

# POPIS RAZLIČNE STOPNJE HLADNE DEFORMACIJE KONSTRUKCIJSKEGA JEKLA NA OSNOVI BARKHAUSNOVEGA ŠUMA

## DESCRIPTION OF VARIOUS DEGREES OF COLD DEFORMATION STRUCTURAL STEEL BASED ON BARKHAUSEN NOISE

JANEZ GRUM<sup>1</sup>, B. PEČNIK<sup>1</sup>, D. FEFER<sup>2</sup>, P. ŽEROVNIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

Magnetni Barkhausnov efekt je pojav, ki nastane med magnetenjem feromagnetnih materialov. To je površinski pojav, povezan z gibanjem magnetnih domen v površinski plasti. Do Barkhausnovega šuma pride zaradi nenadnih sprememb pri magnetenju feromagnetnega materiala pod vplivom izmeničnega magnetnega polja. K tem spremembam prispevajo mikrostrukturne značilnosti, kot so: hladna deformacija, trdota, nečistoče, zaostale in obremenitvene napetosti. Opazovanje Barkhausnovega šuma v nadzorovanih razmerah podaja možnosti za popis in vrednotenje dejanskega stanja materiala. Magnetni Barkhausnovi signali in močnosni spektri Barkhausnovih šumov so bili merjeni v konstrukcijskem jeklu z različnimi stopnjami hladne deformacije, od 5 do 60%.

Ključne besede: mikromagnetna metoda, magnetni Barkhausnov šum, konstrukcijsko jeklo, hladna deformacija, mikrostrukturna analiza

Magnetic Barkhausen effect is associated phenomena generated during the magnetisation of ferromagnetic materials. It is also surface phenomenon associated with the switching of magnetic domains within close surface region. Barkhausen noise is created by the abrupt changes in the magnetisation of materials under applied AC magnetising field. This changes are known to be affected by microstructural features such as the cold deformation, hardness and by residual or applied stresses. Monitoring the Barkhausen noise under controlled conditions provides a means of evaluating the real state of material. Magnetic Barkhausen signals and power spectrum of the Barkhausen noise signal have been measured for a structural steel over a range of plastic deformation up to 60%.

Key words: micromagnetic method, magnetic barhausen noise, structural steel, cold deformation, microstructure analysis

### 1 UVOD

Do sedaj so prevladovale porušne metode za popis stanja materiala na površini in v površinskih plasteh. Zaradi vse večje avtomatizacije proizvodnje se zahteva sprotno spremljanje stanja materiala, zato se v ta namen uvajajo različne neporušne metode, ki pa morajo biti dovolj zanesljive in hitre.

Za uspešnost različnih kompleksnih neporušnih raziskav pa je ključnega pomena razvoj senzorske tehnike za zajemanje signalov in računalniške tehnologije za obdelavo in analizo rezultatov. Ena takih neporušnih metod je magnetna metoda na podlagi Barkhausnovega efekta, ki je bil odkrit že leta 1919. Sedaj pa je magnetna Barkhausnova metoda med najbolj znanimi neporušnimi metodami za ugotavljanje<sup>1,2</sup>:

- velikosti kristalnih zrn
- vrste mikrostrukture
- vpliva hladne deformacije
- sprememb v mikrostrukturi in trdoti materiala po mehanski ali toplotni obdelavi
- zaostalih napetosti na površini oziroma tanki površinski plasti materiala in
- sprememb električnih lastnosti

### 2 MERILNI SISTEM

Na svetovnem trgu se pojavljata predvsem dva različna proizvajalca merilnih naprav, ki delujejo na podlagi magnetnega Barkhausnovega efekta, in to sta Tiede<sup>3,4</sup> in American Stress Technologies AST<sup>2,5</sup>. Te merilne naprave se uporabljajo za ugotavljanje trdote materiala, debeline značilnih površinskih plasti materiala in zaostalih napetosti oziroma mehanskih napetosti v strojnih delih ali konstrukcijah v obremenjenem stanju. Prednost takih magnetnih naprav je, da se lahko uporabljajo za nadzor kakovosti izdelkov v individualni ali masovni proizvodnji in da omogočajo način "online".

