UDK 534.2 + 539.388.1:669

Utrujanje in akustična emisija

IGOR GRABEC

UVOD

Utrujanje snovi zaradi izmeničnih mehanskih obremenitev je pojav, ki povzroča mnogo preglavic pri načrtovanju mehanskih delov tehniških naprav. Naraščanje utrujenostnih razpok lahko privede do porušitve obremenjenega izdelka že dosti prej, preden izmenična obremenitev doseže statično porušno vrednost. Število vzdržanih obremenitvenih ciklov lahko pri izbrani vrsti izdelkov variira za nekaj redov velikosti, čeprav so okoliščine obremenjevanja enake. Zaradi tega je tudi na osnovi skrbno zbranih eksperimentalnih podatkov težko natančno napovedati vzdržljivost posameznega izdelka v uporabi. Kritične dele mehanskih naprav je zato treba med uporabo občasno pregledovati. Utrujanje povzroča vedno rast razpok, ki jo spremlja le neznatna plastična deformacija [1]. Zaradi tega je samo z vizualnim pregledom vzorca mnogokrat težko odkriti razpoke in je bilo v ta namen razvitih že več metod preizkušanja brez okvare. Vse te preizkusne metode slonijo na odkrivanju sprememb fizikalnih lastnosti snovi, ki jih povzroča nastala razpoka. Najbolj znane so magnetne, električne, penetrantske in ultrazvočne metode [2]. Z magnetnimi in električnimi metodami ugotavljamo anomalije, ki se pojavljajo v porazdelitvi magnetnega polja ali električnega toka zaradi nastale razpoke [2]. Penetrantske metode slonijo na opazovanju sprememb adhezijskih lastnosti površine snovi. Penetrantska snov se pri premazu preizkušanca vpije v razpoko, tako da jo na očiščenem delu pozneje na različne načine opazimo in tako najdemo razpoko. Ultrazvočne metode pa izkoriščajo nastanek anomalij v prepuščenem ali odbitem zvočnem valu, ki ga v preizkušanec emitiramo s posebnim oddajnikom.

Vse omenjene metode so predvsem primerne za ugotavljanje že nastalih razpok makroskopskih dimenzij. Nobena izmed njih pa ni posebno primerna za ugotavljanje razvoja oziroma za določanje mikroskopskih porastov razpok. Zaradi tega je z njimi težko ugotavljati, ali je odkrita razpoka posledica utrujenosti in ali se z obremenjevanjem širi. Naštete metode zato niso splošno uporabne in popolnoma zanesljive. Prav zaradi statične narave znanih metod se še vedno pojavlja potreba po izpopolnitvi eksperimentalne tehnike za dinamično ugotavljanje utrujenosti. Ta potreba je v zadnjih nekaj letih pripeljala do raziskav pojava akustične emisije, ki je posledica naraščanja utrujenostnih razpok [3, 4, 5].

Pojav akustične emisije za detekcijsko tehniko precej obeta. Pri rasti razpok se vedno sprošča zvok, ki nosi informacijo o velikosti in mestu nastanka poškodbe. Uporabne podatke o velikosti in mestu razvijajoče se razpoke lahko dobimo, če s primerno detekcijsko napravo izmerimo jakost in prostorsko porazdelitev zvočnega signala. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da obstaja dobro opredeljiva povezava med hitrostjo rasti razpoke in številom zvočnih sunkov, ki jih seva razpoka na časovno enoto [4, 5]. Zato je z detekcijo akustične emisije mogoče dinamično slediti pojavu utrujanja. Bistvena prednost te metode pred vsemi drugimi je prav v možnosti tekočega opazovanja nastajanja poškodb in v možnosti detekcije mikroskopskih skokov razpok v snovi med utrujanjem vzorca. Poleg tega je metoda neodvisna od električnih oziroma magnetnih lastnosti vzorca. Razpoke, ki ne emitirajo zvoka, so večinoma nenevarne in se jih s to metodo tudi ne da odkriti.

