolytu na vnitřním napětí



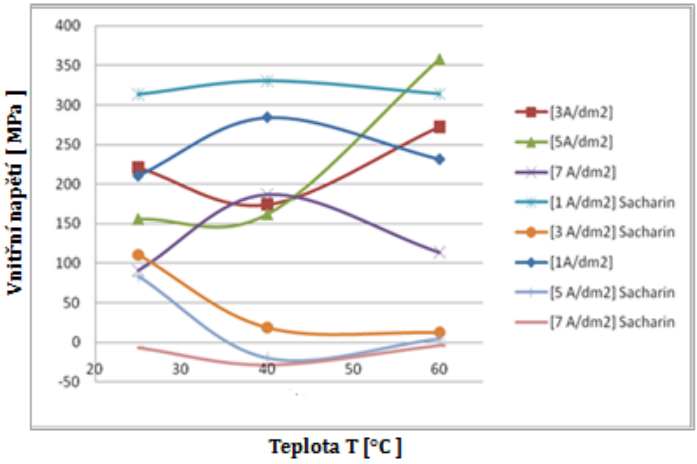
6. 2 Katodická proudová účinnost v závislosti na koncentraci Fe v elektrolytu



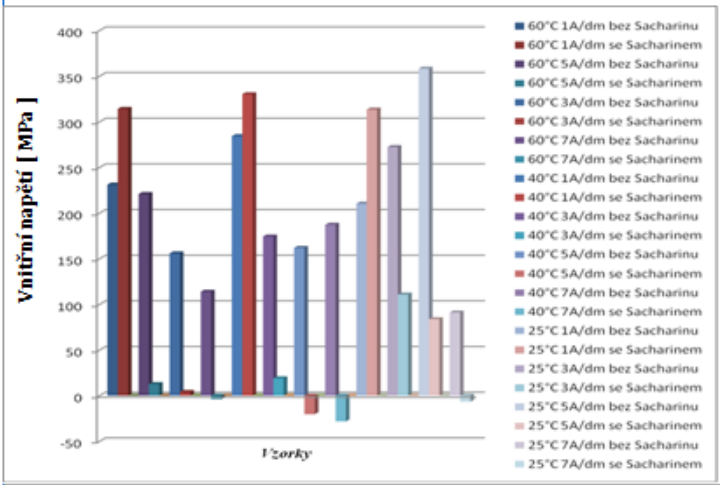
6. 3 Závislosti vnitřního napětí na proudové hustotě



6. 4 Závislost vnitřního napětí na teplotě

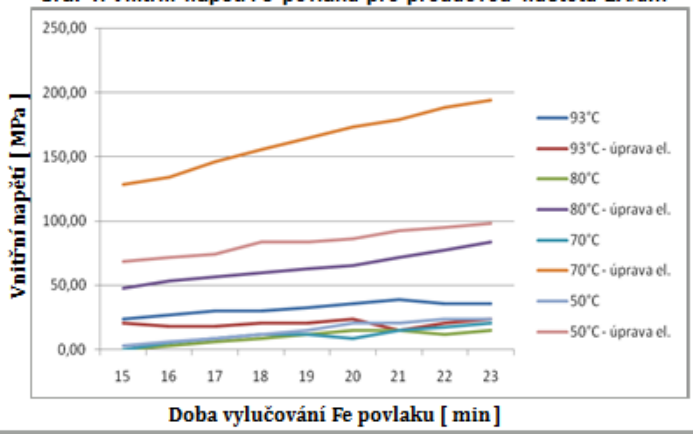


6. 5 Závislost vnitřního napětí na obsahu Sacharinu



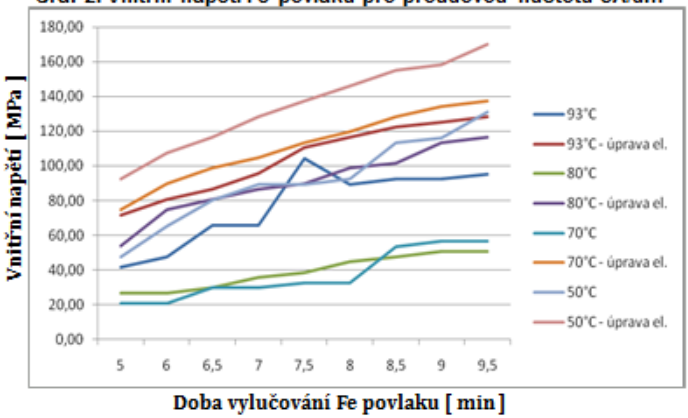
7. Závislost vnitřního napětí na změně složení chloridového elektrolytu

Graf 1. Vnitřní napětí Fe povlaku pro proudovou hustotu 2A/dm²



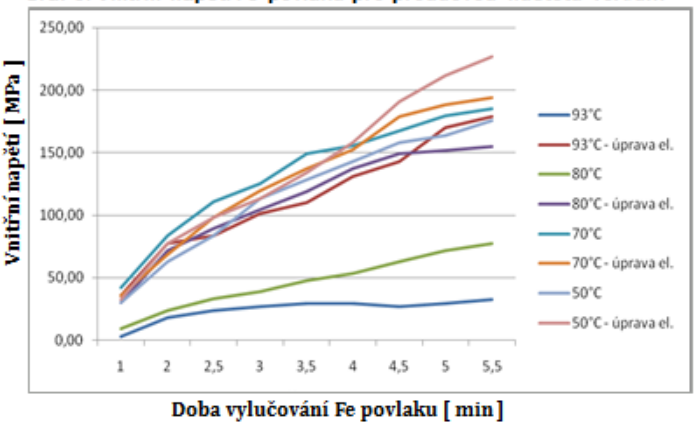
7. 1 Závislost vnitřního napětí na změně složení chloridového elektrolytu

Graf 2. Vnitřní napětí Fe povlaku pro proudovou hustotu 5A/dm²



7. 2 Závislost vnitřního napětí na změně složení chloridového elektrolytu

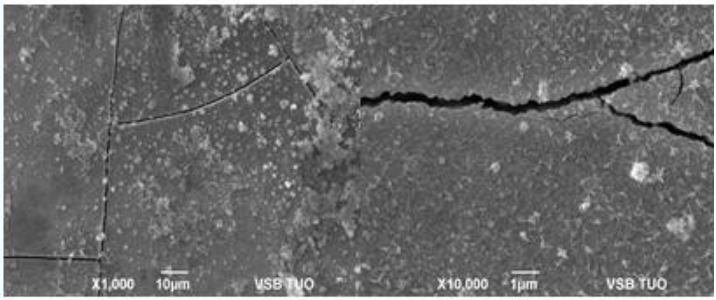
Graf 3. Vnitřní napětí Fe povlaku pro proudovou hustotu 10A/dm²



7. 3 Shrnutí

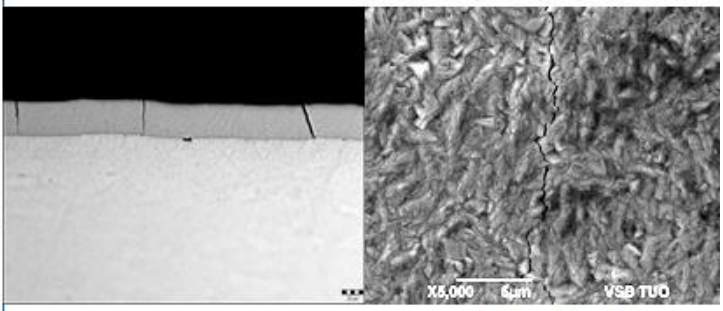
- Vzorky vyloučené z chloridové lázně o teplotě 50°C dosahovaly nejvyšších hodnot vnitřního napětí ve vyloučeném Fe povlaku. Úprava elektrolytu zvýšením koncentrace $FeCl_2$ na 300 [g/l] se u povlaků projevila zvýšením napětí, doloženo v grafech 1 - 3.
- Snížení pracovní teploty lázně chloridového elektrolytu a navýšení hodnoty proudové hustotu má negativní dopad ve smyslu rostoucí tendence hodnot vnitřního napětí povlaků.
- Nejnižších hodnot napětí, bylo dosaženo u chloridového elektrolytu o teplotě 93°C, tato teplota je velice energeticky náročná

8. Degradační procesy



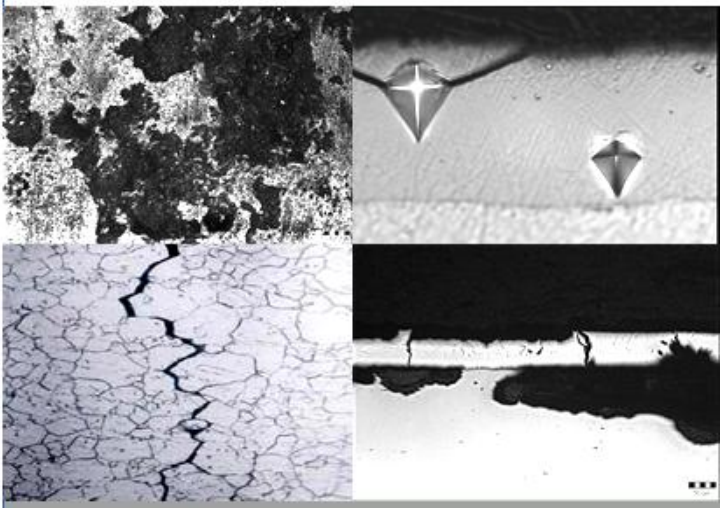
Obr 8. Degradace Fe povlaku, síťoví trhlin, ztráta přilnavosti, na povrchu jsou soli procesních chemikálií, koroze

8. 1 Degradace Ni, Fe povlaku

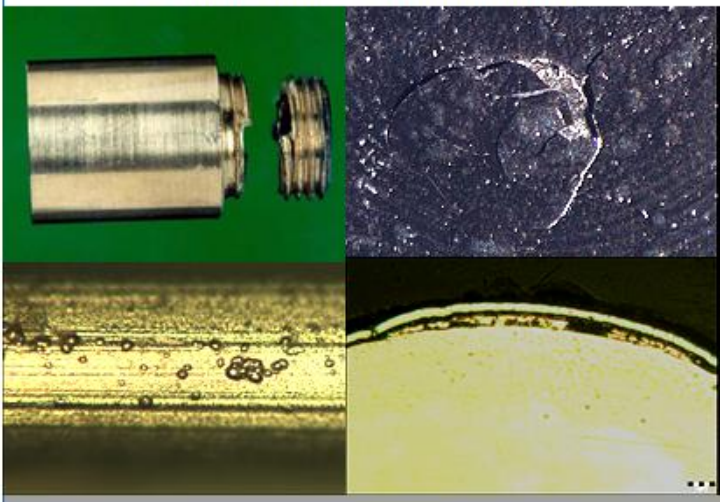


Obr 8. 1 Trhliny na povrchu povlaku a příčné, šířka trhlin 1 – 5 μm

8. 2 Kombinované degradačí faktory – I.



8. 3 Kombinované degradačí faktory – II.



9. Popis přípravy experimentální Fe lázně

Tab. 9. 1 Výchozí složení chloridového elektrolytu:

$FeCl_2$ (g/l)	$CaCl_2$ (g/l)	Proudová hustota (A/dm²)	Teplota lázně °C	pH
250	150	2, 5, 7, 10	93, 80,70, 50	1,5

Tab.9. 2 Parametr úpravy chloridového elektrolytu:

$FeCl_2$ (g/l)	$CaCl_2$ (g/l)	Proudová hustota (A/dm²)	Teplota lázně °C	pH
300	200	2, 5, 7, 10	93, 80,70, 50	1,5

9. 1 Chemické složeni slitinové Ni-Fe lázně

- $NiSO_4 . 7H_2O$ 0,7 mol/l ~ 200g/l
- $FeSO_4 . 7H_2O$ 0,05 mol/l ~ 14g/l
- KOH 0,12 mol/l ~ 6,7 g/l
- KBr 0,085 mol/l ~ 10 g/l
- H_3BO_3 0,5 mol/l ~ 30 g/l
- Laurylsíran sodný 0,2 g/l
- Sacharin 2 g/l
- pH lázně bez Sacharinu 2,7
- pH lázně s přídavkem Sacharinu 2,5

10 Příklad výpočtu pro slitinový povlak Ni-Fe

1. Hmotnost vyloučeného povlaku : $m_k = m_2 - m_1 [g]$

2. Výpočty hmotnosti povlaku: $m = 2 \cdot \rho \cdot l \cdot s \cdot t [g]$

3. Tloušťka povlaku t= 8 .10^{-4}cm, šířka pásku 10mm, délka pásku 165mm. Směsná hustota:

$$\rho = \rho_{Ni} \cdot 0,8 + \rho_{Fe} \cdot 0,2 = 8,9 \cdot 0,8 + 7,8 \cdot 0,2 = \underline{8,68\ g/cm^3}$$

4. Výpočet napětí: E = 1,67 . 10^5 MPa modul pružnosti ocelového pásku, d = 0,05 mm tloušťka pásku:

$$\sigma = -\frac{E \cdot d \cdot \Delta l}{2 \cdot l \cdot t} [MPa]$$

5. Katodická proudová účinnost: $\eta = \frac{z \cdot F \cdot m_k}{M \cdot I . \tau_k} \cdot 100 [\%]$

Molární hmotnost, (Ni = 58,71 g/mol, Fe = 55,8 g/mol), Molární hmotnost slitiny Ni-Fe : 0,2 . 55,8 + 0,8. 58,71 = <u>58,128 g/mol</u>, Faradayova konstanta F = 96 500 C/mol = 1608 A. min/mol, Počet nábojů z: Ni = 2, pro Fe= 2

10. 1 Příklad výpočtu Ni-Fe

6. Čas, při kterém je vyloučena tloušťka povlaku 8μm: $T = \frac{m_k \cdot l \cdot \tau_k}{m_k}$ [min]

Hmotnost povlaku o tloušťce t = 8 μm: m = 2 . ρ . l . s . t [g],
Hmotnost získaného povlaku m_k Doba ukončení experimentu τ_k

7. Teoretická tloušťka povlaku: $t_i = \frac{I \cdot M \cdot \tau}{2 \cdot F \cdot 2 \cdot l \cdot s \cdot \rho} = K \cdot \tau \cdot I$

8. Proudové hustota: i = 1A/dm²

9. Výpočet proudu: I = 1A/dm² . 0,35 = 0,35A

•Vnitřní napětí pomocí IS-metru, odečet nám zkracuje a prodlužuje vzorek. Délkové rozdíly dosadíme do vzorců a získáme vnitřní napětí.
•Vizuální makro-mikroskopická kontrola struktury povlaku – (rovnoměrnost vyloučení povlaku, peeting, lesk povlaku, spálení povlaku v důsledku vyšších proudů).
•Obsah Ni a Fe v povlaku – pomocí řádkovacím elektronovým mikroskopie REM a spektrálním analyzátorem (EDS) INCA x-act – jemnost, rovnoměrnost struktury, uspořádání globulámi a lamelámi, tvorba lamel..

Struktura povrchů vytvořených vysokorychlostními vodními paprsky

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

UGN AV ČR

Ústav geoniky

STRUKTURA POVRCHŮ VYTVOŘENÝCH VYSOKORYCHLOSTNÍMI VODNÍMI PAPRSKY

Libor Sitek

Oddělení desintegrace materiálů, Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava

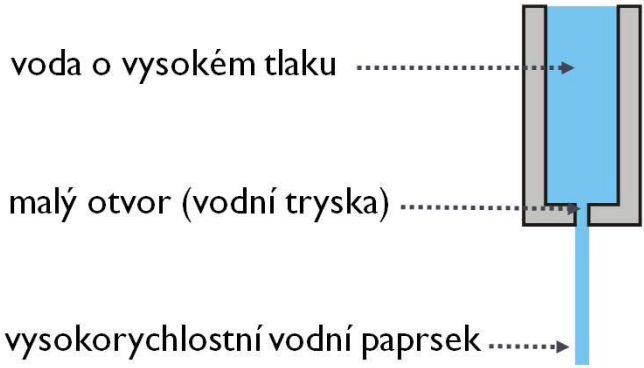
Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava

ÚGN 2

Co je to vysokorychlostní vodní paprsek?

- Proud vody malého průměru pohybující se rychlostí až 1000 ms^{-1}
- Moderní nástroj využitelný v mnoha oborech lidské činnosti (řezání, obrábění, čištění, mletí)
- Nejuniverzálnější a nejrychleji se rozvíjející proces ve světě (podle Frost & Sullivan, Market Intelligence Research Corporation)

Jak vzniká vysokorychlostní vodní paprsek?

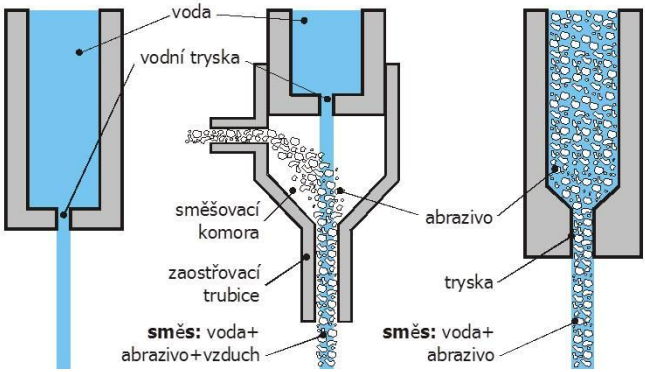


Jak se paprsky dělí?

kapalinový paprsek

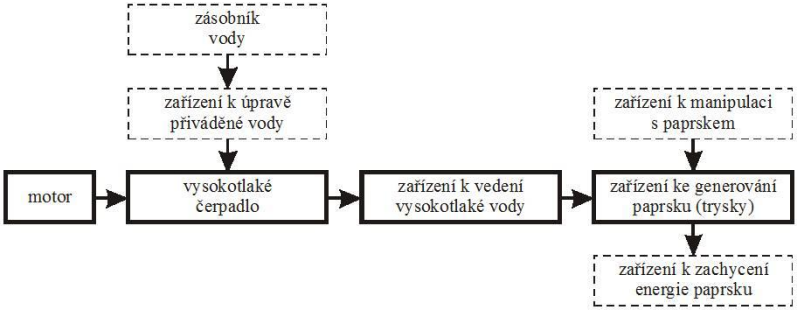
vodní	olejový	lihový	rtuťový	zkapalněný plyn	jiný
nízkotlaký	středotlaký	vysokotlaký	ultravysokotlaký	jiný	
bez příměsí	s příměsí polymerů	s jinými příměsemi			
kontinuální	pulzní	kavitační	jiný		
bez abraziva	s přisáváním abraziva	se suspenzí abraziva			

Základní typy paprsků (dle abraziva)