Feromagnetni materiali imajo različne mehanske lastnosti oziroma so izpostavljeni različnim zunanjim vplivom, zato se pod vplivom magnetnega polja pojavijo dinamične razmere v magnetnih domenah. Tako dobimo različne slike magnetenja oziroma različne signale magnetnega Barkhausnovega šuma, ki so značilni za neki material, za njegovo stanje ali obremenitveno stanje. Uporabljen merilni sistem je iz ekonomskih razlogov sestavljen iz standardne laboratorijske opreme in specialne senzorske enote za zajemanje signala magnetnega Barkhausnovega šuma. Na **sliki 1** je prikazan merilni sistem, sestavljen iz treh osnovnih enot:

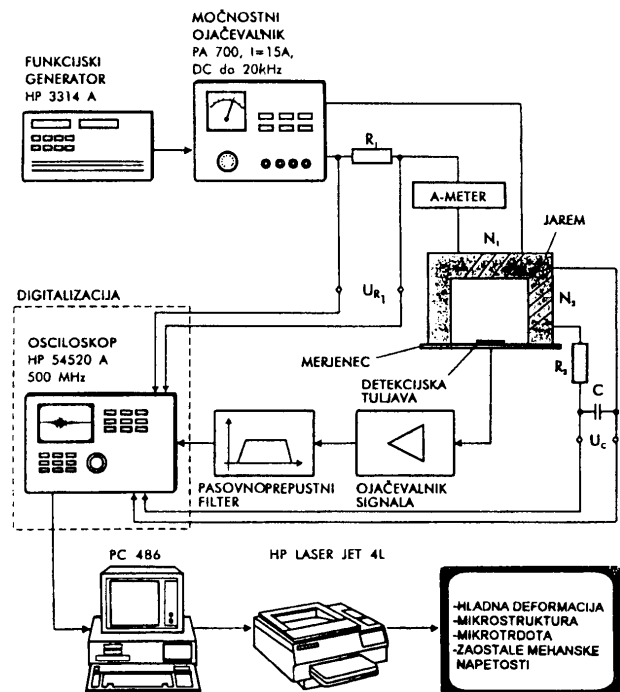
- močnostne enote za magnetenje
- enote za zajemanje Barkhausnovih šumov
- enote za procesiranje oziroma za digitalizacijo in prikaz senzorskih signalov.

Funkcijski generator HP 3314 A generira dinamični signal, ki ga vodimo v močnostni ojačevalnik PA 700, kjer se ojača do te mere, da je mogoče v materialu z magnetnim jarmom ustvariti magnetno polje ustrezne magnetne poljske jakosti. Z detekcijsko tuljavo zajamemo analogni signal Barkhausnovega šuma, ter ga nato ojačanega in filtriranega vodimo v štirikanalni digitalni osciloskop HP 54520 A. Z ojačevalnikom smo signal ojačali tako, da je najbolj primeren za nadaljnjo procesiranje. Uporabili smo pasovnoprepustni filter, ki prepušča signal v frekvenčnem območju med 700 Hz in 25 kHz. Vzbujevalno frekvenco smo spreminjali od 5 Hz do 50 Hz, medtem ko smo čase vzorčenja priredili tokovni periodi, kot je prikazano v tabeli 1. Čas tokovne periode oziroma čas vzorčenja smo določili na osnovi vzbujevalne frekvence.

**Tabela 1:** Čas vzorčenja in čas tokovne periode glede na vzbujevalno frekvenco

**Table 1:** Time of sampling and time of current period regarding incitement frequency

Vzbujevalna frekvenca (Hz)	Čas vzorčenja (s)	Čas tokovne periode (s)
5	0,0004	0,8188
10	0,0002	0,4094
20	0,0001	0,2047
50	0,00004	0,08188



**Slika 1:** Merilni sistem za zajemanje Barkhausnovega šuma  
**Figure 1:** Measuring system for gathering the magnetic Barkhausen noise

Različni avtorji<sup>3,7</sup> so prišli do spoznanj, da s pravilno izbiro vzbujevalne frekvence lahko spremljamo stanje materiala do določene globine. Izbira ustrezne vzbujevalne frekvence je zelo pomembna pri popisu stanja materiala z mikrostrukturnimi oziroma kemičnimi spremembami, ki so potekale po toplotnih postopkih le do neke globine. Zato moramo pri površinskemu kaljenju vzbujevalno frekvenco prirediti globini kaljene površinske plasti, da s to metodo lahko ugotovimo debelino, povprečno trdoto in mikrostrukturno stanje. Mikromagnetna metoda je zaradi številnih vplivov na proces magnetenja v tanki površinski plasti zelo zahtevna. Osnovno vprašanje, ki ga je potrebno pojasniti v posameznih primerih snovnih lastnosti materialov je, v kakšni meri in kako upoštevati posamezne vplive pri ocenjevanju dane lastnosti. Zahteve po analizi materiala do izbrane globine materiala narekujejo izbiro ustrezne vzbujevalne frekvence magnetenja. V našem primeru smo izbrali različne vzbujevalne frekvence, kar pomeni da lahko ocenjujemo lastnosti materiala v različnih globinah. Velja, da pri večji vzbujevalni frekvenci analiziramo tanjšo površinsko plast materiala.

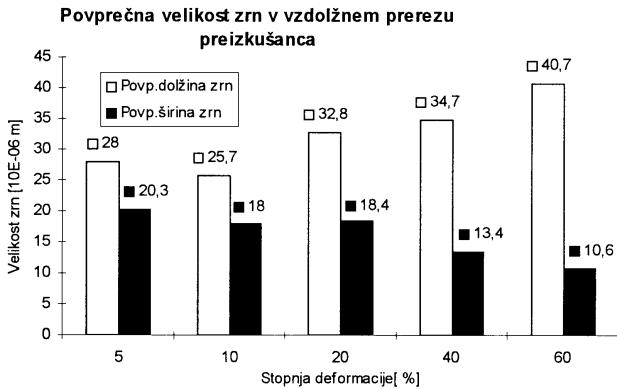
Najboljši rezultati so se pokazali pri nizki vzbujevalni frekvenci 10 Hz, zato smo meritve lastnosti materiala po različnih stopnjah hladne deformacije izvajali pri relativno veliki globini. Digitaliziranje tako pripravljene signala smo izvedli s časom vzorčenja 0,0002 s in časom tokovne periode magnetenja 0,4094 s, ki pa sta odvisni od vzbujevalne frekvence. Pri vzbujevalnih frekvencah nad 50 Hz in toku magnetenja 0,5 A je prihajalo že do nasičenja materiala, tako da ni bilo več zaznani značilnih preskokov Barkhausnovega šuma. Zato smo se odločili za zgornjo mejo vzbujevalne frekvence 50 Hz, in še pri tej vzbujevalni frekvenci Barkhausnovi preskoki niso bili tako očitni. Vendar pa smo želeli s to vzbujevalno frekvenco zajeti signal Barkhausnovega šuma čim bližje površini materiala s pretežno feritno mikrostrukturo.

### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Priprava preizkušancev

Material preizkušancev, ki smo ga analizirali z Barkhausnovim šumom, je bilo konstrukcijsko jeklo s pretežno feritno mikrostrukturo. Material smo z valjanjem na laboratorijskem valjarskem stroju hladno deformirali iz različnih debelin na enotno debelino 2 mm in pri tem dosegli različne stopnje deformacije od 5%, 10%, 20%, 40%, do 60%. Tako pripravljene vzorce smo metalografsko pregledali, nato pa smo se osredotočili na merjenje velikosti feritnih zrn v vzdolžni in prečni smeri glede na smer valjanja. Prav tako smo merili mikrotrdoto po Vickersu, ki se je spreminjala od 140 HV do 400 HV v odvisnosti od stopnje hladne deformacije.

Na sliki 2 so prikazane povprečne velikosti feritnih zrn v vzdolžnem prerezu oziroma v smeri hladnega



**Slika 2:** Izmerjene povprečne velikosti feritnih zrn v vzdolžnem prerezu glede na različne stopnje hladne deformacije  
**Figure 2:** The measured average sizes of ferrite crystal grains in the longitudinal cross section of the specimens after different degrees of cold deformation

valjanja. Z večanjem stopnje deformacije se dolžina zrn povečuje na račun njihovega stanjšanja.

### 3.2 Prikaz in vrednotenje magnetnega Barkhausovega signala (MBS)

Po zajetju napetostnih signalov magnetnega Barkhausovega šuma je sledilo vrednotenje teh signalov in v

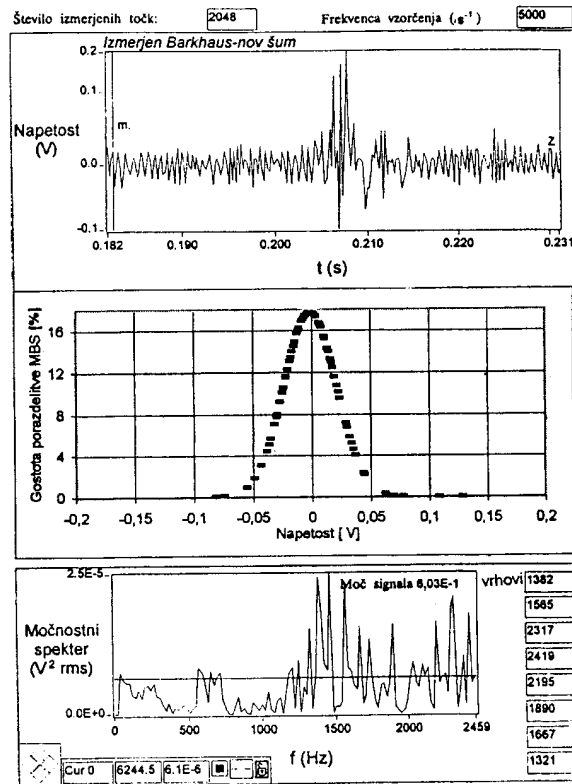
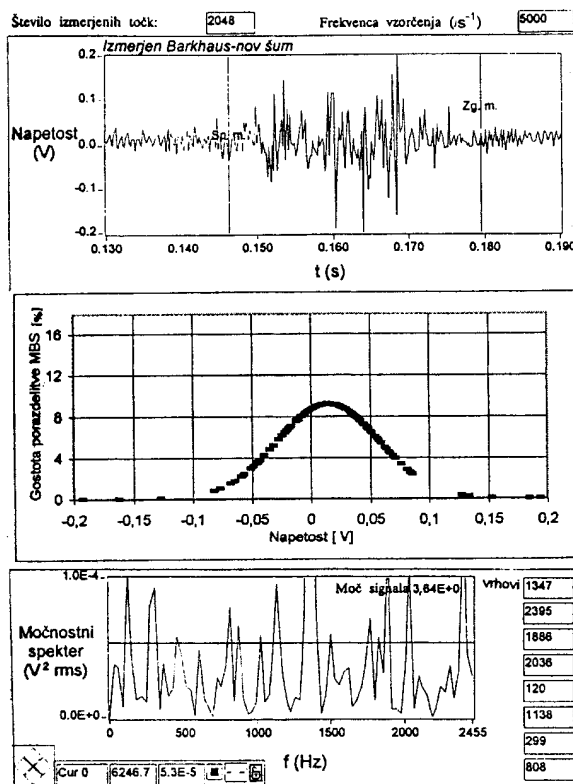
končni fazi izdelava prirejenih krivulj umerjanja glede na določeno značilnost za popis lastnosti materiala v tanki površinski plasti. Vrednotenje napetostnega signala Barkhausovega šuma nam je omogočilo popisati pričakovane korelacije z mikrostrukturo in s stopnjo hladne utrditve konstrukcijskega jekla. Pregled posameznih napetostnih signalov Barkhausovega šuma za različne stopnje deformacije pri različnih vzbujevalnih frekvencah nam je narekoval tri načine vrednotenja:

- primerjavo maksimalnih vrednosti napetostnega signala Barkhausovega šuma pri enaki vzbujevalni frekvenci
- analizo napetostnega signala Barkhausovega šuma na osnovi gostote porazdelitve in
- analizo spektralne moči Barkhausovega šuma.

Pri zajemanju Barkhausovega šuma imamo dva izhodiščna konstantna parametra, in sicer imajo vsi preizkušanci enotno debelino 2 mm in uporabljamo v vseh primerih za magnetenje izmenični tok jakosti 0,5 A. Na **sliki 3** so prikazani trije različni diagrami, in sicer napetostni signal Barkhausovega šuma in njegova gostota porazdelitve ter močnosni spekter. Vsi prikazani načini vrednotenja napetostnega signala Barkhausovega šuma nam omogočajo dovolj zanesljiv popis stanja materiala. Zgornja diagrama na **sliki 3** prikazujeta posnetke

#### Material s 5% stopnjo deformacije

#### Material s 60% stopnjo deformacije



**Slika 3:** Barkhausov signal, gostota porazdelitve magnetnega Barkhausovega signala in močnosni spekter za material s 5%- in 60%- stopnjo deformacije (vzbujevalna frekvenca je 10 Hz)

**Figure 3:** Barkhausen signal, frequency of MBS, power spectrum for material with 5% and 60% degrees of deformation (incitement frequency is 10 Hz)

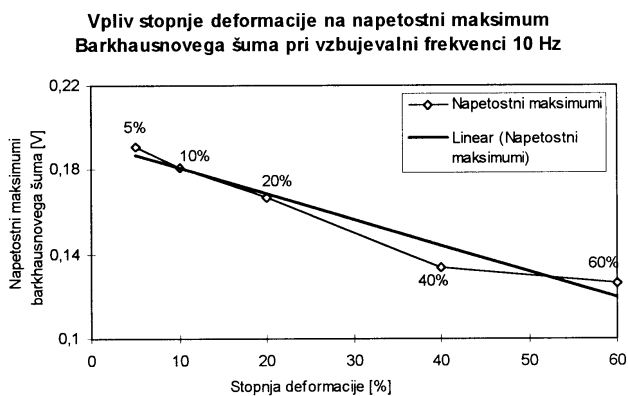
napetostnega Barkhausovega šuma pri najmanjši (5%) in najvišji (60%) stopnji hladne deformacije.

Opazimo lahko izrazite razlike v amplitudah napetostnega signala, kar je povezano z velikostjo feritnih kristalnih zrn in s sposobnostjo gibanja magnetnih domen znotraj zrn. Manjša je stopnja hladne deformacije, večja so feritna zrna in večje so tudi amplitude napetostnih signalov in nasprotno. To pomeni, da že vizualna ocena napetostnega signala omogoča dobro napoved stopnje deformacije.