Kakor druge metode odkrivanja razpok pa tudi detekcija akustične emisije ni univerzalna. Težave pri njeni uporabi mnogokrat povzroča emisija zvoka zaradi pojavov, kakršni so trenje, udarci, hidravlični šumi itd. Zvok zaradi teh pojavov lahko v nekaterih primerih popolnoma zakrije signal iz utrujenostne razpoke [4, 6] in tako prepreči opazovanje utrujenosti.

Pri pregledu vzorcev, porušenih zaradi utrujenostnih razpok, lahko iz hrapavosti površine prelomljene snovi običajno sklepamo, kako je prelom potekal [1]. V večini primerov lahko na lomni površini razlikujemo troje različnih področij. Na prvem, majhnem področju okoli izvora razpoke je površina gladka in kaže polkrožne črte. To je področje, od koder se je začela razpoka širiti. Navadno je v območju povečanih koncentracij napetosti. Gladka površina kaže, da je razpoka prek tega področja le počasi napredovala. Drugo področje je bolj hrapavo in kaže pod mikroskopom bolj izrazite skoke razpoke. V tem področju razpoka sorazmerno hitro napreduje, ker ustrezni prerez prenaša glavni del obremenitve med obratovanjem. Zaradi tega tudi drugo področje običajno zavzema večji del prereza vzorca. Zadnje področje lomne površine pa je izrazito hrapavo in kaže kristalno prelomno strukturo pri krhkem in vlaknasto pri žilavem prelomu vzorca. Ta del ustreza prerezu, ki ni bil več zmožen prenašati zadnjih obremenitev in se je porušil podobno kakor pri statični obremenitvi.

Z znanimi detekcijskimi metodami doslej ni bilo mogoče ugotoviti, na kateri stopnji razvoja je razpoka, četudi smo jo odkrili. Namen našega članka je pokazati, da lahko iz poteka akustične aktivnosti vzorca sklepamo prav o tem, na kateri stopnji je napredovanje razpoke. S tem pridemo do uporabnega podatka, ki ga z drugimi metodami ne moremo dobiti. Tej možnosti doslej v preostalih raziskavah ni bila posvečena posebna pozornost, ima

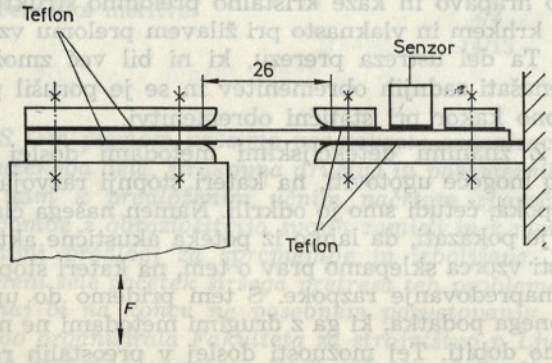
pa lahko praktičen pomen pri ocenjevanju kritičnosti nastalih razpok oziroma utrujenosti preizkušanca.

Za uporabo je bistveno pomembno odkriti, kdaj začne utrujenostna razpoka iz zametka hitro napredovati, ter kdaj postane prerez prešibak za prenos maksimalne obremenitve. Ustrezni števili obremenitvenih ciklov pomenita poleg števila vseh vzdržanih ciklov dopolnilno oceno o vzdržljivosti vzorca, zato je določitvi teh števil v članku namenjena posebna pozornost.

Raziskave poteka akustične emisije v odvisnosti od utrujanja so bile narejene z vzorci iz različnih snovi in v večini primerov je bilo ugotovljeno kakovostno podobno obnašanje, v našem članku pa so prikazani le nekateri značilni rezultati preizkusov na preizkušancih preprostih oblik.

IZVEDBA PREIZKUSOV

Z namenom, da bi eksperimentalno ureditev čimbolj poenostavili in dobili le najbolj značilne lastnosti akustične emisije pri utrujanju, smo naredili preizkuse z upogibnim utrujanjem ploščatih vzorcev. Slika 1 prikazuje način vpetja vzorca in senzorja. Spolirane vzorce s širino 12 mm, debelino 2 mm in dolžino 130 mm smo na obeh krajih ovili s teflonsko folijo in jih vpeli v spolirane prižeme vibratorja. S tem smo se izognili šumom, ki se zelo radi pojavljajo pri trenju vzorca na robovih prižem. Kot vir sile smo uporabili elektrodinamično vzbujani vibrator Brüel & Kjaer, model 4801. Za to vrsto vibratorja smo se odločili zato, ker je vibrirna mizica elastično vpeta, sila pa povzročena z magnetnim poljem, tako da zaradi vibriranja mizice ni trenja med mehanskimi deli. S takšno eksperimentalno ureditvijo smo uspeli tako pripraviti preizkus, da nam vibriranje ni povzročilo akustičnega signala, ki bi bistveno presegel lastni šum detekcijske naprave. Med utrujanjem smo držali stalno vrednost amplitude povesa. Utrujali smo z izmeničnim sinusnim upogibanjem glede na ničelno lego. Frekvenca nihanja je bila v vseh navedenih primerih 50 Hz. Senzor emitiranega zvoka smo zvočno sklopili s preizkušancem s pomočjo sklopitvene ma-

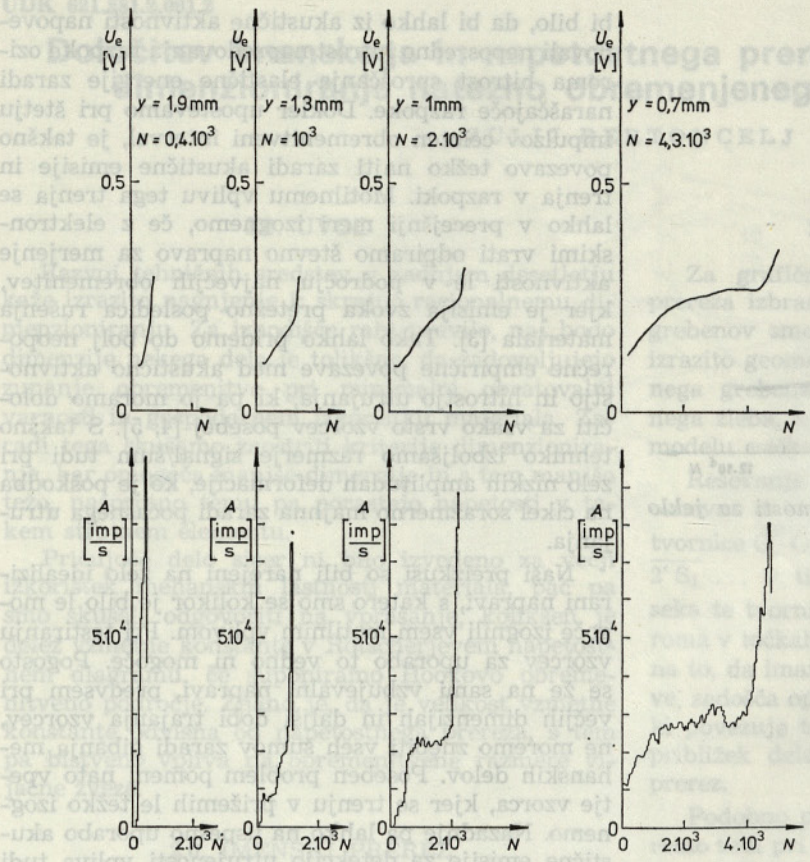


Sl. 1. *Vpetje preizkušanca med utrujanjem*

sti z visoko viskoznostjo. Uporabili smo doma izdelani piezoelektrični senzor s centralno frekvenco 200 Hz. Signal iz senzorja smo najprej močnostno in širokopasovno ojačili za 90 db. Nadalje smo merili efektivno vrednost njegove amplitude ter število sunkov prek praga 1 V v časovni enoti. Signal smo tudi opazovali na osciloskopu, ultrazvočne sunke pa smo spremenili v slišne poke. Podrobneje sta detekcija in obdelava zvočnega signala opisani v poprejšnjih publikacijah [6, 7].

