

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN STRESS LATTICE**ODREĐIVANJE ZAOSTALIH NAPREZANJA U REŠETKASTOJ PROBI**

BUDIC, Ivan; NOVOSELOVIC, Daniel; BAUER, Branko & MANCE, Ines

Abstract: *During process of casting formation residual stresses occur. These residual stresses take place mainly due to unequal changes of volume and non-simultaneous phase and structural changes in different parts of the casting. If stresses exceed tensile strength of the component in production or service, deformation or cracking of the casting will happen. To avoid casting defects, it is necessary to know how big the residual stresses are and if they surpass the allowed values. In this paper some measurements of residual stresses by DMD 20 and MTS 3000 device are presented.*

Key words: *determination of residual stresses, stress lattice, DMD 20, MTS 3000.*

Sažetak: *Tijekom formiranja odljevka dolazi do pojave zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja uglavnom se pojavljuju zbog nejednakih volumenskih promjena i neistovremenih faznih i strukovnih promjena u različitim dijelovima odljevka. Ukoliko su naprezanja veća od vlačne čvrstoće, u proizvodnji ili uporabi, pojavit će se iskrivljenje ili pucanje odljevka. Da bi se izbjegle greške na odljencima potrebno je znati kolika su zaostala naprezanja te da li ona prelaze dopuštena naprezanja. U radu su prikazana mjerenja zaostalih naprezanja u rešetkastoj probi pomoću uređaja DMD 20 i MTS 3000.*

Ključne riječi: *određivanje zaostalih naprezanja, rešetkasta proba, DMD 20, MTS 3000.*



Authors' data: Ivan, **Budic**, dr.sc., Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Hrvatska, Ivan.Budic@sfsb.hr; Daniel, **Novoselovic**, mr.sc. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Hrvatska, Daniel.Novoselovic@sfsb.hr; Branko **Bauer**, dr. sc., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, Branko.Bauer@fsb.hr; Ines, **Mance**, dipl.ing., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska, ines.mance@fsb.hr

1. Uvod

Zaostala naprezanja postoje u nekom konstrukcijskom elementu (odljevku) i kad nema vanjskog opterećenja ni temperaturnog gradijenta. Proizvodni procesi kao što su lijevanje, zavarivanje, strojna obrada, toplinska obrada unose naprezanja u odljevak što pogoduju stvaranju zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja smanjuju čvrstoću, uzrokuju trajne deformacije, smanjuju trajnost, a mogu prouzrokovati i lom konstrukcije (odljevka) [1].

Do pojave zaostalih naprezanja u odljercima dolazi tijekom formiranja odljevka, a posebno od trenutka stvaranja dovoljno čvrste kore pa do sobne temperature. Zaostala naprezanja mogu nastati i zbog nejednakih dimenzijski promjena i neistovremenih faznih i strukovnih promjena u različitim dijelovima odljevka [2].

Zaostala naprezanja nakon potpunog hlađenja jednaka zbroju različitih naprezanja (mehaničkih, toplinskih, faznih, ...). Ukoliko su zaostala naprezanja veća od vlačne čvrstoće, u proizvodnji ili uporabi, pojavit će se napukline ili deformacije na odljercima (sl. 1) [3]. Napukline predstavljaju razdvajanje materijala, a uzrokovane su radnim opterećenjem odljevka. Deformacija je promjena oblika koja prelazi zadane granice tolerancije odljevka.



a-napukline



b-deformacije

Slika 1. Greške na odljercima uzrokovane zaostalim napreznjima [3]

2. Metode mjerenja zaostalih naprezanja

U praksi često stojimo pred zadatkom kako odrediti iznos zaostalih naprezanja u odljercima. Zbog složenosti konstrukcija i mnogo utjecajnih tehnoloških parametara, ne očekuje se skoro rješenje teorijskog određivanja, koje bi bilo prikladno za ljevačku praksu. Zbog navedenih razloga nastoji se razviti metoda za određivanje zaostalih naprezanja pri kontroli i proizvodnji odljevaka koja bi bila dovoljno pouzdana i što je najvažnije jednostavna i jeftina.

Dostupne tehnički primjenjive i praktički prikladne metode određivanja zaostalih naprezanja mogu se podijeliti s obzirom prema stupnju oštećenja konstrukcije/odljevka na:

- nerazarajuće
- djelomično razarajuće
- razarajuće.