Drugi, zelo pomemben pokazatelj stanja materiala je amplitudna porazdelitev napetostnega signala. Porazdelitev napetostnih signalov je prikazana v sredini slike 3, in sicer na levi strani za 5%- in na desni 60%- stopnjo hladne deformacije. Pri nižji stopnji hladne deformacije dobimo bolj sploščeno porazdelitev amplitudnih napetostnih signalov kot pri višjih stopnjah hladne deformacije. Tako lahko ugotovimo, da imamo v primerih, ko je manjša stopnja hladne deformacije, izrazitejše izbruhe napetostnih signalov z večjimi amplitudnimi vrednostmi.

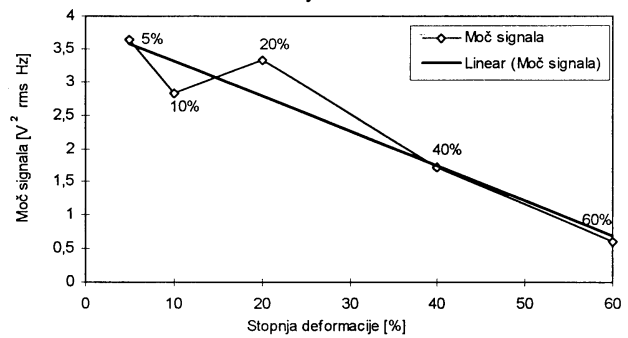
Spodnji diagram na sliki 3 prikazuje močnostni spekter glede na srednjo vrednost napetostnega signala posameznih digitaliziranih vrednosti v odvisnosti od njihove frekvence. Frekvenčna porazdelitev moči napetostnega signala Barkhausovega šuma se močno razlikujeta za obe obravnavani stopnji hladne deformacije materiala. Pri nižji stopnji hladne deformacije so v napetostnem signalu zastopane zelo enakomerne tako nizke kot tudi višje frekvence, medtem ko pri najvišji prevladujejo le višje frekvence signala.

Naslednja, zelo pomembna naloga je prireditve ustreznih krivulj umerjanj za različne stopnje hladne deformacije. Z izdelanimi krivuljami umerjanj smo prišli do spoznanj, da so maksimalne amplitude magnetnega signala Barkhausovega šuma višje pri nižjih stopnjah deformacije materiala. Z večanjem stopnje deformacije pa prihaja do nižanja maksimalnih amplitudnih vrednosti napetostnega signala Barkhausovega šuma, kar so za druge materiale in za različna stanja že popisali drugi avtorji<sup>4,8</sup>. Iz danih rezultatov lahko izhajamo, da sta si



Slika 4: Krivulja umerjanja med različnimi stopnjami hladne deformacije in napetostnimi maksimumi Barkhausovega šuma  
 Figure 4: Calibration curve between different degrees of cold deformation and maximum values of Barkhausen noise

Vpliv stopnje deformacije na moč signala pri frekvenci vzorčenja 5000 Hz



Slika 5: Krivulja umerjanja med različnimi stopnjami hladne deformacije in izračunanimi močmi signala Barkhausovega šuma  
 Figure 5: Calibration curve between different degrees of cold deformation and calculated power of Barkhausen noise signal

maksimalna napetostna amplituda Barkhausovega šuma in stopnja hladne deformacija v obratnem sorazmerju.

Do podobne tendence padanja krivulje umerjanja smo prišli tudi pri primerjavi izračunane moči signala za naraščajoče stopnje hladne deformacije. Z večanjem stopnje hladne deformacije se znižuje izračunana moč signala Barkhausovega šuma oziroma se zmanjšuje površina pod krivuljo močnostnega spektra.

Tako prirejeni krivulji umerjanja, prikazani na sliki 4 in 5, sta linearni in kot takšni zelo primerni za ugotavljanje odvisnosti med napetostnimi maksimumi Barkhausovega šuma oziroma izračunanimi močmi signalov glede na različne stopnje hladne deformacije. Pri takšnih postopkih umerjanja in ocenjevanja lastnosti materialov pa sledi, da to velja le za neki material in za znane razmere pri magnetenju (frekvenca, jakost toka).