Preizkuse smo opravili na vzorcih jekla, medi, zlitine svinca in antimona ter Woodove zlitine. Informativno smo preizkusili tudi nekaj vzorcev zlitin aluminija ter steklastih plastičnih mas. Vzorce smo utrujali pri temperaturi okolja v laboratoriju okoli 20 °C brez kontrolirane vlažnosti. Razvoj in napredovanje razpok smo opazovali s povečevalnikom, v nekaterih primerih, ko razpoke niso bile vidne, pa smo naredili tudi nekaj metalografskih posnetkov.

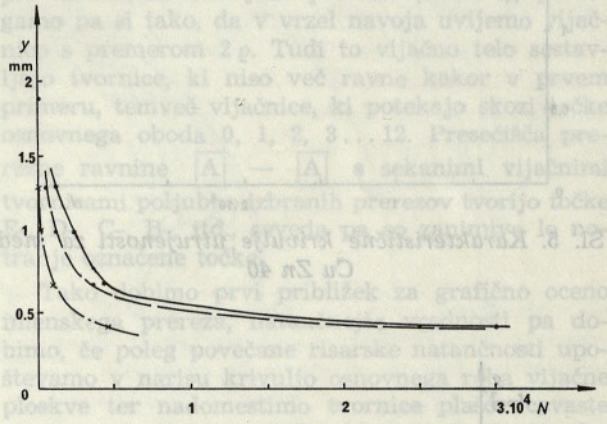
Med utrujanjem smo registrirali efektivno amplitudo in število sunkov na časovno enoto oziroma akustično aktivnost v odvisnosti od števila obremenitvenih ciklov. Pri vseh materialih smo posneli kakovostno podobne diagrame odvisnosti akustične aktivnosti od števila obremenitev. Nekaj izrazitih primerov za zlitino 70 % Pb, 30 % Sb je na sliki 2. Takoj po začetku preizkusa je zvočni signal le poredkoma presegal lastni šum instrumentarija. Krivulja akustične aktivnosti je v tem področju praktično na abscisi, krivulja efektivne vrednosti ultrazvočnega signala pa kaže lastni šum instrumentarija. Z večanjem števila obremenitvenih ciklov je nato začel vzorec prispevati k detektiranemu zvoku. Ultrazvočni signal je v tem območju pokazal serijo naključnih izbruhov oziroma pokov, ki so se pojavljali pretežno v času največjih deformacij. Kmalu za tem porastom akustične emisije smo običajno lahko s povečevalnikom opazili zametke razpok. Ko so le te malo narasle, se je zvočna aktivnost ustalila, povečani zvočni signal pa smo tedaj opazili večinoma tudi pri prehodu vzorca skozi ničelno lego. Ustrezni del zvočnega signala je verjetno posledica trenja površin v razpoki. To domnevo smo potrdili s tem, da smo razpoko zalili z oljem, pri čemer se je akustična emisija delno zmanjšala. Akustična aktivnost je po nastanku razpoke ostajala potem dobršen del dobe trajanja vzorca približno na istem nivoju. V zadnjem delu dobe trajanja pa se je aktivnost vedno povečala, čemur je sledila porušitev vzorca. Manjše variacije kakor akustična aktivnost, kaže krivulja efektivne napetosti signala. To pomeni, da je zvočni signal, ki spremlja utrujanje pretežno sunkovite narave, kar ustreza pokanju pri lomljenju materiala. Vendar pa tudi potek efektivne amplitude kaže, da spremlja najprej porast, dalje vzdrževanje narasle vrednosti in nato ponoven porast akustične emisije.



Sl. 2. *Efektivna vrednost detektiranega signala U_e in akustična aktivnost A v odvisnosti od števila obremenitev N ter povesa y za zlitino 70 % Pb in 30 % Sb*

