

# Akustična emisija — nova tehnika preiskave materiala brez porušitve in njena uporaba pri zasledovanju faznih transformacij v jeklu

Mirko Pikalo

## 1. UVOD

Zadnjih nekaj let zasledimo v strokovni literaturi s področja neporušnih preiskav vse več člankov o akustični emisiji, kar kaže na hiter razvoj te tehnike in njeno uveljavljanje v industriji. V železarni Ravne smo tehniko akustične emisije začeli uvajati v začetku leta 1975.

Akustična emisija (AE) je ena najnovejših tehnik preiskave materiala brez porušitve in dopolnjuje klasične metode na tem področju. Kot pojav je akustična emisija poznana že dolgo, na primer v seizmologiji, toda prve meritve na tehnično pomembnih materialih je naredil nemški raziskovalec J. Kaiser<sup>1</sup> leta 1950. Iz Evrope se je tehnika pozneje preselila v ZDA, kjer je po letu 1960 doživela hiter razvoj in vse več uporabe v industriji.

## 2. Pojav akustične emisije

Akustična emisija je izraz, ki ga uporabljamo za popis zvočnih valov, ki jih v obliki kratkih impulzov sevajo trdna telesa. Ponavadi je AE posledica mikrodinamičnih procesov med deformacijo snovi, ko se del nakopičene elastične energije sunkovito pretvarja v zvočno. Več primerov akustične emisije je slišnih. Domač je primer pokanja lesa pri lomu. Slišno akustično emisijo poznamo tudi v metalurški praksi, ko nastajajo napetostne razpoke na površini izdelkov ali ko z njih odpada škaja.

Večina primerov akustične emisije pa je neslišna za človeško uho, ker so impulzi energijsko zelo šibki, po frekvenčnem sestavu pa segajo že v ultrazvočno področje. Frekvenčno območje AE je v frekvenčnem pasu približno od 50 kHz do 5 MHz. Pod frekvenco 50 kHz je težko meriti, ker so v tem frekvenčnem področju motnje iz okolice prevelike, nad 5 MHz pa je dušenje zvoka v materialu že tako močno, da je meritev nemogoča.

Za detekcijo AE uporabljamo piezoelektrične senzorce, ki jih namestimo na preizkušanece. Ti senzorcji delujejo kot pretvorniki zvočnih nihanj v električna. V raziskavah na področju AE za senzorce uporabljamo piezoelektrično keramiko PZT (svinčev cirkonat titanat keramika). Ploščica iz te keramike se odlikuje predvsem po veliki občutljivosti v resonanci in veliki kapacitivnosti. Električni signal, ki ga da senzor, ojačimo, filtriramo, primerno analiziramo in registriramo.

Akustično emisijo lahko pričakujemo samo pri trdnih materialih. Najlepše rezultate dajejo polikristalini materiali in kompoziti. Iz literature navajam nekaj materialov, pri katerih so merili AE: jeklo, aluminij, berilij, titanove zlitine, fiber glas, salonit, keramika, kamen, les in razni monokristali. Največ eksperimentov AE je bilo narejenih na jeklu. V večini primerov so študirali AE, ki se pojavi pri plastični deformaciji. Med nateznim preizkusom vzorec jekla začne oddajati zvok še v trenutku, ko dosežemo mejo plastičnosti. Tehnično pomemben je pri tej vrsti eksperimentov Kaiserjev efekt<sup>2</sup>. Pri ponovni obremenitvi vzorec začne oddajati zvok še v trenutku, ko dosežemo predhodno maksimalno obremenitev. Drugače povedano, material si zapomni, do kod je bil obremenjen. Kaiserjev efekt nudi možnost določitve maksimalne obremenitve nekega strojnega dela, ki je med pogonom nedostopen za meritve.

Skoraj največ pa se v svetu ukvarjajo z AE pri nastajanju in širjenju razpok v jeklu. S klasičnimi metodami, kot so ultrazvok, stresano magnetno polje, vrtnični tokovi

in penetranti, odkrijemo razpoko potem, ko je že nastala. AE pa nam nudi možnost, da razpoko odkrijemo med nastankom, saj se sama izdaja z emitiranjem zvoka. S pomočjo triangulacije pa je mogoče določiti tudi koordinate izvora. Na tak način testirajo tlačne posode. Na posodo namestijo večje število senzorjev, potem pa jo obremenijo s hidrostatičnim pritiskom nad delovni pritisk. Če ima posoda razpoke, se med obremenitvijo povečujejo in izdajajo z zvokom. S pomočjo računalnika določijo mesto razpok. Verjetno je, da bo akustična emisija prav na tem področju požela največje uspehe.