#### 4 SKLEP

Rezultati raziskav so pokazali, da je mikromagnetna metoda zelo uspešna za ugotavljanje stopnje utrditve danega materiala glede na izmerjene mehanske karakteristike za različne stopnje hladne deformacije. Neposredno ugotavljanje stopnje hladne deformacije je lahko izvedeno preprosto s krivuljo umerjanja ali pa imamo ustrezno programsko podporo, ki dobljeni signal pretvori neposredno v želeni parameter za popis lastnosti materiala.

Glavna omejitev pri krivuljah umerjanja je, da je namenjena samo za določen material pri točno določenih mehanskih ali toplotnih spremembah. Za oceno lastnosti materiala na podlagi magnetnega Barkhausovega šuma pa sta pomembna dva parametra, ki se spreminjata z mikromagnetnim potencialom, in sicer vzbujevalna frekvenca ter tok magnetenja.

Glavne prednosti magnetne Barkhausove metode se kažejo v tem, da je ena izmed neporušnih metod z dobro ponovljivostjo in zanesljivostjo zajetih in obdelanih signalov in da lahko poteka proces vrednotenja signala v realnem času. Kljub hitremu zaznavanju napetostnega sig-

nala Barkhausnovega šuma in procesiranju signalov je zanesljivost metode in natančnost dobljenih rezultatov zelo visoka. Metoda je zaradi zanesljivosti in hitrosti zelo primerna za popolni nadzor kakovosti obdelovancev oziroma izdelkov v velikoserijski proizvodnji.

## 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> Buttle D. J., Jakubovics J. P., Brigges G. A. D.: Magneto-acoustic and Barkhausen emission from domain-wall interaction with precipitates in Incoloy 904, *Philosophical Magazine A*, 55 (1987) 6, 735-756
- <sup>2</sup> Titto K.: Use of Barkhausen effect in testing for residual stresses and material defects, *Non-destructive Testing*, Australia, 26 (1989) 2, 36-41
- <sup>3</sup> Bach G., Valtinogjer J., Goebbles K., Essingen: Mikromagnetische Härte-, Härtetiefe- und Spannungsmessung, *Material Prüfung*, Carl Hanser Verlag, München, 31. Jahrgang, November/Dezember, 1989
- <sup>4</sup> Bach G., Goebbles K., Theiner W. A.: Characterisation of Hardening Depth by Barkhausen Noise Measurement, *Materials Evaluation*, *The American Society for Non-destructive Testing*, 46 (1988) November, 1576-1580
- <sup>5</sup> Fix. R. M., Titto K., Titto S.: Automated Control of Camshaft Grinding Process by Barkhausen Noise, *Materials Evaluation*, 48 (1990) 7, 904-908
- <sup>6</sup> Tebble R. S., Skidmore I. C., Corner W. D.: The Barkhausen effect, Physics Department, University of Leeds, 739-761
- <sup>7</sup> Kern R., Theimer W.: Non-destructive magnetic testing of laser hardening parameters, *Paper Presented at The European Conference on Laser Treatment of Materials*, Bad Nauheim, 1986, v knjigi Mordike B. L.: *Laser Treatment of Materials*, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde Verlag, Oberursel, Germany, 1987, 427-434
- <sup>8</sup> Titto K., Pro. R.: Detection of heat treat defects and grinding burns by measurement of Barkhausen noise, *2nd International Symposium on the Non-destructive Characterisation of Materials*, Toronto, 1986
- <sup>9</sup> Gardner C. G., Matzkanin G. A., Davidson D. L.: The influence of mechanical stress on magnetisation in ferromagnetic materials, *International Journal of Non-destructive Testing*, 3 (1971) 131-169
- <sup>10</sup> Karjalain L. P., Moilanen M.: Detection of plastic deformation during fatigue of mild steel by the measurement of Barkhausen noise, *Non-destructive Testing International*, (1979) April, 51-55