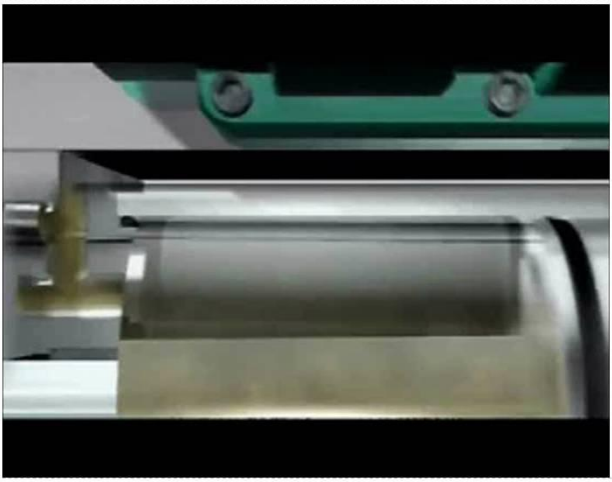


vodní paprsek **abrazivní vodní paprsek** **abrazivní suspenzní paprsek**

Zařízení pro generování VVP



Generování vysokorychlostního vodního paprsku



Technologické operace

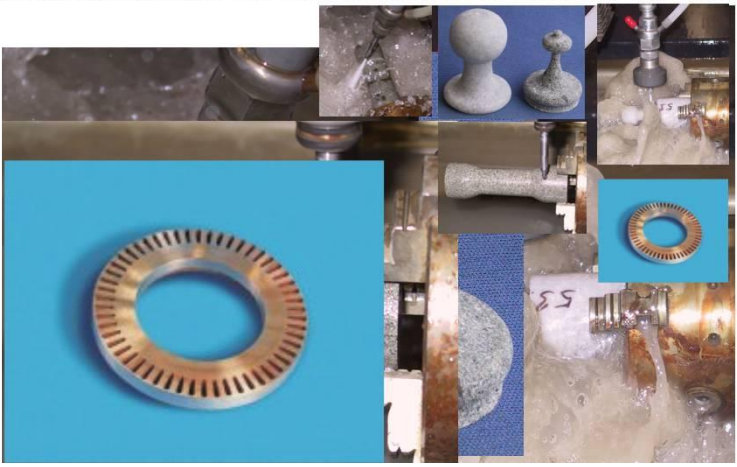
9

Řezání

ÚCN

10

Obrábění

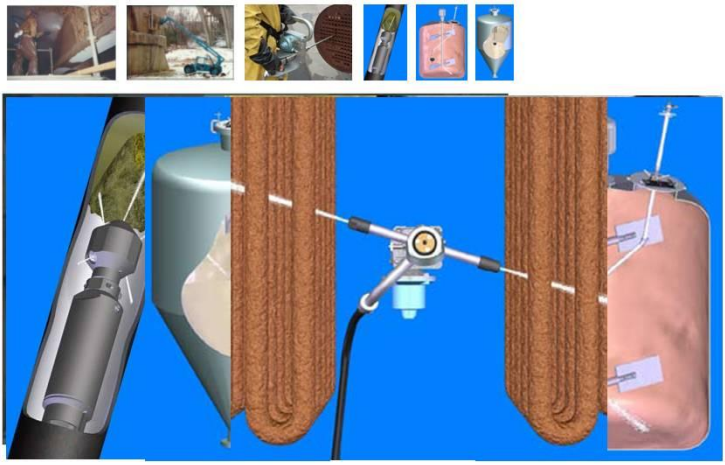


Finální výrobky

Čištění ploch & odstraňování vrstev

ÚCN 13

Čištění ploch & odstraňování vrstev



ÚCN 14

Vojenské aplikace

Příklady použití vodního paprsku

Příklady použití vodního paprsku

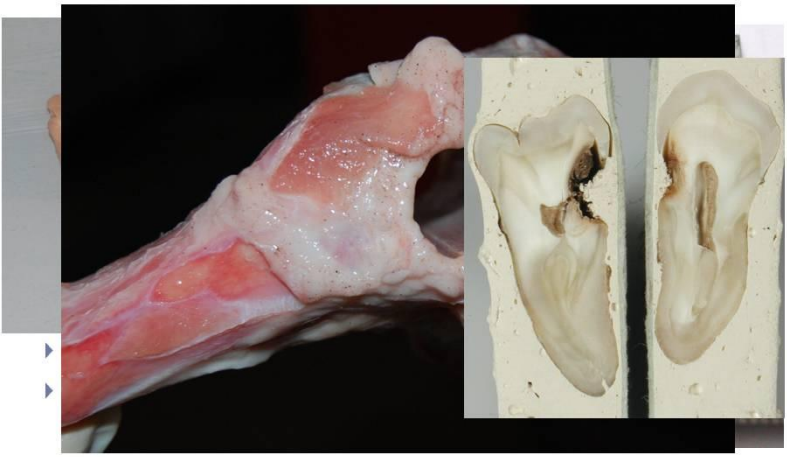
Jaké jsou nevýhody VVP?

- Relativně vysoká pořizovací cena zařízení
- Poměrně nízká účinnost (cca 50%)
- Vysoké požadavky na kvalitu a čistotu vody

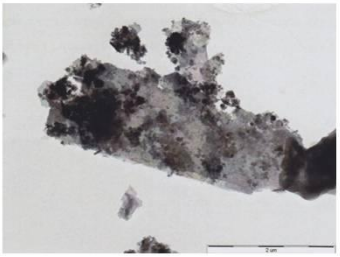
Jaké jsou výhody VVP?

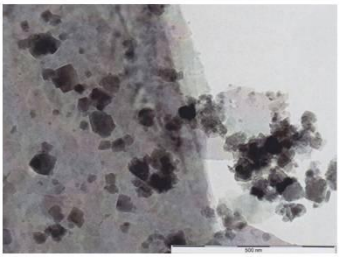
- Řezání jakéhokoliv materiálu
- Řezání v libovolném směru
- Studený řez
- Kvalitní řez (žádné další opracování)
- Šetří materiál - úzká řezná spára
- Nezatěžuje životní prostředí a snižuje množství prachu ve vzduchu
- Rychlejší než mnohé konvenční metody

Vývojové trendy



Vermikulit pomletý pomocí VVP





Produkt použit jako **prekurzor** pro syntézu nanočástic oxidu železa

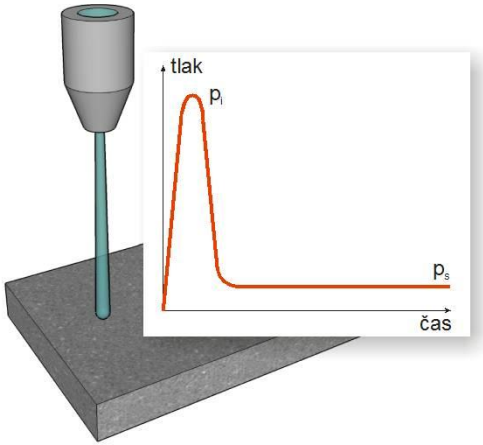
ÚCN

21

Pulzující vodní paprsek

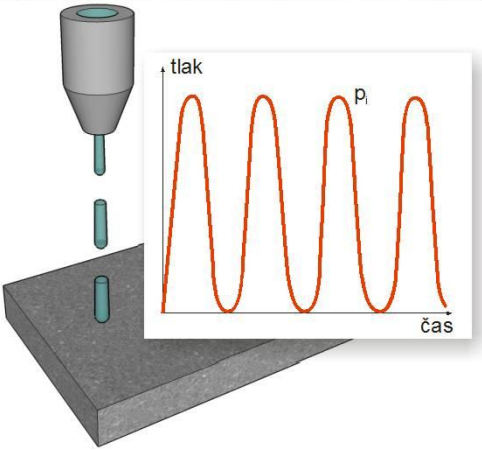
22

Dopad kontinuálního paprsku na povrch



ÚCN 23

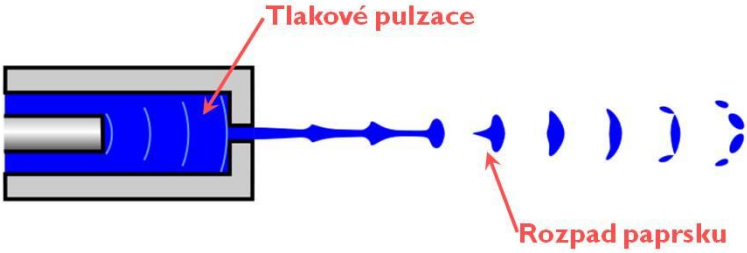
Dopad pulzujícího paprsku na povrch



ÚCN 24

Generování pulzujícího paprsku

- Generování akustických vln působením akustického budiče na tlakovou kapalinu a jejich přenos vysokotlakým systémem k trysce



Nevýhody pulsujících paprsků

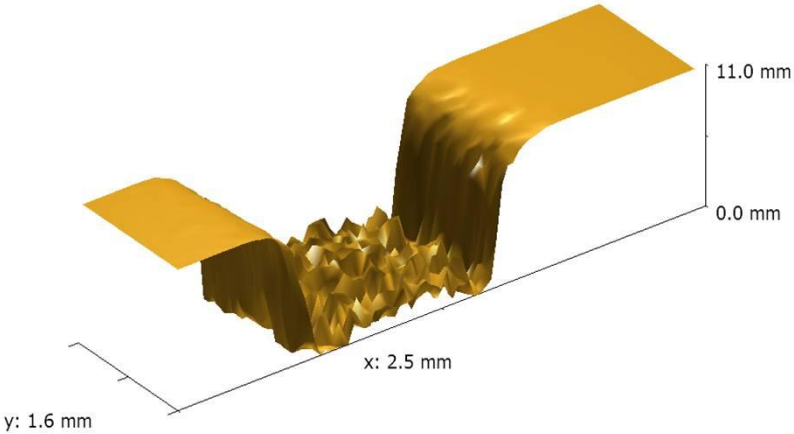
- Dosud **nejsou** uspokojivě **zodpovězeny** všechny **otázky související s šířením vysokofrekvenčních tlakových pulsací** vysokotlakým systémem a formováním pulsujících paprsků
- Generátor pulsací integrovaný ve vysokotlakém systému ⇒ další potenciální **zdroj poruch**

Výhody pulsujících paprsků

- Stejné jako u kontinuálních paprsků, kromě toho však nabízejí:
  - Výrazně **vyšší výkonnost** v porovnání s kontinuálními paprsky
  - Možnost **využití** výrazně **nižších pracovních tlaků** k dosažení stejných výsledků ⇒ nižší náklady na pořízení a provoz vysokotlakých zařízení

Řezné plochy

Řezné plochy – boční, zadní, spodní



Vzhled povrchu – boční řezná stěna

Hodnocení kvality boční řezné stěny

$q = 5$ Nejhladší povrch.

$q = 4$ Hladký povrch.

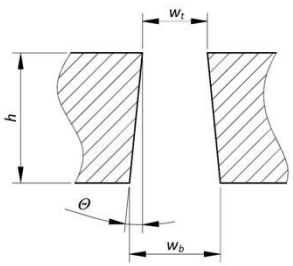
$q = 3$ Středně kvalitní povrch.

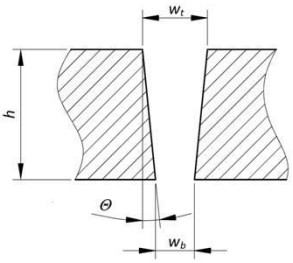
$q = 2$ Drsný povrch.

$q = 1$ Dělicí řez.