Kod nerazarajućih metoda mjerenja konstrukcija/odljevka se ne oštećuje. Neke od metoda su: difrakcija rendgenskog zračenja, mjerenje ultrazvukom, mjerenje promjene magnetskih svojstava konstrukcijskog materijala nastalih zbog naprezanja i sl.

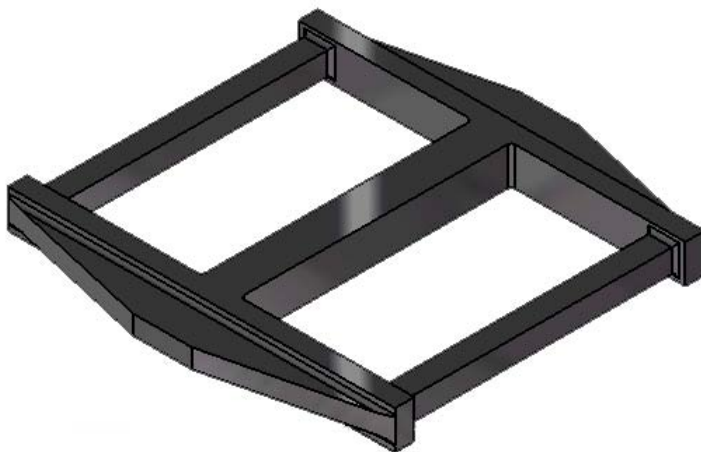
Djelomično razarajuće metode praktički se svode na nerazarajuće metode, jer je područje oštećenja konstrukcija/odljevaka vrlo malo. Kod odljevaka ta se područja razaranja mogu dimenzijama prilagoditi dodacima za obradu samog komada, a naknadnom obradom oštećena mjesta se uklanjaju. Dvije najraširenije metode djelomično razarajuće su metoda izrezivanja kružnog žlijeba i metoda bušenja.

Razarajuće metode su one kod kojih se konstrukcija/odljevak potpuno uništi. Ove metode se još nazivaju i relaksacijske metode, jer ih prati rezanje i relaksacija.

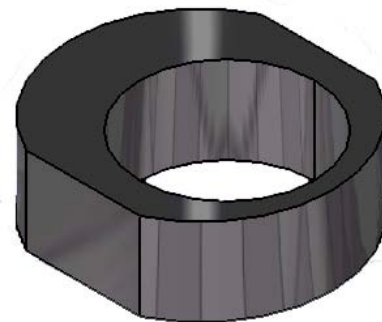
U ljevačkoj praksi za ove metode ispitivanja najčešće se primjenjuju tehnološke probe, konstruirane tako da se u odljencima namjerno uzrokuju zaostala naprezanja. Tehnološke probe konstruirane su tako da sadrže tanki i masivni dio te se prilikom hlađenja, uslijed uzajamnog otpora skupljanju, pojavljuju naprezanja.

Imamo dvije najčešće tehnološke probe i to [4]:

- rešetkasta tehnološka proba (sl. 2a)
- tehnološka proba prema Thomasu (sl. 2b)



a-rešetkasta tehnološka proba



b- tehnološka proba prema Thomasu

Slika 2. Tehnološke probe

3. Određivanje zaostalih naprezanja na rešetkastoj probi

Odlivene su rešetkaste tehnološke probe određenih dimenzija od sivog ljeva. Nakon hlađenja odljevaka izvršena je priprema mjernih mjesta na probama. Priprema mjernih mjesta, kao i lijepljenje mjernih traka, obavljeno je prema uputama HBM (Hottinger Baldwin Masstechnik)[5].

Površina na koju su lijepljene mjerne trake nisu sadržavale neravnine te su bile dovoljno velike za mjerne trake (rozete) kao i za točke nastavka za lemljenje. Gruba kora odljevka izbrušena je brusnim kamenom. nakon čega je izbrušena brusnim

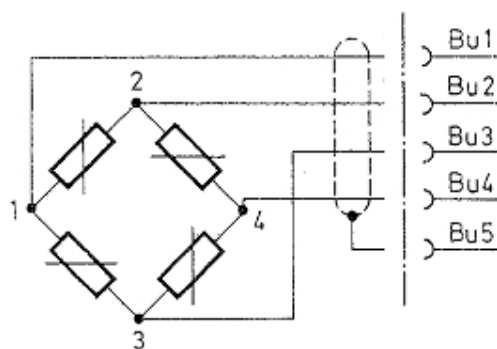
papirom (zrnatosti 180). Mjerna mjesta odmašćena su i očišćena sredstvom za čišćenje RMS1 (Aceton, Isopropanol) tvrtke HBM. Lijepljenje mjernih traka i rozeta obavljeno je ljepilom Z 70. Nakon čega su zalemljeni kablovi na mjerne trake.

Za određivanje zaostalih naprezanja u rešetkastim probama korišteni su uređaji tvrtke Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) i to:

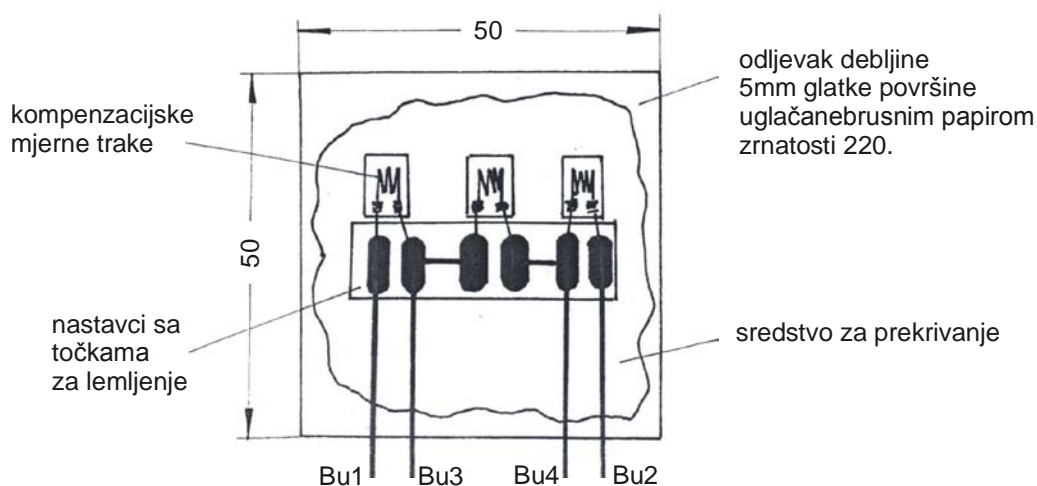
- DMD 20 koji koristi razarajuću (relaksirajuću) metodom
- MTS 3000 koji koristi djelomično razarajućom metodom bušenja.

3.1 Određivanje zaostalih naprezanja uređajem DMD 20

Mjerenja deformacija uređajem DMD 20 obavlja se pomoću mjernih traka na način da se deformacija na rešetkastoj probi izmjeri prije i nakon rezanja. Mjerna traka spojena je u puni Wheatstonov most (sl. 3a). Postupak uspostave punog mosta omogućen je na način da se na pločicu dimenzija 50x50 mm istog materijala kao i odljevak zalijepi 3 kompenzacijske trake (sl. 3b), a 4 aktivna traka zalijepi na odljevak kojem se mjeri deformacija. Kompenzacijske mjerne trake moraju biti iste vrste (imati isti k-faktor) kao i aktivna mjerna traka. Aktivna traka (koja se nalazi između točaka 1 i 2 na sl. 3a) spaja se na uređaj DMD 20 na mjesta BU1 i BU2 (sl. 3b) [6].



a-Wheatston-ov most



b-lijepljene kompenzacijskih traka

Slika 3. Spajanje mjernih traka u puni most

Prije samog mjerenja obavlja se nuliranje uređaja (postavljanje vrijednosti deformacije na nulu) i kalibracija uređaja te ukucavanje koeficijenta trake k -faktora. Mjerenje se obavlja na način da se očita se stvarna vrijednost deformacije ε_1 . Nakon toga predmet se prereže i ostaviti najmanje dva sata da stoji prije drugog mjerenja. Zatim očitamo drugu vrijednost deformacije ε_2 .

Izmjerena vrijednost deformacije je:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \text{ (}\mu\text{m/m)} \quad (1)$$

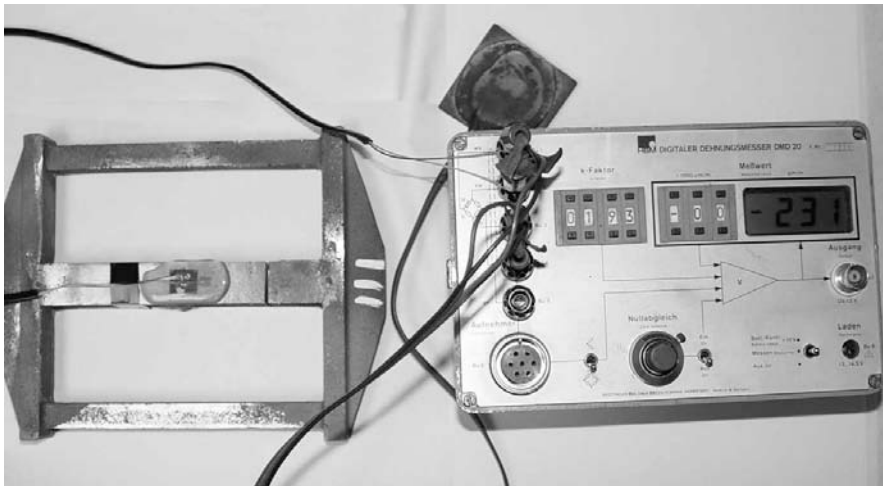
Unutarnje naprezanje σ računa se prema izrazu:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

gdje je:

E - modul elastičnosti N/mm²

Mjerenje rešetkaste probe pomoću DMD 20 prikazuje slika 4.

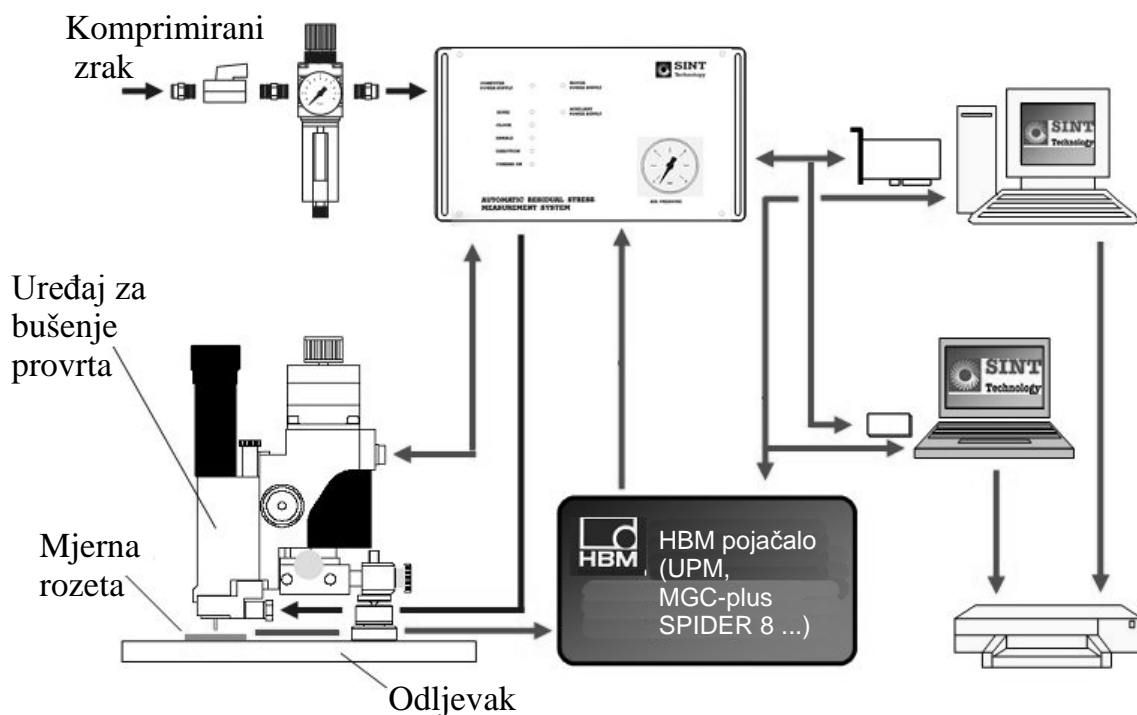


Slika 4. Mjerenje zaostalih naprezanja uređajem DMD 20

3.2 Određivanje zaostalih naprezanja uređajem MTS 3000

Uređaj MTS 3000 služi za mjerenje zaostalih naprezanja metodom bušenja. Slika 5. [7] prikazuje način spajanja uređaja za određivanje zaostalih naprezanja.

Da bi mjerenje bilo omogućeno potrebno je osigurati komprimirani zrak (npr. kompresor). Tlak koji je potreban iznosi 4 bar što predstavlja optimalnu ulaznu vrijednost zraka koja je potreban za pokretanje turbine unutar uređaja. Zrak se preko ventila i filtra uvodi do kontrolnog uređaja preko kojeg se dalje spaja na uređaj za bušenje. Mjerni kablovi sa rozete spajaju se na mjerno pojačalo koje je spojeno sa računalom. Proces mjerenja provodi se preko računala. Pokretanjem programa Restan omogućeno nam je da preko glavnog izbornika podesimo parametre mjerenja [7].



Slika 5. Uređaj MTS 3000 [7]

Prije mjerenja potrebno je obaviti:

Pozicioniranje svrdla - potrebno je svrdlo postaviti u nultu poziciju. To je pozicija gdje je svrdlo u dodiru sa odljevkom i od tog položaja se mjeri dubina bušenja i računaju koraci.

Postavljanje parametara mjerenja - ovdje upisujemo potrebne podatke o mjerenju kao što su:

- promjer svrdla i broj koraka
- način rasporeda koraka (linija ili krivulja)
- podaci o mjerneozeti te postavljanje njenih vrijednosti na nulu (nuliranje)
- podaci o uzorku koji ispitujeemo (materijal, modul elastičnosti, Poissonov omjer)
- odabiremo tip pojačala ili mjerne kartice
- upisujemo opće podatke o mjerenju (datum, operater, opis mjerenja, ...).

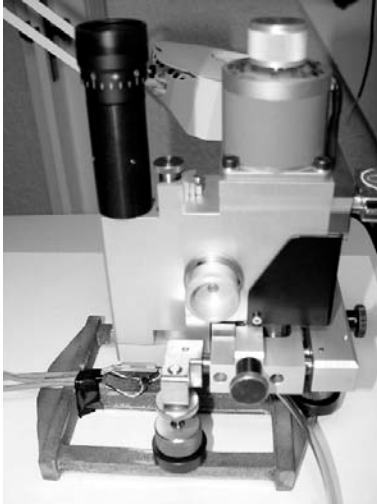
Priprema mjerenja - prije mjerenja potrebno je odrediti brzinu bušenja i način na koji će se očitavati mjerenje. Postoje dva načina: ručni (step-by-step) i automatski. Kod ručnog operater sam zaustavlja uređaj da očitava vrijednosti mjerenja za određenu dubinu, a kod automatskog uređaj sam očitava prema zadanim broju koraka. Nakon svakog koraka računalo očitava vrijednosti deformacija i bilježi ih.

Nakon mjerenja izmjereni podaci učitavaju se u program EVAL_RSM.EXE gdje se na osnovi izmjerenih deformacija proračunavaj zaostala naprezanja jednom od sljedećih metoda:

- ASTM E 837-01

- INTEGRAL
- KOCKELMANN
- POWER SERIES

Prikaz mjerenja rešetkaste probe prikazan je na slici 6.



Slika 6. Mjerenje rešetkaste probe

4. Zaključak

Ukoliko su zaostala naprezanja veća od vlačne čvrstoće pojaviti će se greške na odljencima. Da bi izbjegli greške potrebno je znati kolika su zaostala naprezanja, te da li ona prelaze dopuštena naprezanja. Način na koji ćemo mjeriti zaostala naprezanja ovisi o raspoloživoj opremi za mjerenje, gabaritima odljevka, te o metodi ispitivanja. Lijevanje probi i ispitivanje razarajućim metodama pogodan je za istraživačka ispitivanja npr. utjecajnih parametara na naprezanja. Nerazarajuće i djelomično razarajuće metode pogodne su za ispitivanje zaostalih napreznjima na konkretnim odljencima jer ova ispitivanja vrlo malo ili gotovo ni malo ne oštećuju odljevak. Pouzdano određivanje zaostalih napreznja zahtijeva mjerenje na samoj konstrukciji i ne može se provesti na modelima, jer se pomoću modela može dodati samo kvalitativna slika o raspodjeli zaostalih napreznja.

5. Literatura

- [1] Heidl, I. & Husnjak, M. (1987). *Tenzometrija*, Tehnička enciklopedija 12, Leksikografskog zavoda "Miroslav Krleža", str. 688-690
- [2] Kočovski, B. (1972). *Teorija livarstva*, Izdavačko grafički zavod, Beograd
- [3] Atlas ljevačkih pogrešaka, (1965). Knjiga 1. (sivi lijev), Metalbiro
- [4] Kočovski, B. (1981). *Praktikum iz teorije livarstva*, Naučna knjiga, Beograd
- [5] Hoffmann K. (1996). *Practical hints for the installation of strain gages*, HBM
- [6] Operating manual, Digital Strain Meter DMD 20, HBM
- [7] Sint Technology, RESTAN system for measuring residual stresses by the hole drilling method - operating and maintenance manual, Italy.



Photo 027. Sacrament / Prva pričest