Ponovljeni preizkusi na enakih vzorcih s povečano ali zmanjšano amplitudo upogiba so pokazali, da se na splošno s povečanjem deformacije zmanjšata števili ciklov, pri katerih opazimo porast akustične emisije. To ustreza zmanjšanju dobe trajanja vzorca pri večanju amplitude obremenitve. Vsa tri števila ciklov, ustrezajoča prvemu in drugemu porastu akustične emisije ter porušitvi, smo prikazali v odvisnosti od amplitude deformacije v istem diagramu, ki ga prikazuje slika 3. Tako smo dobili poleg že znane Wöhlerjeve krivulje, ki kaže vzdržljivost vzorca proti ciklični obremenitvi, še dve novi. Prva krivulja prikazuje vzdržljivost vzorca proti nastanku razpoke, druga pa vzdržljivost razpokanega vzorca proti nastanku nestabilne makroskopske konfiguracije. Prva krivulja je pri večini materialov le malo odmaknjena od ordinatne osi, medtem ko je druga skoraj v skladu z Wöhlerjevo krivuljo. To kaže, da se med utrujanjem večina časa porabi za ustvarjanje nestabilnega prereza zaradi napredujoče razpoke.

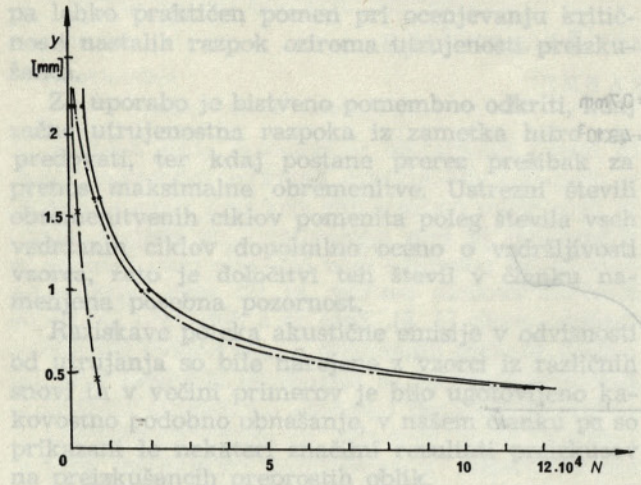
Podobne diagrame kakor za zlitino 70 % Pb, 30 % Sb smo posneli tudi za preostale preizkušane materiale ter iz njih dobili krivulje, ki jih kažejo slike 4, 5 in 6 [8]. Nekaj preglednih testov nam je nadalje pokazalo, da lahko dobimo podobne diagrame tudi za razne aluminijeve zlitine ter steklaste plastične mase.



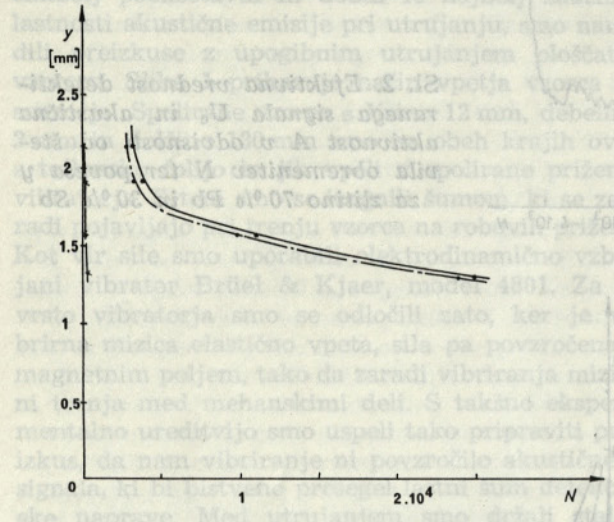
Sl. 3. *Wöhlerjeva krivulja ter krivulji nastanka razpoke in razvoja nestabilnega prereza za zlitino 70 % Pb in 30 % Sb*

SKLEPI

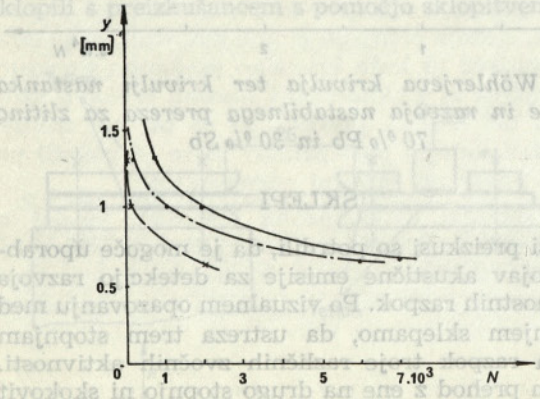
Naši preizkusi so potrdili, da je mogoče uporabljati pojav akustične emisije za detekcijo razvoja utrujenostnih razpok. Po vizualnem opazovanju med utrujanjem sklepamo, da ustreza trem stopnjam razvoja razpok troje različnih zvočnih aktivnosti. Pri tem prehod z ene na drugo stopnjo ni skokovit temveč zvezen, toda dovolj strm, da lahko z njim opredelimo karakteristično število ciklov. Zaželeno