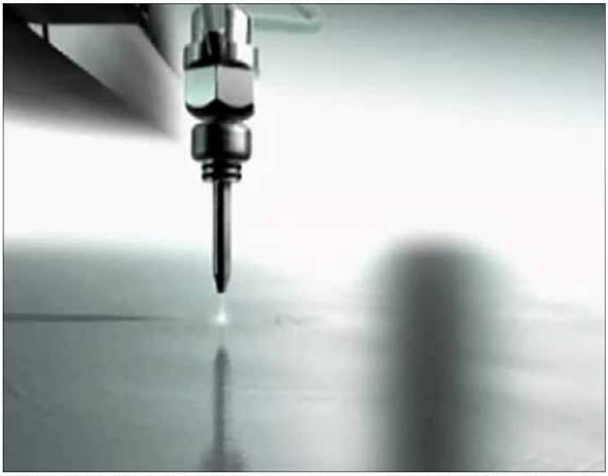
Úkos boční řezné stěny

- Negativní úkos
- Pozitivní úkos



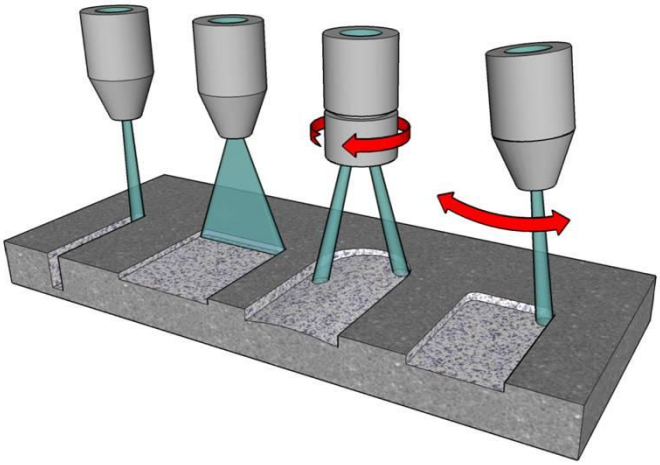


Dynamický paprsek



ÚCN 33

Typy paprsků k plošné desintegraci



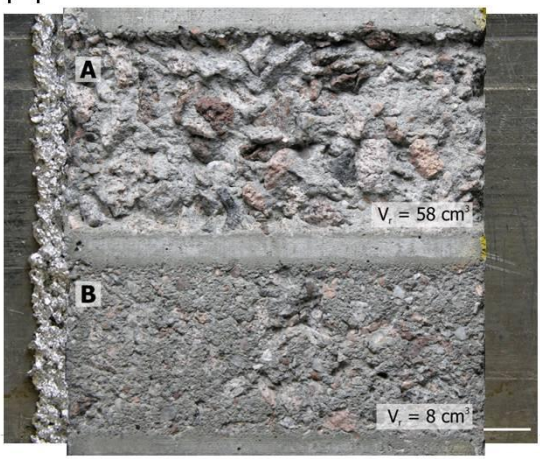
ÚCN 34

Účinky kontinuálního a pulzujícího paprsku

- Válcový paprsek

Účinky kontinuálního a pulzujícího paprsku

- Plochý paprsek

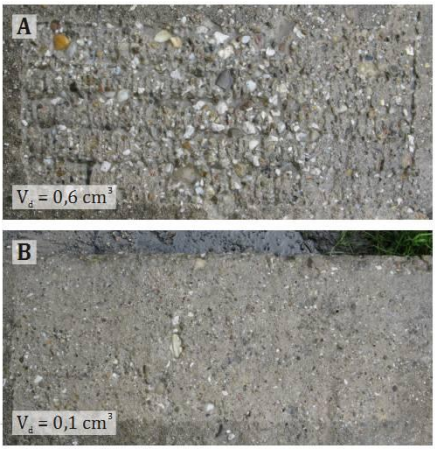


Účinky kontinuálního a pulzujícího paprsku

- Rotující paprsky

Účinky kontinuálního a pulzujícího paprsku

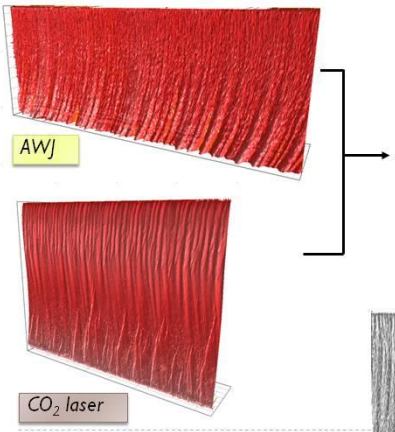
- Kmitavý paprsek

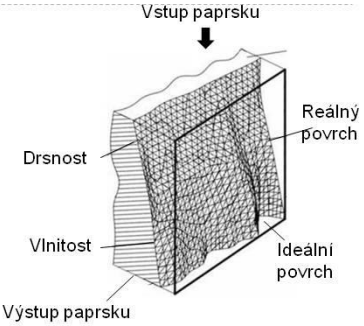


Porovnání s technologií laserového dělení

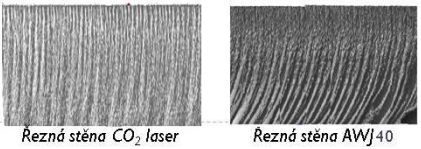
39

Porovnání topografie povrchů





Popis řezné stěny



Řezná stěna CO_2 laser — Řezná stěna AWJ

ÚCN

40

Abrazivní vodní vs. laserový paprsek

Parametry	Fotografie povrchů
$v = 350\ mm.min^{-1}$ $m_a = 250\ g.min^{-1}$	
$v = 450\ mm.min^{-1}$ $m_a = 250\ g.min^{-1}$	
$v = 550\ mm.min^{-1}$ $m_a = 250\ g.min^{-1}$	
$v = 350\ mm.min^{-1}$ $m_a = 400\ g.min^{-1}$	
$v = 450\ mm.min^{-1}$ $m_a = 400\ g.min^{-1}$	
$v = 550\ mm.min^{-1}$ $m_a = 400\ g.min^{-1}$	

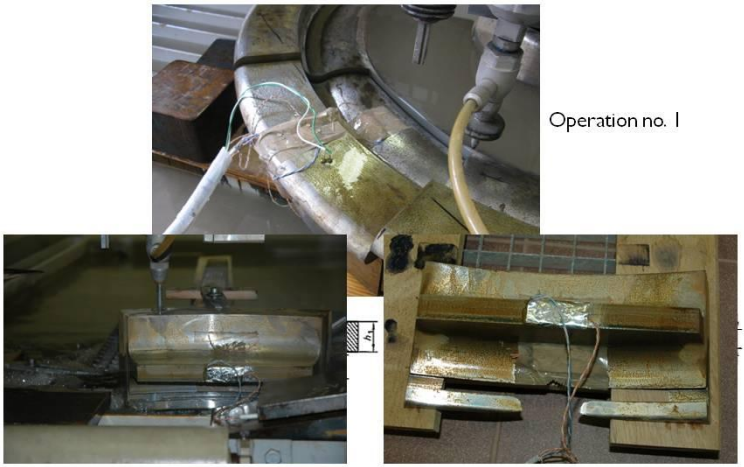
Parametry	Fotografie povrchů
$P = 3500\ W$ $v = 350\ mm.min^{-1}$	
$P = 3500\ W$ $v = 450\ mm.min^{-1}$	
$P = 3500\ W$ $v = 4$ $550\ mm.min^{-1}$	
$P = 5000\ W$ $v = 350\ mm.min^{-1}$	
$P = 5000\ W$ $v = 450\ mm.min^{-1}$	
$P = 5000\ W$ $v = 550\ mm.min^{-1}$	

Využití VVP při zjišťování zbytkových napětí

Efekt zbytkových napětí u železničního kola

Důlková metoda

ČSN EN 13262+A1



ÚGN

45

Děkuji za pozornost

libor.sitek@ugn.cas.cz

46

Vliv řezných parametrů na integritu povrchu

prof. Dr. Ing. Josef Brychta

VŠB-TU Ostrava

Fakulta strojní VŠB–TUO 1

Seminář Zbytková napětí 2013 na VŠB-TU Ostrava

Vysokorychlostní 3D obrábění a integrita povrchu

Prof. Dr. Ing. Josef BRYCHTA

Fakulta strojní VŠB–TUO 2

Obrábění prostorových ploch – 3D

Design výrobků je zejména charakterizován prostorovými plochami nepravidelných tvarů

Vyskytují se:
formy, kovací zápustky, lopatky turbin, lisovací nástroje pro automobilový a letecký průmysl

KVALITU obrobku lze zajistit pouze „HSM technologií“

Fakulta strojní VŠB–TUO 3

Vnímání jakosti a kvality v obrábění

Požadavky na jakost:

rozměrová a tvarová přesnost

Požadavky na kvalitu: lze zajistit „HSM“

rozměrová a tvarová přesnost plus

integrita obrobeného povrchu

Fakulta strojní VŠB–TUO 4

Definování některých pojmů

HSM (*High Speed Machining*)	- vysokorychlostní obrábění (snížení výrobních časů až o 90 %, nákladů 50 % a sílu řezání o 30 %)
HSC - *High Speed Cutting*	- obrábění vysokými řeznými v_c a řádově vyššími v_f
HVC - *High Volume Cutting*	- velké objemy úběru
Dry Machining	- bez procesního média
Hard Machining	- nahrazení broušení
High Force Cutting	- hrubování

Fakulta strojní VŠB–TUO 5

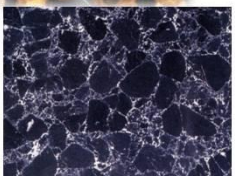
Parametry HSC strojů a nástrojů

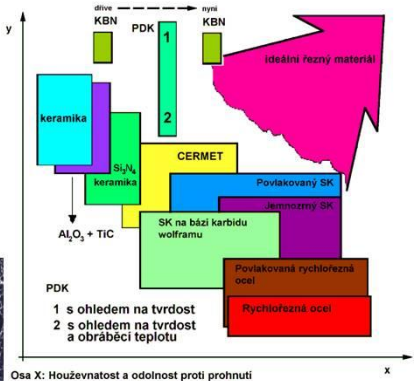
- otáčky 10 000 - 80 000 min^{-1}
- výkony převážně od 15 - 80 kW
- rychloposuvy 90 - 120 $m.min^{-1}$
- pracovní posuvy 15 - 40 $m.min^{-1}$
- víceosé simultánně řízené OC

