

Meritev zaostalih napetosti z uporabo metode vrtanja luknjice

Bojan PODGORNİK, Jože VIŽINTIN

Izvleček: Zaostale napetosti se v komponentah strojev in naprav pojavljajo kot posledica njihove izdelave, lahko pa so vnesene tudi namenoma preko procesa inženiringa površine. Natančno poznavanje vrednosti in porazdelitve zaostalih napetosti pa je ključnega pomena pri analizi in kontroli kvalitete izdelkov kakor tudi za natančno napoved dobe trajanja elementov. Za kvantitativno oceno vpliva zaostalih napetosti ter za preprečitev napak in poškodb elementov seveda potrebujemo primerne metode merjenja zaostalih napetosti, ki morajo biti zanesljive za praktično uporabo, pa tudi prenosne in neporušne. Prav metoda vrtanja luknjice, ki se šteje med polneporušne metode, kaže veliko praktično uporabnost pri merjenju in analizi zaostalih napetosti realnih komponent in konstrukcij.

V prispevku so predstavljeni rezultati in problemi merjenja zaostalih napetosti, ki se pojavljajo pri praktični uporabi metode vrtanja luknjice. Aplikacije, zajete v prispevku, vključujejo procese preoblikovanja, kot so valjanje, kovanje in izsekavanje ter primer gredi generatorja s področja strojnih elementov. Predstavljeni rezultati jasno kažejo na pomembnost zaostalih napetosti za pravilno načrtovanje in uporabo konstrukcijskih elementov.

Ključne besede: zaostale napetosti, metoda vrtanja luknjice, preoblikovanje, komponente

1 Uvod

Zaostale napetosti se pojavljajo kot posledica spremembe volumna materiala, ki nastane zaradi termične ekspanzije, plastične deformacije ali fazne spremembe. Odločilno za nastanek zaostalih napetosti pa je dejstvo, da se te spremembe volumna razlikujejo in da se pojavljajo v različnih delih elementa različno [1]. Zaostale napetosti se v komponentah strojev in naprav tako pojavljajo kot posledica njihove izdelave z ulivanjem, odrezavanjem, preoblikovanjem in toplotno obdelavo [2]. Zaostale napetosti pa so lahko vnesene tudi namenoma preko procesa inženiringa površine, kot so

nitiranje, peskanje itd., z namenom ustvarjanja polja tlačnih zaostalih napetosti [3]. Natančno poznavanje vrednosti in porazdelitve zaostalih napetosti je ključnega pomena pri analizi in kontroli kvalitete izdelkov kakor tudi za natančno napoved dobe trajanja elementov [4–6]. Tako tlačne zaostale napetosti izboljšajo odpornost površine na utrujanje in obrabo, medtem ko natezne napetosti povečajo verjetnost poškodbe in odpovedi inženirskih komponent [7]. Za kvalitetno oceno vpliva zaostalih napetosti ter za preprečitev napak in poškodb elementov seveda potrebujemo primerne metode merjenja zaostalih napetosti. V praksi se uporabljajo različne metode merjenja, ki vključujejo mehanske, rentgenske, akustične in magnetne metode [8]. Poleg zanesljivosti pa morajo biti metode za uporabo v industriji tudi prenosne in neporušne. Prav metoda vrtanja luknjice [9], ki šteje med polneporušne metode, kaže veliko praktično uporabnost pri merjenju in analizi zaostalih napetosti realnih komponent in konstrukcij. Seveda

vsaka aplikacija zahteva svoj pristop merjenja in evalvacije rezultatov.

V prispevku so predstavljeni rezultati in problemi merjenja zaostalih napetosti, ki se pojavljajo pri praktični uporabi metode vrtanja luknjice. Aplikacije, zajete v prispevku, vključujejo procese preoblikovanja, kot so valjanje, kovanje in izsekavanje ter primer gredi generatorja s področja strojnih elementov. Predstavljeni rezultati jasno kažejo na pomembnost zaostalih napetosti za pravilno načrtovanje in uporabo konstrukcijskih elementov.