Procesov, pri katerih lahko nastaja AE, je več in so navedeni v tabeli 1.

Tabela 1 — Procesi, pri katerih nastaja AE

- dvojnjenje
- rekristalizacija
- fazne transformacije
- plastična deformacija
- nastanek in napredovanje razpok
- vodikova krhkost (kosmičenje)
- napetostna korozija
- utrujanje materiala
- lezenje materiala
- trganje vlaken v matici pri kompozitih

V vseh primerih ni mogoče zanesljivo meriti AE. Velikokrat je emisija tako šibka, da nastali električni signal senzorja ne presega šuma ojačevalnikov ali pa so impulzi tako redki, da jih ni mogoče ločiti od ozadja, ki je zmeraj prisotno. Najboljši ojačevalci imajo 10  $\mu$ V lastnega šuma, za meritev pa zahtevamo signal, ki je dvakrat večji. V primeru redkih impulzov si pomagamo z diskriminacijo impulzov po kraju nastanka. Na intenzivnost AE vplivajo različni faktorji, ki so navedeni v tabeli 2.

Tabela 2 — Faktorji, ki vplivajo na intenzivnost AE

močna AE	šibka AE
velika trdnost	majhna trdnost
krhki materiali	duktilni materiali
anizotropnost	izotropnost
nehomogenost	homogenost
velika hitrost deformacije	majhna hitrost deformacije
nizka temperatura	visoka temperatura
grobno zrno	drobno zrno
martenzitne transformacije	difuzijske transformacije
lita struktura	

V tabeli 3 so navedene še potencialne aplikacije AE v bazičnih raziskavah in industriji.

Tabela 3 — Potencialne aplikacije AE

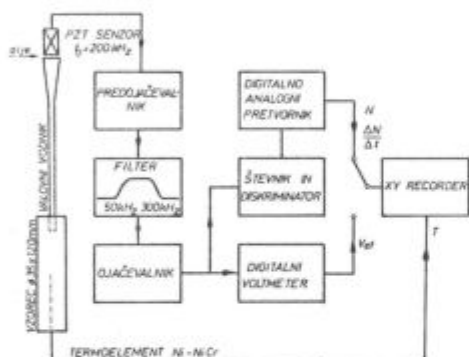
- študij plastične deformacije
- določanje maksimalnih obremenitev strojnih delov s pomočjo Kaiserjevega efekta
- študij faznih transformacij
- študij nastajanja in širjenja razpok
- študij utrujanja in lezenja materiala
- študij napetostne korozije
- študij vodikove krhkosti (kosmičenja)
- testiranje in kontrola obremenjenih struktur v strojništvu (iskanje razpok)
- neprekinjeno nadzorovanje obremenjenih strojnih delov
- kontrola varov

Mirko Pikalo je diplomiran fizik in vodja oddelka za razvoja kontrole kakovosti v železarni Ravne

### 3. Akustična emisija pri faznih premenah v jeklu

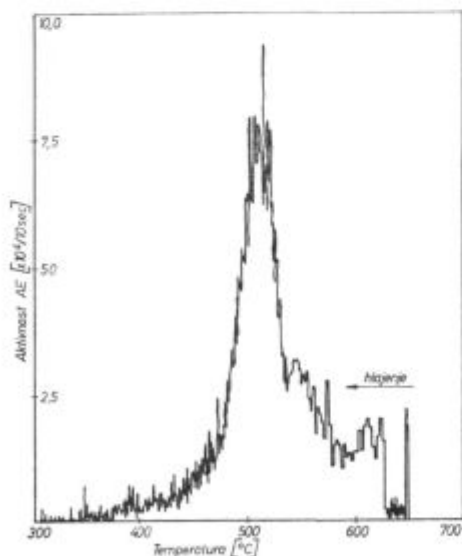
V železarni Ravne smo začeli z eksperimenti akustične emisije pri faznih premenah v orodnih jeklih. Pri preizkusih smo uporabili instrumentarij za detekcijo, analizo in registracijo AE, ki je prikazan na sl. 1. Za eksperiment smo izbrali vzorce jekel C 4733, C 4751 in C 5743, ki so kaljiva na zraku. Vzorce smo segreli na temperaturo avstenitizacije in jih na tej temperaturi ogrevali različno dolgo. Da smo se ognili škaji, smo jih segrevali v zaščitni atmosferi argona. Vzorce smo nato ohlajali v zaščitni cevi s pretokom argona do temperature 600°C, potem pa do sobne temperature na zraku. Pri temperaturi 600°C smo začeli z meritvijo AE. Zaradi visoke temperature, ki uniči senzor, smo akustični sklop med vzorcem in senzorjem ustvarili z valovnim vodnikom iz avstenitnega jekla. Resonančna frekvenca senzorja je 200 kHz, kvaliteta pa 40. Občutljivost senzorja v resonanci je velika, detektiramo lahko še

zvočni val z amplitudo pritiska  $p_0 = 10^{-3} \frac{N}{m^2}$ , kar ustreza relativnim premikom  $\frac{\Delta s}{s_0} = 10^{-14}$ . Pri takem pritisku je električni signal senzorja 20 μV, šum ojačevalca pa 10 μV preračunano na njegov vhod. Ojačani signal smo vodili preko pasovnega filtra, ki je prepuščal signal, v frekvenč-



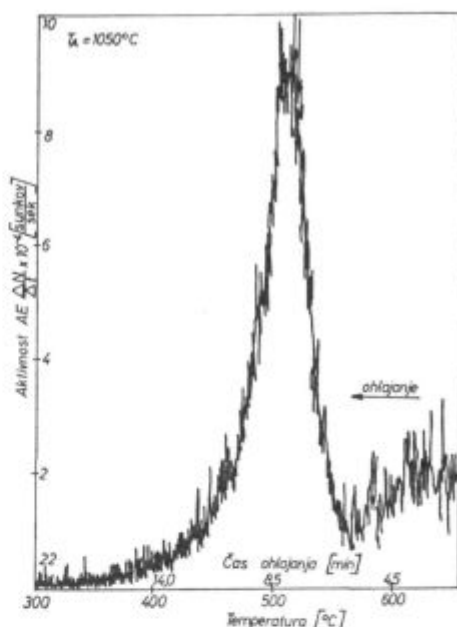
Slika 1

Shema naprave za detekcijo in analizo AE  
Block diagram of instrumentation for detection and analysis of AE



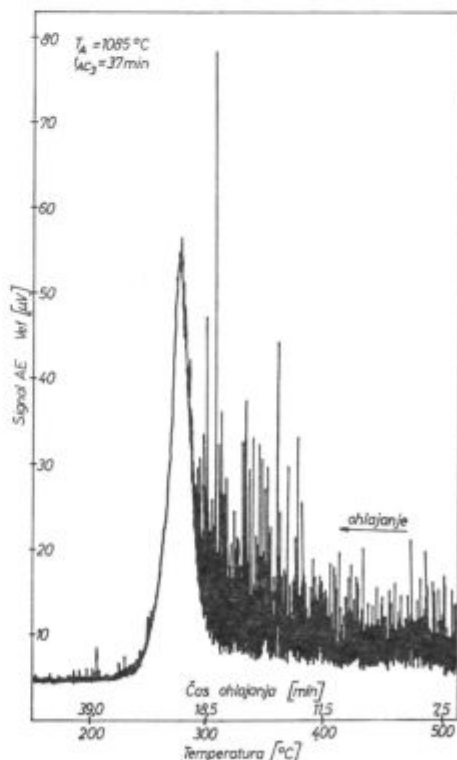
Slika 2

Temperaturna odvisnost aktivnosti AE pri bainitni premeni (vzorec št. 1)  
Temperature dependence of AE activity for bainitic transformation (specimen no. 1)



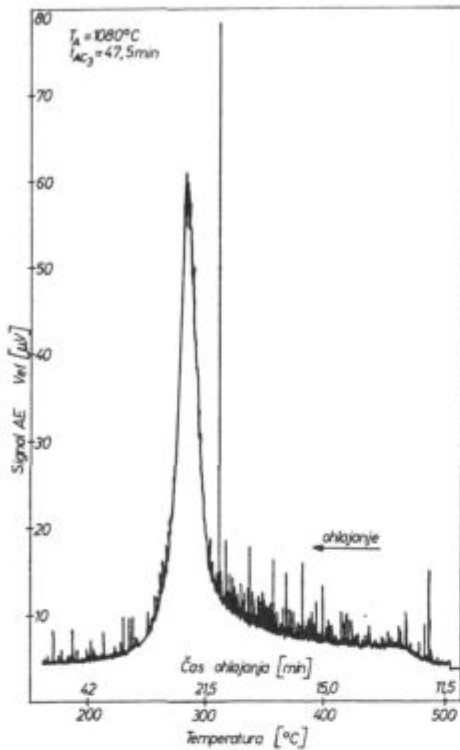
Slika 3

Temperaturna odvisnost aktivnosti AE pri bainitni premeni (vzorec št. 2)  
Temperature dependence of AE activity for bainitic transformation (specimen no. 2)



