

UDK 534.1

Akustična emisija

IGOR GRABEC

Uvod

V naravi nastaja zvok zaradi makroskopskih in mikroskopskih dinamičnih pojavov. Primeri makroskopskih pojavov, ki rojevajo zvok, so razna nihanja strun, plošč in nosilcev ter iz njih sestavljenih struktur. Za to vrsto pojava je značilno, da se lastnosti zvočila med sevanjem zvoka ne spreminjajo in jih je mogoče opisati s konstantami, zvočilo pa lahko obravnavamo kot pretvornik vložene energije v zvočno. Makroskopske zvočne pojave navadno lahko brez zaprek eksperimentalno in teoretično opišemo z že znanimi metodami akustike [1].

Manj znana in raziskana je skupina mikroskopskih zvočnih pojavov, ki jo navadno označujemo z imenom akustična emisija [2]. Značilna primera pojava iz te skupine sta šumenje kosa trdne snovi med lomljenjem in sevanje zvoka pri raznih faznih premenah. V obeh primerih se spreminjajo lastnosti snovi. Porajajo se lokalne nestabilnosti, pri katerih se del nakopičene energije pretvarja v zvočno. Nastali zvok oznanja te nestabilnosti, zato obstaja možnost, da z detekcijo in analizo tega zvoka dobimo podatke o spremembi lastnosti snovi. Poleg te je še možnost, da s triangulacijskim načinom detekcije zvoka določimo tudi lego nastale spremembe, ki pogosto — predvsem v trdni snovi — pomeni mikroskopsko napako [2].

Obe naštetii možnosti sta tehnično pomembni; prva za preizkušanje ter študij lastnosti materialov in druga za določanje mikroskopskih napak, ki se lahko razvijejo v resne poškodbe v sestavljenih tehniških napravah. Prav zaradi te uporabnosti v zadnjem času v svetu hitro narašča obseg raziskav akustične emisije.

Cilj našega članka je opisati osnovne značilnosti pojava akustične emisije skupaj z metodami in tehniko raziskav ter prikazati naša prizadevanja na tem področju.

Osnovne značilnosti pojava akustične emisije pri mehanski deformaciji trdne snovi

Pri zasledovanju odvisnosti deformacije od mehanske obremenitve kosa polikristalne snovi lahko precej splošno opazimo dvojje značilnih področij. V prvem, elastičnem področju je deformacija sorazmerna obremenitvi in izgine, če obremenitev odstranimo. V drugem, neelastičnem področju, defor-

macija ni sorazmerna z obremenitvijo in tudi ne izgine, če obremenitev odstranimo. Na prehodu iz elastičnega v neelastično področje se na prvotno gladki površini vzorca deformirane snovi pojavijo valovitosti, ki kažejo na spremembo v razmestitvi kristalnih zrn ter na njihovo deformacijo. Takšno deformacijo mnogokrat spremlja slišno škripanje snovi. Kako si to škripanje razlagamo? Zaradi prenosa celotne mehanske obremenitve prek množice kristalnih zrn se pojavijo v snovi mikroskopske strižne napetosti. Te napetosti lahko posamezno kristalno zrno glede na druga premaknejo ali tudi deformirajo. Oba pojava sta sunkovita. Pogosto en del zrna zaradi strižne obremenitve spolzi ob drugem delu. Čas trajanja takšnega mikro dogodka lahko ocenimo, če značilno dimenzijo zrna d delimo s hitrostjo zvoka c , ker le ta popiše hitrost razširjanja razbremenitve po snovi [3].

Zamislimo si, da imamo opravka s snovjo, katere značilne mehanske konstante spadajo v naslednje velikostne razrede:

gostota $\rho = 10 \text{ kg/dm}^3$

modul elastičnosti $E = 10^5 \text{ N/mm}^2$

značilna velikost zrna $d = 10^{-5} \text{ m}$.

Zvočna hitrost v takšni snovi spada v velikostni razred

$$c \cong \sqrt{E/\rho} \cong 10^3 \text{ m/s.}$$

Mikroskopska razbremenitev se zgodi v času, ki je reda velikosti $t = d/c \cong 10^{-8} \text{ s}$.

Nastala razbremenitev zrna deluje kot mikroskopski sunek, ki sproži v snovi sunkovit zvočni val. Takšen val lahko opišemo s skupino samih sinusnih valov, ki imajo frekvence vse do reda velikosti $f = 1/t = c/d = 100 \text{ MHz}$. Ta vrednost je lahko pri manjših, predvsem submikroskopskih premikih izbranih zrn ter pri fino zrnatih snoveh še bistveno večja.

Dobljena ocena kaže, da sega spekter emitiranega zvoka trdne snovi visoko v ultrazvočno območje. Medtem ko potuje skokovit zvočni val od mesta nastanka, se njegov spektralni sestav spreminja. To spreminjanje je posledica dušenja ultra zvoka, ki z naraščajočo frekvenco hitro raste [4]. Visokofrekvenčni del spektra je zato relativno — glede na nizkofrekvenčni del — tem bolj zadušen, čim dalje od izvora detektiramo emisijo. Tako nam pri potresomerstvu, ki je samo ena vrsta analize zelo od-

daljene akustične emisije, preostane le zelo nizkofrekvenčno področje v okolici nekaj hertzov [5]. Pri laboratorijskih raziskavah lastnosti snovi z akustično emisijo se navadno skušamo izogniti vplivu zvoka iz okolja. Ta zvok je pretežno nizkofrekvenčen in je zato najbolj uporabno ultrazvočno območje približno v mejah od 100 kHz do 5 MHz. Nad to mejo že igra pomembno vlogo dušenje ultrazvoka na laboratorijskih dimenzijah. Glede na omenjene omejitve izbiramo odzivne lastnosti detektorjev in analizatorjev emitiranega ultrazvoka [6].

Ocenimo še red velikosti energije, ki se sprosti, če zdrči en del obremenjenega zrna ob drugem zaradi strižne napetosti. Zaradi preprostosti vzemi-

mo, da je zrno kockaste oblike s stranico d in da se pojavi porušitev pri strižni deformaciji

$$\varepsilon = \Delta d/d = 1 \text{ } \%$$

Sproščena energija je velikostnega reda

$$W = \frac{G \varepsilon^2 d^3}{2} \cong 10^{-9} \text{ J.}$$

Pri tem smo upoštevali, da je strižni modul približno enak

$$G \cong E/2,5.$$

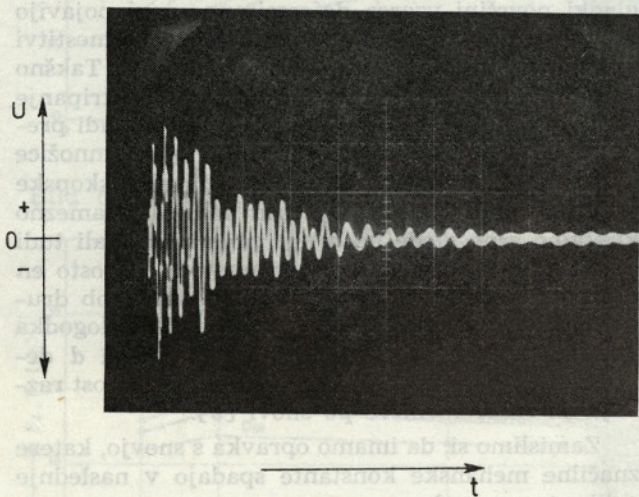
Zgornja ocena kaže, da se emitirana energija zelo hitro manjša z manjšanjem značilne dimenzije zrna oziroma deformiranega območja. Zaradi absolutno majhnih emitiranih energij je treba pri analizi akustične emisije uporabljati primerno elektronsko ojačevalno tehniko, ki jo bomo pri obravnavi instrumentarija še posebej omenili.

Akustični zvočni impulz, ki ga povzroči mikroskopska porušitev v snovi, vzbudi preizkusno snov, da zaniha s svojimi lastnimi frekvencami. To nihanje je zaradi izgub v snovi in zaradi sevanja v okolico dušeno. Tako opazimo pri detekciji akustične emisije nasploh serijo izbruhov nihanj, ki označujejo mikronestabilnosti [7, 8]. Mnogokrat so posamezni izbruhi medsebojno ločeni in dobro opredeljeni kakor na primer tisti na sliki 1. Emisija te vrste se najpogosteje opaža pri nehomogenih, anizotropnih materialih z veliko trdnostjo. Prav tako je značilna za deformacijo razpokanih vzorcev, širjenje loma, martenzitne fazne premene ter mehanske deformacije pri nizkih temperaturah. Precej splošno velja, da se s povečanjem krhkosti snovi poveča tudi verjetnost za emisijo v obliki močnih izbruhov [2]. Čim bolj je material homogen in izotropen in čim manjšo trdnost ima, tem šibkejši so posamezni izbruhi in tem bolj pogosti. Lahko se tudi zgodi, da se nihanja posameznih izbruhov prekrivajo in jih ni mogoče ločiti. V tem primeru poteka akustična emisija zvezno [9, 10], kakor prikazuje na primer slika 2.

Glede na omenjeni značilnosti obeh vrst akustične emisije moramo izbrati tudi metode analize.

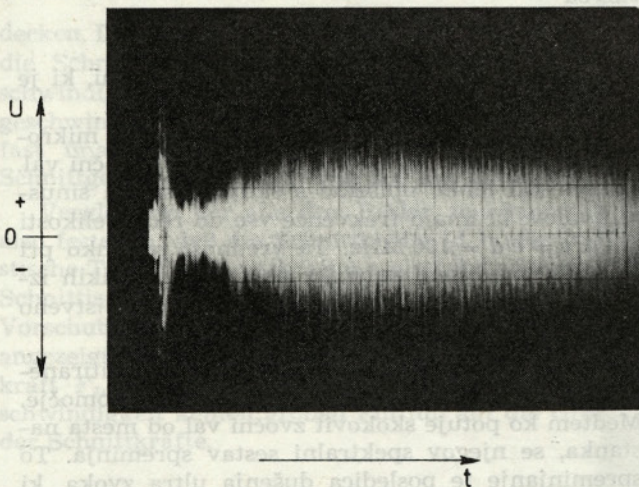
Instrumentarij za analizo akustične emisije

Začetni element v napravi za analizo akustične emisije je vedno pretvornik zvočnega v električni signal [2, 4, 6, 7]. V ta namen se uporabljajo večinoma piezoelektrični senzorji iz keramike svinecinkonat-titanat, označene s simbolom PZT. Senzor je zalepljen v kovinski okrov, da bi zmanjšali vpliv električnih motenj iz okolice. Okrov detektorja je zvočno spojen s preizkušancem prek stične snovi, ki omogoča dober zvočni stik med preizkušancem in detektorjem. Najpogosteje se za stik uporabljajo olje, vosek ali razne silikonske masti. Zvok se prek stične snovi širi na okrov detektorja in na senzor v njem ter povzroča zaradi mehanske deformacije senzorja generacijo električnega naboja na njegovih



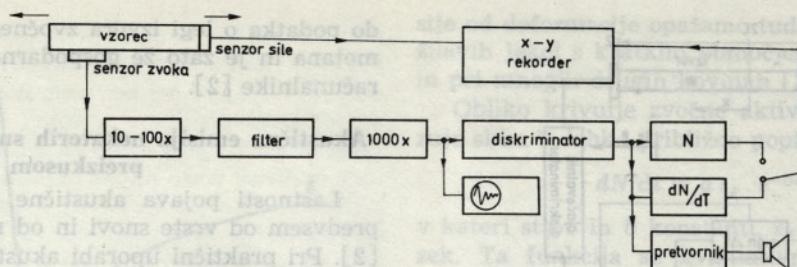
Sl. 1. Osciloskopski posnetek poteka zvočnega izbruha

Abscisa ustreza času, ordinata pa napetosti signala iz ojačevalnega dela



Sl. 2. Osciloskopski posnetek porasta zvezne akustične emisije

Na začetku posnetka je viden zvočni izbruh, temu sledi krajše področje lastnega šuma instrumentarija, ki se nato prelije v območje zvezne akustične emisije



Sl. 3. Shema naprave za detekcijo in analizo zvočnih izbruhov

stranicah. Ta generirani naboj je treba nato električno ojačiti. V ta namen moramo uporabiti najprej ojačevalnik naboja, ki je zaradi čim manjšega raztrosa generiranega naboja povezan prek kolikor mogoče kratkega kabla s senzorjem. Napetost, ki jo ustvari generirani naboj na sponkah ojačevalnika, se v njem ojači 10 do 100-krat. Izhod iz ojačevalnika je nizkoohmski in je prirejen impedanci kablov, s katerimi pripeljemo signal do drugih delov aparature, ki so navadno prostorsko ločeni od ojačevalnika (glej sliko 3). Ugodno je, če imamo ojačevalnik s čim manjšim lastnim šumom. Z malo bolj skrbno izvedbo ni težko doseči $10 \mu\text{V}$ efektivne napetosti šuma preračunano na vhod ojačevalnika, kar zadoštuje za večino tehniških problemov.

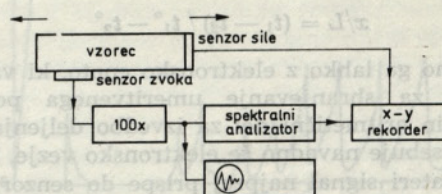
Piezoelektrične keramične ploščice delujejo navadno kot resonančni senzorji. Zvočni izbruh povzroči, da zanihajo, z lastnimi frekvencami. Sama frekvenca električnega signala na izhodu ojačevalnika zaradi tega navadno ne pomeni uporabne karakteristike dogajanja v snovi. V novjšem času pa so že izdelali tudi neresonančne senzorje, ki enakomerno pretvarjajo zvočni signal v električnega na širokem frekvenčnem območju. Vendar so pretežno še vedno v rabi resonančni senzorji, predvsem zaradi preproste izvedbe in dobre občutljivosti. Poleg piezoelektričnih senzorjev se zlasti v nizkofrekvenčnem področju uporabljajo tudi akcelerometri, kapacitivni pretvorniki itd., toda manj uspešno.

Napetostni signal iz ojačevalnika je podatek o zvočnem dogajanju v snovi. Z namenom, da mu damo uporabno obliko, ga moramo najprej elektronsko obdelati. Kadar se pojavlja emisija v izbruhih, uporabljamo elektronski sistem, ki je shematično prikazan na sliki 3. Naloga tega sistema je, da prireja vsakemu izbruhu niz parametrov. Najpogostejše želimo ultrazvočni signal uporabljati samo za indikacijo števila mikrodogodkov. V tem primeru signal najprej filtriramo, da izločimo nizkofrekvenčne vplive okolja. Filtrirani signal nato približno tisočkrat ojačimo in ga vodimo v osciloskop za neposredno opazovanje ter v diskriminator z oblikovalnikom impulzov. Ta elektronska enota priredi vsakemu zvočnemu izbruhu, ki mu ustreza napetostni signal nad mejo diskriminatorja, enega ali več uniformiranih napetostnih impulzov. Uniformirane impulze nato štejemo z elektronskim števnikom ali pa ugotavljamo njihovo pogostost (aktivnost) z merilnikom pogostosti. Celotno število impulzov N ali

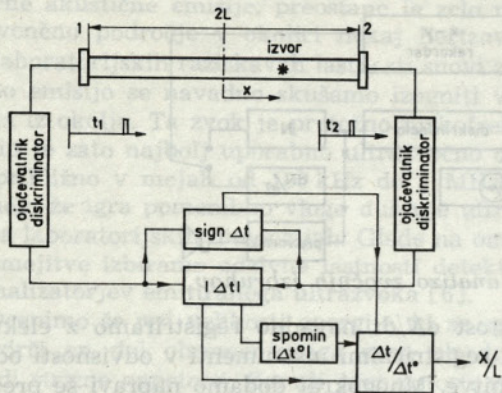
pogostost dN/dt navadno registriramo z elektronskimi registrirnimi instrumenti v odvisnosti od obremenitve. Mnogokrat dodamo napravi še pretvornik ultrazvočnih sunkov v zvočni signal, zato da lahko vsak izbruh tudi slišno zaznamo, čeprav je v osnovi ultrazvočen. Ta metoda je predvsem koristna pri majhnih pogostostih sunkov.

Prireditev uniformiranih napetostnih impulzov zvočnemu izbruhu je dokaj poljubna. Pri najpreprostejši izvedbi priredimo en napetostni impulz vsakemu nihanju napetosti — prek meje diskriminatorja. Tako priredimo močnejšim izbruhom, ki se pozneje iznihajo, več impulzov kakor šibkejšim. Razlaga tako dobljenih rezultatov je včasih oporečna. Bolj neoporečno informacijo o zvočnem dogodku dobimo, če vsakemu izbruhu priredimo impulz sorazmeren njegovi celotni energiji, kar pa je elektronsko težje izvesti. Tako dobljene impulze lahko nato razvrstimo po amplitudah z amplitudnim analizatorjem, ki je posebna vrsta diskriminatorja. Statistična zasedenost posameznih amplitud pomeni poleg pogostosti sunkov dodatno informacijo o lastnostih emisije [11].

Bistveno drugačen način analize od pravkar opisanega moramo uporabljati v primeru, ko je akustična emisija zvezna. Pri tej vrsti emisije je najugodnejše uporabljati senzor z enakomerno občutljivostjo po vsem frekvenčnem pasu, ki nas zanima. Ojačeni zvezni signal nato analiziramo s spektralnim analizatorjem, ki nam pokaže porazdelitev moči registriranega ultrazvoka po izbranem frekvenčnem območju [9, 10]. Oblika in višina spektra pomenita v tem primeru karakteristiko pojava, ki pa jo je mnogokrat, zaradi resonančnega odziva snovi, težko interpretirati. Zato se tudi pri detekciji zvezne emisije mnogokrat omejimo samo na opazovanje moči signala v ožjem frekvenčnem območju. Ustrezni elektronski sistem je prikazan s shemo na sliki 4.



Sl. 4. Shema naprave za analizo zvezne akustične emisije



Sl. 5. Shema naprave za enodimenzionalno določanje lege izvora akustične emisije

V uvodu smo že omenili, da lahko iz sprejetih zvočnih signalov ugotovimo mesto zvočnega izbruha. Najpreprosteje naredimo to v eni dimenziji. Zamislimo si, da je preizkušanece dolga, tanka palica z dolžino $2L$. Zvočni izbruh naj nastane na oddaljenosti x od sredine palice, kakor prikazuje slika 5. Ta zvočni izbruh detektiramo z dvema senzorjema, ki ju namestimo na oba konca palice. Vsak senzor opremimo z elektronskim vezjem, ki priredi izbruhi po en napetostni sunek. Če želimo ugotoviti lego izbruha, moramo k celotni napravi dodati najprej enoto za ugotavljanje časovne razlike med dvema napetostnima sunkoma in nato še enoto za izračun koordinate iz časovne razlike. Enoto za ugotavljanje časovne razlike med napetostnima sunkoma sestavljata elektronski oscilator in števnik. Zvočni sunek, ki prvi doseže enega od obeh senzorjev, sproži oscilator. Sunek iz drugega senzorja nato oscilator ugasne. Število nihajev oscilatorja je sorazmerno času med obema sunkoma. V skladu s sliko 5 je ta časovna razlika enaka

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{L+x}{c} - \frac{L-x}{c} = \frac{2x}{c}$$

Kadar je izvor na senzorju 2, je časovna razlika

$$t_1^\circ - t_2^\circ = \frac{2L}{c}$$

To razliko določimo ob umeritvi naprave tako, da povzročimo kratkotrajen udarec v bližini drugega senzorja. Iz obeh podatkov izhaja rezultat

$$x/L = (t_1 - t_2) / t_1^\circ - t_2^\circ$$

Določimo ga lahko z elektronsko enoto, ki vsebuje spomin za shranjevanje umeritvenega podatka $t_1^\circ - t_2^\circ$ in aritmetični del za izvedbo deljenja. Ista enota vsebuje navadno še elektronsko vezje, ki pokaže, kateri signal najprej prispe do senzorja. Ta del naprave posredno določi predznak koordinate x .

V primeru, ko imamo opravka z akustičnimi izvori na ploskvah ali v prostoru, je aritmetična pot

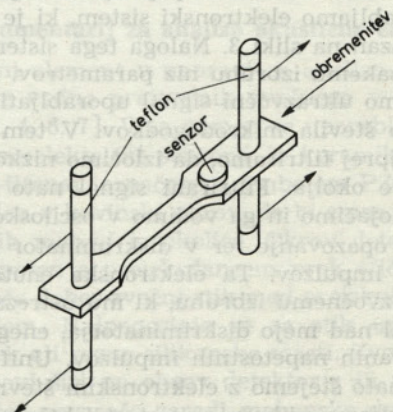
do podatka o legi izvora zvočnega izbruha bolj zamotana in je zato že gospodarno uporabljati mini-računalnike [2].

Akustična emisija nekaterih snovi med nateznim preizkusom

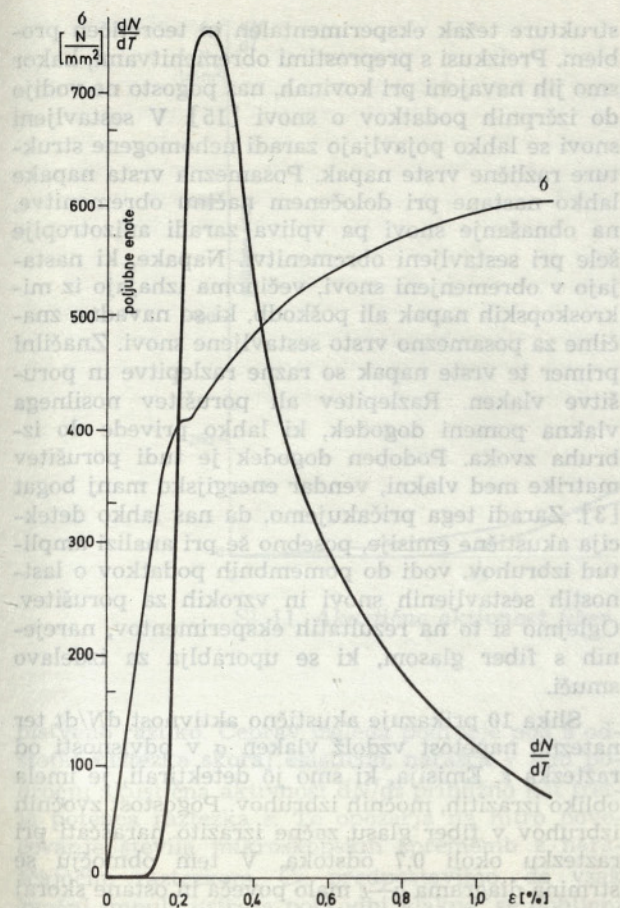
Lastnosti pojava akustične emisije so odvisne predvsem od vrste snovi in od načina obremenitve [2]. Pri praktični uporabi akustične emisije v tehniki preizkušanja, na primer pri določanju lege in vrste nastajajoče napake v obremenjeni kompleksni napravi, je ugodno, če poznamo značilnosti akustične emisije izbrane snovi v preprostih načinih obremenitve. Med te sodi v prvi vrsti obremenitev, ki jo dobimo z nateznim preizkusom podolgovatega vzorca snovi brez razpoke ali zareze.

V tem delu članka so opisani rezultati detekcije akustične emisije med nateznim preizkusom vzorcev ladijskega konstrukcijskega jekla Č. 0542, aluminijeve zlitine P 20 ter fiber glasa (steklena vlakna v epoksi matriki). Te vrste snovi smo izbrali zato, ker se v tehniki pogosto uporabljajo. Vzorci so imeli obliko ploščatih epruvet, kakršne prikazuje slika 6. Natezno silo smo prenesli na epruveto prek sornikov, nameščenih v obe izvrtini. Sornike smo ovili s telefonskim trakom, da smo se izognili emisiji zvoka, ki bi lahko nastala pri trenju površin v izvrtini. Vzorci so bili pred preizkusom s konca proti sorniku tlačno obremenjeni z višjo silo, kakor pa je potrebna za pretrganje vzorca. Tako smo se izognili akustični emisiji zaradi deformacije v okolici izvrtine, kar je posledica pozneje omenjenega Kaiserjevega efekta. Med nateznim preizkusom smo zato detektirali predvsem zvok, ki ga je emitiral srednji del deformirane epruvete.

Ultrazvočni senzor smo namestili na razširjeni del epruvete. Za zvočni kontakt smo uporabili kapljico strojnega olja med epruveto in senzorjem. Za senzor nam je rabila ploščica keramike PZT5 z največjo občutljivostjo v območju 250 kHz. Signal iz senzorja smo vodili prek ojačevalnika v širokopasovni filter, s katerim smo obdržali od signala le spektralni del v območju od 0,1 do 1 MHz. Ta



Sl. 6. Oblika preizkušanca in način obremenitve



Sl. 7. Akustična aktivnost preizkušanca iz Č. 0542 med nateznim preizkusom

signal smo nato še nadalje ojačili, tako da je celotna ojačitev skupno z ojačevalnikom dosegla območje 10^5 . Lastni šum ojačevalnega dela je s tem dosegel 0,5 V dejanske amplitude na izhodu. Vsak izhodni napetostni signal prek 1 V, ki ga je povzročila akustična emisija, smo nato z diskriminatorjem spremenili v uniformirani impulz in vodili v merilnik pogostosti impulzov (aktivnosti), ki smo jo nato zapisovali kot funkcijo raztezka na x - y recorderju.

Rezultat preizkusa, narejenega z jekleno pločvino, prikazuje slika 7. V njej je poleg pogostosti impulzov dN/dt nanesena tudi odvisnost natezne napetosti σ od razteka ε . Akustična emisija je bila v tem primeru izrazito diskretna z dobro ločenimi izbruhi. S slike 7 je razvidno, da je akustična emisija skoraj nezaznavna v elastičnem območju raztezkov in strojno narašča s pojavom plastične deformacije. To je ena od najbolj značilnih lastnosti akustične emisije in je značilna skoraj za vse kovine [3]. Nadalje je značilno, da se pojavi maksimum aktivnosti v področju plastičnega toka. S prehodom v področje utrjevanja zvočna aktivnost nato zopet pojenjuje. Podobno odvisnost akustične emi-

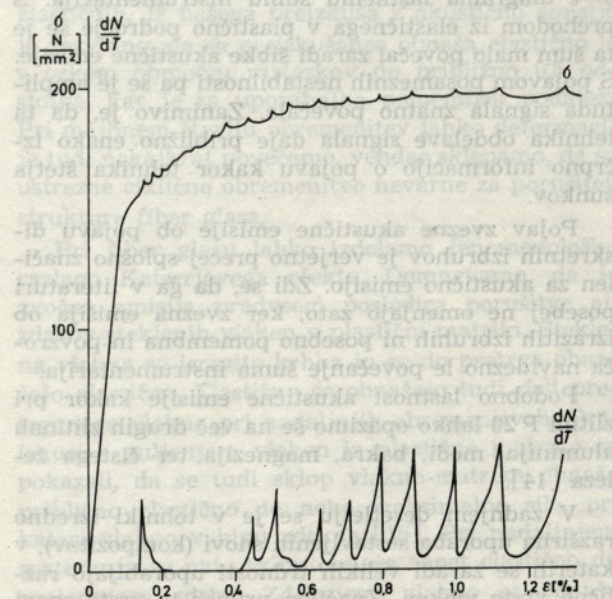
sije od deformacije opazamo tudi pri drugih vrstah žilavih jekel s kratkim območjem plastičnega toka in pri mnogih drugih kovinah [2].

Obliko krivulje zvočne aktivnosti, ki jo prikazuje slika 7, lahko približno popišemo s funkcijo

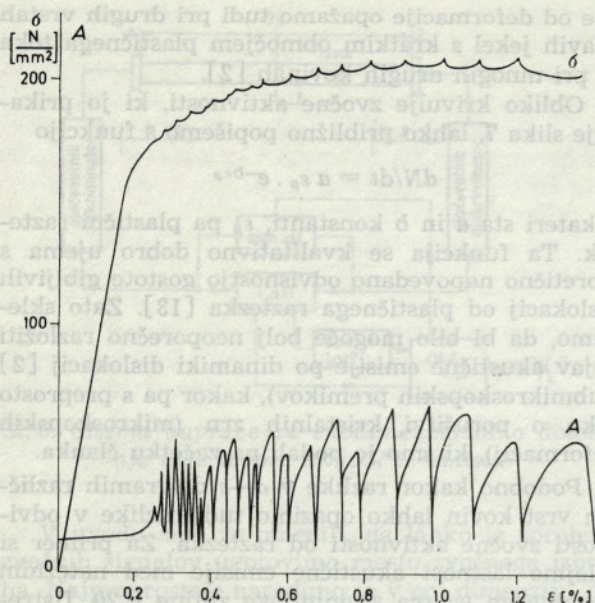
$$dN/dt = a \varepsilon_p \cdot e^{-b\varepsilon_p}$$

v kateri sta a in b konstanti, ε_p pa plastični raztezek. Ta funkcija se kvalitativno dobro ujema s teoretično napovedano odvisnostjo gostote gibljivih dislokacij od plastičnega raztezka [13]. Zato sklepamo, da bi bilo mogoče bolj neoporečno razložiti pojav akustične emisije po dinamiki dislokacij [2] (submikroskopskih premikov), kakor pa s preprosto sliko o poružitvi kristalnih zrn (mikroskopskih deformacij), ki smo jo podali na začetku članka.

Podobno kakor razlike v σ - ε diagramih različnih vrst kovin lahko opazimo tudi razlike v odvisnosti zvočne aktivnosti od raztezka. Za primer si oglejmo lastnost akustične emisije med nateznim preizkusom vzorca aluminijeve zlitine P 20. Ustrezna diagrama prikazuje slika 8. Značilno za to vrsto pločvine je, da se po preteku tihe elastične deformacije pojavi v snovi vrsta nestabilnosti, ki se odraža v skokih σ - ε diagrama. V vseh naših preizkusih je obremenitev v času enakomerno naraščala. Pri določenih vrednostih obremenitve je snov v hipu popustila, čemur je sledil nagel skok raztezka. Vsakemu skoku raztezka je sledilo nato tiho obdobje naraščanja obremenitve z majhnim zvečanjem raztezka, do ponovne delne razbremenitve zaradi skoka raztezka. Kakor je razvidno s slike 8, spremlja pojav posamezne nestabilnosti povečanje akustične emisije. Poleg izrazitih zvočnih izbruhov v obdobju nestabilnosti smo pri tem preizkusu opazili



Sl. 8. Pogostost zvočnih izbruhov med nateznim preizkusom vzorca aluminijeve zlitine P 20



Sl. 9. Dejanska amplituda napetostnega signala s frekvenco okoli 250 kHz med nateznim preizkusom vzorca aluminijeve zlitine P 20

tudi šibko zvezno emisijo, ki je povzročila zvezni signal nekajkrat višji od lastnega šuma ojačevalnega dela instrumentarija.

Zvezno akustično emisijo smo označili s selektivno detekcijo v območju največje občutljivosti senzorja. V ta namen smo s spektralnim analizatorjem Tektronix 1L5 izmerili dejansko amplitudo A detektiranega signala v spektralnem območju od 200 do 300 kHz. Rezultat eksperimenta se vidi na sliki 9. Na diagramu ustreza krivulja pod elastičnim delom σ - ε diagrama lastnemu šumu instrumentarija. S prehodom iz elastičnega v plastično področje se je ta šum malo povečal zaradi šibke akustične emisije. S pojavom posameznih nestabilnosti pa se je amplituda signala znatno povečala. Zanimivo je, da ta tehnika obdelave signala daje približno enako izčrpno informacijo o pojavu kakor tehnika štetja sunkov.

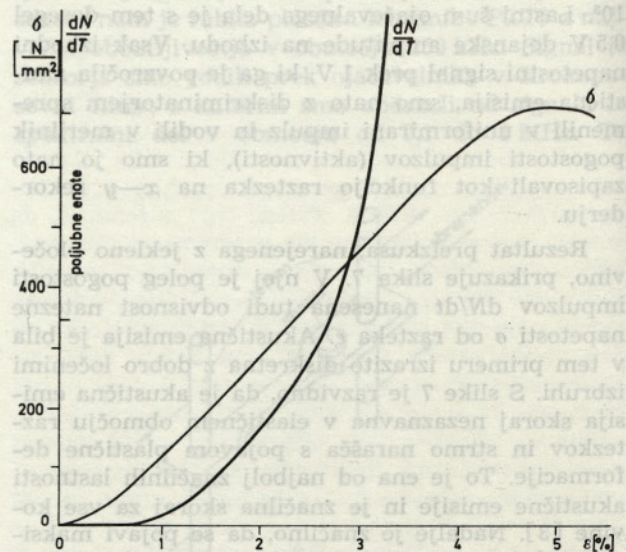
Pojav zvezne akustične emisije ob pojavu diskretnih izbruhov je verjetno precej splošno značilen za akustično emisijo. Zdi se, da ga v literaturi posebej ne omenjajo zato, ker zvezna emisija ob izrazitih izbruhih ni posebno pomembna in povzroča navidezno le povečanje šuma instrumentarija.

Podobno lastnost akustične emisije kakor pri zlitini P 20 lahko opazimo še na več drugih zlitinah aluminija, medi, bakra, magnezija ter čistega železa [14].

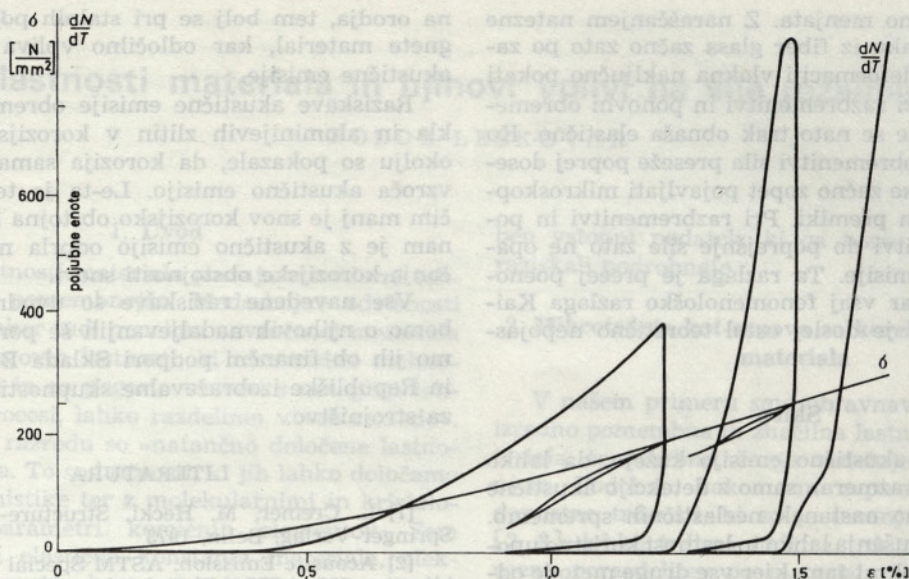
V zadnjem desetletju se je v tehniki izredno razširila uporaba sestavljenih snovi (kompozitov), v katerih se zaradi velikih trdnosti uporabljajo različne vrste vlaken. Značilen primer te vrste snovi je *fiber glas*. Določitev mehanskih lastnosti kompozitov je zaradi nehomogene in navadno anizotropne

strukture težak eksperimentalen in teoretičen problem. Preizkusi s preprostimi obremenitvami, kakor smo jih navajeni pri kovinah, nas pogosto ne vodijo do izčrpnih podatkov o snovi [15]. V sestavljeni snovi se lahko pojavljajo zaradi nehomogene strukture različne vrste napak. Posamezna vrsta napake lahko nastane pri določenem načinu obremenitve, na obnašanje snovi pa vpliva zaradi anizotropije šele pri sestavljeni obremenitvi. Napake, ki nastajajo v obremenjeni snovi, večinoma izhajajo iz mikroskopskih napak ali poškodb, ki so navadno značilne za posamezno vrsto sestavljene snovi. Značilni primer te vrste napak so razne razlepitve in porušitve vlaken. Razlepitev ali porušitev nosilnega vlakna pomeni dogodek, ki lahko privede do izbruha zvoka. Podoben dogodek je tudi porušitev matrike med vlakni, vendar energijsko manj bogat [3]. Zaradi tega pričakujemo, da nas lahko detekcija akustične emisije, posebno še pri analizi amplitud izbruhov, vodi do pomembnih podatkov o lastnostih sestavljenih snovi in vzrokih za porušitev. Oglejmo si to na rezultatih eksperimentov, narejenih s *fiber glasom*, ki se uporablja za izdelavo smuči.

Slika 10 prikazuje akustično aktivnost dN/dt ter natezno napetost vzdolž vlaken σ v odvisnosti od raztezka ε . Emisija, ki smo jo detektirali, je imela obliko izrazitih, močnih izbruhov. Pogostost zvočnih izbruhov v *fiber glas*u začne izrazito naraščati pri raztezu okoli 0,7 odstotka. V tem območju se strmina diagrama σ - ε malo poveča in ostane skoraj stalna do porušitve traku. Samo iz diagrama σ - ε bi lahko sklepali, da se obnaša *fiber glas* podobno kakor krhko jeklo, ki iz elastičnega območja hitro preide v porušitev. Detekcija akustične emisije pa pokaže



Sl. 10. Akustična aktivnost *fiber glasa* med nateznim preizkusom



Sl. 11. Akustična aktivnost fiber glasa pri ponovljenih obremenitvah

bistveno razliko. Čeprav izgleda področje pod 5 odstotki raztezka skoraj elastično, narašča v tem področju akustična aktivnost dN/dt približno kot tretja potenca raztezka ϵ . To opozarja na hitro povečevanje števila mikroskopskih sprememb z naraščajočim raztezkom. Če predpostavimo, da vsak zvočni impulz ustreza poškodbi vlakna, se dobljeni rezultat dobro ujema s fenomenološko teorijo Zwebna o porušitvi fiber glasa [16]. Na osnovi naših preizkusov bi pričakovali, da lahko v praktični uporabi dovolimo raztezke približno 5 odstotkov, medtem ko se pri večjih raztezkih že začno pojavljati poškodbe. To je rezultat, ki bi ga samo s posnemanjem diagrama $\sigma-\epsilon$ težko dobili. Seveda nastane takoj vprašanje, ali zvočni izbruh res pomeni poškodbo glede na mehansko zdržljivost fiber glasa. Če je to res, potem je vrednost raztezka, pri kateri se začno pojavljati zvočni izbruhi, odločujoča za praktično uporabo tega materiala. Da bi o tem pojavu dobili še več informacij, smo izvedli preizkus z večkratno obremenitvijo istega vzorca. Rezultat preizkusa se vidi na sliki 11. Pri delni razbremenitvi traku akustična aktivnost zamre v karakterističnem času približno ene minute. Značilno je, da pri ponovnem dvigu obremenitve ne zaznamo akustične emisije vse do obremenitev, ki so bile prej dosežene. Ponovno raztegovanje do poprejšnje vrednosti je torej podobno elastičnim deformacijam brez novih poškodb. Podobno se obnašajo mnoge kovine pri razbremenitvah iz plastičnega območja. Pojav nepovratnosti akustične emisije je prvi odkril na kovinah Kaiser [17] in je izredno pomemben za tehniko preizkušanja snovi. S tem pojavom lahko pri vzorcu ugotovimo maksimalno poprejšnjo ne-

elastično obremenitev oziroma deformacijo, čeprav ne vemo, kako je bila dosežena. V ta namen samo obremenimo vzorec in določimo obremenitev, pri kateri se akustična emisija izrazito poveča. Kaiserjev efekt kaže, da snov med razbremenitvijo in obremenitvijo ne doživlja pomembnih neelastičnih sprememb. Ta ugotovitev pa seveda ne drži pri večjem številu ponovljenih ciklov. V tem primeru se lahko pojavlja utrujanje snovi [3]. Pričakujemo lahko, da je nevarnost poškodb zaradi utrujanja tem večja, čim bolj so obremenitve odmaknjene od elastičnih. Iz našega preizkusa z akustično emisijo je razvidno, da se preizkušane obnaša elastično le v ozkem območju raztezkov do približno 0,5 odstotka, kar je za uporabnika pomemben podatek. Pri majhnem številu obremenitev lahko deformacije tudi nekajkrat povečamo, vendar sklepamo, da so ustrezne ciklične obremenitve nevarne za porušitev strukture fiber glasa.

Pri fiber glasu lahko izdelamo fenomenološko razlago Kaiserjevega efekta. Domnevamo, da je zvočna emisija predvsem posledica porušitve ali zdrkov steklenih vlaken v plastični matriki. Steklena vlakna so izrazito krhka in se do pretrga obnašajo elastično. Elastično se obnašajo tudi deli pretrganega vlakna pri nadaljnjih obremenitvah. Preizkusi s puljenjem vlaken iz plastične matrike so pokazali, da se tudi sklop vlakno-matrika obnaša približno elastično do neke maksimalne sile, pri kateri vlakno v hipu zdrkne [15]. Pri nadaljnjem raztezanju se nato sklop obnaša zopet elastično do naslednjega zdrka. Zdrknjeno vlakno se obnaša elastično tudi pri razbremenitvi. Maksimalna natezna sila in sila, potrebna za zdrk, se od vlakna do

vlakna naključno menjata. Z naraščanjem natezne obremenitve traku iz fiber glasa začno zato po začetni elastični deformaciji vlakna naključno pokati in zdrkavati. Pri razbremenitvi in ponovni obremenitvi do iste sile se nato trak obnaša elastično. Ko pa ob ponovni obremenitvi sila preseže poprej doseženo vrednost, se začno zopet pojavljati mikroskopske porušitve in premiki. Pri razbremenitvi in ponovni obremenitvi do poprejšnje sile zato ne opazimo zvočne emisije. Ta razlaga je precej poenostavljena, vendar vsaj fenomenološko razlaga Kaiserjev efekt, ki je doslej ostal teoretično nepojasnen.

Sklep

Preizkusi z akustično emisijo kažejo, da lahko v idealiziranih razmerah samo z detekcijo akustične emisije določimo nastanek neelastičnih sprememb. V tehniki preizkušanja lahko to lastnost koristno uporabljamo mnogokrat tam, kjer vse druge metode odpovedo. Tipičen primer takšne uporabe je odkrivanje nastanka razpoke v kosu obremenjene snovi. Zaradi možnosti ojačanja signala je akustična emisija primerna predvsem za ugotovitev mikroskopskih sprememb v snovi. Preizkusi te vrste so uporabni pri določitvi kvalitete zvarov, faznih premen in analizi pojavov v sestavljenih snoveh. Posebno pomemben za preizkuševalno tehniko je Kaiserjev efekt zaradi možnosti določanja poprejšnjih obremenitev. Tehniško najbolj perspektivna pa je verjetno uporaba akustične emisije za lokacijo nastajajočih napak v raznih obremenjenih tehniških napravah. To področje je deležno mnogih raziskav in se sedaj še burno razvija [2]. Uporabnost akustične emisije pa je tudi delno omejena. Predvsem v industrijskem okolju pogosto ne moremo odstraniti vpliva močnih izvorov zvoka, kakršni so na primer razna trenja na površinah, udarci, pretakanje tekočin itd. Tudi razlaga rezultatov je težavna, ker je dostikrat samo z detekcijo emisije nemogoče ugotoviti ali pomeni izvor zvoka resno napako v snovi ali pa je samo postranskega pomena za mehanske lastnosti vse strukture.

Pri nas smo doslej ob sodelovanju IJS razvili instrumentarij za detekcijo akustične emisije in izvedli uvodne preizkuse z različnimi vrstami snovi pri nateznem preizkusu. Nadalje razvijamo še instrumentarij za določanje lege izvorov emisije. Analizo akustične emisije smo že uspešno uporabili za določanje kvalitete še vročega zvara neposredno po varjenju [18]. Izkazalo se je, da je zvar tem aktivnejši oddajnik zvoka, čim več mikronapak je v njem, torej čim manj je kvaliteten.

Novost pomenijo raziskave ultrazvočne emisije, ki smo jih izvedli pri raznih rezalnih procesih [19]. Uvodne raziskave na tem področju so pokazale, da bi lahko akustično emisijo uporabljali za označitev rezalnega procesa in še posebej ostrine rezalnega orodja med rezalnim procesom. Čim manjša je ostrina

na orodja, tem bolj se pri stalnih pogojih rezanja gnete material, kar odločilno vpliva na lastnosti akustične emisije.

Raziskave akustične emisije obremenjenega jekla in aluminijevih zlitin v korozijsko aktivnem okolju so pokazale, da korozija sama po sebi povzroča akustično emisijo. Le-ta je tem močnejša, čim manj je snov korozijsko obstojna [20]. Tako se nam je z akustično emisijo odprla možnost določanja korozijske obstojnosti snovi.

Vse navedene raziskave so uvodne narave in bomo o njihovih nadaljevanjih še poročali. Izvajamo jih ob finančni podpori Sklada Borisa Kidriča in Republiške izobraževalne skupnosti na Fakulteti za strojništvo.

LITERATURA

- [1] L. Cremer, M. Heckl, *Structure-Borne Sound*, Springer-Verlag, Berlin, 1973
- [2] *Acoustic Emission*, ASTM Special Technical Publication 505, ASTM, Philadelphia, 1972
- [3] R. G. Liptai, D. O. Harris, R. B. Engle, C. A. Tatro, *Int. J. Nondestructive Testing*, 3, (1971) 215
- [4] R. S. Sharpe, *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Academic Press Inc., London, 1970, str. 6
- [5] B. H. Armstrong, *Bull. Seismological Society of America*, 59, (1969) 1251
- [6] H. L. Dunegan, C. A. Tatro, *Techniques of Metals Research*, 5, Part 2, str. 273
- [7] Urednik R. F. Bunshah, John Wiley & Sons, Ind. 1971
- [8] W. Swindlehurst, *Nondestructive Testing*, 6, (1973) 152
- [9] B. J. Brindley, J. Holt, I. G. Palmer, *Nondestructive Testing*, 6 (1973) 299
- [10] P. Jax, *J. Eisenblätter*, Information 15, Battelle Frankfurt (1973) str. 2
- [11] G. Curtis, *Nondestructive Testing*, 7, (1974) 82
- [12] A. A. Pollock, *Nondestructive Testing*, 6, (1973) 264
- [13] I. I. Averbuh, V. E. Vajnberg, *Defektoskopija*, 4, (1973) 25
- [14] J. J. Gilman, *J. Appl. Phys.*, 36, (1965) 2722
- [15] R. M. Fisher, J. S. Lally, *Canadian Journal of Physics*, 45, (1967) 1147
- [16] L. J. Broutman, R. H. Krock, *Modern Composite Materials*, Addison — Wesley Publishing Comp., Reading, Mass. (1967)
- [17] C. Zweben, *AIAA*, 6, (1968) 2329
- [18] J. Kaiser, *Archiv für das Eisen-Hüttenwesen*, 24, (1953) 43
- [19] M. Popovič, *Raziskava akustične emisije zvarov*, Diplomsko delo št. 2044, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 1974
- [20] M. Nikolič, *Raziskava akustične emisije rezalnega procesa*, Diplomsko delo št. 2058, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 1974
- [21] M. Dobovšek, *Raziskava akustične emisije mehansko obremenjene snovi v korozijsko aktivnem okolju*, Diplomsko delo št. 2059, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 1974

Avtorjev naslov:

doc. dr. Igor Grabec
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani