

PIEZOELEKTRIČNI AKTUATOR

M. Modic, M. Kosec, J. Pirš, J. Možina

KLJUČNE BESEDE: piezoelektrični aktuatorji, večplastni aktuatorji, keramični aktuatorji, keramika PZT, dinamične karakteristike, statične karakteristike, pomik, histereza, izdelava, eksperimentalni rezultati

POVZETEK: V delu smo na kratko opisali delovanje in uporabnost piezoelektričnih aktuatorjev. Izdelali smo večplastni aktuator iz "mehke" piezokeramike na osnovi $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$. Analizirali smo njegovo obnašanje; pomik in histerezo pri statični in dinamični električni obremenitvi. Odstopanja od modela smo pojasnili z lastnostmi piezokeramike.

PIEZOELECTRIC CERAMIC ACTUATOR

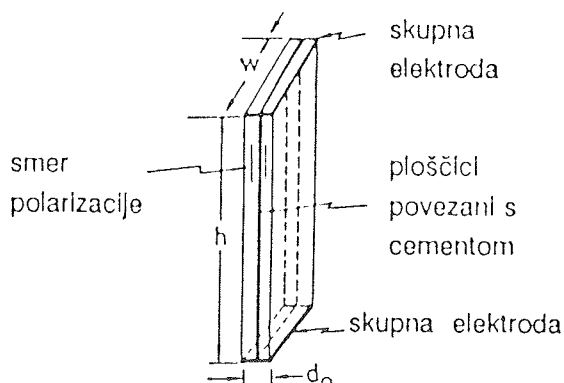
KEY WORDS: piezoelectric actuators, multilayer actuators, ceramic actuators, PZT ceramics, dynamic characteristics, static characteristics, displacement, hysteresis, fabrication, experimental results

ABSTRACT: The applications of piezoelectric actuators are briefly reviewed. The multilayer piezoelectric actuator was fabricated using "soft" piezoceramics based on $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ solid solution. The static and dynamic characteristics were measured. The discrepancy between measured and calculated values is discussed in terms of piezoceramic internal structure.

1. UVOD

Piezoelektrični aktuatorji so elektromehanske naprave, pri katerih se piezoelektrični pojav izkorišča za spreminjanje dimenzij z električno napetostjo. Piezoelektrični aktuatorji so narejeni iz feroelektričnih keramičnih materialov. Zadnja leta so ob uporabi novih feroelektričnih keramičnih materialov razvili več vrst piezoelektričnih aktuatorjev, ki jih, v primerjavi z doslej prevladujočimi elektromagnetnimi, odlikuje možnost krmiljenja pomikov reda velikosti nekaj stotink μm , majhna poraba energije, zanemarljivo segrevanje in majhna zakasnitev (nekaj s) pomika za električnim signalom. Piezoelektrične aktuatorje največ uporabljajo na področjih optike, precizne mehanike in v malih motorjih.

Piezoelektrične aktuatorje lahko po konstrukciji razdelimo v dve skupini. V prvi skupini so dvoplastni aktuatorji, ki jih dobimo, če zlepimo dve keramični ploščici s polarizacijama v nasprotnih smereh. V drugi skupini pa so



Slika 1: Konstrukcija dvoplastnega aktuatorja

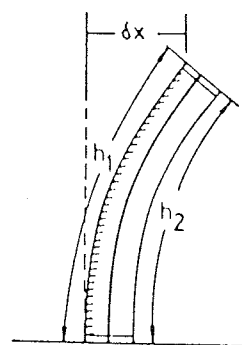
mnogoplastni aktuatorji, kjer so ploščice zlepljene v stolpec.

Najprej si oglejmo primer dvoplastnega aktuatorja, njegovo konstrukcijo kaže slika 1⁽¹⁾.

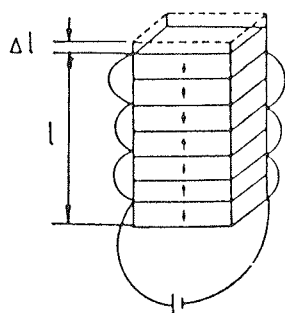
Dve keramični ploščici s polarizacijama v nasprotnih smereh sta povezani s plastjo cementa. Aktuator ima dve elektrodi, spodnjo in zgornjo. Ko na elektrodi pripeljemo električno napetost, pride do obratnega piezoelektričnega pojava; ploščica, v kateri ima polarizacija smer električnega polja, se podaljša, druga ploščica pa se skrajša. Posledica različne deformacije obeh ploščic je upogib aktuatorja (slika 2).