Slika 4

Temperaturna odvisnost efektivne vrednosti signala AE pri martenzitni transformaciji (vzorec št. 3). Vzorec je imel zelo aktivno škajo  
Temperature dependence of RMS value of the AE signal for martensitic transformation (specimen no. 3). The specimen had very active oxide film.



Slika 5

Temperaturna odvisnost efektivne vrednosti signala AE pri martenzitivni transformaciji (vzorec št. 4). Tik pred premeno se pojavi močan sunek, kot napoved premene.

Temperature dependance of RMS value of the AE signal for martensitic transformation (specimen no. 4). Just before the transformation begins, a high amplitude burst of AE occurs.

nem pasu 100 kHz — 300 kHz. Strmina filtra je 24 dB na oktavo. Filtrirani signal smo še enkrat ojačali, tako da je skupno ojačanje signala  $10^4$ – $10^5$  krat.

Akustična emisija pri faznih premenah je lahko diskretna ali pa zvezna. V prvem primeru vzorec oddaja posamezne zvočne izbruhe. V drugem pa vzorec stalno oddaja zvok, ker so izbruhi tako pogosti, da se časovno prekrivajo. Vrsti emisije smo priredili tudi tehniko analize signala. V primeru diskretne emisije uporabimo ring-down tehniko. Visokofrekvenčne nedemodulirane impulze vodimo na števnik preko amplitudnega diskriminatorja z nastavljenim pragom. Števnik prešteje tako samo tiste nihaje v impulzu, ki presežejo prag diskriminatorja. Prag postavimo na dvakratno vrednost šuma. S tem izločimo šum in priredimo močnejšim impulzom več sunkov kot šibkejšim. Število sunkov smo merili z digitalnim števcem, s pomočjo digitalnega analognega pretvornika pa smo jih pretvorili v ustrezno

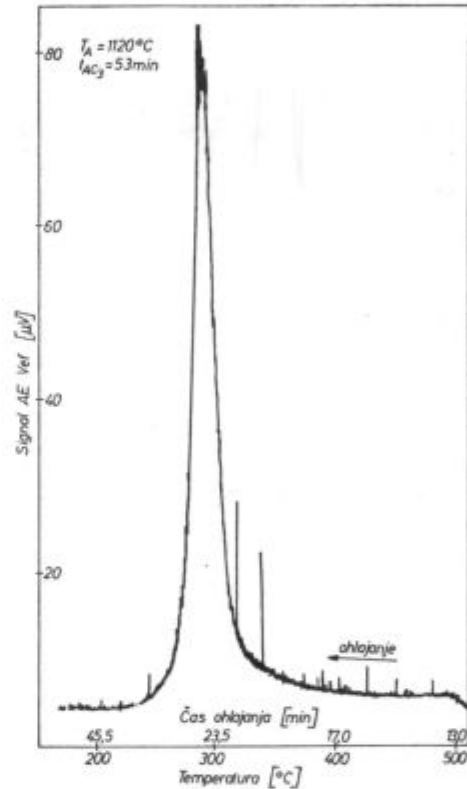
Tabela 4

St. vzorca (slike)	Vrsta jekla	Temp. avsten. [°C]	Čas nad premeno AC, [min]	Zaščit. atmosfera	Vrsta premene pri ohl. na zraku	Vrsta akustič. emisije
1 (2)	Č 4733/VCMo 140	—	—	brez	bainit	pos. izbruhi
2 (3)	C5743/TMCN2	1050	—	brez	bainit	pos. izbruhi
3 (4)	Č 4751/UtopMol	1085	37	brez	martenzitiv	zvezna
4 (5)	Č 4751/UtopMol	1080	47	dušik	martenzitiv	zvezna
5 (6)	Č 4751/UtopMol	1120	53	argon	martenzitiv	zvezna
6 (7)	Č 4751/UtopMol	1065	59	argon	martenzitiv	zvezna

napetost. Registriramo lahko celotno število sunkov  $N$ , tako da vse sunke sproti seštevamo, ali pa aktivnost  $\frac{dN}{dt}$

tako da merimo število sunkov v enakomernih, zaporednih časovnih intervalih. Kadar so izbruhi AE tako pogosti, da je signal praktično že zvezen, je bolje meriti njegovo efektivno vrednost. V našem primeru smo merili efektivno vrednost signala s pomočjo digitalnega voltmetra, katerega analogni izhod smo vodili direktno na x-y recorder.