- „super tvrdé“ řezné materiály na bázi PKD a KBN
- řezná keramika, cermety
- povlakované rychlořezné oceli „ jemnozrnné “
- houževnaté slinuté karbidy

Fakulta strojní VŠB–TUO 6

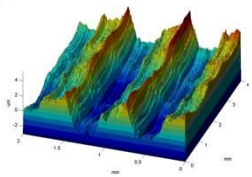
Ideální řezný materiál





Fakulta strojní VŠB–TUO 7

Kvalita funkčních ploch je podmíněna požadovanou integritou povrchu

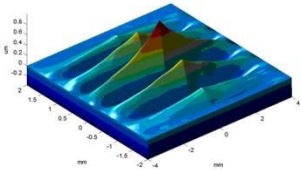


KVALITA OBROBKU ZÁVISÍ NA:

- tvarové a rozměrové přesnosti
- interních vlastnostech materiálu
- metalurgickém zpracování
- způsobu obrobení povrchu resp. dosažené integritě funkčních ploch

INTEGRITA POVRCHU:

- topografie povrchu - „3D drsnost“
- strukturní změny povrchových vrstev
- hloubka a charakter zpevnění
- smysl, velikost a průběh pnutí



Fakulta strojní VŠB–TUO 8

Požadavky na související činnosti

Obráběcí stroj - tuhost, parametry, bezpečnost, pohony, řízení

Postupový řetězec strategie, technologie CAD/CAM

„HSM“ - technologie jako proces

Řezný nástroj materiál, geometrie, povlakování, symetrie

Obrobek upnutí, materiál

Aspekty „HSC“ obrábění

ZVÝŠENÍ TEPLOTY V ZÓNĚ ŘEZÁNÍ

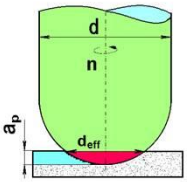
OBRÁBĚNÍ
- úbytek síly řezání
- vyšší objem úběru za čas
- rychlý odvod tepla třískou

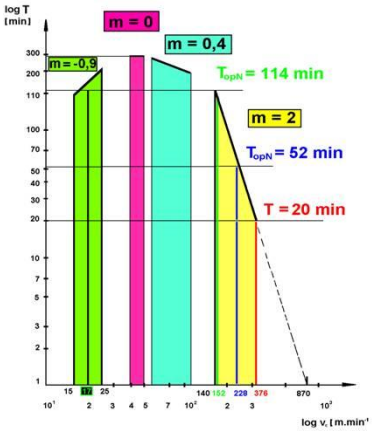
ZMĚNA TVORBY TŘÍSKY

OBROBEK
- minimalizace ohřevu obrobku
- zvýšená rozměrová přesnost
- vyšší kvalita povrchu

Závislosti trvanlivosti břitu na v_c

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{d \cdot a_p - a_p^2}$$

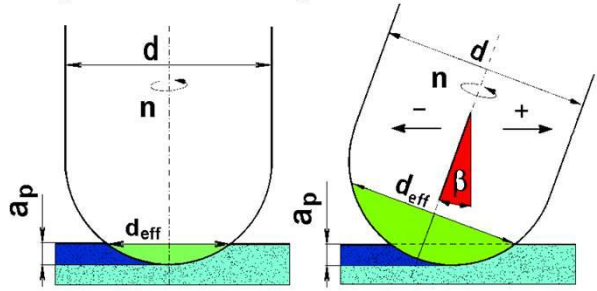




Fakulta strojní VŠB–TUO 11

Závislost efektivního průměru frézy na úhlu náklonu

$$d_{eff} = d \,.\, \sin\left[\beta \pm arc\cos\left(\frac{d - 2\,a_p}{d}\right)\right] \qquad v_{c,eff} = \frac{\pi \,.\, n \,.\, d}{1000} \sin\left[\beta \pm arc\cos\left(\frac{d - 2\,a_p}{d}\right)\right]$$



nezabírat středem - frézovat jen sousledně - bez procesního média

Fakulta strojní VŠB–TUO 12

Deformační zóny „klasického a HSC obrábění“

- s rostoucí v_c se oblast PPD v zóně tvořící se třísky řádově objemově zmenšuje
- ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné rovině, v tzv. rovině střihu
- při určité v_f se náhlé změní fyzikální a chemické vlastnosti
- transformace v rovině střihu probíhá za vysoké teploty

Fakulta strojní VŠB–TUO 13

Shrnutí požadavků „HSM“

OBRÁBĚCÍ STROJ

ŘEZNÝ MATERIÁL

odolný proti opotřebení, teplotně stabilní, houževnatý, vhodný povlak

VŘETENO
značný rozsah otáček, dostatečný točivý moment, speciální uložení a upnutí nástroje, vysoký počet otáček

POHONY
vysoká rychlost posuvu, krátké doby zrychlení

KONCEPT
odlehčené pohyblivé hmoty, tuhost a tlumení kmitů

ŘIDICÍ JEDNOTKA
krátké zpracování záznamu, velká kapacita paměti

BEZPEČNOST
plné opláštění, zvuková izolace, odtah vzduchu

Fakulta strojní VŠB–TUO 14

Shrnutí požadavků „HSM“

POSTUPOVÝ ŘETĚZEC

- znalost HSC technologie
- výkonný CAD/CAM systém
- generování frézovacích drah

OPTIMALIZACE STRATEGIE FRÉZOVÁNÍ

- sousledné (sousměrné) frézování
- kontinuální záběr frézy
- eliminace strmých změn směru
- frézování paralelně spirálovou dráhou

Vědecký přínos pro rozvoj v oboru

- optimální průřez odebírané třísky je čtvercový
- optimální odebíraný objem třísky je kubický
  (platí zejména pro přerušovaný řez)

$a_p = a_e$

$a_p = a_e = f_z$

- HSM významně spoří energetické zdroje
- ekologický přínos („suché obrábění“)
- zkracuje strojní časy a výrobní náklady
- zpřesňuje výrobu a zvyšuje kvalitu povrchu

Stanovené řezné podmínky pro zkoušku obrobitelnosti dle ČSN

Metoda obrábění	Řezné podmínky		
	Řezná rychlost [m.min^{-1}]	Posuv [mm.ot^{-1}]	Hloubka řezu [mm]
Soustružení	80, 100, 125	0,2	2,0
VBD z SK	**160**, 200, 250	0,2	0,2
Vrtání RO	12, 18, 24, 30, 35	0,12	3 D
Vrtání SK	28, 36, 44, 52, 60	0,08	2 D
Frézování	80, 110, **139**	$f_z = 0,1$ mm	2
VBD z SK	176, 220, 278		šířka frézování 0,5 D

Děkuji Vám za pozornost

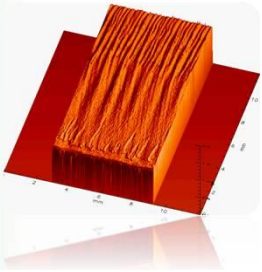
Identifikace mechanických ekvivalentů, zbytkové napjatosti a konstrukce zatěžovacích diagramů z topografie povrchu generovaného hydroabrazivní technologií

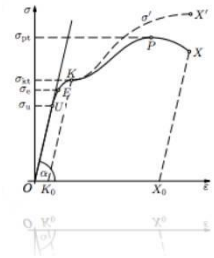
doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.

VŠB-TU Ostrava

Cíl

- Identifikace mechanických ekvivalentů, konstrukce zatěžovacích diagramů (tj. určení pevnosti, pružnosti, zbytkového napětí, velikosti a charakteru rychlosti odeznění, průběhu s hloubkou) z topografie povrchu generovaného hydroabrazivní technologií.





Úvod, výběr technologie

Současný trend:

- neustálé zvyšování užitných vlastností materiálů

- jedna z možností → zjemňování zrna materiálu (ECAP)

Velikost zrna

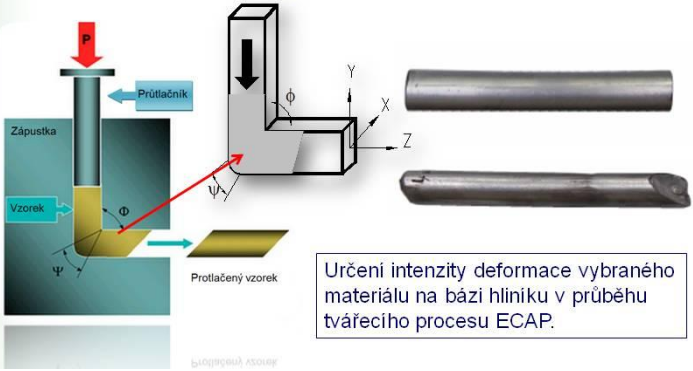
Mechanické vlastnosti

(tvrdost, pevnost, tažnost, …)

Topografie povrchu

Úvod, výběr technologie

- Princip tvářecí technologie ECAE spočívá ve vícenásobném protlačování materiálu zalomeným otvorem konstantního průřezu.



Určení intenzity deformace vybraného materiálu na bázi hliníku v průběhu tvářecího procesu ECAP.

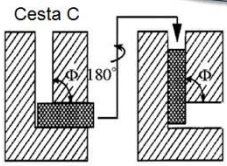
Experimentální část

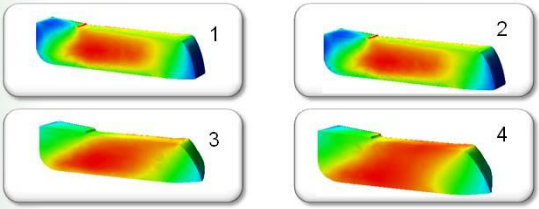
EN AW 6060

ϕ = 10 mm

konstantní rychlost deformace – 1,73 mm /s

Cesta C

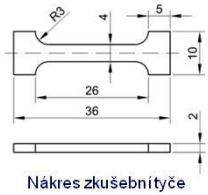




Experimentální část

Vzorka	Počet prechodů
0	0
1	1
2	1
3	4
4	4
5	3
6	3
7	2
8	2

Celkem byly technologii ECAE vytvořeny 4 páry vzorků s jedním až čtyřmi protlačeními. Kdy první z páru byl použit na metalografické zkoušky a druhý pro stanovení mechanických vlastností.



Nákres zkušební tyče

Experimentální část

Metalografická analýza

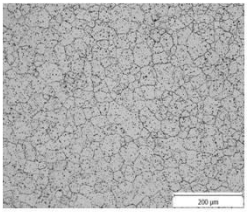
Struers LectroPol-5

Mikroskop GX51

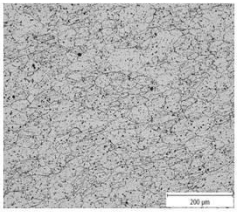
Pro zviditelnění struktury byly vzorky nejprve broušeny na brusném papíru zrnitosti 600, 1200 a 2000 MESH, dále byly leštěny 20 s na přístroji firmy Struers LectroPol-5 při napětí 24V v elektrolytu pod firemním označení D2. Nakonec byly vzorky leptány po dobu 4 s opět na přístroji Struers LectroPol-5 při napětí 2 V ve stejném elektrolytu. Pro pozorování metalografických výbrusů byl použit invertovaný mikroskop pro odražené světlo GX51 s maximálním zvětšením 1000x.

Experimentální část

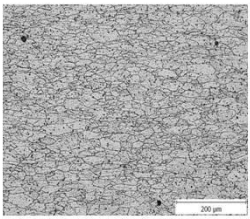
a)



b)



c)



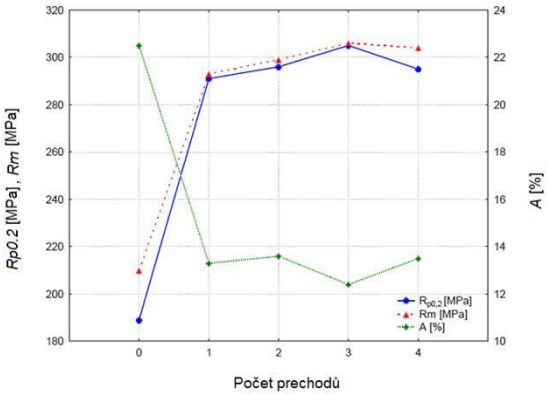
Mikrostruktura a) výchozího materiálu (sample 0); b) materiálu podrobeného jednomu průchodu zápustkou ECAE (vzorka 1); c) materiálu podrobeného čtyřem průchodům zápustkou ECAE (vzorka 7).

Experimentální část

V tabulce jsou uvedeny hodnoty mechanických vlastností získané z tahových zkoušek (VÚHŽ Dobrá). V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty mechanických veličin, stanovených ze dvou zkoušek pro každou jednotlivou skupinu vzorků.

Počet prechodů	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	E [GPa]
0	189	210	22.5	48
1	291	293	13.3	62
2	296	299	13.6	85
3	305	306	12.4	93
4	295	304	13.5	78

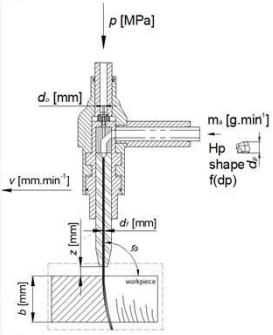
Experimentální část



Mechanické vlastnosti v závislosti na počtu protlačení.

Příprava experimentů technologií AWJ

- Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava
- PTV CNC WJ2020B-1Z-D



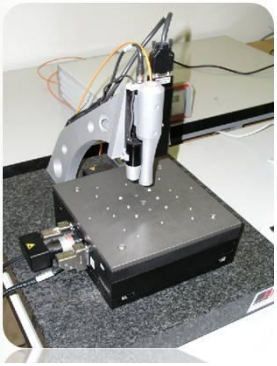
Experimentální část

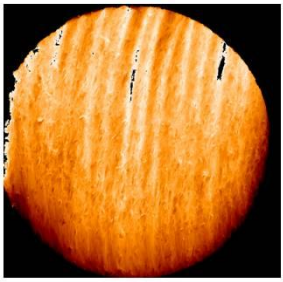
Technologické faktory	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlak kapaliny	p	MPa	370
Průměr vodní trysky	d_o	mm	0,3
Průměr abrazivní trubice	d_a	mm	0,8
Délka abrazivní trubice	l_a	mm	76
Hmotnostní průtok abraziva	m_a	$g.min^{-1}$	250
Vzdálenost trysky od povrchu	L	mm	2
Posuvná rychlost	v_p	$mm.min^{-1}$	300, 250, 200, 150, 100
Velikost abraziva	-	MESH	80

Experimentální část

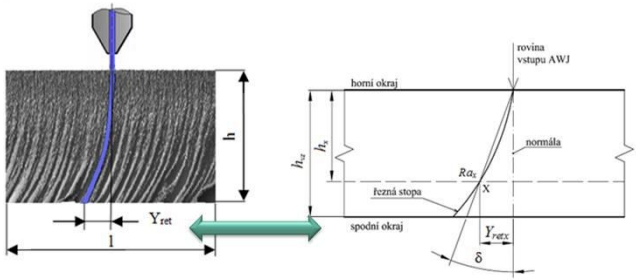
Měření drsnosti povrchu po řezání AWJ optickým profilometrem MicroProf FRT

MicroProf FRT





Koncepce řešení



h_x – hloubka měřeného bodu X (na řezu) [mm]
h_{vz} – tloušťka vzorku [mm]
X – vybraný měřený bod na řezné stopě
Y_{ret} – odchylka řezné stopy od normálové roviny v bodě X [mm]
δ – deviační úhel [°]
Ra_x – drsnost v bodě X [μm]

Koncepce řešení – ověřené vztahy

Křivení řezné stopy

$$y = \frac{k}{x}$$

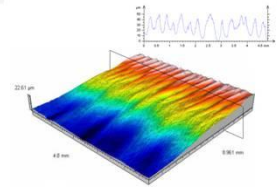
Dělitelnost materiálu

$$k = \frac{l}{E_{mat}^2}$$

Vazba geometrických parametrů

$$x = \frac{Ra \cdot h}{Y_{ret}}$$

$$y = \frac{Y_{ret}}{E_{mat}^2 \cdot Ra \cdot h}$$



Průběhové vyrovnávací napětí

Střední aritmetická drsnost Ra, Ra_X $Yret$, δ, h_X, $Yret_X$

$$y = \frac{Y_{reto}}{\sigma_p^2} \Rightarrow \frac{Y_{reto}}{\sigma_p^2} = \frac{Y_{ret}}{E_{mat}^2 \cdot Ra \cdot h} \Rightarrow \sigma_p = \sqrt{\frac{Ra \cdot h \cdot Y_{reto}}{Y_{ret}}} \cdot E_{mat} \Rightarrow Ra = \frac{\sigma_p^2 \cdot Y_{ret}}{Y_{ret0} \cdot h \cdot E_{mat}^2}$$

Deviace

$$\delta = arctg\left(\frac{Y_{ret}}{h}\right)$$

Podmínka

$$\sigma_{p0} = \frac{\sigma_t}{\sigma_d} = 10^6 = \sigma_0 \qquad \sigma_d = \sigma_t$$

Mechanická konstanta materiálu

$$K_{plmat} = \frac{Ra \cdot h}{Y_{ret}} = \frac{Ra_0 \cdot h_0}{Y_{ret0}} = \frac{\sigma_p^2}{E_{mat}^2} = \frac{10^{12}}{E_{mat}^2}$$

Predikce mechanických parametrů materiálů

Tab.1 Teoretická data napěťových parametrů podle diagramů σ-ε

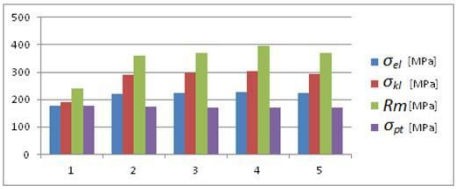
Protlačení	σ_{el}	σ_{kl}	Rm	σ_{pt}	σ_{true}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0	177,05	189,2	240	176	660
1	222,17	291,04	360	173	800
2	224,38	296,03	370	172	805
3	228,37	305,03	395	170	800
4	224	295,03	370	170	805

Tab. 2 Teoretická data deformačních parametrů podle diagramů σ-ε

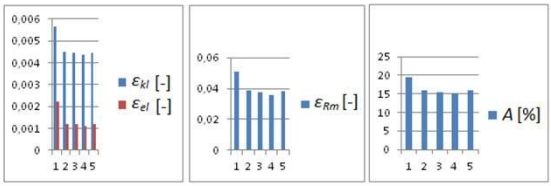
Protlačení	ε_{kl}	ε_{el}	ε_{Rm}	ε_{pt}	A
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
0	0,00565	0,0022	0,051	0,195	19,5
1	0,0045	0,0012	0,0385	0,159	15,9
2	0,00446	0,0012	0,0375	0,155	15,5
3	0,00438	0,0011	0,036	0,153	15,3
4	0,00447	0,0012	0,038	0,16	16

Predikce mechanických parametrů materiálů

Obr. 1 Alterace vzájemného poměru napěťových parametrů podle počtu protlačení



Obr. 2 Alterace vzájemného poměru deformačních parametrů podle počtu protlačení

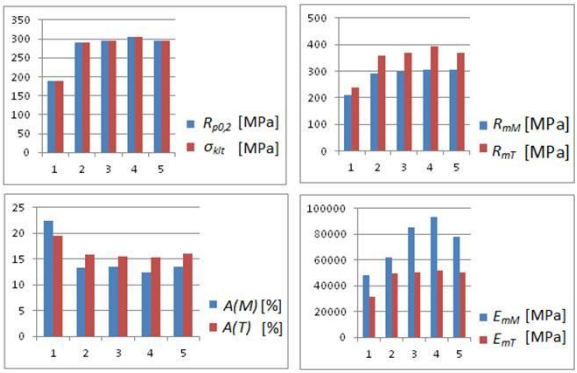


Predikce mechanických parametrů materiálů

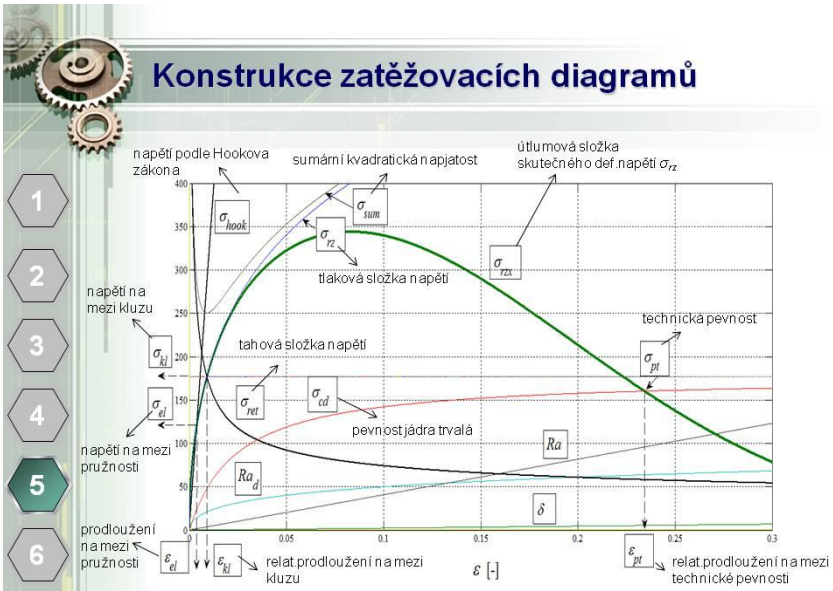
Tab. 3 Komparovaná teoretická a naměřená data

Protlačení	$R_{p0.2}$	σ_{klT}	R_{mM}	R_{mT}	$A(M)$	$A(T)$	E_{mM}	E_{mT}
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]
0	189	189,2	210	240	22,5	19,5	48000	31331
1	291	291,04	293	360	13,3	15,9	62000	49360
2	296	296,03	299	370	13,6	15,5	85000	50349
3	305	305,03	306	395	12,4	15,3	93000	52153
4	295	295,03	304	370	13,5	16	78000	50150
mean	275,2	275,266	282,4	347	15,06	16,44	73200	46668,6
diff [%]		(+/-) 0		(+) 22,9		(+)9,2		(-) 56,8

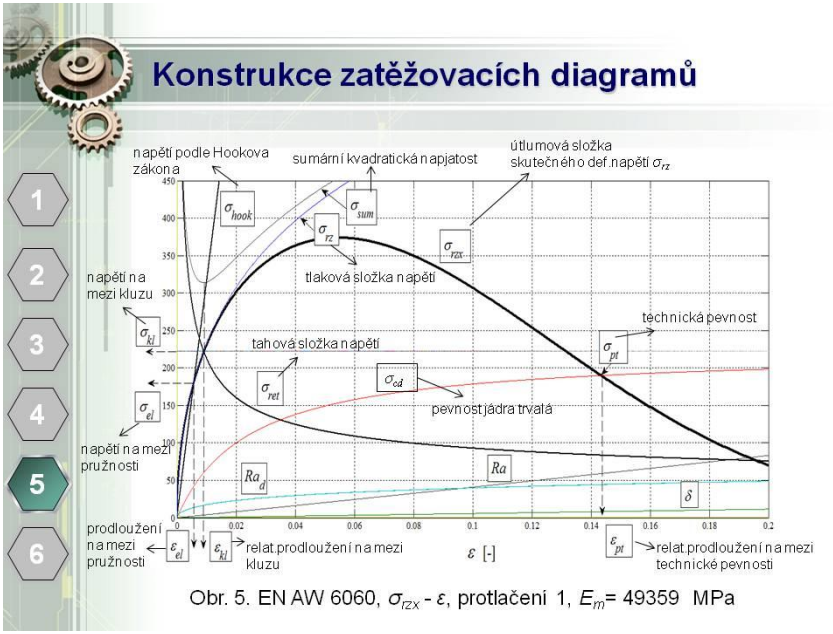
Predikce mechanických parametrů materiálů



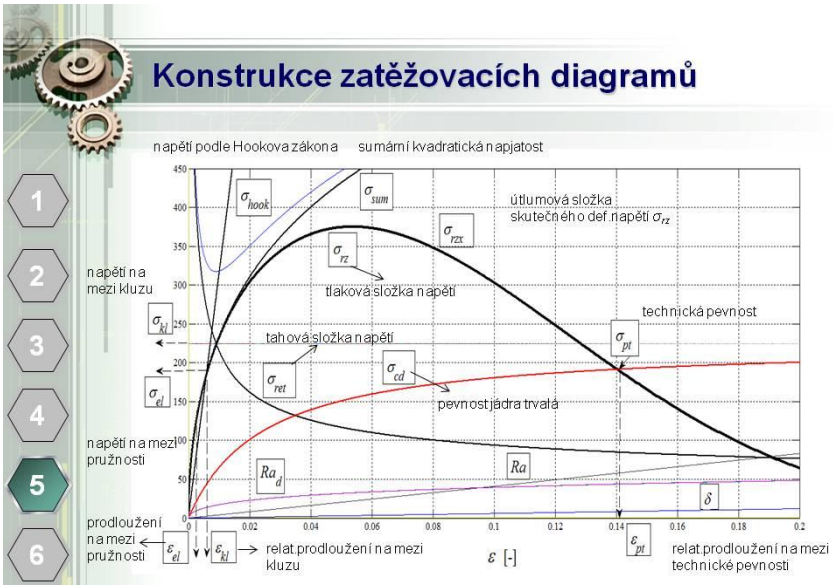
Obr. 3 Grafická ilustrace poměru komparovaných teoretických a naměřených dat



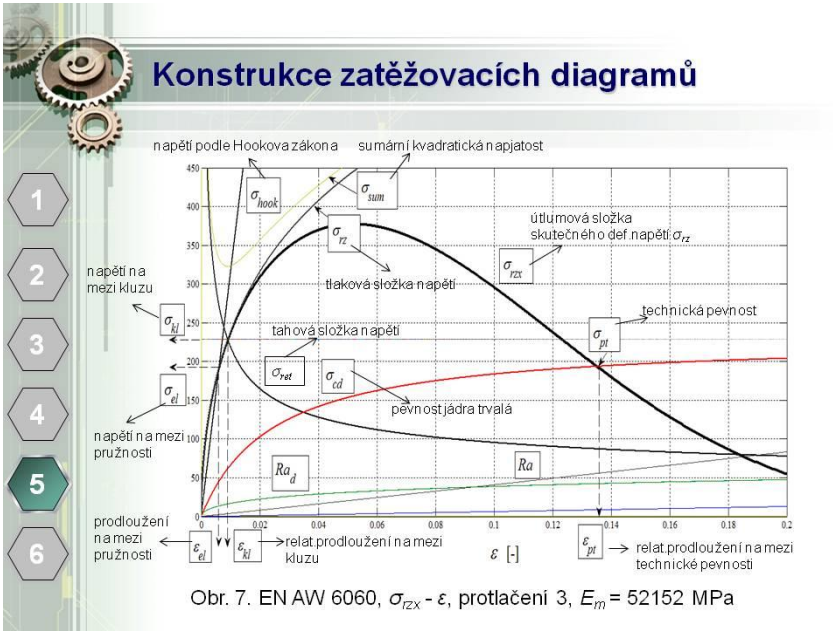
Obr. 4. EN AW 6060, σ_{rzx} - ε, protlačení 0, E_m=31331 MPa



Obr. 5. EN AW 6060, σ_{rzx} - ε, protlačení 1, E_m= 49359 MPa

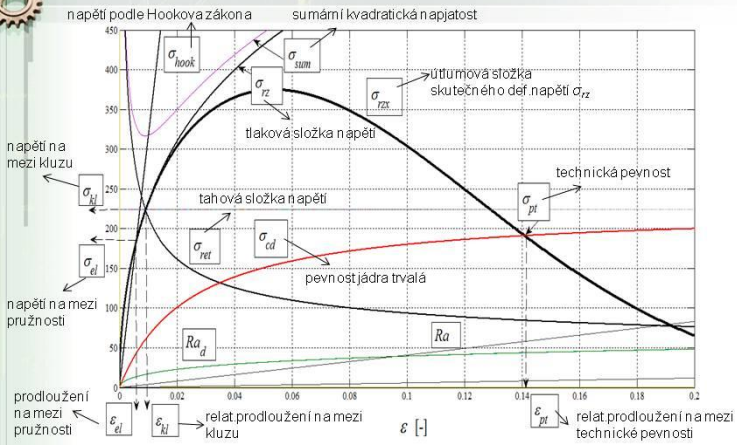


Obr. 6. EN AW 6060, σ_{rzx} - ε, protlačení 2, E_m = 50349 MPa



Obr. 7. EN AW 6060, σ_{rzx} - ε, protlačení 3, E_m = 52152 MPa

Konstrukce zatěžovacích diagramů



Obr. 8. EN AW 6060, σ_{rzx} - ε, protlačení 4, E_m = 50150 MPa

Konstrukce zatěžovacích diagramů

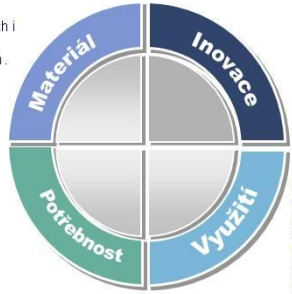
- Prokázala se možnost exaktní teoretické konstrukce ekvivalentních diagramů σ-ε, a to využitím naměřených hodnot.
- Vývojové trendy v hodnotách teoretických i naměřených jsou ekvivalentní .
- Prokázala se možnost analyticky exaktního vyšetření parametrů v diagramech σ-ε.
- Jde o operativní, bezkontaktní a nedestruktivní způsob, který umožňuje identifikovat napěťodeformační mechanické ekvivalenty mechanických parametrů materiálů z analýzy drsnosti povrchu.
- Umožňuje jednoduchou operativní kontrolu mechanických parametrů expresním způsobem.

Konstrukce zatěžovacích diagramů

1
2
3
4
5
6

Pomocí mechanické konstanty K_{plmat} je rovněž možno provést predikci pružně-pevnostních ekvivalentů jak v pružné tak i v plastické oblasti přetváření včetně numerických i grafických parametrů skutečných i technických **σ-ε** diagramů na stanovených přetvárných mezích.

Řešení nabízí **originální způsob identifikace fyzikálně-mechanických vlastností technických materiálů,** a to nejen statických, tzv. tabulkových, ale také způsob identifikace dynamických změn těchto parametrů v čase podle intenzity a druhu namáhání a vytváření interaktivních matematických modelů

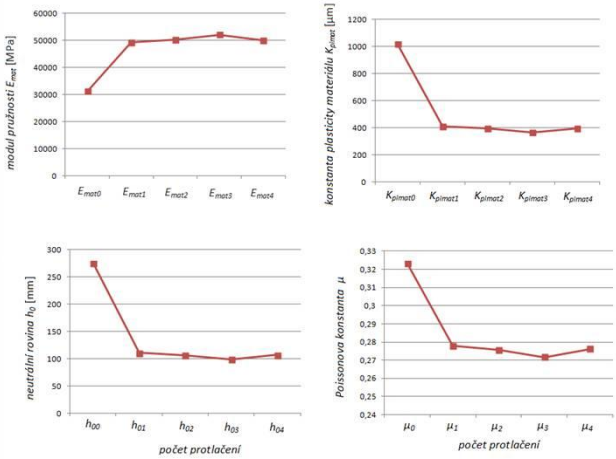


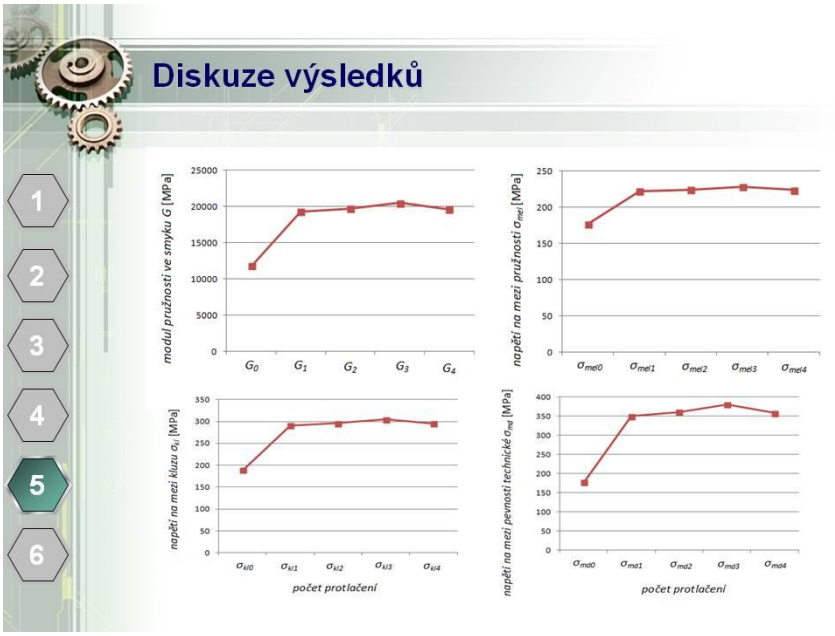
Potřebnost a aktuálnost nového způsobu diagnostiky pružnopevnostních parametrů včetně statické konstrukce zatěžovacího diagramu **σ-ε** a dalších analýz na základě měření topografie povrchu spočívá **v získání on-line informací o vlastnostech konkrétně využívaného materiálu přímo v provozech, poloprovozech atd.**

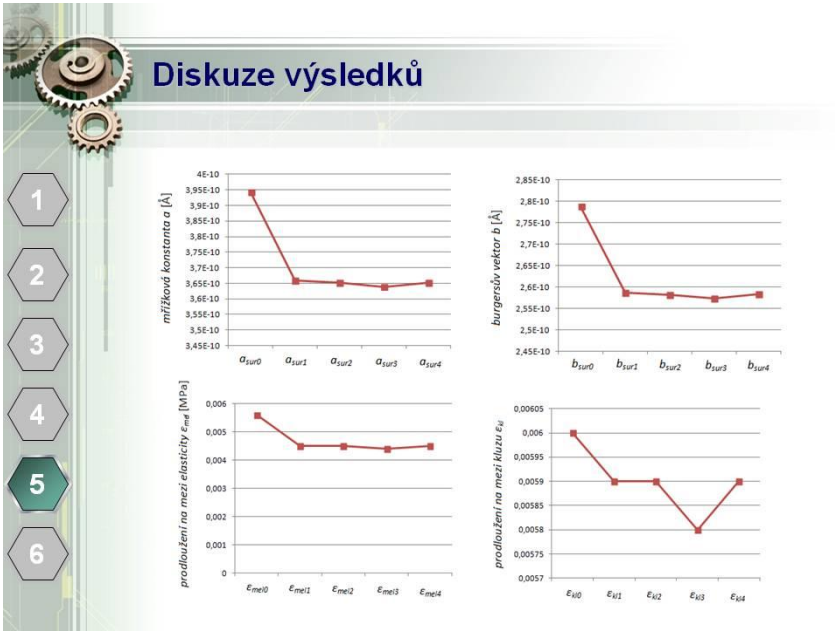
Nejen **v aplikační sféře,** ale také **v základním výzkumu materiálů** s akcentem na prohloubení současné teorie **pružnosti a pevnosti, fyziky pevných látek** a tím také celého procesu technického vzdělávání, a to nejen v lokálním měřítku, ale i dokonce v měřítku evropském, resp. celosvětovém.

Diskuze výsledků

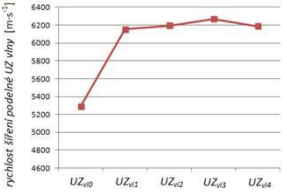
1
2
3
4
5
6

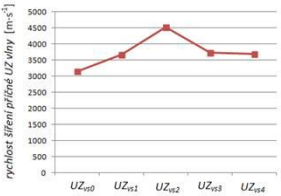


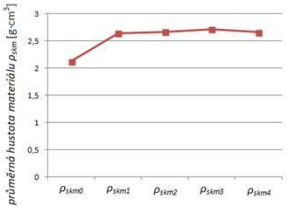

Diskuze výsledků
1
2
3
4
5
6
modul pružnosti ve smyku G [MPa]
25000
20000
15000
10000
5000
0
G0
G1
G2
G3
G4
napětí na mezi pružnosti σmel [MPa]
250
200
150
100
50
0
σmel0
σmel1
σmel2
σmel3
σmel4
napětí na mezi kluzu σki [MPa]
350
300
250
200
150
100
50
0
σki0
σki1
σki2
σki3
σki4
počet protlačení
napětí na mezi pevnosti technické σmd [MPa]
400
350
300
250
200
150
100
50
0
σmd0
σmd1
σmd2
σmd3
σmd4
počet protlačení

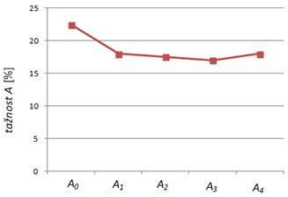

Diskuze výsledků
1
2
3
4
5
6
mřížková konstanta a [Å]
4E-10
3,95E-10
3,9E-10
3,85E-10
3,8E-10
3,75E-10
3,7E-10
3,65E-10
3,6E-10
3,55E-10
3,5E-10
3,45E-10
asur0
asur1
asur2
asur3
asur4
burgersův vektor b [Å]
2,85E-10
2,8E-10
2,75E-10
2,7E-10
2,65E-10
2,6E-10
2,55E-10
2,5E-10
2,45E-10
bsur0
bsur1
bsur2
bsur3
bsur4
prodloužení na mezi elasticity εmel [MPa]
0,006
0,005
0,004
0,003
0,002
0,001
0
εmel0
εmel1
εmel2
εmel3
εmel4
prodloužení na mezi kluzu εki
0,00605
0,006
0,00595
0,0059
0,00585
0,0058
0,00575
0,0057
εki0
εki1
εki2
εki3
εki4

Diskuze výsledků

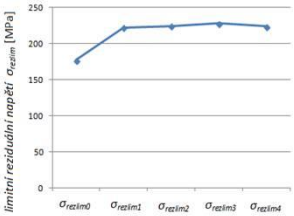


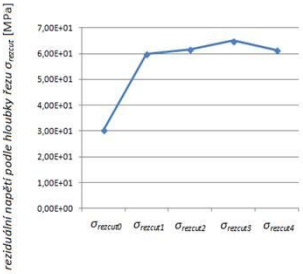






Diskuze výsledků





$\sigma_{def} = E_{mat} \cdot \varepsilon^n$

Závěr

1 2 3 4 5 6

- Řešení nabízí **originální způsob identifikace** fyzikálně-mechanických vlastností technických materiálů pomocí nejen statických, tzv. tabulkových parametrů, ale také dynamických parametrů, tj. způsob identifikace dynamických změn těchto parametrů v čase podle intenzity a druhu namáhání a vytváření interaktivních matematických modelů.
- Nový způsob řešení chování materiálů v plastické napěťově-deformační oblasti z topografické drsnosti povrchu, kde se zobecněný Hookův zákon ve tvaru

  $\sigma_{def} = E_{mat} \cdot \varepsilon^n$ nahrazuje rovnicí

  $$\sigma_{defbru} = E_{mat} \cdot \left(\frac{Ra \cdot h}{K_{plmat}} \right)^{0,25}$$

  A to z důvodu, že výraz ε^n v zobecněném Hookově zákonu, tj. hodnota exponentu n, je současnými hypotézami nedostatečně řešitelná.
- Navržený způsob je **levně a expresně aplikovatelný, na základě vstupů měřených např. ultrazvukem,** jak v laboratorních podmínkách, tak i v podmínkách in-situ pro přímou kontrolu a monitorování okamžitého stavu materiálu nosných konstrukcí.

$\sigma_{def} = E_{mat} \cdot \varepsilon^n$

1 2 3 4 5 6

Děkuji za pozornost.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Odborné diskuzní fórum bylo podpořeno z projektu:
„Systém vzdělávání pro personální zabezpečení výzkumu a vývoje v oblasti moderního trendu povrchového inženýrství - integrity povrchu“, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0037,
podporovaného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost, spolufinancovaného z Evropského sociálního fondu a ze státního rozpočtu České republiky.

Autor:	kolektiv autorů
Pracoviště:	VŠB-Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní
Název:	Zbytková napětí
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2013, 1. vydání
Počet stran:	203
Vydala:	VŠB – Technická Univerzita Ostrava Fakulta strojní
Tisk:	Katedra obrábění a montáže VŠB – TU Ostrava
Náklad:	XX ks

Neprodejné