YU — ISSN — 0039 — 2480

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 24 LJUBLJANA, MAREC—APRIL 1978 ŠTEVILKA 3—4

UDK 534.2:539.4

Uporaba akustične emisije pri testiranju trdnosti zvarjenih konstrukcij

IGOR GRABEC — PETER MUŽIČ — JOŽE KUDER — VLADO GLIHA

Uvod

Pri izdelavi obsežnih zvarjenih konstrukcij je zahtevana trdnost in s tem ustrezna varnost izvedbe osnovni pogoj, ki ga mora izvajalec upoštevati tako pri načrtovanju kakor pri izdelavi. Katastrofalne porušitve nekaterih mostov, ladij, tlačnih posod, reaktorjev itd. [1] kažejo, da trdnost zvarjenih konstrukcij ne ustreza vedno zahtevanim pogojem uporabe, kljub očitno ogromnim vloženim sredstvom in naporom. Analiza v normalnih razmerah porušenih konstrukcij navadno kaže, da je bil vzrok za porušitev nepredviden nastanek razpok, ki so povzročile nestabilnost obremenjenega dela oziroma njegov krhki lom [1]. Analiza tudi kaže, da se razpoke najpogosteje razvijejo v nataljenih conah vzdolž zvarov [2].

Kot posledica nevarnosti za razpoke se je razvila posebna veja tako imenovane lomne mehanike. Le-ta preučuje vplive in zakonitosti, ki odločajo o stabilnosti razpok [3, 4]. Poleg tega se je razvila obširna veja merske tehnike, namenjene neporušitvenemu iskanju razpok med izdelavo in med uporabo zvarjene konstrukcije [5].

Raziskave na področju lomne mehanike so pripeljale do precej zanesljivih kriterijev za oceno stabilnosti strukture, v kateri so že razpoke. Ugotovljeno je bilo, da je konstrukcija odporna proti krhkemu lomu dokler faktor koncentracije mehanskih napetosti ob razpokah ne preseže neke kritične vrednosti, značilne za izbrani material [6]. Neporušitvena merska tehnika pa je tudi toliko napredovala, da je mogoče mnogo kritičnih napak odkriti z rentgenskimi in ultrazvočnimi ter drugimi metodami.

Naloga izdelovalca zahtevne zvarjene konstrukcije je v grobih obrisih naslednja. Pri načrtovanju se mora oblikovno izogniti koncentracijam napetosti zaradi zarez, pri izdelavi pa mora izbrati takšne tehnološke postopke, ki ne povzročajo razpok. Med izdelavo in po njej mora nato izdelek tudi preiskati z nedestruktivnimi metodami, da se izogne možnim razpokam.

Četudi je naloga izdelovalca varjene konstrukcije opravljena v skladu z naštetimi zahtevami, pa njena trdnost med uporabo še vedno ni zagotovljena. V zvarjenih konstrukcijah so pogosto linijske napake, kakršen je mrzli zvar, ki jih z nedestruktivnimi metodami težko odkrijemo, ker se navidezno obnašajo kakor kompakten material, odpovedo pa šele med obratovanjem [2, 7]. Prav tako tudi ni mogoče popolnoma zanesljivo oceniti kritičnosti obstoječih razpok. Četudi si odmislimo težave z določanjem faktorja koncentracije napetosti na realnem vzorcu, daje lomna mehanika kolikor toliko zanesljive kriterije predvsem za odpornost proti krhkemu lomu, oziroma območje obremenitev, v katerem je struktura zaradi navzoče razpoke v celoti še stabilna. Odprto pa ostaja še vedno vprašanje, kako se razpoke pojavljajo oziroma rastejo med uporabo. Zaradi tega je mnogo novejših raziskav usmerjenih v preučevanje dinamike rasti razpok pri obratovalnih obremenitvah [8, 9].

Naraščanje razpok je vedno povezano s spreminjanjem mehanskega napetostnega stanja, kar je nadalje povezano z emisijo zvoka. Z detekcijo in analizo emitiranega zvoka lahko zato dobimo podatke, uporabne za popis dinamike razvoja razpok [8, 10, 11].

Razpoke, katerih velikosti se bližajo kritičnim dimenzijam v zelo trdnih materialih, pogosto naraščajo skokovito in sevajo zato zvok v zaporedju zvočnih izbruhov oziroma pokov. Hitrost rasti razpok je odvisna od faktorja koncentracije napetosti ter narašča, ko se le-ta bliža kritični vrednosti. Hkrati s tem naraščata tudi pogostost in jakost zvočnih izbruhov. Zato načeloma obstaja možnost ocenitve, ali se približuje obremenitev kritičnim vrednostim iz podatkov o pogostosti zvočnih izbruhov [7]. Poleg tega lahko s hkratnim detektiranjem zvoka na več mestih in uporabo triangulacijske tehnike določimo tudi lego rastoče napake. Za razliko od drugih metod iskanja razpok detektiramo z metodo akustične analize le razpoke, ki se razvijajo in se prek emitiranega zvoka same javljajo [9].

Zaradi navedenih možnosti se je pri študiju dinamike porušitev v zadnjem desetletju razvila in uveljavila analiza akustične emisije kot nova nedestruktivna metoda [12, 13]. Cilj naše razprave je prikazati, kako daleč so segle raziskave te vrste

pri nas in kako jih je mogoče uporabljati za potrebe preizkušanja konstrukcij, zvarjenih v naši težki industriji.

Na področju preizkušanja trdnosti zvarjenih konstrukcij iz debelih, zelo trdnih pločevin se kaže vedno močnejša težnja po preizkusih na vzorcih v dejanskih dimenzijah. Vse več je namreč dokazov, da se lahko le na takšnem vzorcu pravilno ugotavljajo vplivi raznih tehnoloških postopkov, kakršni so varjenje ter krivljenje, na trdnost izdelka. Zato je nedestruktivna metoda detekcije razvoja razpok, ki lahko prepreči porušitev navadno dragega vzorca, ne samo pripomoček, temveč tudi potreba [13, 14]. Zaradi tega je za ocenjevanje trdnosti na osnovi analize akustične emisije že pripravljen prvi standard ASME.

Analizo akustične emisije smo vključili v raziskave trdnosti vzorca cevi za HE Bajina Bašta. Visokotlačni del cevovoda bo izdelala Metalna v Mariboru iz zelo trdnega jekla Sumiten 80 P z zajamčeno mejo trdnosti 800 N/mm². Tipični premer visokotlačnega dela bo 4 m, debelina stene 50 mm, delovni tlak pa 60 bar. Udarna trdnost po Charpyju znaša za dobavljeno pločevino v vzdolžni smeri valjanja približno 2,2 J/mm² pri normalni temperaturi. V nataljeni cevi zvara se zmanjša ta vrednost na 0,8 J/mm².

Empirični podatki tujih raziskovalcev kažejo [7], da je pri preizkušanju tlačnih posod iz materiala z navedeno debelino in udarno trdnostjo priporočljivo uporabljati analizo akustične emisije.

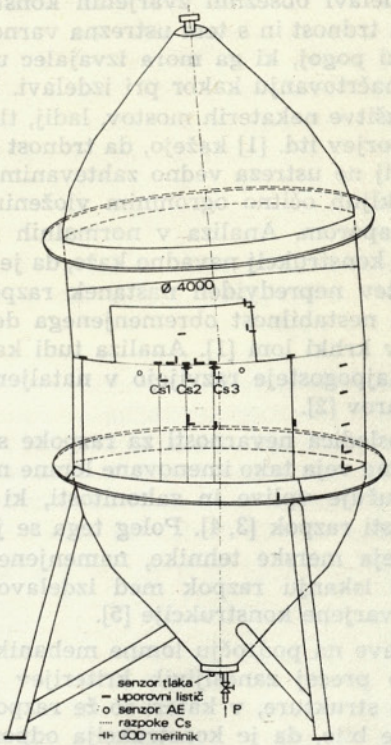
Cilj raziskav je bil preveriti, ali je s predvidenim tehnološkim procesom izdelave mogoče doseči zahtevano trdnost cevovoda. Pri tem je bila pozornost usmerjena predvsem na obnašanje zvarov oziroma toplotno vplivanih con. Ustrezne podatke smo dobili z merjenjem deformacijskega polja na kritičnih področjih v odvisnosti od obremenitve. Na vzorcu je bilo posebej pripravljenih nekaj dobro opredeljenih razpok, s katerimi smo simulirali verjetne vrste okvar. Z opazovanjem pojavov ob teh razpokah smo želeli dobiti ne le podatke o trdnosti cevovoda, temveč tudi napotke za ocenjevanje kritičnosti napak pri poznejšem preizkušanju že zgrajenega cevovoda.

Analiza akustične emisije je bila vključena v raziskave z dvema namenoma. Najprej smo želeli obseg obstoječih laboratorijskih raziskav razširiti na neposredno reševanje industrijskih problemov. Med samim preizkusom pa smo želeli dobiti podatke o naraščanju pogostosti mikro porušitev ter o njihovi legi.

V naslednjih delih članka je najprej opisana priprava preizkusov skupaj z uporabljenim instrumentarijem. Temu sledi opis izvedbe preizkusov in diagramski prikaz izmerjenih veličin. Rezultati raziskav so analizirani in komentirani v razpravi na koncu članka.

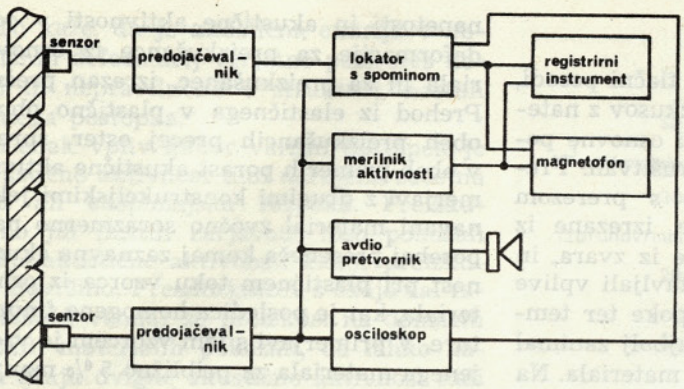
Priprave za preizkuse

Shema tlačne posode, na kateri so bile izvedene raziskave, je prikazana na sliki 1. Posoda je bila zvarjena iz srednjega, valjastega dela in dveh koničnih pokrovov. Valjasti del je pomenil izsek spodnjega visokotlačnega konca cevovoda, ki je rahlo ukrivljen. Zato je bila os valjastega dela prelomljena za 5°. Prehod iz valjastega dela v konični pokrov je bil ojačan z dvema prirobnicama. Posoda je bila nameščena na trinožnem podstavku z ojačitvenim koničnim pasom. Dovodi za črpanje vode in merjenje tlaka so bili nameščeni na spodnji strani koničnega dela. V notranjosti posode je bila izdelana trinadstropna zvezdasta konstrukcija za namestitev raket pri simulaciji vodnega udara.



Sl. 1. *Shema tlačne posode*
Srednji del je izsek visokotlačnega dela cevovoda za HE Bajina Bašta

Na sedlasti strani valjastega dela so bile v pregretih conah vzdolžnih zvarov s posebnim eksplozijskim postopkom pripravljene tri razpoke v medsebojni razdalji 500 mm. Pri prvem preizkusu so bile razpoke dolge 400 mm in globoke 8 mm. Po razrušitvi posode pri prvem preizkusu je bil deformirani del izrezan in zamenjan z novim. Ta je imel eno zavarjeno razpoko (CS1) z dolžino 40 mm v globini 10 mm in dve prosti razpoki. Srednja razpoka CS2 je bila dolga 160 mm in globoka približno 6,5 mm. Potekala je od prečnega vara navzdol ob vzdolžnem varu. Tretja razpoka CS3 je potekala vzporedno z drugo do globine 8 mm, njena dolžina pa je bila samo 50 mm. Celovitost posode



Sl. 2. *Shema merilnega stavka za detekcijo in analizo akustične emisije*

je bila po izdelavi posebej skrbno preverjena z radiografskimi in ultrazvočnimi metodami.

Med preizkusi smo merili tlak, deformacijo in akustično emisijo. Tlak smo merili z membranskim merilnikom, pri simulaciji vodnega udara pa poleg tega še s piezoelektričnim merilnikom. Za grobo oceno deformacije smo merili obseg valjastega dela in razdaljo med prirobnicama. Za fin in bolj zanesljiv popis deformacij pa smo uporabili serijo 36 uporovnih merilnih lističev in 11 Moireovih mrežic. S tremi COD merilniki smo merili tudi odpiranje razpok. Med simulacijo vodnega udara smo poleg tega snemali odpiranje razpok tudi z dvema hitrima kamerama. Električne signale iz vseh senzorskih elementov smo vodili do 25 m oddaljenega merskega mesta, kjer smo jih elektronsko ojačili in obdelali ter pomembnejše posneli na magnetofonu in pisalnikih. Rezultati merjenja deformacij bodo izčrpno opisani pozneje.

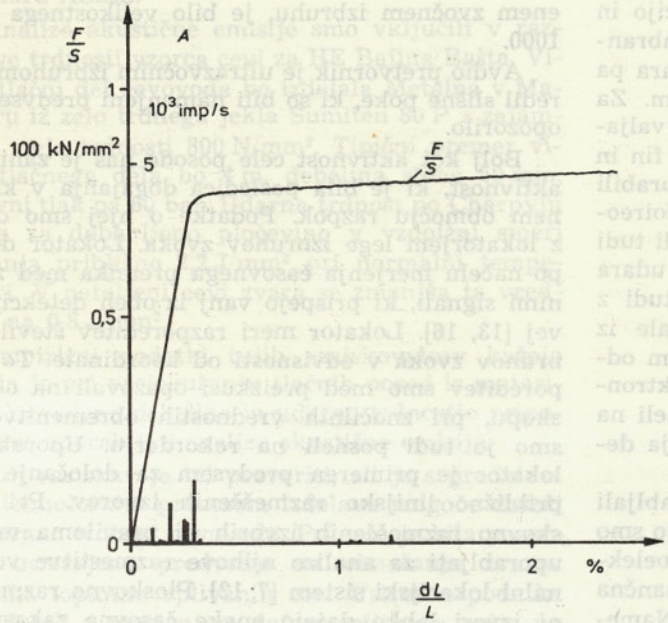
Za analizo akustične emisije smo uporabljali merilni stavek, ki ga prikazuje slika 2. Emisijo smo detektirali z dvema resonančnima PZT piezoelektričnima senzorjema domače izdelave. Resonančna frekvenca obeh senzorjev je bila 180 kHz. Namestili smo jih tako, da je bilo kritično področje razpok na liniji med njima. Signala iz obeh senzorjev sta bila v predojačevalnikih že na posodi ojačana za faktor 100 nato pa prek daljših kablov pripeljana v aparaturo za analizo akustične emisije. Ta je bila sestavljena iz dela za merjenje zvočne aktivnosti in lokatorja. V merilniku aktivnosti je bil en signal najprej napetostno ojačan za 40 dB (faktor 100) v frekvenčnem pasu od 0,1 do 1 MHz. Ta signal smo nato opazovali na osciloskopu in dalje obdelali v merilniku pogostosti ter avdio pretvorniku. Osciloskop je pokazal, da sestavlja signal zvezen šum ozadja z amplitudo pod 0,5 V. Iz tega šuma so se med pokanjem posode zaradi obremenitve dvigali dobro opredeljeni kratkotrajni izbruhi oscilacij. Frekvenca teh oscilacij je ustrezala resonančni frekvenci senzorjev. Z merilnikom pogostosti smo merili število napetostnih nihajev oziroma sunkov, ki so na časovno enoto presegli prag 1 V. Ustrezno ustaljeni tehniki analize akustične emisije smo tako izmerjeno pogostost uporabili kot merilo zvočne aktivnosti cele posode [13]. Za časovno enoto pri merjenju števila sunkov smo izbrali 0,1 s. Tipično število sunkov, ki se je pojavilo v enem zvočnem izbruhu, je bilo velikostnega reda 1000.

Avdio pretvornik je ultrazvočnim izbruhom priredil slišne poke, ki so bili namenjeni predvsem za opozorilo.

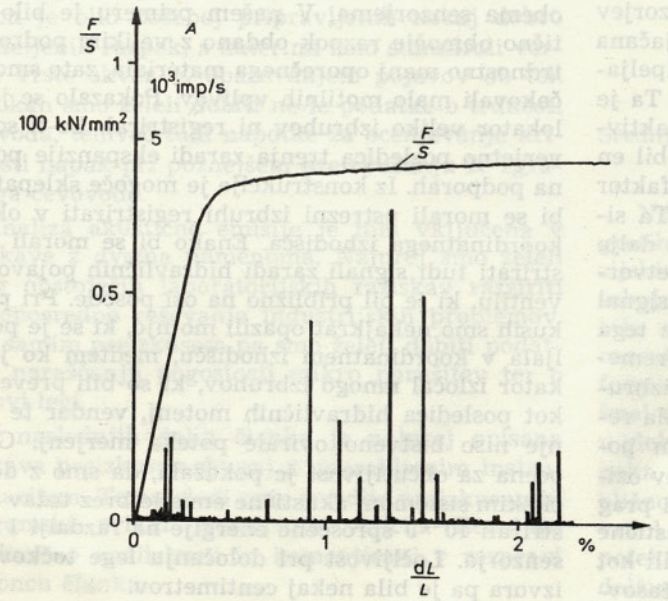
Bolj kot aktivnost cele posode nas je zanimala aktivnost, ki je bila posledica dogajanja v kritičnem območju razpok. Podatke o njej smo dobili z lokatorjem lege izbruhov zvoka. Lokator deluje po načelu merjenja časovnega premika med zvočnimi signali, ki prispejo vanj iz obeh detekcijskih vej [13, 16]. Lokator meri razporeditev števila izbruhov zvoka v odvisnosti od koordinate. To razporeditev smo med preizkusi opazovali na osciloskopu, pri značilnih vrednostih obremenitve pa smo jo tudi posneli na rekorderju. Uporabljeni lokator je primeren predvsem za določanje lege približno linijsko razmeščenih izvorov. Pri ploskovno razmeščenih izvorih bi praviloma morali uporabljati za analizo njihove razmestitve večkanalni lokacijski sistem [7, 12]. Ploskovno razmeščeni izvori lahko dajejo enake časovne zakasnitve med detektiranimi izbruhi, kakor tisti na liniji med obema senzorjema. V našem primeru je bilo kritično območje razpok obdano z velikim področjem trdnostno manj oporečnega materiala, zato smo pričakovali malo motilnih vplivov. Pokazalo se je, da lokator veliko izbruhov ni registriral. Le-ti so bili verjetno posledica trenja zaradi ekspanzije posode na podporah. Iz konstrukcije je mogoče sklepati, da bi se morali ustrezni izbruhi registrirati v okolici koordinatnega izhodišča. Enako bi se morali registrirati tudi signali zaradi hidravličnih pojavov na ventilu, ki je bil približno na osi posode. Pri preizkusih smo nekajkrat opazili motnjo, ki se je pojavljala v koordinatnem izhodišču, medtem ko je lokator izločal mnogo izbruhov, ki so bili preverjeni kot posledica hidravličnih motenj, vendar te motnje niso bistveno ovirale poteka merjenj. Groba ocena za občutljivost je pokazala, da smo z detekcijskim sistemom akustične emisije brez težav registrirali 10^{-4} J sproščene energije na razdalji 1 m od senzorja. Ločljivost pri določanju lege točkovnega izvora pa je bila nekaj centimetrov.

Izvedba preizkusov

Preden smo začeli s preizkusi na tlačni posodi, smo izvedli vrsto laboratorijskih preizkusov z nategom vzorcev. S tem smo želeli dobiti osnovne podatke o obnašanju materiala pri porušitvah. Preizkušanci so imeli ploščato obliko s prerezom 15 × 2 mm². Preizkušali smo vzorce, izrezane iz osnovnega materiala, vzorce, izrezane iz zvara, in vzorce z zarezo. Poleg tega smo ugotavljali vplive rje, utrujenostne in eksplozijske razpoke ter temperature. Med vsemi vplivi nas je najbolj zanimal vpliv varjenja na akustične lastnosti materiala. Na slikah 3 in 4 so prikazani posnetki poteka natezne napetosti in akustične aktivnosti v odvisnosti od deformacije za preizkušance iz osnovnega materiala in za preizkušanec, izrezan prečno iz zvara. Prehod iz elastičnega v plastično območje je pri obeh preizkušancih precej oster, spremlja pa ga v obeh primerih porast akustične aktivnosti. V primerjavi z drugimi konstrukcijskimi jekli je obravnavani material zvočno sorazmerno neaktiven. Še posebej preseneča komaj zaznavna akustična aktivnost pri plastičnem toku vzorca iz osnovnega materiala, kar je posledica homogene finozrnate strukture. V primerjavi s tem vzorcem je vzorec iz zvarjenega materiala za približno 5 % manj odporen in akustično bistveno bolj aktiven; posebej pri plastič-



Sl. 3. *Odvisnost natezne napetosti in akustične aktivnosti od natezne deformacije vzorca iz osnovnega materiala*



Sl. 4. *Odvisnost natezne napetosti in akustične aktivnosti od natezne deformacije vzorca izrezanega prečno iz zvara*

nem toku. To kaže, da je akustična emisija v območju plastičnih deformacij verjetno posledica nehomogenosti in nepravilnosti v strukturi, nastali zaradi varilnega postopka.

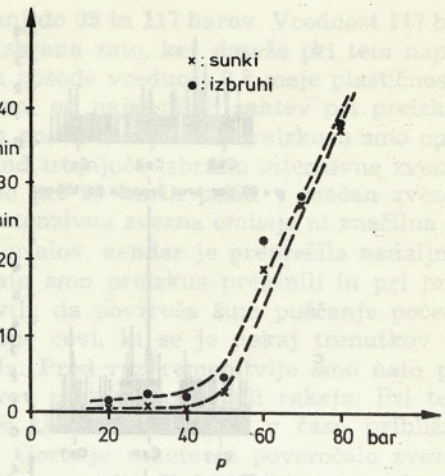
Približno enak vpliv kakor varilni postopek je imela na akustično aktivnost tudi narejena začetna utrujenostna ali eksplozijska razpoka. Preizkušanci, ki smo jih pustili zarjaveti, niso pokazali bistveno večje akustične aktivnosti kakor preizkušanci s čisto površino. Preizkušancev s škajo žal nismo uspeli dobiti, vendar so preizkusi na domačih konstrukcijskih materialih pokazali, da lahko navzoča krhka škaja dvigne akustično aktivnost tudi za nekaj velikostnih redov, medtem ko je funkcijska odvisnost aktivnosti od deformacije podobna kakor pri neškajastem materialu. Zato deluje krhka škaja kot dober posrednik med plastičnimi deformacijami in akustično emisijo [17, 18]. Pri znižanju temperature od 20 na 0 °C nismo opazili bistvenih sprememb pri emisijskih ter deformacijskih lastnostih materiala.

Z opisano serijo predpreizkusov smo ugotovili, da je za detekcijo akustične emisije na izbranem materialu potrebna skrajna občutljivost, ki ji ustreza nastavljeni detekcijski prag le malo nad nivojem ozadja. Nadalje smo sklepali, da bomo v normalnem delovnem območju tlakov dobili zaradi praktično elastične deformacije posode dosti pod plastičnim področjem iz osnovnega materiala le zanemarljivo akustično aktivnost. Več smo je pričakovali od pokanja oksidnih plasti, trenja posode na podporah zaradi ekspanzije in od hidravličnih šumov zaradi črpanja. Odgovor na vprašanje, ali je mogoče dobiti podatke o emisiji pokajočih zvarov v navzočnosti teh motilnih vplivov, smo lahko dobili le od preizkusa na posodi.

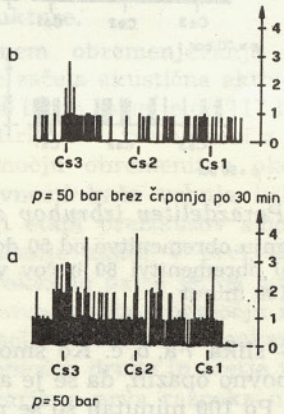
Raziskave trdnosti tlačne posode smo izvedli v več etapah. V prvi etapi preizkusov smo izvedli štiri tlačne obremenitve do tlakov 20, 50, 80 in 100 barov. Po vsaki od prvih treh obremenitev je bila posoda razbremenjena, pri četrti obremenitvi pa se je porušila. Pri tlaku 50 barov smo posodo pustili 12 ur, pri tlaku 80 barov pa 2 uri. Meritve so pokazale, da povzroča črpanje na začetku precejšen šum. Njegova amplituda se je z naraščajočim tlakom manjšala in je bila pri 20 barih le še za približno dvakrat višja od amplitude ozadja. Z naraščajočim tlakom se je nato šum še zmanjševal in zato ni povzročal težav pri merjenju z ojačanjem 40 dB.

Izmerjena zvočna aktivnost posode je v enominutnih intervalih pokazala do tlaka 50 barov le posamezne izbruhe, ki so bili po jakosti zelo šibki saj so v poprečju vsebovali samo nekaj deset sunkov (sl. 5). Lokator je pokazal do 50 dB v okolici razpok za približno trikrat višjo aktivnost od ozadja (sl. 6).

Takoj po izključitvi črpalke nismo opazili zaznavne spremembe v aktivnosti, kar je potrdilo, da je bil vpliv hidravličnih šumov res zanemarljiv.



Sl. 5. *Potek zvočne aktivnosti v odvisnosti od tlačne obremenitve*

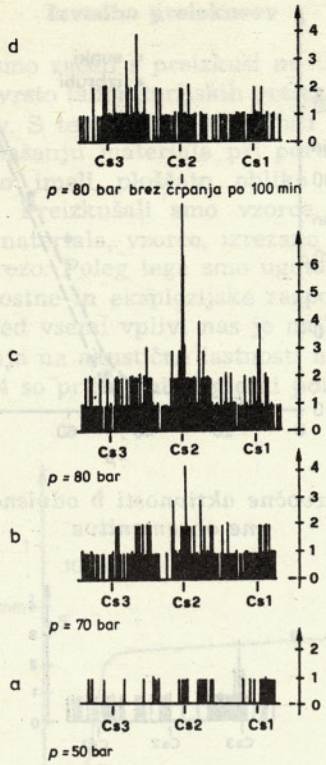


Sl. 6. *Porazdelitev izbruhov zvoka*

a) med črpanjem od 20 do 50 barov
b) v časovnem intervalu 30 minut pri stalni obremenitvi 50 barov

Zvočna aktivnost se je nato ob konstantnem tlaku s časom manjšala in se je po 12 urah zmanjšala pod zaznavno vrednost. Lokator je v začetnem, bolj aktivnem intervalu, ki je trajal približno 20 minut, pokazal največjo aktivnost na tretji zarezi — slika 6 b. Glede na to, da je emisija zvoka po 12 urah praktično prenehala, smo sklepali, da je posoda pri tej obremenitvi stabilna in da se v njej razpoke ne razvijajo.

Pri nadaljnjem obremenjevanju do 80 barov smo opazili hiter porast zvočne aktivnosti cele posode. Poleg povečane pogostosti izbruhov se je povečalo tudi število sunkov v izbruhih. Zaradi tega je pogostost sunkov naraščala hitreje kakor pogostost izbruhov. Poteka obeh aktivnosti sta prikazana na sliki 5. Hkrati s porastom celotne aktivnosti smo opazili tudi porast aktivnosti razpok. Z lokatorjem izmerjene krajevne porazdelitve izbruhov so pokazale v intervalu od 50 do 80 barov precejšen porast števila izbruhov v območju sred-



Sl. 7. *Porazdelitev izbruhov zvoka*
a, b, c) pri dviganju obremenitve od 50 do 80 barov
d) pri stalni obremenitvi 80 barov v časovnem intervalu 100 minut

nje razpoke — slika 7 a, b, c. Ko smo črpanje prekinili, smo ponovno opazili, da se je aktivnost s časom manjšala. Po 100 minutah so se na minuto pojavljali le še posamezni sunki. Lokator je pokazal med umirjanjem ponovno večjo aktivnost tretje razpoke — slika 7 d.

Porast aktivnosti celotne posode, še bolj pa nastanek izrazitega vrha v porazdelitvi izbruhov zvoka sta vzbujala sum, da gre za začetek naraščanja razpok oziroma, da se približujemo kritičnim obremenitvam. Ocena faktorja koncentracije napetosti na osnovi empirično preizkušenih izrazov za plitvo in dolgo razpoko [19] je znašala pri 80 barih

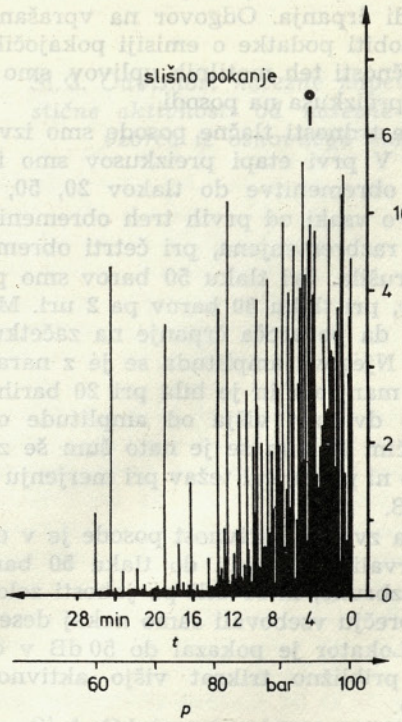
$$K_I = 2{,}15 \text{ kN mm}^{-3/2}$$

kar je dosti pod kritično vrednostjo

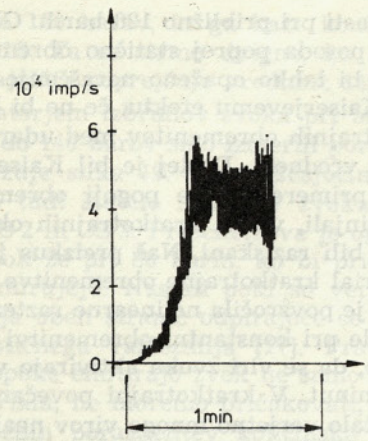
$$K_{IC} = 7{,}70 \text{ kN mm}^{-3/2}$$

ki jo daje izdelovalec jekla. Tudi v primeru, ko bi eksplozijska priprava povzročila neopazno razpoko po vsej debelini stene, bi bila izračunana vrednost K_I še vedno malo pod kritično K_{IC}. To je nakazovala tudi izmerjena skoraj linearna odvisnost odprtine razpoke od obremenitve. Te ocene so nasprotovale našim domnevam. Delno je tem domnevam nasprotovalo tudi umirjanje posode, vendar pa popolno opiranje samo na to opažanje ni moglo biti zanesljivo. Rezultati eksperimentov z lezenjem snovi kažejo, da se snov po povečanju obremenitve na določen stalen nivo najprej delno umiri, nato pa se vzdržuje šibka aktivnost, ki spremlja počasno lezenje in rušenje snovi. Ta aktivnost se zopet poveča, ko naraščanje poškodbe pripelje do kritičnega stanja [20, 21].

Po razbremenitvi posode smo pri ponovnem obremenjevanju do 80 barov opazili približno za velikostni red šibkejšo akustično aktivnost kakor pri prvi obremenitvi. Posnetek na sliki 8 kaže, da se je akustična aktivnost zopet opazno povečala, ko smo dosegli vrednost največje poprejšnje obremenitve. Ta pojav neponovljivosti imenujemo *Kaiserjev efekt*, značilen pa je za večino konstrukcijskih materialov [22]. Ob primerno pripravljenih preizkusih lahko omogoča ugotovitev vrednosti poprejšnje največje obremenitve, pri občasnih pregledih naprav pa, ali je prišlo v času uporabe do resnejših preobremenitev oziroma poškodb [7]. Z nadaljnjim naraščanjem tlaka je nato začela akustična aktivnost hitro rasti in je bila pri 90 barih že približno za dva velikostna reda večja od tiste, ki smo jo opazili pri prvem obremenjevanju do 50 barov. Pri tlaku približno 95 barov se je pojavil v posodi slišen pok. Pri tem je verjetno zaradi tresljaja odpadel eden od senzorjev, ki so bili pritrjeni na steno s posebej za ta namen pripravljenim voskom. Zaradi tega nam ni več uspelo ugotoviti lege izvorov zvoka. Kmalu za pokom se je pri



Sl. 8. *Posnetek akustične aktivnosti pri ponovnem obremenjevanju do 80 barov in več*



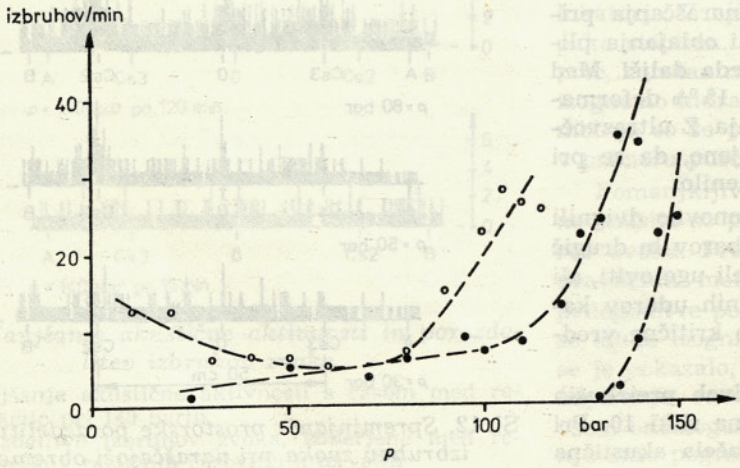
Sl. 9. *Porast zvezne akustične emisije zaradi puščanja počene cevi za črpanje*

približno 100 barih posoda porušila. Lom se je začel na srednji razpoki in se širil v obe smeri vzdolž zvara, se na prečnih zvarih usmeril v osnovni material in se v njem ustavil. Diagram posnete deformacije v odvisnosti od tlaka je pokazal, da se je v intervalu od 85 do 100 barov pojavila neelastična deformacija, ki je znašala približno 10 % elastične. Približno enako oceno smo dobili tudi iz izmerjene odprtine razpoke. Na osnovi teh podatkov in po pregledu lomnih površin smo ocenili, da je bil lom krhek, saj je nastal v območju skoraj elastičnih obremenitev. Očitno je bil posledica nadkritičnih dimenzij razpoke. Pregled drugih dveh razpok je pokazal, da se je zaradi obremenitve povečala tudi razpoka CS 3.

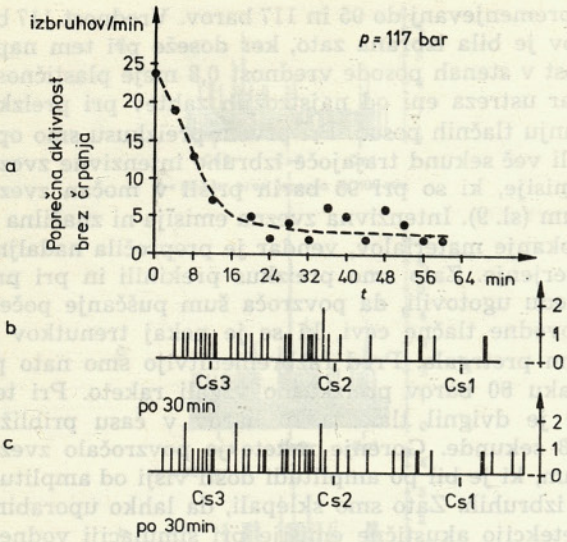
Po analizi celotnega postopka je bilo skupaj z izdelovalci jekla ugotovljeno, da je bila posredovana vrednost za K_{IC} ocenjena previsoko. Preizkusi, izvedeni pri nas, so dali vrednost $K_{IC} = 5{,}50\ \mathrm{kN\ mm^{-3/2}}$ za nataljeno cono zvara. V skladu s tem so bile pripravljene nove razpoke in ponovno zavarjene v posodo.

V drugi etapi preizkusov smo najprej ponovno ugotovili celovitost posode, nato pa opravili dvoje obremenjevanj do 95 in 117 barov. Vrednost 117 barov je bila izbrana zato, ker doseže pri tem napetost v stenah posode vrednost 0,8 meje plastičnosti, kar ustreza eni od najstrožjih zahtev pri preizkušanju tlačnih posod. Pri prvem preizkusu smo opazili več sekund trajajoče izbruhe intenzivne zvezne emisije, ki so pri 95 barih prišli v močan zvezen šum (sl. 9). Intenzivna zvezna emisija ni značilna za pokanje materialov, vendar je preprečila nadaljnje merjenje. Zato smo preizkus prekinili in pri pregledu ugotovili, da povzroča šum puščanje počene dovodne tlačne cevi, ki se je nekaj trenutkov za tem pretrgala. Pred razbremenitvijo smo nato pri tlaku 80 barov preizkusno vžgali raketo. Pri tem se je dvignil tlak za 10 barov v času približno 0,8 sekunde. Gorenje rakete je povzročalo zvezen šum, ki je bil po amplitudi dosti višji od amplitude v izbruhih. Zato smo sklepali, da lahko uporabimo detekcijo akustične emisije pri simulaciji vodnega udara le kot indikator gorenja raket in ne za opis stabilnosti strukture.

Pri ponovnem obremenjevanju z zamenjano tlačno cevjo je začela akustična aktivnost naraščati pri približno 90 barih in se je do 117 barov dvignila za približno štirikrat v primerjavi z aktivnostjo v stabilnem območju obremenitev okoli 30 barov. Posnetek aktivnosti kaže vrhnja krivulja na sliki 10. V drugi etapi preizkusov smo uporabili za 3 dB višje ojačanje kakor v prvi, da bi povečali občutljivost. Pokazalo pa se je, da s tem dvignemo v glavnem le nivo ozadja v območju majhnih obremenitev. Lokacija izvorov je pokazala povišano aktivnost v območju druge in tretje razpoke, medtem ko se zavarjena prva razpoka ni oglašala. Po prenehanju črpanja se je aktivnost celotne posode zmanjšala v času približno 20 minut na nivo ozadja, značilnega za stabilno območje. Izmerjeni časovni potek prikazuje slika 11 a. V intervalu 30 minut smo zaznali le nekaj izbruhov v območje okoli prostih razpok. Kakor prikazujeta sliki 11 b in 11 c, se porazdelitev izbruhov v nadaljnjih 30 minutah skoraj ni spremenila, kar pomeni, da je



Sl. 10. *Potek akustične aktivnosti med obremenjevanjem popravljene tlačne posode*



Sl. 11. *Manjšanje akustične aktivnosti in porazdelitev izbruhov zvoka*

a) Manjšanje akustične aktivnosti s časom pri konstantni obremenitvi 117 barov,
b, c) porazdelitev izbruhov zvoka med relaksacijo v različnih časovnih intervalih pri tlaku 117 barov

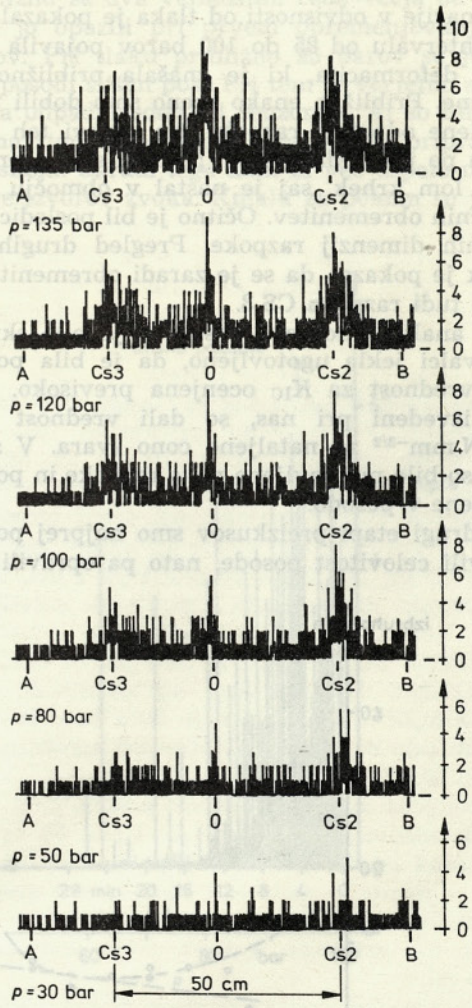
aktivnost razpok praktično zamrla. Med umirjanjem sta bili obe razpoki približno enako aktivni. Pri črpanju je bila izmerjena aktivnost druge razpoke približno za velikostni red nad aktivnostjo tretje. Zato smo sklepali, da so med črpanjem hidravlični šumi povzročali motnjo pri merjenju aktivnosti v območju sredine med senzorjema, kjer je — žal — ležala tudi druga razpoka. Zato smo sklenili pri naslednjih preizkusih namestiti senzorja tako, da sta ležali aktivni razpoki CS 2 in CS 3 zunaj koordinatnega izhodišča.

Iz hitrega pojemanja aktivnosti celotne posode in utišanja razpok smo sklepali, da je celotno mehansko stanje pri tlaku 117 barov stabilno.

V tretji etapi preizkusov smo z vžigom raket v posodi simulirali dva vodna udara. Prvemu do 130 barov je čez 3 sekunde sledil drugi do 140 barov. Tlačna udara sta imela čas naraščanja približno 0,8 s, relaksacijski čas zaradi ohlajanja plinov pa od en do dva velikostna reda daljši. Med vodnima udaroma je bilo približno 15 % deformacije posledica nelinearnega raztezanja. Z ultrazvočnimi metodami je bilo grobo ocenjeno, da se pri tem stanje razpok ni izrazito spremenilo.

V četrti etapi preizkusov smo ponovno dvignili tlak s črpanjem prvič od 0 do 140 barov in drugič od 100 do 150 barov. S tem smo želeli ugotoviti, ali se ni morda v času simulacije vodnih udarov katera od razpok razvila do približno kritične vrednosti.

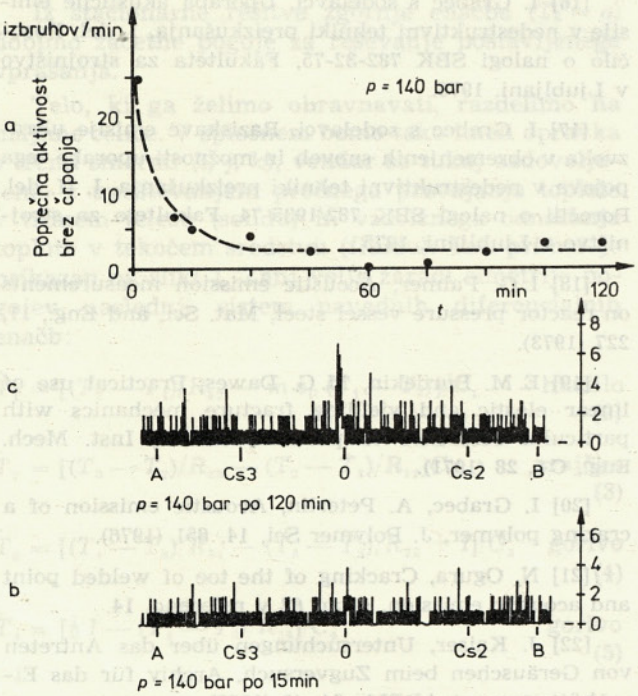
Potek zvočne aktivnosti v teh dveh preizkusih kažeta srednja in krajna krivulja na sliki 10. Pri obremenjevanju do 140 barov je začela akustična aktivnost rasti pri približno 120 barih. Glede na to, da je bila posoda poprej statično obremenjena do 117 barov, bi lahko opaženo naraščanje aktivnosti ustrezalo Kaiserjevemu efektu, če ne bi bilo vmesnih kratkotrajnih obremenitev med udaroma, ki so presegli to vrednost. Doslej je bil Kaiserjev efekt opisan za primere, ko se pogoji obremenjevanja niso spreminjali, vplivi kratkotrajnih obremenitev pa še niso bili raziskani. Naš preizkus je pokazal, da si material kratkotrajne obremenitve ni zapomnil, čeprav je povzročila nelinearne raztezke. Umirjanje posode pri konstantni obremenitvi 117 barov je pokazalo, da se viri zvoka aktivirajo v času približno 20 minut. V kratkotrajni povečani obremenitvi, je ostalo verjetno mnogo virov neaktiviranih, sevali pa so pri ponovni počasni obremenitvi, ko smo presegli mejo najvišje poprejšnje počasne obremenitve. Pravilnost te mogoče razlage bo treba še ugotoviti s preizkusi. Veljavnost Kaiserjevega efekta pri počasnih obremenitvah je lepo razvidna iz poteka akustične aktivnosti pri obremenjevanju



Sl. 12. *Spreminjanje prostorske porazdelitve števila izbruhov zvoka pri naraščajoči obremenitvi*

od 100 do 150 barov, ki ga kaže končna krivulja na sliki 10. Ta se strmo dvigne, ko obremenitev doseže najvišjo poprejšnjo vrednost 140 barov.

Z lokatorjem izbruhov zvoka pri obremenjevanju od 0 do 140 barov smo izmerili porazdelitve, ki jih prikazuje slika 12. Z naraščajočim tlakom je naraščalo tudi število izbruhov zvoka v območju razpok CS 2 in CS 3. Presenetljiva je opazna aktivnost razpok že pri 80 barih, ko bi pričakovali, da razpoke mirujejo. Nastali poki so verjetno posledica trenja obeh stranic odpirajoče se razpoke zaradi elastičnega raztezanja [17]. Prav zato, ker lahko razpoke emitirajo zvok ne samo zaradi trganja materiala, ne moremo pričakovati, da bi lahko iz izmerjenih porazdelitev količinsko ocenili rast razpok. Očitno pa lahko analiza akustične emisije rabi za razporeditev nevarnih področij in za relativno primerjavo aktivnosti defektov. S slike 12 je nadalje razvidna tudi slaba stran enodimenzionalne razporeditve. Pri nadaljnjem preizkušanju smo ugotovili, da je med črpanjem napredovala na dovodni cevi utrujenostna razpoka, ki je bila aktivni emitor zvoka [17]. Bila je enako oddaljena od obeh senzorjev, zato se je njena aktivnost poleg drugih motenj kazala predvsem v naraščanju vrha v razporeditvi okoli koordinate 0. Ta vrh je v našem primeru pomenil motnjo, ki pa bi se ji lahko izognili z uporabo dvodimenzionalnega lokatorja.



Sl. 13. *Manjšanje akustične aktivnosti in porazdelitev izbruhov zvoka*

a) Manjšanje akustične aktivnosti s časom med relaksacijo pri 140 barih,

c, d) porazdelitve izbruhov zvoka, izmerjene med relaksacijo v različnih časovnih intervalih

Pri tlaku 140 barov smo črpanje ustavili in opazovali relaksacijo 2 uri. Zmanjševanje aktivnosti prikazuje slika 13 a. Tudi tokrat je bil relaksacijski čas približno 20 minut. Lokator je v času relaksacije pokazal približno enakomerno ozadje brez opazne aktivnosti razpok (sl. 13 b, c). Posodo smo nato razbremenili do 100 barov in ponovno dvignili tlak, tokrat do 150 barov. Zelo hiter porast aktivnosti v intervalu od 140 do 150 barov (sl. 10) je vzporedno s hitro rastočo nelinearno deformacijo osnovnega materiala nakazoval, da se bližamo meji plastičnosti. Kljub navzočim napakam je posoda s tem zadostila najstrožjemu kriteriju pri preizkušanju trdnosti, zato smo preizkus ustavili. Kritična področja razpok so bila izrezana, raziskave mehanskih in metalurških sprememb na njih pa še tečejo.

Sklepi

Uporaba akustične emisije pri preizkušanju zvarjenih konstrukcij se je pri nas šele začela. Z opisanimi preizkusi smo ugotovili, da je akustična emisija tlačne posode iz zelo trdnega jekla Sumiten 80 P pretežno diskretna. Zvezni šumi so pri tem posledica hidravličnih motenj. Pri prehodu v kritično območje obremenitev se celotna akustična aktivnost poveča približno za dva velikostna reda v primerjavi z aktivnostjo v stabilnem območju obremenitev. Zato lahko rabi za opozorilne namene pri preizkušanju dragih vzorcev. Izmerjeno umirjanje akustične emisije je pokazalo, da je značilni aktivacijski čas za emisijo vira približno dvajset minut, kar se presenetljivo ujema s preizkusno ugotovljenimi predpisi za trajanje preizkusa tlačne naprave. Material si zapomni poprejšnje obremenitve, ki trajajo približno toliko, kolikor znaša aktivacijski čas. Pri ponovnih obremenitvah opazimo zato povečano aktivnost, ko presežemo največjo poprejšnjo, dolgo trajajočo obremenitev. Obremenitve, ki je opravljena v bistveno krajšem času kakor je relaksacijski, si material ne zapomni. Pri oceni aktivnosti napak je v veliko pomoč uporaba lokatorja. Z njim lahko ugotovimo, ali je neka napaka stabilna. Najbolj ugodno je preizkušanje zaprte, konstantno obremenjene posode, ker se s tem izognemo hidravličnim motnjam zaradi črpanja. Te motnje so še posebej izrazite pri nizkih tlakih ali v primeru puščanja posode.

Pomanjkljivosti preizkušanja z analizo akustične emisije so predvsem v neopredeljeni naravi virov zvoka. Preizkusi so pokazali, da se poleg hidravličnih motenj pojavljajo tudi motnje zaradi prilagoditve posode na podporah. Tem motnjam bi se lahko izognili s primernimi podlagami. Nadalje se je pokazalo, da emitirajo razpoke zvok tudi pri odpiranju zaradi elastične ekspanzije, kar predvsem onemogoča količinsko analizo. Pri preizkušanju smo pogrešali zanesljivo kalibracijsko metodo

za oceno energije detektiranih zvočnih izbruhov in za ugotavljanje manjšanja amplitude z razdaljo od vira. Ker narašča s približevanjem h kritičnim obremenitvam tudi amplituda izbruhov, bi bilo primerno analizirati izbruhe tudi po amplitudi. Čeprav narašča pogostost sunkov hitreje kakor pogostost izbruhov, je videti, da je za razlago bolj primerno uporabljati slednjo za popis mikro pokanja strukture.

Nekatere od nakazanih problemov bi lahko rešili, če bi v obdelavo podatkov vključili procesni računalnik. To je tudi eden od ciljev našega prihodnjega dela. Dosti težavneje bi se bilo približati neoporečni razlagi pojava nastanka zvoka. Ta problematika bo ostala verjetno še dolgo časa predmet raziskav [12].

Pri preizkušanju smo precej pogrešali uporabne kriterije za ocenjevanje nevarnosti poškodb oziroma krhkega loma, na osnovi analize akustične emisije. Morda bodo predpisi, ki jih pripravlja ASME delno rešili ta problem. Ne glede na naštete pomanjkljivosti pa so že naše uvodne raziskave pokazale, da lahko analizo akustične emisije s pridom uporabljamo pri preizkušanju trdnosti zvarjenih konstrukcij.

Zahvala

Del opisanih raziskav je bil financiran s sredstvi Sklada Borisa Kidriča. Raziskovalni skupnosti Slovenije se za to najlepše zahvaljujemo. Zahvaljujemo se tudi vsem sodelavcem, predvsem iz Razvojno raziskovalnega inštituta Metalne v Mariboru in Fakultete za strojništvo v Ljubljani, ki so prispevali k uspešni izvedbi preizkusov.

LITERATURA

[1] W. B. Bedesem, J. S. Clarke, Prevention of catastrophic brittle fracture of heavy pressure vessels, ASME, Report 68-PVP-4.

[2] C. E. Hartbower, W. G. Reuter, C. F. Morais, P. P. Crimminis, Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking, ASTM, STP 505, stran 187, Philadelphia, 1971.

[3] G. R. Irwin, Eng. Fr. Mech, EFMEA, 1, 1, (1968).

[4] P. C. Paris, G. C. Sih, Stress analysis of cracks, ASTM, STP 381, 1970.

[5] R. C. McMaster, Nondestructive testing handbook, Ronald Press Comp., New York, 1959.

[6] H. Liebowitz, Fracture, an advanced treatize, Academic Press, New York, 1971.

[7] N. O. Cross, L. L. Loushin, J. L. Thempson, Acoustic emission testing of pressure vessels for petroleum refineries and chemical plants, ASTM, STP, 505, stran 270, Philadelphia, 1971.

[8] A. A. Pollock, Acoustic emission and fracture mechanics, Schallemission, DGM, stran 133, Frankfurt (Main, 1974).

[9] D. L. Parry, Industrial application of acoustic emission analysis technology, ASTM, STP 571, stran 150, Philadelphia, 1974.

[10] H. L. Dunegan, D. O. Harris, C. A. Tatro, Fracture analysis by use of acoustic emission, Eng. Fr. Mech, EFMEA, 1, 105 (1968).

[11] I. G. Palmer, P. T. Heald, The application of acoustic emision measurements to fracture mechanics, Mat. Sci. and Eng. 11, 181 (1973).

[12] Monitoring structural integrity by acoustic emission, urednik J. C. Spanner, ASTM, STP 571, Philadelphia, 1974.

[13] I. Grabec, Akustična emisija, Strojniški vestnik, 21, 3—4 (1975).

[14] Significance of defects in welded structures, urednika T. Kanazawa, A. S. Kobayaski, University of Tokio Press, Tokio, 1974.

[15] Acoustic emission, urednik R. W. Nichols, Applied science publishers, London, 1976.

[16] I. Grabec s sodelavci, Uporaba akustične emisije v nedestruktivni tehniki preizkušanja, I. del, Poročilo o nalogi SBK 782-32-75, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, 1976.

[17] I. Grabec s sodelavci, Raziskave emisije ultrazvoka v obremenjenih snoveh in možnosti uporabe tega pojava v nedestruktivni tehniki preizkušanja, I, II. del, Poročili o nalogi SBK 782/1935-74, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, 1975.

[18] I. G. Palmer, Acoustic emission measurements on reactor pressure vessel steel, Mat. Sci. and Eng., 11, 227 (1973).

[19] E. M. Burdekin, M. G. Dawes, Practical use of linear elastic and yielding fracture mechanics with particular reference to pressure vessels, Inst. Mech. Eng., C 5, 28 (1971).

[20] I. Grabec, A. Peterlin, Acoustic emission of a crazing polymer, J. Polymer Sci, 14, 651 (1976).

[21] N. Ogura, Cracking of the toe of welded point and acoustic emission, stran 62 v referenci 14.

[22] J. Kaiser, Untersuchungen über das Antreten von Geräuschen beim Zugversuch, Archiv für das Eisenhüttenwesen, AREIA, 24, 43 (1953).

Naslov avtorjev: prof. dr. Igor Grabec, Peter Mužič, ing. str., Fakulteta za strojništvo, Ljubljana; Jože Kuder, dipl. ing. str., Vlado Gliha, dipl. ing. fiz., Metalna, Maribor