Z upoštevanjem osnovnih geometrijskih enačb in ob predpostavki, da sta ploščici dolgi in tanki, dobimo za pomik x enačbo:

$$\delta x = \frac{h_1 \cdot (h_1 - h_2)}{2 \cdot d_0} = \frac{h^2}{2 \cdot d_0} \cdot \left(\frac{2 \delta h}{h} \right)$$



Slika 2: Upogib aktuatorja, ki je posledica obratnega piezoelektričnega pojava v obeh ploščicah



Slika 3: Konstrukcija mnogoplastnega aktuatorja, puščice kažejo smer polarizacij posameznih ploščic

Velja tudi $\epsilon_3 = \delta h/h = d_{33} \cdot E_3$, kjer je d_{33} piezoelektrična konstanta (mV^{-1}) in E jakost električnega polja (V m^{-1}). Indeks 3 označuje smer polarizacije.

Upogib aktuatorja je torej tako odvisen od električnega polja E_3 :

$$\delta x = \frac{h_2}{d_0} \cdot d_{33} \cdot E_3$$

Oglejmo si še primer mnogoplastnega aktuatorja⁽²⁾.

Keramične ploščice so zlepljene v aktuator kot kaže slika 3. Vsaka ploščica ima dve elektrodi, na spodnji in na zgornji ploskvi. Stiki med ploščicami so izmenoma priključeni na +, oz. - pol generatorja. Vse ploščice v aktuatorju so tako vzporedno električno vezane.

Za pomik ene ploščice velja enačba

$$\epsilon_3 = \frac{\Delta z}{z} = d_{33} \cdot E_3, \text{ kjer je } z \text{ debelina ploščice in}$$

$$\Delta z = d_{33} \cdot E_3 \cdot z = d_{33} \cdot U, \text{ kjer je } U \text{ napetost med elektrodama.}$$

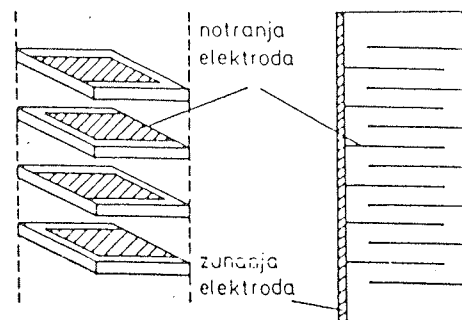
Pomik v smeri polarizacije celotnega aktuatorja je v prvi aproksimaciji, ko zanemarimo vplive lepila na pomik, vsota pomikov posameznih ploščic:

$$\Delta l = n \cdot \Delta z = n \cdot d_{33} \cdot U, \text{ kjer je } n \text{ število ploščic v aktuatorju.}$$

Vidimo, da lahko pomik aktuatorja zvečamo z dodajanjem novih ploščic, zato lahko velike pomike (nekaj μm) dobimo tudi pri nizkih napetostih (nekaj sto V).

Elektrode je na spodnjo in zgornjo ploskev ploščice treba nanesti tako, da lahko zlepljene ploščice pravilno električno vezemo. Eno izmed možnosti kaže slika 4⁽²⁾.

Keramične ploščice so kvadratne oblike, vsaka elektroda pa sega do roba ploščice samo ob eni stranici. Če na zgornji ploskvi ploščice elektroda sega do roba ob levi stranici, bo na spodnji ploskvi iste ploščice elektroda segala do roba ob desni stranici. Ob lepljenju takšnih ploščic je treba paziti, da imata dve sosednji ploščici



Slika 4: Ena od možnih konfiguracij elektrod v mnogoplastnem aktuatorju

nasprotno smer polarizacije in da sta ob vsakem stiku dveh ploščic zgornja elektroda spodnje ploščice in spodnja elektroda zgornje ploščice obrnjeni v isto smer (če zgornja elektroda spodnje ploščice sega do desnega roba, mora tudi spodnja elektroda zgornje ploščice segati do desnega roba). Ko so ploščice zlepljene, vse leve robove povežemo z eno, vse desne pa z drugo zunanjo elektrodo.