Sl. 4. *Karakteristične krivulje utrujenosti za jeklo Č. 0245*



Sl. 5. *Karakteristične krivulje utrujenosti za med Cu Zn 40*



Sl. 6. *Karakteristične krivulje utrujenosti za Woodovo zlitino*

bi bilo, da bi lahko iz akustične aktivnosti napovedovali neposredno hitrost napredovanja razpoke oziroma hitrost sproščanja elastične energije zaradi naraščajoče razpoke. Dokler upoštevamo pri štetju impulzov celoten obremenitveni interval, je takšno povezavo težko najti zaradi akustične emisije in trenja v razpoki. Motilnemu vplivu tega trenja se lahko v precejšnji meri izognemo, če z elektronskimi vrati odpiramo števno napravo za merjenje aktivnosti le v področju največjih obremenitev, kjer je emisija zvoka pretežno posledica rušenja materiala [3]. Tako lahko pridemo do bolj neoporečne empirične povezave med akustično aktivnostjo in hitrostjo utrujanja, ki pa jo moramo določiti za vsako vrsto vzorcev posebej [4, 5]. S takšno tehniko izboljšamo razmerje signal/šum tudi pri zelo nizkih amplitudah deformacije, ko je poškodba na cikel sorazmerno majhna zaradi počasnega utrujanja.

Naši preizkusi so bili narejeni na zelo idealizirani napravi, s katero smo se kolikor je bilo le mogoče izognili vsem motilnim vplivom. Pri testiranju vzorcev za uporabo to vedno ni mogoče. Pogosto se že na sami vzbujevalni napravi, predvsem pri večjih dimenzijah in daljši dobi trajanja vzorcev, ne moremo znebiti vseh šumov zaradi gibanja mehanskih delov. Poseben problem pomeni nato vpetje vzorca, kjer se trenju v prižemih le težko izognemo. Nazadnje pa lahko na uspešno uporabo akustične emisije za detekcijo utrujenosti vpliva tudi oblika vzorca. Če je vzorec sestavljen iz več delov, so površine spojev navadno močni emitorji zvoka, ki lahko po jakosti dostikrat preseže signal zaradi utrujenosti. Podobne in še hujše težave pa se pojavljajo pri uporabi akustične emisije za detekcijo utrujenosti delov v uporabi, kjer tudi okolje vedno prispeva svoj motilni delež. Zaradi tega je uporaba akustične emisije pri detekciji utrujenosti za zdaj še pretežno v fazi laboratorijskih raziskav.

LITERATURA

[1] P. G. Forrest, Fatigue of Metals, Pergamon Press, Oxford, 1966.

[2] R. C. McMaster, Nondestructive Testing Handbook. The Ronald Press Comp., New York, 1959.

[3] S. Smith, T. M. Morton, Exp. Mech, **13**, 193 (1973).

[4] T. M. Morton, S. Smith, R. M. Harrington, Exp. Mech, **14**, 208 (1974).

[5] D. O. Harris, H. L. Dunegan, Exp. Mech, **14**, 71 (1974).

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

[7] I. Grabec s sodelavci, Poročilo o nalogi: Raziskave emisije ultrazvoka v obremenjenih snoveh in možnosti uporabe tega pojava v nedestruktivni tehniki preizkušanja, II. del., — Poročilo po pogodbi SBK 2-782/1935, Fakulteta za strojništvo, 1975.

[8] J. Čekada, Diplomsko delo, št. 2313, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 1975.

Avtorjev naslov: doc. dr. Igor Grabec
Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani