

Možnosti ugotavljanja velikosti napake in njene lege v materialu z ultrazvočno difrakcijo

Possibilities for Defect Dimension and Position Identification in Material with Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction

B. Godec¹, A. Černe, M. Vončina, Č. Remec, IMT Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

Za oceno stanja materiala jeklenih konstrukcij uporabljamo neporušne preiskovalne metode, še posebno preiskave z ultrazvokom, ki v zadnjem času še pridobivajo na pomenu, saj novejša aparatura omogočajo izpis in s tem dokumentiranje rezultatov opravljenih preiskav. V prispevku je predstavljena metoda ultrazvočne difrakcije, ki izrablja difrakcijske valove, ki nastanejo na ostrem robu. Na osnovi časa prehoda ultrazvoka ob poznani hitrosti oddajnega in sprejemnega valovanja lahko izračunamo položaj konice razpoke. Laboratorijske preiskave so pokazale, da je z uporabo ultrazvočne difrakcijske metode možno določiti velikost in natančen položaj lege napake v materialu.

Ključne besede: neporušne preiskovalne metode, ultrazvočna preiskava, ultrazvočna difrakcija, razpoka

Nondestructive testing methods specially ultrasound examination are used to estimate the condition of material as steel construction. Today ultrasonic testing methods are becoming more important as testing equipment enables testing results to be copied out and documented. The ultrasound diffraction method which employs diffracted waves that appear on the sharp edge is presented in the paper. On the basis of the time of flight as well as known velocity of broadcasting and receiving of ultrasound the position of the top of the crack may be calculated. Laboratory examinations prove that it is possible to determine the precise dimension of cracks and the exact position of defects in material.

Key words: nondestructive testing methods, ultrasonic examination, time-of-flight diffraction, crack

1 Uvod

Do poškodb konstrukcij pogosto pride zaradi napak v materialu. Te lahko nastanejo že pri izdelavi jeklene konstrukcije, predvsem pa se pojavijo med eksploatacijo. Tako nastale razpoke v materialu povečujejo lokalne napetosti, ki privedejo do porušitve konstrukcije, in to pri obremenitvah, ki so brez razpok sprejemljive^{1,3}. Teoretična kritična velikost razpoke a_c je podana z enačbo³:

$$a_c = \frac{2WE}{\pi\sigma^2} \quad (1)$$

kjer je W lomno delo v J/m^2 , E elastični modul v N/mm^2 in σ uporabljena napetost v N/mm^2 . Spoznanja lomne mehanike in njeno upoštevanje pri oceni konstrukcij so pripeljala do razvoja kvantitativnih tehnik za določanje velikosti napak v materialu².

Pri neporušnih preiskavah stanja materiala največ uporabljamo konvencionalne ultrazvočne preiskave, predvsem impulzno ultrazvočno metodo. Ta temelji na amplitudi in vrsti signala, ki se vrne od defekta v ultrazvočno napravo. V praksi pa napake niso vedno orientirane točno pravokotno na ultrazvočni snop, ker pa so prisotni tudi drugi signali, ki nastanejo zaradi difuznega sipanja od površine razpoke, in zaradi difrakcije od roba

razpoke, lahko odkrijemo napake z neugodno orientacijo.

Cilj naše raziskave je bila osvojitev ultrazvočne difrakcijske metode, kjer se za natančno določitev razpoke direktno izrablja pojav difrakcijskih valov.

2 Ultrazvočno valovanje

Ultrazvočno valovanje je mehansko valovanje, ki ga tvorijo nihanja ali vibracije atomskih ali molekulskih delov substance okoli ravnovesnega položaja teh delcev^{1,4,5,11}.

Ultrazvočne preiskovalne metode so zelo razširjene za določanje in karakterizacijo notranjih in površinskih napak v konstrukcijskih materialih, kakor tudi za meritve debeline in stopnje korozije in tudi, vendar redkeje, za določanje fizikalnih lastnosti, strukture, velikosti zrn in elastičnih karakteristik^{1,2}.

Pri ultrazvočni preiskavi pošljemo v material snop visokofrekvenčnih zvočnih valov. Ti potujejo skozi material, pri tem izgubljajo energijo in se na vmesnih površinah odbijejo. Odbiti val se prikaže na zaslonu, tega analiziramo in določimo prisotnost in lokacijo razpok in drugih nepravilnosti v materialu^{1,11}.

Najbolj razširjena je ultrazvočna pulzna metoda, ki ima kot kvantitativna tehnika veliko omejitev, saj je podvržena odklonom zaradi faktorja spojitve, odboja in kota ali vrste defekta. Zato v zadnjem času veliko delajo pri uvajanju tehnik, ki temeljijo na času prehoda ultrazvočnega valovanja^{2,5}.

¹ Mag. Boštjan GODEC, dipl.inž.
Inštitut za metalne konstrukcije
1115 Ljubljana, Mencingerjeva 7

Za preiskave z ultrazvokom uporabljamo frekvence od 50kHz pa do 20MHz, kar je odvisno od vrste preiskave in od kvalitete in vrste preiskovanega materiala.

Poznamo več vrst ultrazvočnega valovanja: longitudinalno, transverzalno, površinsko "plazeče" in Rayleigh-ovo. Za razliko od zraka, kjer se lahko širijo samo longitudinalni valovi, pa v trdnih snoveh lahko nastopajo tudi transverzalni valovi, kar pomeni, da smer valovanja ni nujno enaka smeri nihanja delcev.

Pri longitudinalnem valovanju delci nihajo v smeri njegovega širjenja. Hitrost longitudinalnih valov je:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{1+\mu}[1-2\mu]} \quad (2)$$

kjer je μ - Poissonova konstanta, ρ - gostota materiala v kg/m^3 . C_1 je za jeklo 5.900 m/s.

Transverzalni valovi lahko nastanejo samo v tekočinah in trdnih telesih. Delci nihajo v pravokotni smeri glede na širjenje valovanja. Valovanje se širi s strižnimi silami med atomi. Hitrost transverzalnih valov je:

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

C_2 je za jeklo 3230 m/s.

Površinski valovi so kombinirano valovanje, podobno transverzalnemu, ki nastane na površini preiskovanega materiala in jih včasih imenujemo tudi plazeče valovanje. Rayleigh-ovo valovanje pa je omejeno na površino in ima amplitudo, ki je dušena eksponentno glede na razdaljo od površine. Hitrost površinskih valov je:

$$c_3 = \frac{0,87+1,12\mu}{1-\mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (4)$$

Rayleigh-ovi valovi potujejo po površini s hitrostjo, jasno ločeno od hitrosti valovanja v samem materialu. Ta hitrost je približno 92% hitrosti transverzalnega valovanja.

Pri prehodu ultrazvočnega valovanja iz enega materiala v drugega pod kotom, ki ni 90° , pride do loma oz. odklona od prvotne smeri širjenja valovanja. Za vse oblike valov so značilni: odboj, lom in difrakcija. Odbojni kot valovanja je enak vpadnemu. Valovanje se lomi na meji materialov, katerih zvočna hitrost je različna, po naslednji enačbi:

$$\frac{\sin \alpha_e}{\sin \alpha_d} = \frac{c_1}{c_2} \quad (5)$$

kjer je α_e - vpadni kot, α_d - lomni kot, c_1 - hitrost valovanja v prvem mediju in c_2 - hitrost valovanja v drugem mediju.

3 Ultrazvočna difrakcija

Ultrazvočna difrakcija je pojav, ki nastane, ko ultrazvočni valovi zadenejo na prekinitev lastnosti materiala in se na tej prekinitvi razpršijo. Na robovih te pre-

kinitve se bodo valovi uklonili. Seveda pa je tudi energija tako uklonjenih valov ustrezno manjša. Postopek primerjamo z nam dobro znanim primerom pri uklonu svetlobe. Če postavimo oviro v svetlobni tok točkastega izvira, se nekaj svetlobe ukloni tudi v senco te ovire zaradi difrakcije svetlobe. Efekt difrakcije svetlobe na tankih razpokah pa je slabo ločljiv prav zaradi kratke valovne dolžine svetlobe. Ker pa je valovna dolžina ultrazvoka reda velikosti milimetra, je tudi opazovanje tega efekta veliko lažje.

4 Eksperimentalno delo

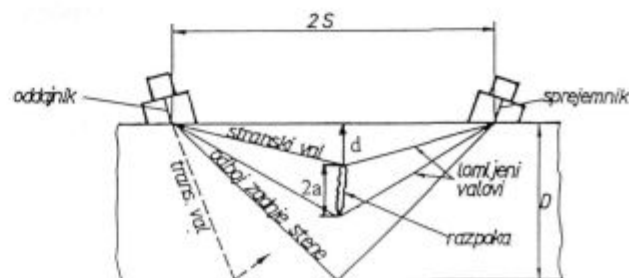
Uporabo difrakcijske ultrazvočne metode ("time-of-flight diffraction") smo preiskovali v laboratorijskih razmerah na preiskovalcih, v katere smo umetno vnesli razpoke.

Osnova je postavitve ultrazvočnih glav, kot je prikazano na **sliki 1**. Ena od glav rabi kot oddajnik, druga pa kot sprejemnik ultrazvočnih valov. Kot glave je tako izbran, da dobimo poševne longitudinalne valove v materialu. Seveda dobimo v materialu tudi transverzne valove, vendar je hitrost širjenja skoraj dvakrat počasnejša kot pri longitudinalnih, tako da ne motijo. Iz registriranih časov izračunamo položaj razpoke. Potrebno je poznati debelino preiskovanega materiala. V splošnem velja, da pri večjem razmiku ultrazvočnih glav pregledujemo večje globine, medtem ko pri manjši razdalji med glavami kontroliramo manjše. Prednost te metode je, da je amplituda difraktiranih valov le malo odvisna od naklona razpoke.

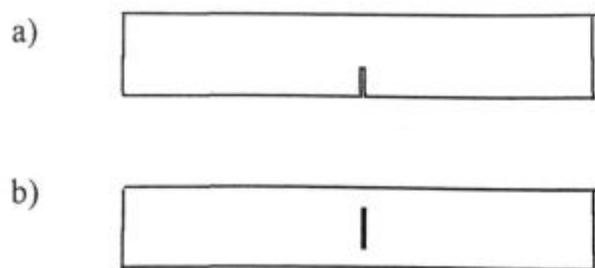
4.1 Izdelava preiskovalcev

Osnovni material, iz katerega smo izdelali preskusne etalone, je bilo drobnozrnato nizkoogljeno jeklo Č.0361. Zaradi odstranitve možnosti napak, ki bi se lahko pojavile v preiskovalnih etaloni, smo material najprej pregledali z radiografsko metodo. Prav tako pa smo ga preiskali na dvoplastnost. Pri tako majhnih energijah valovanja, kot je to pri difraktiranem ultrazvočnem valu, je zelo pomembno, da na poti difraktiranega vala od konice razpoke pa do sprejemne ultrazvočne glave ni večjih ovir.

Za preiskavo smo pripravili dve vrsti preskusnih etalonov. V prvo skupino spadajo tisti, kjer poteka razpoka globine 3 do 10 mm in širine 0,25 do 2 mm s površine v



Slika 1: Ultrazvočna difrakcijska metoda



Slika 2: a) skica preskušanca z zarezo v sredini in b) skica preskušanca z zarezo, ki izhaja iz površine

Figure 2: a) specimen sketch with the notch in the middle and b) specimen sketch with the notch coming out from the surface

notranjost. V drugo skupino pa spadajo etaloni, pri katerih smo simulirali razpoke v sredini materiala. Velikost razpoke smo pri tem variirali med 5 in 30 mm (slika 2).

4.2 Vpliv stanja površine

Akustični spoj ultrazvočne glave s površino preiskovanega materiala je eden važnejših faktorjev pri preiskavah z ultrazvokom. To je še posebno pomembno pri preiskavah z ultrazvočno difrakcijo, ker je energija difraktiranega vala zelo majhna glede na celoten energijski potencial ultrazvočnega snopa. V tabeli 1 so navedeni podatki s koliko ultrazvočne energije se lahko prenese iz vibratorja ultrazvočne glave v material, glede na stanje površine preiskovanega materiala, če pri tem ne upoštevamo izgub, nastalih s kontaktnim sredstvom.

Tabela 1: Prenos ultrazvočne energije v % glede na spoj

STANJE POVRŠINE	UČINKOVITOST SPOJA (%)
strojna obdelava (brušenje)	100
ročna brusilka	76
brušeno toda korodirano	70
korodirano z jamicami (pitting)	48

4.3 Izračun velikosti in globine razpoke

Za izračun geometrije napake (razpoke) v materialu moramo poznati debelino (H) materiala, hitrost potovanja ultrazvoka v tem materialu (C) in razdaljo med sprejemno in oddajno ultrazvočno glavo ($2S$). Ob predpostavki, da je razdalja med sprejemno in oddajno ultrazvočno glavo konstantna in da je razpoka na sredini med obema ultrazvočnima glavama, lahko zapišemo:

$$t_L = \frac{2S}{C} \quad (6)$$

$$t_1 = \frac{2\sqrt{S^2 + d^2}}{C} \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{S^2 + (d+2a)^2}}{C} \quad (8)$$

$$t_{zs} = \frac{2\sqrt{S^2 + H^2}}{C} \quad (9)$$

pri čemer je t_1 čas ultrazvočnega prehoda od vrha razpoke, bližje površini, in t_2 čas ultrazvočnega prehoda z nasprotnega vrha razpoke, t_{zs} je čas odboja od zadnje stene, t_L pa čas za plazeči val. Če zgornje enačbe nekoliko preuredimo, dobimo, da je vrh razpoke od zgornje preiskovane površine oddaljen:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_1^2 - 4S^2} \quad (10)$$

in da je razpoka dolga:

$$2a = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t_1^2 - 4S^2 - d^2} \quad (11)$$

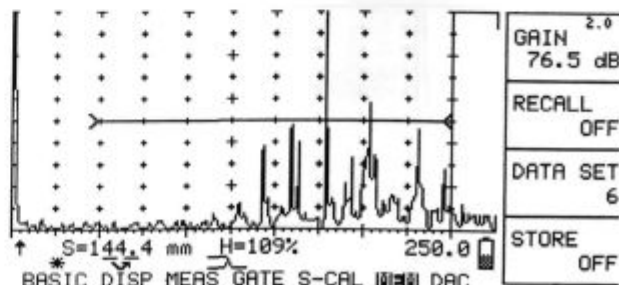
4.4 Preskusi z ultrazvočnimi glavami za longitudinalno valovanje

Parametre ultrazvočnih glav smo določili na osnovi literaturnih podatkov. Odločili smo se za uporabo serijskih ultrazvočnih glav z zelo majhnim časom iznihovanja (α -glave), da bi s tem na kar najmanjšo mero zmanjšali mrtvo cono in bližnje področje. Uporabili smo glave z delovno frekvenco 5 MHz. V literaturi se za najprimernejše delovne kote navajajo različni podatki. Mi smo izbrali dva izmed njih, in sicer 45° in 70° v jeklu.

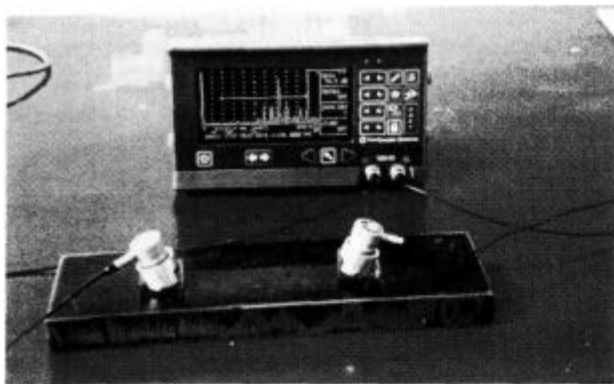
Da bi dobili ustrezen kot longitudinalnega valovanja v jeklu, smo izdelali kline iz pleksi stekla tako, da transverzno valovanje prehaja v jeklo pod željenim kotom in da sočasno nastalo transverzno valovanje povzroča čim manj motečih signalov.

Preiskave so pokazale, da pri taki izvedbi pleksi klina nastane veliko motečih signalov. Poleg longitudinalnega vala se pojavita še transverzalni in površinski val. Pri odboju od konice razpoke in od zadnje stene pa pride še do pretvorbe ene vrste valovanja v drugo, kar da kar nekaj motečih signalov na zaslonu ultrazvočnega aparata. Tako je težko iz množice signalov ločiti difraktirani val, ki nastane na konici razpoke, zaradi njegove veliko manjše zvočne energije (slika 3).

Da se izognemo vsem motečim vplivom, je potrebno izdelati tak pleksi klin, ki premakne moteča valovanja stran od longitudinalnega vala, ali pa jih duši v taki meri, da niso več moteča.



Slika 3: Prikaz motečih signalov na zaslonu ultrazvočnega aparata
Figure 3: Record of disturbed signals on the screen of ultrasound apparatuses



Slika 4: Fotografija postopka dela z glavami za longitudinalno valovanje

Figure 4: Photography of work method with longitudinal heads

4.5 Preskusi z ultrazvočnimi glavami za transversalno valovanje

Metodo ultrazvočne difrakcije smo preiskusili tudi s klasičnimi, serijskimi ultrazvočnimi glavami z delovnimi frekvencami 2 MHz in 4 MHz ter koti 45° in 70° v jeklu. Na sliki 5 je prikazan izpis ultrazvočnega signala na mestu razpoke (a) in tam, kjer ni razpoke (b). Na mestu, kjer je v materialu razpoka, se difraktirani val jasno loči od večjega signala odboja od zadnje stene. Tam, kjer ni razpoke, smo dobili signal odboja od zadnje stene. Ta signal se je povečal, ker ni bilo izgub zaradi difrakcije.

Pri delu s transversalnimi glavami smo ugotovili moteč element površinskega-plazečega valovanja, ki je velik, v kolikor je razpoka v materialu globoko pod površino. Če pa je razpoka blizu površine ali celo odprta

na površino, pa je moteči vpliv plazečega valovanja veliko manjši. Preiskave s to vrsto valovanja so dale boljše rezultate kot z longitudinalnimi glavami, ker ni toliko motečih valovanj in je difraktirani val lažje razločiti od drugih signalov.

Iskanje in določanje velikosti razpoke na etalonih z napako v sredini so dale pozitivne rezultate. Izkaže se, da jo je možno detektirati, če sta začetek in konec razpoke več kot 5 mm pod površino. Točnost izmerjene velikosti pa je odvisna od:

- točnosti nastavitve razdalje med sprejemno in oddajno glavo
- kakovosti stika sprejemne in oddajne glave z delovno površino preskušanca
- delovnega kota uporabljenih ultrazvočnih glav
- delovne frekvence

5 Sklep

Raziskava je pokazala, da je možno z obstoječo ultrazvočno opremo in prirejenimi ultrazvočnimi glavami pri uporabi ultrazvočne difrakcijske metode zaznati napako v materialu in pri tem istočasno določiti njeno velikost in lego. Metoda je bila preskušena v laboratorijskih razmerah z ročno tehniko na simuliranih vzorcih, v katere so bile umetno vnesene napake.

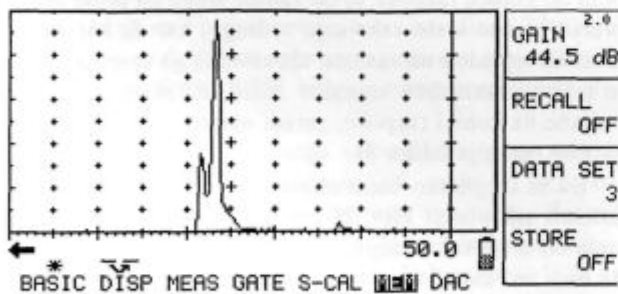
Izkazalo se je, da razpok, ki so odprte proti površini in so globoke manj kot 12 mm, ni mogoče preiskati s kombinacijo glav s kotom 45° v jeklu. Prav tako ne moremo odkrivati globine napak enakega tipa s 70° glavami, če je globina napake manjša od 5 mm. Obe omejitvi nam narekuje konstrukcija ultrazvočnih glav. Preiskave, narejene z ultrazvočnimi glavami za longitudinalne valove, niso dale pričakovanih rezultatov zaradi težav pri izdelavi pleksi klinov za te glave. Preveliko in premočno moteče valovanje transversalnega in površinskega valovanja zakriva relativno šibke signale difraktiranih valov. To se da odpraviti s posebnimi klini iz pleksi stekla, ki dajejo čisto longitudinalno valovanje.

Pri praktičnem delu s samo enim parom ultrazvočnih glav se je pokazalo, da je izredno težko doseči enakomeren nivo kontakta sprejemne in oddajne glave v meji 6dB. To pa nam ne zagotavlja zadosti natančnega določevanja velikosti razpoke. Doseči bi morali vsaj nivo 2dB, za kar pa bi bilo potrebno narediti poseben manipulator, ki bi zagotovil enake pogoje kontakta za obe ultrazvočni glavi.

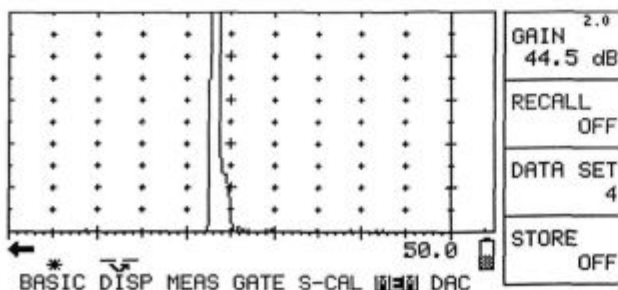
Pri uporabi te metode v praksi bo nujno potrebno razviti manipulator, ki bo skrbel za ohranjanje točne razdalje med sprejemno in oddajno ultrazvočno glavo. Samo en par ultrazvočnih glav ne omogoča točne določitve velikosti napake (razpoke), za to bi potrebovali vsaj tri do štiri pare v kombinaciji 45° , 60° in 70° .

6 Literatura

- ¹ Metal Handbook - Vol. 17: Nondestructive testing, 9th Edition AMS, International, 1991



a) Na mestu razpoke



b) Na mestu brez razpoke

Slika 5: Izpis ultrazvočnega signala
Figure 5: Record of ultrasound signal

- ² K. Date, H. Shimada, N. Kenaga, Crack height measurement-an evaluation of the accuracy of ultrasonic timing methods, *NDT International*, 15, 1982, 315-319
- ³ J. P. Charlesworth, J. A. G. Temple, *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of Flight Diffraction*, 1989
- ⁴ P. Carter, Experience with the time-of-flight diffraction technique and an accompanying portable and versatile ultrasonic digital recording system, *British Journal of NDT*, 1984, September, 354-361
- ⁵ G. J. Curtis, B. M. Hawker, Automated time of-flight studies of the defect detection trial plates 1 and 2, *British Journal of NDT*, 1983, September, 240-248
- ⁶ M. G. Silk, B. H. Lindigton, The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth, *NON-destructive testing*, 1975, June, 340-342
- ⁷ A. Hess, C. Toma, Möglichkeiten der Risstiefenbestimmung mit Ultraschall nach dem Rissspitzenverfahren, *Materialprüf*, Nr. 10, 340-342
- ⁸ M. G. Silk, B. H. Lindigton, An evaluation of single probe bulk-wave time-delay techniques in sizing cracks in steel, *NDT International*, 1977, June, 129-134
- ⁹ A. Černe, M. Vončina, Meritve globine razpoke z metodo ultrazvočne difrakcije, 2. slovenski dnevi jeklenih konstrukcij, Zbornik, Ljubljana 1995, 277-285
- ¹⁰ M. Vončina, Uporaba sodobnih neporušnih preiskav na napravah termoeenergetskih objektov, 1. slovenski dnevi jeklenih konstrukcij, Zbornik, Ljubljana 1994, 142-150
- ¹¹ J. Kraukrämer, *Ultrasonic testing*, 3rd Edition, Springer Verlag, Berlin, 1983