2. EKSPERIMENTALNO DELO

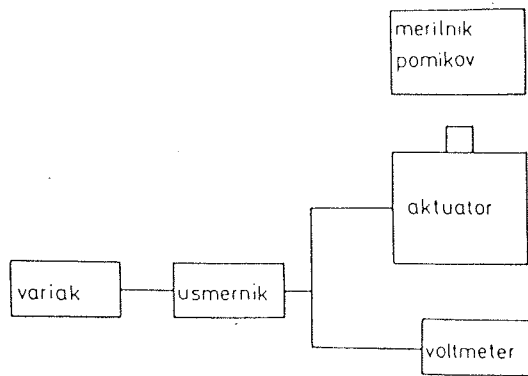
2.1 Izbira materiala

Cilj dela je bil konstrukcija, izdelava in karakterizacija mnogoplastnega keramičnega aktuatorja, ki bi dosegal pomike nekaj μm pri napetostih nekaj sto voltov.

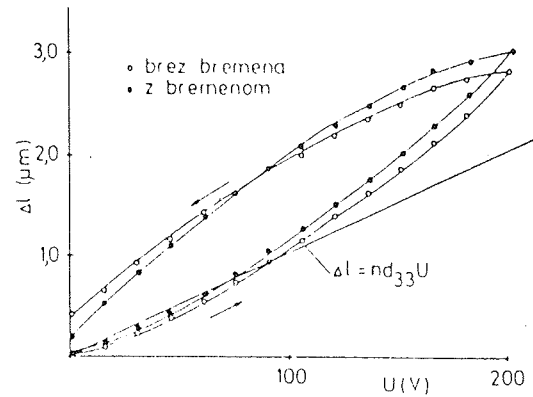
Za piezoelektrične naprave najbolj pogosto uporabljajo keramiko svinčevega cirkonata titanata $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ (kratko PZT), ki ima perovskitno strukturo. Najbolj uporabni so materiali z x med 0,46 do 0,50, kjer so poleg tetragonalnih možne tudi trigonalne osnovne celice, kar povečuje število možnih polarnih osi⁽³⁾.

Piezoelektrični efekt PZT keramike lahko močno povečamo z dopiranjem, z dodajanjem majhnih količin snovi, ki v kristalni mreži zamenjujejo Pb, Zr ali Ti ione. Dodatki Fe^{3+} , K^{1+} ali Mg^{2+} so akceptorji, tako dopirano keramiko imenujemo trdo keramiko, njene značilnosti pa so mala histereza in sorazmerno nizke vrednosti piezoelektričnih koeficientov; tipična vrednost za d_{33} je $200 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}$, za d_{31} pa $-100 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}$. Dodatki Nb^{5+} , Ta^{5+} ali La^{3+} so donorji in povzročijo, da je nekaj svinčevih mest v kristalni mreži praznih, zato postanejo domene lažje obrnljive. To je mehka keramika, njene značilnosti so večja histereza, visoke vrednosti piezoelektričnih koeficientov (tipična vrednost za d_{33} je $500 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}$, za d_{31} pa $-200 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}$) in visoka dielektrična konstanta⁽⁴⁾.

Ker smo želeli velike pomike aktuatorja pri nizkih napetostih, smo izbrali material z visoko vrednostjo d_{33} , ki je

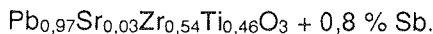


Slika 5: Postavitev eksperimenta za merjenje odziva aktuatorja na enosmerno napetost



Slika 6: Raztezek aktuatorja v odvisnosti od enosmerne napetosti

bil razvit za akustične piezokeramične elemente. To je donorsko dopirana PZT keramika s formulo:



2.2 Priprava piezokeramičnih ploščic

Iz granulata PZT smo stisnili vzorce 15 x 15 x 8 mm, jim odstranili vezivo ter sintrali pri 1300°C. Po sintranju smo dobili keramiko z gostoto, ki je bila večja od 95 % teoretične vrednosti in z velikostjo zrn pretežno med 5 - 10 μm. Z žaganjem in brušenjem smo pripravili ploščice 13 x 13 x 0,5 mm, na katere smo s sitotiskom nanesti srebrove elektrode s konfiguracijo, prikazano na sliki 4. Neaktivni del med elektrodo in robovi ploščice je bil 1 mm. Po sušenju in žganju elektrod ter polarizaciji pri sobni temperaturi v električnem polju z jakostjo 3 kV/mm smo dobili elemente s povprečno vrednostjo $d_{33} = 400 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}$.