2 Opis metode vrtanja luknjice

Metoda vrtanja luknjice je bila kot osnova za meritev zaostalih napetosti predstavljena že leta 1930 in temelji na merjenju površinskih pomikov, ki nastopajo zaradi sproščanja napetosti med vrtanjem luknjice premera do 2 mm v površino. Z odstranjevanjem materiala, ki vsebuje zaostale napetosti, okoliški

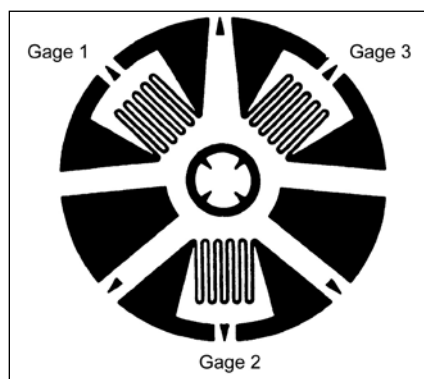
Izr. prof. dr. Bojan Podgornik, univ. dipl. inž., Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana
Prof. dr. Jože Vižintin, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

material v taki meri spremeni svoje napetostno stanje, da je ponovno vzpostavljeno napetostno ravnovesje [10]. Nastale pomike površine lahko zasledujemo z uporabo posebej oblikovane merilne rozete (slika 1) in na podlagi meritev izračunamo zaostale napetosti, ki so obstajale na mestu vrtnja luknjice (slika 2). Celotna metoda je standardizirana in opisana v ameriškem standardu ASTM E 837 [9].

Relaksacija površine, izmerjena z enim od treh merilnih lističev merilne rozete, je z zaostalimi napetostmi povezana preko enačbe 1:

$$\varepsilon_i = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \cdot A + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot B \cdot \cos^2 \theta \quad (\text{en. 1})$$

kjer sta σ_{\max} in σ_{\min} glavni zaostali napetosti, θ kot med osjo merilnega lističa in smerjo maksimalne zaostale napetosti ter A in B kalibracijski konstanti, odvisni od materiala površine, geometrije merilne rozete, premera in globine luknjice [9].

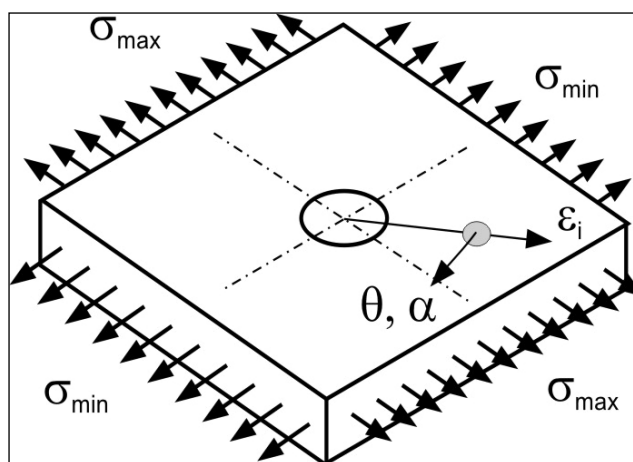


Slika 1. Merilna rozeta za merjenje pomikov pri metodi vrtnja luknjice

Glavne zaostale napetosti in kot α , definiran med merilnim lističem 1 in smerjo σ_{\max} , pa nato izračunamo na podlagi izmerjenih pomikov in z uporabo enačb 2 in 3:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{4A} \pm \quad (\text{en. 2})$$

$$\frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B}$$



Slika 2. Komponente napetosti, povzročene z vrtnjem luknjice [9]

$$\alpha = 1/2 \arctan \left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \right) \quad (\text{en. 3})$$

Metoda vrtnja luknjice je veljavna v primeru homogenih izotropnih materialov, ter za komponente, ki so široke in debele v primerjavi s premerom in globino luknjice. Prav tako se je potrebno pri meritvah izogibati območjem z velikimi gradienti zaostalih napetosti ter mest, kjer napetosti presegajo 2/3 meje tečenja materiala [10]. V primeru sprememb zaostalih napetosti z globino pa se za meritev le-teh lahko poslužujemo inkrementalnih metod, ki dajejo vrednosti zaostalih napetosti v odvisnosti od globine [11].

■ 3 Praktični primeri

3.1 Vroče valjanje

Valji za vroče valjanje (slika 3a) se navadno ulivajo kot dvoslojna konstrukcija z žilavim jedrom ter obrabno in temperaturno obstojno zunanjo plastjo. Takšna izvedba zahteva točno določeno in natančno kontrolirano toplotno obdelavo, saj so le na tak način doseženi ustrezna mikrostruktura in površinska trdota valja ter homogeno polje zaostalih napetosti. Nepravilna izbira parametrov ali nepredvidene prekinitve procesa toplotne obdelave, ki lahko trajajo tudi več tednov, imajo za posledico pokanje površine ali celo porušitev valja pred samo uporabo (slika 3b in c).

Rezultati meritev zaostalih napetosti in kota α , opravljenih z uporabo metode vrtnja luknjice na različnih valjih za vroče valjanje, so prikazani na sliki 4. V primeru pokanja površine valja se usmerjenost zaostalih napetosti spreminja z globino, pri čemer je ena komponenta zaostalih napetosti pozitivna in druga

negativna. To jasno kaže na nehomogeno polje zaostalih napetosti ter prisotnost natezne komponente v površini valja, ki povzroča nastanek in širjenje razpok. Ko se v valju pojavi popolnoma natezno polje zaostalih napetosti določene vrednosti, je porušitev valja neizbežna. Pravilno izvedena toplotna obdelava valja daje homogeno polje tlačnih zaostalih napetosti vrednosti 150–250 MPa (slika 4) in optimalno delovanje valja.

3.2 Orodje za vroče kovanje

Med kovanjem, še posebej pri vročem kovanju, so kontaktne površine orodja izpostavljene velikim kontaktnim tlakom (slika 5), ki so posledica mehanske in toplotne obremenitve orodja. Za prenašanje velikih dinamičnih obremenitev in za dobro obrabno odpornost morajo imeti kovaška orodja ustrezno žilavost kakor tudi visoko trdoto površine. Povečanje trdote površine in s tem izboljšanje abrazijske obrabne odpornosti orodja lahko dosežemo z ustrezno toplotno obdelavo površine. Medtem ko s kaljenjem površine dosežemo dvig trdote, se pri kaljenju orodnih jekel pojavi natezno polje zaostalih napetosti. Za preprečevanje nastanka in rasti utrujenostnih razpok pa seveda potrebujemo ustrezno polje tlačnih zaostalih napetosti z maksimalnimi vrednostmi, lociranimi v območju kritičnih kontaktnih napetosti (slika 5c). Meritve zaostalih napetosti na orodnih jeklih so pokazale, da z nitranjem površine dosežemo

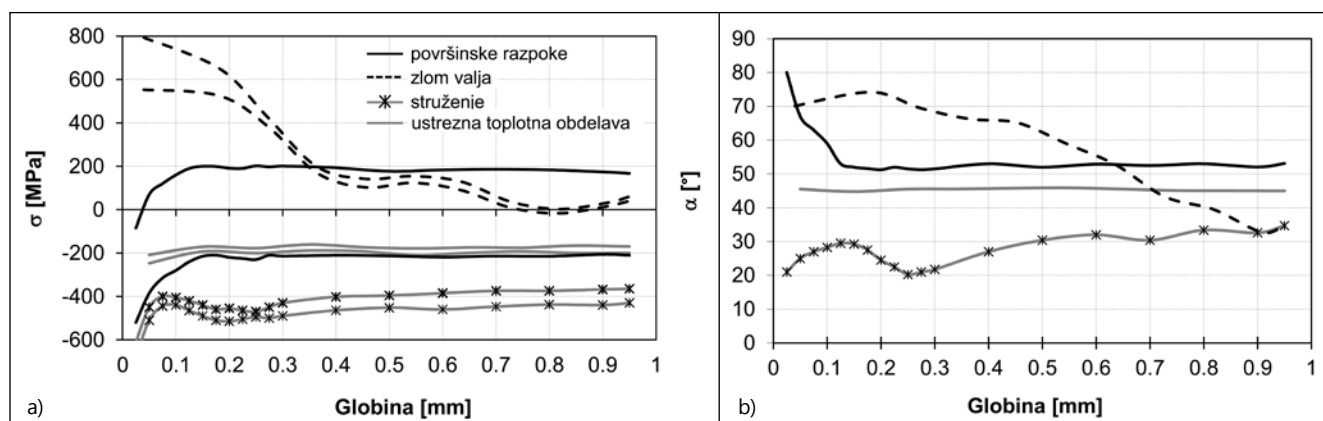


Slika 3. Valji za vroče valjanje po mehanski obdelavi (a), pokanje površine valja (b) in lom valja zaradi nepravilne toplotne obdelave (c)

polje tlačnih zaostalih napetosti (slika 6), ki lahko občutno izboljšajo učinkovitost orodij za vroče kovanje. Nadalje lahko z optimizacijo parametrov nitriranja, še posebej pri nitriranju v plazmi, vplivamo na

na ravnih površinah in standardnih vzorcih, pa so kovaška orodja precej večjih dimenzij in kompleksnih oblik, kar lahko predstavlja precejšnjo oviro. Metoda vrtnja luknjice zahteva ravno površino velikosti

napetosti vplivajo tudi temperatura oz. veliki temperaturni gradienti. Zaradi tega je potrebna temperaturna kompenzacija ali pa izvedba meritev na popolnoma ohlajenih orodjih.



Slika 4. Zaostale napetosti σ_{max} in σ_{min} (a) in kot α (b) pri poškodovanih in mehansko obdelanih valjih

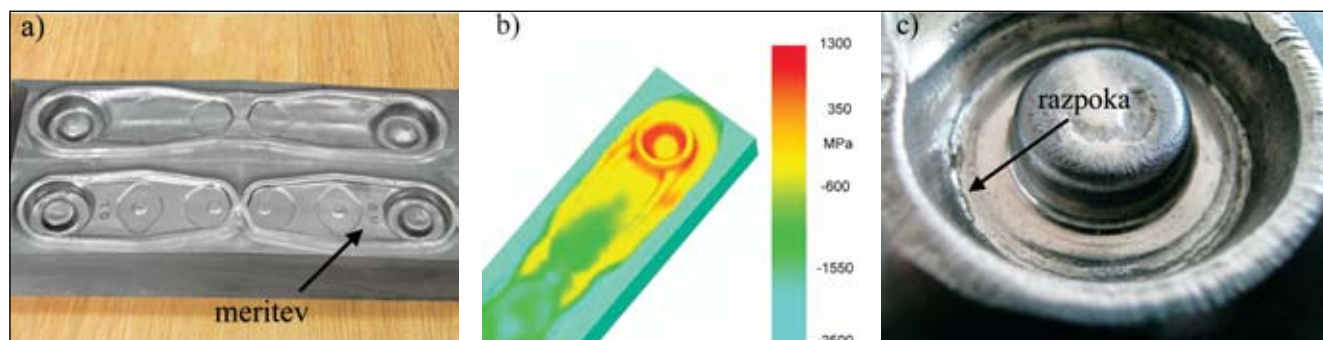
vrednosti in lego zaostalih napetosti in polje zaostalih napetosti prilagodimo posamezni aplikaciji. Kot prikazuje slika 6, že majhna sprememba časa in/ali temperature nitriranja vpliva na spremembo vrednosti in lege zaostalih napetosti.

Medtem ko lahko metodo vrtnja luknjice zelo enostavno uporabimo

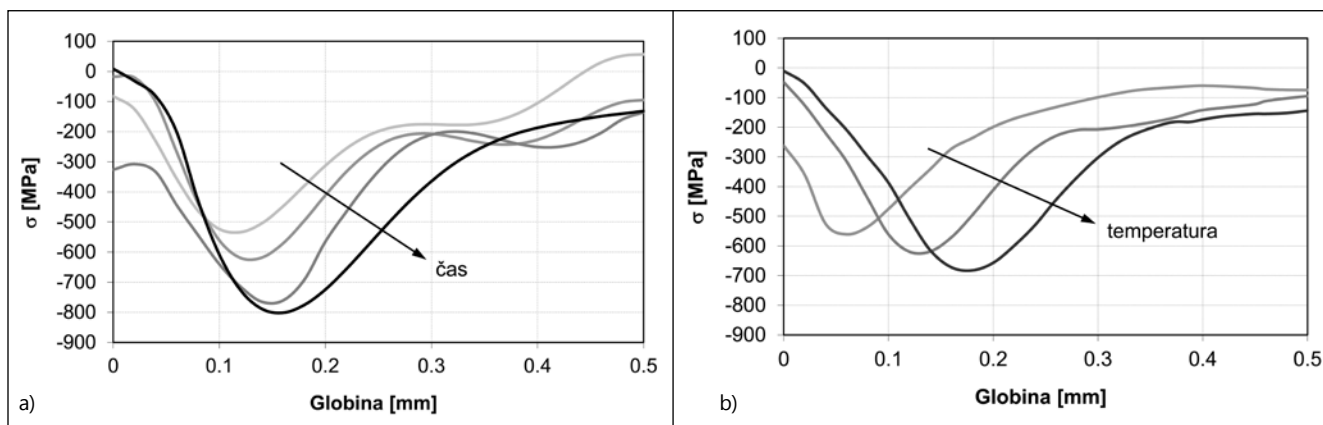
80–100 mm², kritična mesta na kovaških orodjih pa so običajno ob majhnih radijih in prelomih ravnin (slika 5c). Za korelacijo kontaktnih napetosti in vrednosti zaostalih napetosti, izmerjenih v bližini kritičnih mest, sta torej nujni uporaba modeliranja in numerična analiza (FEM). V primeru visokotemperaturnih aplikacij pa na pravilnost meritev zaostalih

3.3 Gred generatorja

Med obratovanjem 20 MW generatorja je prišlo do eksplozije v območju uležajenja gredi, kar je povzročilo zvitje gredi v točkah A in C, prikazanih na sliki 7. Za ponoven zagon generatorja sta bili na razpolago dve rešitvi, in sicer zamenjava gredi ali njeno popra-



Slika 5. Orodje za vroče kovanje (a), simulacija kontaktnih napetosti (b) in poškodba orodja (c)

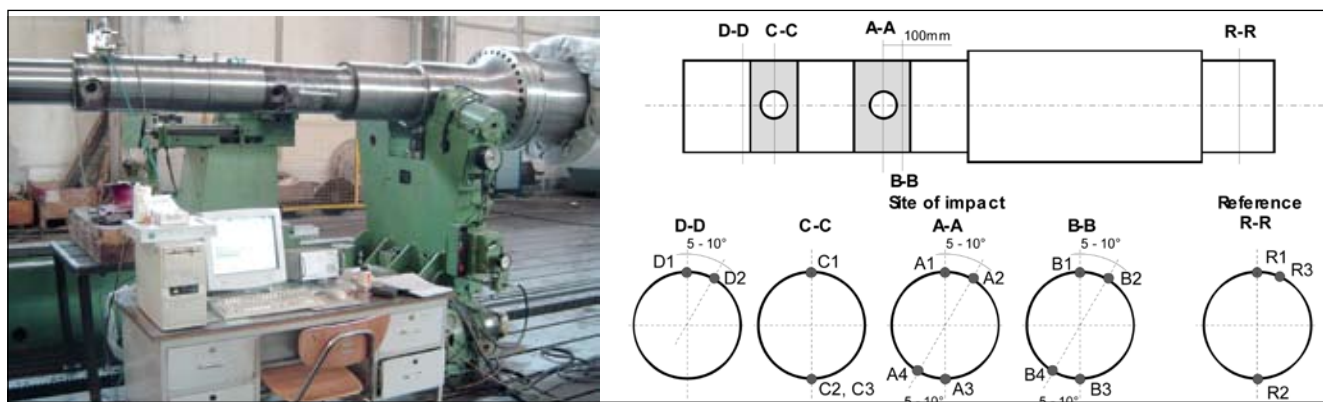


Slika 6. Vpliv časa (a) in temperature (b) nitriranja na velikost in lego zaostalih napetosti pri orodnih jeklih

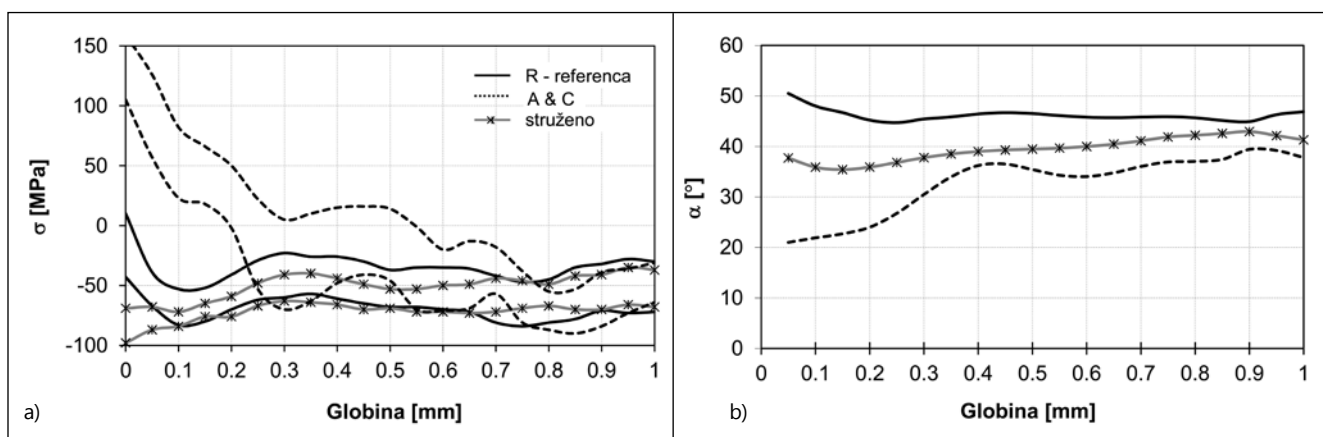
vilo. Pri odločitvi za popravilo gredi s segrevanjem in ravnanjem je bilo potrebno zagotoviti, da samo popravilo gredi ne vpliva na polje zaostalih napetosti v njeni površini. Ker o vrednostih zaostalih napetosti ni bilo informacij, je bilo najprej potrebno izvesti referenčne

meritve zaostalih napetosti na nepoškodovanem mestu (slika 7b). Referenčne meritve so pokazale, da ima gred tlačne zaostale napetosti vrednosti 50 MPa (slika 8). Za zagotovitev zanesljivosti meritev so se v vsaki točki izvedle do 4 zaporedne meritve.

Meritve zaostalih napetosti na mestu poškodb (A–D, slika 7b) so ovrgle sum vpliva popravila gredi na njeno napetostno polje. Čeprav so se v zgornji plasti površine (300–500 μm) pojavile natezne zaostale napetosti, so bile le-te med postopkom mehanske obdelave površine odstra-



Slika 7. Merjenje zaostalih napetosti na gredi generatorja



Slika 8. Porazdelitev zaostalih napetosti σ_{max} in σ_{min} (a) ter kot α (b) na gredi generatorja po popravilu

njene. Kot prikazuje slika 8, je bilo po končnem brušenju površine doseženo enako tlačno napetostno polje kakor na referenčnem mestu. Na podlagi meritev zaostalih napetosti je bil generator ponovno priključen na napetostno omrežje brez nevarnosti poškodbe gredi.

V primeru, ko je mehanska obdelava površine omejena ali celo onemogočena zaradi ozkih toleranc, je potrebno nameniti veliko pozornost pripravi in čiščenju mesta merjenja ter lepljenju merilnih lističev oz. merilne rozete. Pri velikih gredeh, ki za rokovanje zahtevajo uporabo dodatnih naprav, kot so stružnice, pa se srečujemo še z enim problemom, in sicer z izolacijo oz. ozemljitvijo merjenih površin. Ob nepravilni izolaciji prihaja do nepravilnega delovanja naprave za merjenje zaostalih napetosti ter do napačnih odčitkov površinskih pomikov.

■ 4 Zaključki

- Metoda vrtanja luknjice se je z dobro natančnostjo in ponovljivostjo izkazala kot zelo uporabna za merjenje zaostalih napetosti v praksi.
- V primeru merjenja zaostalih napetosti na ulitih ali poškodovanih površinah je potrebno nameniti veliko pozornost pripravi površine, kot so struženje, brušenje, čiščenje itd., saj nepravilna priprava površine lahko vodi do napačnih rezultatov meritve. Poskrbeti pa je potrebno tudi za kompenzacijo vpliva temperature.
- Medtem ko je metodo vrtanja luknjice enostavno aplicirati na ravnih površinah in vzorcih, so površine v realnih aplikacijah precej bolj kompleksne, kar seveda močno otežuje pozicioniranje merilne naprave. Korelacija kontaktnih napetosti in zaostalih napetosti, izmerjenih v bližini kritičnih mest, pa je možna z uporabo numerične analize kontakta.
- Pri velikih elementih, kot so gredi generatorjev, se srečujemo s problemom izolacije merjene površi-

ne, ki lahko močno vpliva na rezultate meritev površinskih pomikov. Poleg tega se veliko meritev izvaja na terenu oz. pri naročniku, zaradi česar je potrebna natančna kontrola merilne opreme pred odhodom kakor tudi zadostna količina potrošnega materiala.

Literatura

- [1] B. Kämpfe, E. Auerswald, Determination of Residual Stresses in Microsystems Using X-RAY Diffraction, Materials week 2000, Munich, Germany (2000) 1–10.
- [2] C. Achmus, FEM-Berechnung von Festwalzeigenstressen, 8. Deutschsprachiges ABAQUS – Anwender-Treffen, Hannover, Germany (1996) 55–63.
- [3] L. Vergani, Meccanica dei Materiali, McGraw Hill, NY (2001).
- [4] M. D'Acunto, Characterization of residual stress and roughness of steel components, 3rd AIME-TA Int. Tribology Conference, Salerno, Italy (2002) 9–14.
- [5] G. A. Webster, Role of Residual Stress in Engineering Applications, Mater. Sci. Forum, Vol. 347–349 (2000) 1–11.
- [6] J. Grum, A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding, J. Mat. Processing Technology, Vol. 114 (2001) 212–226.
- [7] S. Hossain, M. R. Daymond, C. E. Truman, D. J. Smith, Prediction and measurement of residual stresses in quenched stainless-steel spheres, Mater. Sci. Eng., Vol. A 373 (2004) 339–349.
- [8] F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Grant, A Review of Residual Stress Measurement Methods, Measurement of Residual Stress in Components, NPL Report, UK (2002)
- [9] ASM E 837 Standard, Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gage Method (ASTM, 1983).
- [10] C. Ruud, Measurement of Residual stresses, Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel, ASM International, Materials Park (2002) 99–117.

- [11] P. V. Grant, J. D. Lord, P. Whitehead, NPL Good Practice Guide, No. 53/2 (2006).

Residual stress measurement by hole-drilling method

Abstract: Residual stresses can arise in engineering components as part of their manufacturing or can also be introduced deliberately as part of surface treatment procedures. A precise knowledge of the level of residual stresses that exist in engineering components is necessary in analysis and quality control as well as for accurate prediction of components lifetime. Therefore, reliable methods of determining the magnitude and distribution of residual stresses are required in order to quantify their effect and to avoid detrimental failures. On the other hand on-site portable and non-or near non-destructive methods are required for practical use. The hole-drilling method shows a great potential in measuring and evaluating residual stresses in practical applications. This paper presents results and problems on residual stress measurements performed by the hole-drilling method on real components, including forming applications of rolling, punching and cutting, and machine component applications of gears and shafts. Presented results clearly indicate the importance of residual stress information for proper design and use of engineering components.

Key words: residual stress, hole-drilling method, forming, components