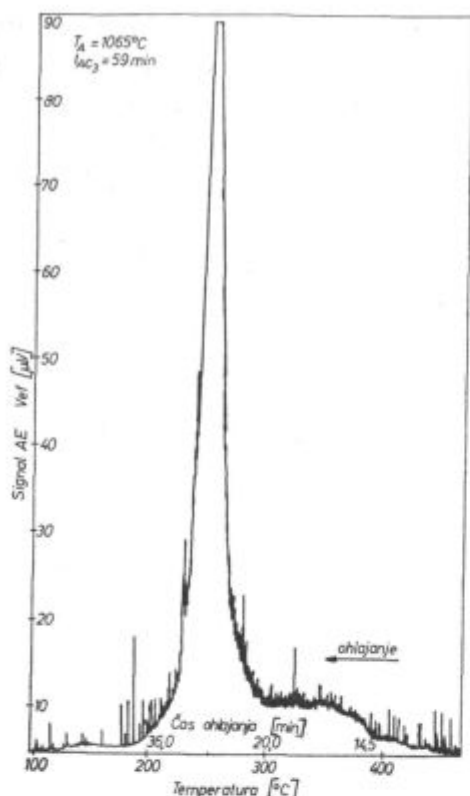
Pri eksperimentih smo uspeli registrirati AE pri bainitnih in martenzitivnih transformacijah podhlajenega avstena. Za ti dve transformaciji je značilna brezdifuzijska pretvorba, ki poteka sunkovito, zato smo tu akustično emisijo tudi pričakovali. Med perlitno-feritno transformacijo ni pričakovati emisije, saj je ta transformacija tipično difuzijska. Zanimivo pa je dejstvo, da dobimo pri bainitni



Slika 6

Temperaturna odvisnost efektivne vrednosti signala AE pri martenzitivni transformaciji (vzorec št. 5). Vzorec je bil segret v zaščitni atmosferi argona.

Temperature dependance of RMS value of the AE signal for martensitic transformation (specimen no. 5). The specimen was heated in protective atmosphere.



Slika 7

Temperaturna odvisnost efektivne vrednosti signala AE pri martenzitni premeni (vzorec št. 6)

Temperature dependence of RMS value of the AE signal for martensitic transformation (specimen no. 6)

transformaciji emisijo v obliki posameznih, dobro opredeljenih in močnih impulzov, medtem ko je pri martenzitnih transformacijah signal emisije zvezen in šibak. Te ugotovitve bomo preverili v nadaljnjih preizkusih na manjših vzorcih in različnih vrstah jekla.

V tabeli 4 so urejeni rezultati naših meritev, na slikah od 2 do 7 pa je prikazana registrirana temperaturna odvisnost akustične aktivnosti, oziroma efektivne vrednosti signala. Iz slik 2 do 7 je razvidno, da je možno dokaj zanesljivo ugotoviti začetek in konec transformacije.

#### 4. ZAKLJUČEK

Prihodnost AE kot nove tehnike preizkušanja materiala brez porušitve je predvsem na področju odkrivanja razpok, ki nastajajo in se širijo. Tehnično pomemben je tudi Kaiserjev efekt, s pomočjo katerega je mogoče ugotavljati maksimalne obremenitve materiala. Hitro se tehnika uveljavlja tudi pri kontroli varov. Naši uvodni preizkusi pa so pokazali, da je akustična emisija občutljiv indikator bainitnih in martenzitnih premen v jeklu. Tehnično pomembno pa je, da detekcija AE pri faznih premenah ne zahteva vzorca lepe oblike, kot na primer dilatometrijski preizkus. Tako je mogoče tehniko AE uporabiti tudi v proizvodnih obratih, če obstajajo potrebe po ugotavljanju in zasledovanju faznih premen.

#### Literatura

1. J. Kaiser, Untersuchungen über das auftreten Geräuschen beim Zugversuch, Archiv für das Eisenhüttenwesen 24 (1953) 43.
2. I. Grabec, Akustična emisija, Strojniški vestnik, Letnik 21, št. 3-4, 1975.