2.3 Izdelava aktuatorja

Lepilo, s katerim smo lepili ploščice v aktuator, smo izbrali po teh kriterijih:

Lepilo ni smelo biti električno prevodno, da ne bi pokvarilo konfiguracije elektrod.

Strjevanje lepila ni smelo potekati pri previsoki temperaturi, ker bi segrevanje keramike do temperature blizu Curiejeve temperature keramiko depolariziralo (ploščice so bile iz materiala, ki je imel Curiejevo temperaturo pri 190°C).

Lepilo je moralo imeti čim manjši elastični modul, da bi bil vpliv lepila na pomik aktuatorja čim manjši.

Vsem trem zahtevam ustreza lepilo Loctite 638. Ploščice smo zlepili po shemi na sliki 4. Za zunanje elektrode smo uporabili sušečo srebrovo pasto, ki smo jo nanesti ročno. Aktuator je sestavljalo 26 ploščic. Podrobnosti izdelave so opisane v viru 5.

3. REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Statične meritve

Za merjenja odziva aktuatorja na enosmerno napetost smo aktuator namestili v kovinski okvir tako, da smo pomik, ki se je prenašal prek bata, registrirali z merilnikom MI-6B (Genevoise). Inštrument zaznava pomike do 0,01 μm. Shema meritve je prikazana na sliki 8.

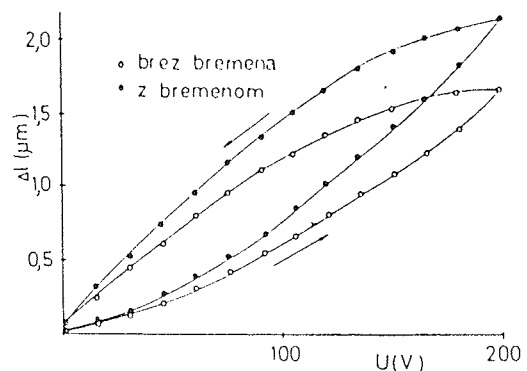
Pri merjenju je bil aktuator postavljen navpično, nanj je delovala samo sila teže bata, velika 0,6 N. Pri drugem merjenju pa je na aktuator poleg sile teže bata pritiskala tudi vzmet s silo 70 N, kar je pomenilo mehansko obremenitev 0,4 MPa. Rezultate meritev raztezkov kaže slika 6. Premica na sliki 6 kaže odvisnost raztezka od napetosti, kot ga predvideva enačba

$$\Delta l = n \cdot d_{33} \cdot U, \text{ kjer je } n = 26$$

$$\text{in } d_{33} = 400 \cdot 10^{-12} \text{mV}^{-1}.$$

Ko smo predznak napetosti obrnili, se je z naraščajočo napetostjo aktuator krčil. Izmerjeni skrčki so precej manjši od izmerjenih raztezkov (slika 7).

Velikost histereze smo izračunali tako, da smo poiskali napetosti, kjer je histerezna zanka najširša in razliko



Slika 7: Skrček aktuatorja v odvisnosti od enosmerne napetosti

med obema pomikoma pri tej napetosti delili z največjim pomikom (pri 200 V).

Dobili smo takšne rezultate:

	velikost histereze
raztezek brez vzmeti	31,8 %
raztezek z vzmetjo	26,6 %
skrček brez vzmeti	33,5 %
skrček z vzmetjo	30,7 %

Z analizo grafov lahko opazimo naslednje lastnosti aktuatorja:

1. Histereza je nekoliko manjša v primeru, ko je bil aktuator obremenjen z vzmetjo.
2. Pomiki so pri z vzmetjo obremenjenem aktuatorju nekoliko večji kot pri neobremenjenem.
3. Raztezki so samo pri nizkih električnih napetostih takšni, kot jih napoveduje enačba $\Delta l = n d_{33} \cdot U$, pri večjih napetostih (nekako od 100 V naprej pa je izmerjeni raztezek nekoliko večji od izračunanega).

Medtem, ko je prva lastnost verjetno posledica tega, da bat zaradi vzmeti bolje sledi pomikom aktuatorja pa sta druga in tretja lastnost verjetno posledici lastnosti keramike.

Domnevamo, da je d_{33} keramike pri mehanski obremenitvi narasla, tako kot sta ugotovila Meeks in Timme⁽⁶⁾. Zato smo dobili pri obremenjenem aktuatorju večje pomike, kot pri neobremenjenem. Pri tem je seveda treba biti previden, saj aktuator poleg keramike sestavljajo še elektrode, lepilo in ohišje, ki tudi vplivajo na lastnosti aktuatorja, njihovega vpliva pa ne poznamo.

Tudi pojav, da je pri večjih električnih napetostih izmerjeni pomik večji od izračunanega, so pri poskusih s keramiko že opazili. Pri PZT keramiki s tetragonalno obliko osnovne celice v feroelektričnem stanju lahko domene, glede na to, kako se obračajo v zunanjem električnem polju, razdelimo v dve skupini, 90 stopinjske in 180 stopinjske⁽⁷⁾. Pri 180 stopinjskih domenah se orientacija njihovega dipolnega momenta zaradi elek-

tričnega polja obrne za 180°, kar ne povzroča sprememb dimenzije vzorca. Pri 90 stopinjskih domenah pa se orientacija dipolnega momenta zaradi električnega polja obrne za 90°. Ker ima orientacija dipolnega momenta smer daljše stranice v tetragonalni osnovni celici, se za 90° obrne tudi smer te stranice, kar povzroča spremembo dimenzij vzorca.

Pri polarizirani PZT keramiki sprememba električnega polja skoraj ne vpliva na obračanje 180 stopinjskih domen, vpliva pa na obračanje 90 stopinjskih domen⁽⁸⁾. Razlika med izmerjenim in izračunanim pomikom bi naj torej bila posledica obračanja 90 stopinjskih domen, z večanjem števila domen, orientiranih v smeri polarizacije, se namreč večja tudi piezoelektrični efekt.

Morda je tudi to, da je skrček, ki smo ga izmerili, manjši od raztezka, posledica obračanja domen, kar električno polje v nasprotni smeri polarizacije zmanjšuje število domen, ki prispevajo k piezoelektričnemu efektu.

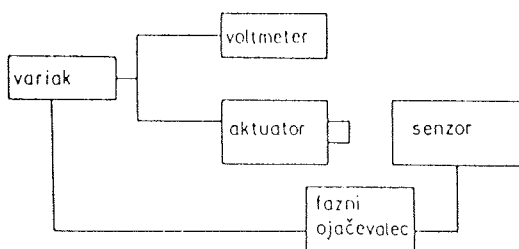
3.2 Dinamične meritve

Poleg odziva aktuatorja na enosmerno napetost smo poskusili izmeriti tudi odziv aktuatorja na izmenično napetost; slika 8 kaže postavitev eksperimenta.

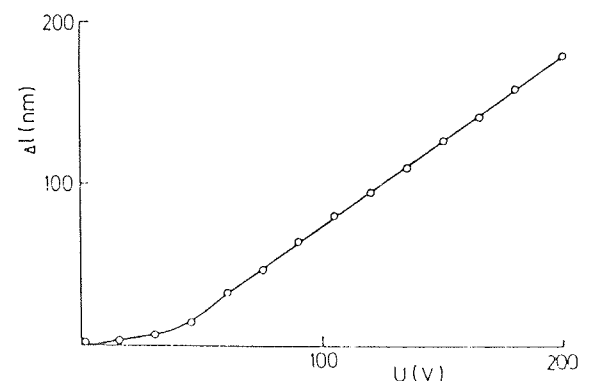
Pomike aktuatorja smo merili s senzorjem z optičnim vlaknom, ki ga sestavljajo laser, optična vlakna in fotodetektor⁽⁹⁾.

V našem eksperimentu smo aktuator poganjali z napetostjo iz variaka s frekvenco 50 Hz, zato smo tudi na referenčni vhod ojačevalca pripeljali sinusen signal iz variaka s frekvenco 50 Hz. Na vhod ojačevalca smo pripeljali signal iz fotodetektorja. S faznim ojačevalcem smo merili amplitudo signala s frekvenco 50 Hz iz fotodetektorja. Pri občutljivosti senzorja $3 \text{ nm}(\mu\text{V})^{-1}$ smo dobili rezultate, ki jih prikazuje slika 9.

Ker je bil aktuator med merjenjem v vodoravni legi, nismo mogli meriti brez vzmeti, ki je zagotavljala, da je bat sledil pomiku ploščic. Izmerjeni pomiki so več kot desetkrat manjši od pomikov, izmerjenih pri enosmerni



Slika 8: Postavitev eksperimenta za merjenje odziva aktuatorja na izmenično napetost



Slika 9: Izmerjen pomik aktuatorja v odvisnosti od amplitude izmenične napetosti s frekvenco 50 Hz.

napetosti. Domnevamo, da zaradi histereze odziv aktuatorja na sinusno izmenično napetost ni sinusno nihanje, zato nihanje aktuatorja vsebuje poleg sinusnega nihanja s frekvenco 50 Hz še člene z višjimi harmonskimi frekvencami, ki pa jih pri merjenju s faznim ojačevalcem nismo izmerili.

4. SKLEPI

Sestavili smo piezoelektrični aktuator, uporabljajoč piezokeramiko na osnovi trdne raztopine $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$.

Izbrali smo material, ki ima visoko vrednost konstante d_{33} , vendar tudi veliko histerezo.

Pri aktuatorju, zlepljenem iz 26 ploščic, smo pri enosmerni napetosti 200 V izmerili raztezek 2 μm .

Pri aktuatorju, obremenjenem z mehansko napetostjo $\sigma_3 = 0,41 \text{ MPa cm}^{-2}$, smo izmerili večje pomike kot pri neobremenjenem aktuatorju, kar naj bi bila posledica odvisnosti vrednosti d_{33} za PZT keramiko od σ_3 .

Pri napetostih, večjih od 100 V, je bil izmerjen raztezek večji od raztezka, ki ga predvideva enačba $\Delta l = n d_{33} U$. To je verjetno posledica obračanja 90 stopinjskih domen v smer električnega polja.

Lastnosti, ki smo jih opazili pri merjenju pomikov aktuatorja, smo poskusili pojasniti z lastnostmi keramike, ne moremo pa izključiti vplivov ostalih sestavnih delov (lepila, ohišja...) na lastnosti aktuatorja.

Odvisnost pomika aktuatorja od amplitude izmenične napetosti s frekvenco 50 Hz smo izmerili z doma izdelanim senzorjem z optičnim vlaknom, nismo pa uspeli izvesti merjenja pomika aktuatorja v odvisnosti od frekvence izmenične napetosti.

Konfiguracija elektrod je takšna, da so v keramiki tudi neaktivne plasti, čemur bi se lahko izognili z drugačno tehnologijo; s preizkušanjem več vrst keramik in lepil pa bi lahko zmanjšali histerezo, ki je glavna pomanjkljivost piezoelektričnega aktuatorja.

5. VIRI

1. P. S. Brady, Optomechanical Bimorph Actuator, *Ferroelectrics* **50** (1983) 353
2. S. Takahashi, Longitudinal Mode Multilayer Piezoceramic Actuators, *Ceram. Bull.* **65** (1986) 1156
3. V. A. Isupov, Some Aspects of the Physics of Piezoelectric Ceramics, *Ferroelectrics* **46** (1983) 217
4. T. R. Shrout, A. Safari, W. A. Schulze, Low Field Poling of Soft PZTs, *Ferroelectric Letters* **44** (1983) 227
5. M. Modic, Piezoelektrični aktuator, diplomsko delo, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo Univerze v Ljubljani, Ljubljana 1989
6. S. W. Meeks, R. W. Timme, Effects of One-Dimensional Stress on Piezoelectric Ceramics, *J. Appl. Phys.* **46** (1975) 4334
7. D. Berlincourt, H. A. Krueger, Domain Processes in Lead Titanate Zirconate and Barium Titanate Ceramics, *J. Appl. Phys.* **30** (1959) 1804
8. N. Uchida, T. Ikeda, Temperature and Bias Characteristics of $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Families Ceramics, *Jap. J. Appl. Phys.* **4** (1965) 867
9. A. Alajbegović, Brezdotična detekcija ultrazvoka z optičnim vlaknom, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1987

*Marko Modic, dipl.ing.
Železarna Ravne
62390 Ravne na Koroškem*

*dr. Marija Kosec,
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39
61000 Ljubljana*

*dr. Janez Pirš
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39
61000 Ljubljana*

*prof. dr. Janez Možina
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Ljubljani
Murnikova 2
61000 Ljubljana*

Prispelo: 26. 03. 91 Sprejeto: 04. 06. 91