

Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. Verő Balázs professzornak a TEM-felvételek értelmezésében nyújtott segítségével. A transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatok az MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében készültek.

Irodalom

[1] B. Fekete, P. Bereczki, P. Trampus: Low cycle fatigue behavior of VVER-440 reactor pressure vessel

steels at isothermal condition, Materials Science Forum. 2014. (megjelenés alatt)

[2] L. F. Coffin: Fatigue at high temperature – Prediction and interpretation. Proc. Instn. Mech. Engrs. 1974 Vol. 188 9/74

[3] G. Facheris, M.-S. Pham, K. G. F. Janssens, S. R. Holdsworth: Microscopic analysis of the influence of ratcheting on the evolution of dislocation structures observed in AISI316L stainless steel during low cycle fatigue. Materials Science & Engineering A587 (2013) 1–11.

[4] T. Mayer, L. Balogh, C. Solenthaler, E. Muller Gubler, S. R. Holdsworth: Dislocation density and sub-grain size evolution of 2CrMo NiWV during low cycle fatigue at elevated temperatures. Acta Materialia 60 (2012) 2485–2496.

[5] Vani Shankar, Valerij Bauer, R. Sandhya, M. D. Mathew, H.-J. Christ: Low cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue behavior of modified 9Cr–1Mo ferritic steel at elevated temperatures. Journal of Nuclear Materials 420 (2012) 23–30.

PÓR GÁBOR – CSICSÓ GÁBOR – DANKA ZSOLT – GÁRDONYI GÁBOR – MANHERTZ GÁBOR – BERECKZI PÉTER – SZOMBATHELYI VIKTOR – TRAMPUS PÉTER – VERŐ BALÁZS

Akusztikus események detektálása TWIP-acélok szakítása közben

A TWIP- (TWinning Induced Plasticity = ikresedés hatására bekövetkező képlékeny alakváltozás) acélok története körülbelül 16 éves múltra tekint vissza. Ezek az ausztenites acélok széles körben használatosak, mivel nagy szilárdságuk nagymértékű képlékeny alakíthatósággal párosul, emellett jó kopás- és korrózióálló tulajdonsággal rendelkeznek. A TWIP-acélnak egyre nagyobb szerep jut az autópárhuzban. A TWIP-acélok szakítógörbéje felosztható három jól elkülöníthető részre: az első szakaszban a diszlokációs keményedés jellemző, amelyek akusztikus emissziós (AE) eseményeket okoznak; a második szakaszban az ikresedés következtében jelentkezik az események többsége; míg a harmadik szakaszban az ikerpárok generálják az eseményeket. A méréseink célja az volt, hogy szakítóvizsgálat közben jellegzetességeket találjunk az egyes szakaszok alatt regisztrált akusztikus eseményekben. Különbségeket észleltünk az eseménymagyságban, az eseménygyakoriságban, mialatt a spektrumok első benyomásra nagy hasonlóságot mutattak. Alaposabb vizsgálat után kisebb eltéréseket észleltünk a spektrumokban, melyek fontosak lehetnek a későbbi elemzésekben. A szakítóvizsgálatokat Gleeble szimulátor segítségével hajtottuk végre.

Bevezetés

A cikkben TWIP-acélok eltérő hőmérsékleten történő szakítása közben rögzített akusztikus jeleket mutatunk be. A TWIP-acélok nagy mangántartalommal (17–24%) rendelkeznek, aminek következtében szobahőmérsékleten teljesen ausztenites szövet-szerkezetük van és nagymértékű képlékeny alakváltozásra képesek az ikerkristályok keletkezésének köszönhetően. Erről a folyamatról kapta a nevét az anyag. Az ikresedés következtében a mikroszerkezet folyamatosan finomabbá válik. Az ikerhatárok úgy viselkednek, mint a szemcseha-

tárok, ugyanis gátolják a diszlokációk mozgását, növelve az acél szilárdságát. A TWIP-acél egyesíti a nagy szilárdságot a nagy szívóssággal.

A szakítóvizsgálatok kiértékelésénél az egyes szakaszok megkülönböztetésére a keményedésváltozás sebességének görbéjét használják. A görbe a valódi alakváltozás-valódi feszültség függvény folytonos differenciáljával állítható elő. A függvény lokális szélső értékeinél választhatóak el az alakváltozási mechanizmusok egyes szakaszai. Mivel eltérő anyag-szerkezeti változások játszódnak le a különböző szakaszokban, érdekes kihívásnak ígérkezett, hogy eltérése-

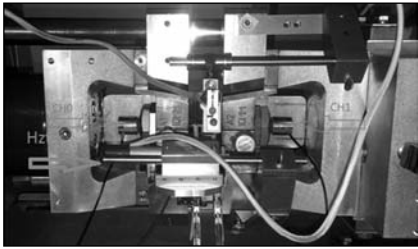
ket találjunk az egyes szakaszok akusztikus eseményei közt.

Cikkünkben analizáljuk és összehasonlítjuk a különböző hőmérsékleten (szobahőmérséklet, 100 °C, 150 °C) végzett szakítások során mért akusztikus eseményeket.

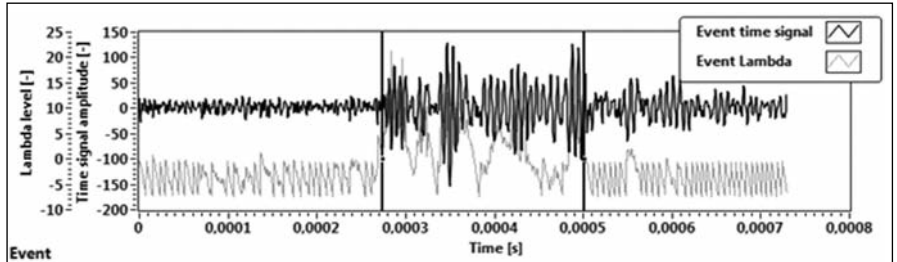
A vizsgálati eljárás bemutatása

A szakítóvizsgálatok végrehajtásához a Gleeble 3800 [1] fizikai szimulátort használtuk. A Gleeble egy termomechanikus szimulátor, amelynek egy teljesen integrált, digitális, zárt rendszerű szabályzó rendszere van.

Precíziós öntéssel készült TWIP



■ 1. ábra. Próbatetest a Gleeble munkaterében



■ 2. ábra. SPRT eseménydetektálás, a felső a rögzített jel, az alsó a lambdafüggvény

minőségű acélból gyártott próbatesteket vizsgáltunk. A vizsgált TWIP-acél nagy mennyiségű mangánt (23,9%) és 0,5% korbont tartalmaz, mindemellett nagymértékű képlékeny alakváltozásra képes, köszönhetően az ausztenites szerkezetnek és az ikerkristályok keletkezésének.

A szakítás folyamata a következő:

- A próbatestet az 1. ábrán látható két pár rézpofa segítségével pozícionáljuk a szimulátor befogópofáiba, majd mechanikusan előfeszítjük.
- A hosszirányú alakváltozás mérése a „HZZT” elnevezésű, LVDT-típusú nyúlásmérőt használtuk. A vizsgálati szakasz közepén a keresztmetszet-csökkenést szintén regisztráltuk a szakítás során.
- A szakítóvizsgálatokat 50 mm/perc keresztfej sebességgel hajtottuk végre.
- A próbatest hevítését a rendszer ellenállásfűtéssel valósítja meg. A hőmérsékletet a próbatest vizsgálati szakaszának közepére hegesztett termoelmpárral szabályoztuk.

Egy saját fejlesztésű rendszert használtunk, hogy detektáljuk és analizáljuk az akusztikus emissziós (AE) eseményeket. Szükségünk volt egy mintavételező és adattároló rendszerre, amely képes nagy frekvenciával rögzíteni a jeleket. A választásunk a National Instruments PXIe beágyazott rendszerére esett. A VIKTÓRIA névre keresztelt, saját fejlesztésű programmal vezéreltük a méréseket és elemeztük az eredményeket [2]. A VIKTÓRIA képes 2 MHz mintavételi frekvenciával rögzíteni az adatokat négy csatornán. A szoftvercsomag ezen kívül alkalmas utólagos eseménydetektálás futtatására is. Az AE-mérésekhez Sensophone A-15 AM AE-szenzorokat és Sensophone erősítőt használtunk [3].

Az AE-események detektálásához két különböző módszer áll rendelkezésünkre. Az első verzióban a küszöb-szintes eljárást alkalmaztuk. Ebben a módszerben, az algoritmus kiválasztja az eseményeket a rögzített jelekből az előre meghatározott küszöbszint alapján. A második eseménydetektálási technika az SPRT (Sequential Probability Ratio Test – szekvenciális valószínűségi hányados teszt). Ez a módszer a rögzített időjelet lépésről lépésre dolgozza fel. A módszer alapja az ún. lambdafüggvény, amelynek a definíciója a következő:

$$\lambda_n = \ln \frac{p(x_1, x_2, \dots, x_n | H_1)}{p(x_1, x_2, \dots, x_n | H_0)}$$

ahol x_i a mintavételezett és szűrt adatsor; a számlálóban a H_1 (esetünkben az események eloszlása) hipotézisnek megfelelő folyamat valószínűségi sűrűsége (p) szerepel; a nevezőben a H_0 (esetünkben háttérzaj eloszlása) hipotézisnek megfelelő jelfrész valószínűségi sűrűsége kap helyet.

Ha a lambdafüggvény negatív tendenciát mutat, akkor a mért jel adott szakasza a fenti egyenlet alapján inkább a H_0 hipotézist elégíti ki. A lambdafüggvény növekedése esetén, amennyiben az értékek elérik a felső döntési határt, akkor a vizsgált szakasz a háttértől eltérő eseményeket is tartalmaz. A lambdaértékek számítását megelőzi egy, az adatsoron elvégzett AR (autoregresszív) szűrés. A

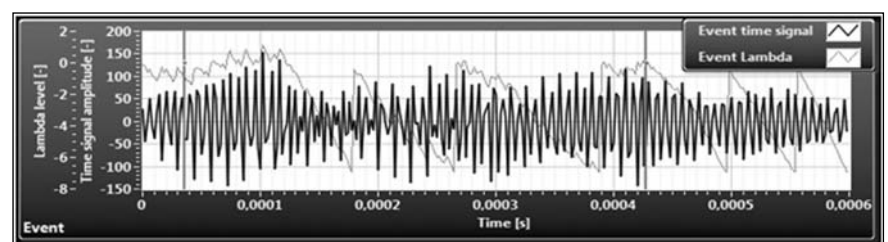
szűrt jelre a lambdaértékeket kiszámítva az események azonosíthatók.

A jel előkészítése után (szűrés, vágás), lehetőségünk van kiszámítani a klasszikus AE-paramétereket (felfutási idő, esemény időtartam, oszcilláció szám, maximum amplitúdó). Az SPRT-detektálást használva több eseményt találunk, mint a hagyományos módszer alapján. Ez a módszer természetéből adódik, mivel képes észrevenni olyan eseményeket, melyek amplitúdója megegyezik vagy akár kisebb is, mint a háttérzaj amplitúdója (2. ábra).

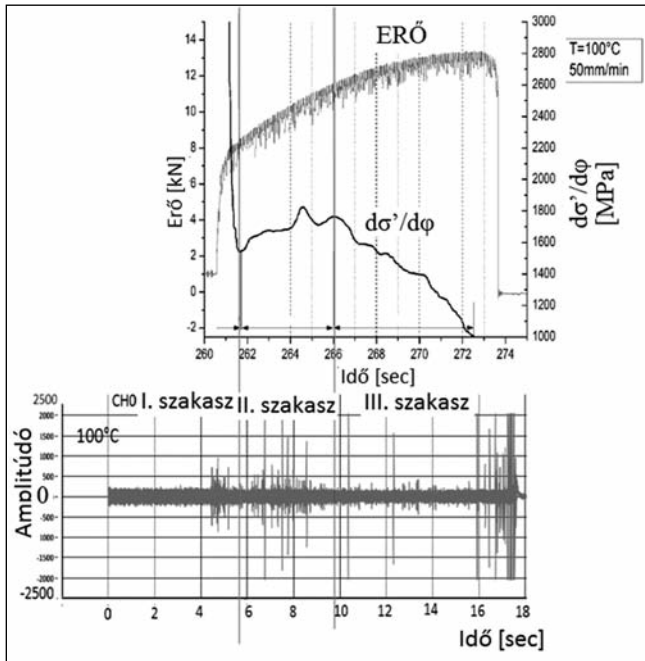
Közvetlenül a mérés megkezdése előtt a próbatestet ellenállásfűtéssel 1 °C/másodperces hevítési sebességgel a vizsgálati hőmérsékletre melegítettük. A fűtést 50 Hz-es váltakozó áram végezte. Észrevettük, hogy az SPRT-eljárás detektál eseményeket a tényleges szakítás megkezdése előtt is. Ezek rendkívül gyenge események, melyeket csak az SPRT észlel, a hagyományos küszöbszintes eljárás ezeket nem érzékeli. Ilyet láthatunk a 3. ábrán.

Mérési eredmények

A TWIP-acélok szakítógörbéje felosztható három szakaszra a következőkben ismertetett módon. Az aktuálisan mért erő (F) és az aktuálisan mért mérőhossz változás (Δl) értékekből meghatározzuk a valódi feszültség (σ') – valódi nyúlás (φ) görbét.



■ 3. ábra. Az SPRT által detektált gyenge esemény a tényleges szakítás megkezdése előtt



■ 4. ábra. A szakítógörbe és a keményedési tényező, alatta a mért időjel. Az időjelet a $d\sigma'/d\phi$ görbe használatával osztottuk fel három szakaszra

A $\sigma'(\phi)$ görbe deriválásból kapjuk meg a keményedés változásának sebességét (work-hardening rate, $d\sigma'/d\phi$). A folytonos differenciál sajátossága miatt a primer $d\sigma'/d\phi$ görbék helyenként erősen oszcillálnak, így ezeket simítani kellett. Simításhoz a MATLAB „polifit” funkcióját használtuk, az eredő görbe a 4. ábrán látható. Tipikusan a szakítógörbe kezdetén a $d\sigma'/d\phi$ érték nagymértékben csökken, ezt nevezük I. szakasznak, majd kis mértékben emelkedni kezd (II. szakasz), majd a legvégén ismételen csökken (III. szakasz). A szakítógörbe ilyen típusú kiértékelése megtalálható a szakirodalomban [5, 6].

ábra) az első szakaszban láthatunk néhány közepes amplitúdójú (500-1000 mV) AE-eseményt, főleg a képlékeny alakváltozás elérése előtt. Az első és a második szakasz közti lokális minimumnál található az a pont, ahol az ikerhatár képződés kezdődik, de az anyag még nem ad AE-eseményt. Az újra növekedő $d\sigma'/d\phi$ görbe hatására újra érzékelünk eseményeket, de kisebb amplitúdóval (500 mV alatt). A harmadik szakaszt a kisméretű események uralják, kivéve a szakítás utolsó részét, ahol már makrorepedések jelentkeznek az anyagban. A harmadik szakasz elején látható néhány nagyméretű (2000

mV) esemény, melyek valószínűleg mikrorepedés keletkezésére (üregképződésre) utaló jelek. A szakítás legvégén esik, a szakirodalom szerint [6] nem észlelhető ikresedés, viszont AE-események detektálhatók a diszlokációs keményedés miatt. A második szakaszban, ahol a görbe emelkedik, az ikerkristályok keletkezésének a hatását láthatjuk. A harmadik szakaszban, ahol a $d\sigma'/d\phi$ görbe újra csökken az iker-iker kölcsönhatás eredményét detektáljuk [6].

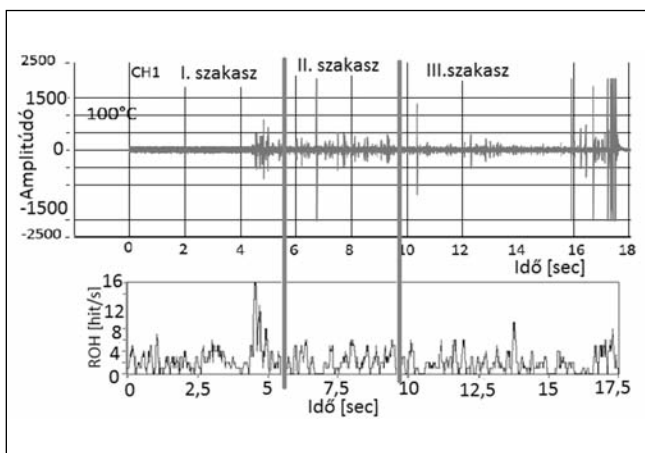
100 °C-on (5.

mV) esemény, melyek valószínűleg mikrorepedés keletkezésére (üregképződésre) utaló jelek. A szakítás legvégén látható nagy események a tényleges szakadás következményei.

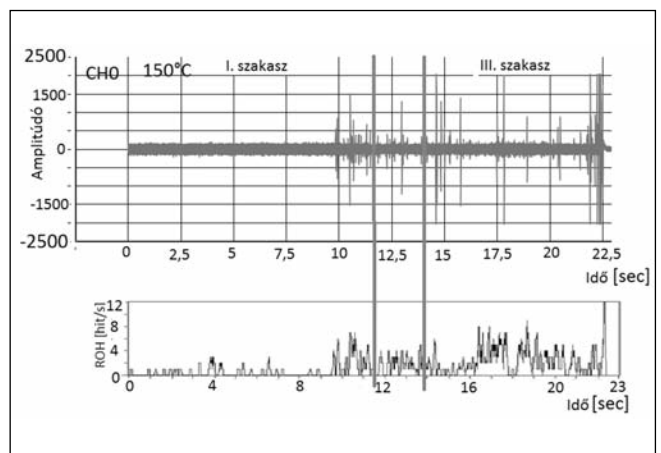
A 150 °C-os szakítás során vizsgálva az eseményeket sok hasonlóságot fedezünk fel (6. ábra). Az első 10 másodpercben a fűtésből származó jeleket láthatjuk. Utána nagyobb eseményaktivitást fedezhetünk fel az első szakasz alatt, majd a szakaszváltás következtében az aktivitás a minimumra csökken. Általánosságban az események maximum amplitúdója kisebb a második és a harmadik szakaszban, mint az elsőben. Előfordul néhány nagyobb esemény is, de a kisebbek dominálnak. Az eseményszám szintén kisebb, de ez lehet a következménye a kisebb amplitúdóknak is, mivel az események kevésbé emelkednek ki a háttérzajból. (Nem vizsgáljuk az AE-eseményeket a szakítás legvégén, mivel azok keletkezése a tényleges törés miatt történik.)

Spektrumanalízis

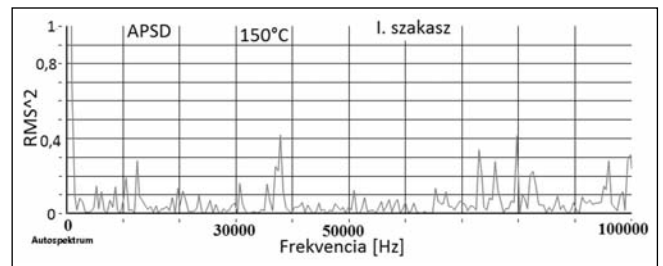
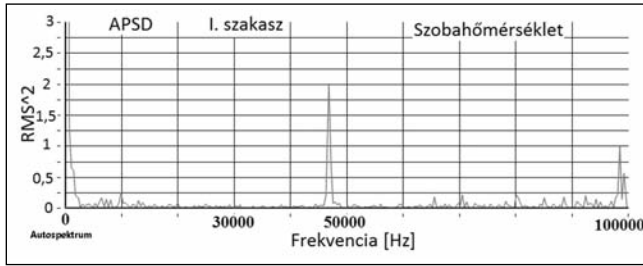
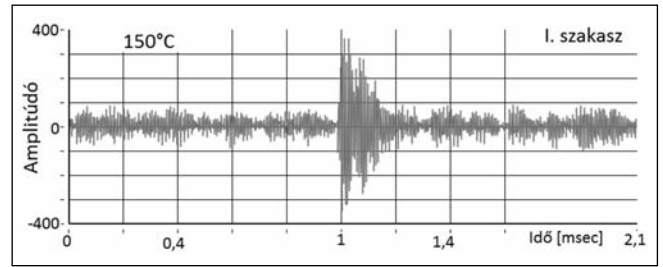
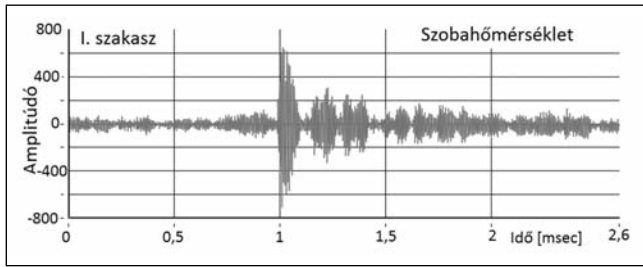
Az új programcsomagunk részeként képesek vagyunk APSD (Auto Power Spectral Density) elemzést futtatni egy eseményen, függetlenül attól, hogy melyik módszerrel detektáltuk. Az APSD-t egy eseményről Fast Fourier Transformation (FFT – gyors Fourier-transzformáció) segítségével készítettük, de ennek a módszernek igen nagy a szórása. Nem egyszerű átlagolással jobb bizonytalansági szintet elérni, az összes detektált beütés (esemény) átlagolása félre-



■ 5. ábra. Időjel (felső) és a Rate of hits (ROH) SPRT által detektálva 100 °C-os szakítás során



■ 6. ábra. Időjel (felső) és a Rate of hits (ROH) SPRT által detektálva 150 °C-os szakítás során



■ 7. ábra. AE-esemény spektruma (szobahőmérséklet, I. szakasz)

■ 8. ábra. AE-esemény és spektruma (150 °C, I. szakasz)

zető lehet, mivel a nagy amplitúdójú események, mint pl. a valódi repedés-terjedés, amit nem számítunk már AE-eseménynek, jelentősen torzítják az átlagolás eredményét. Ezért azt az utat választottuk, hogy az APSD-n belül, belső átlagolást végeztünk, vagyis a szomszédos spektrumvonalakat átlagoltuk. Ezzel is csökkenteni lehet a bizonytalanságot.

Minden spektrumban látható egy nagy, széles kiemelkedés 150 kHz környékén, de ennek oka az AE150 típusú szenzor rezonanciája. De mi a kisebb, de fontosabb spektrumkarakterisztikákra fogunk figyelni. A következőkben bemutatjuk a tipikus AE-eseményeket és a spektrumokat különböző hőmérsékleteken és

a szakítás különböző szakaszain belül.

Mérések szobahőmérsékleten

A könnyebb áttekinthetőség céljából csak 100 kHz-ig ábráztuk a spektrumokat, így a szenzor miatt keletkező csúcs nem zavar. Egy jelentős csúcs tűnik fel a teljes szakítás során, körülbelül 50 kHz-nél (7. ábra).

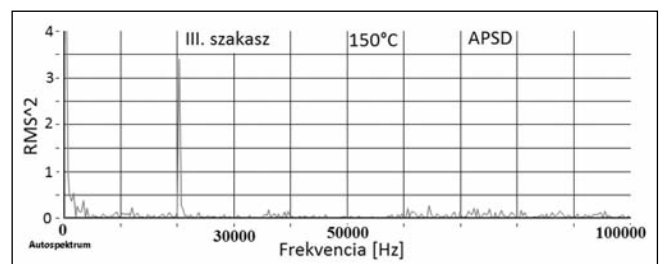
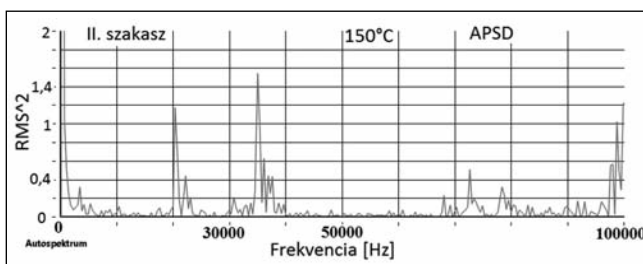
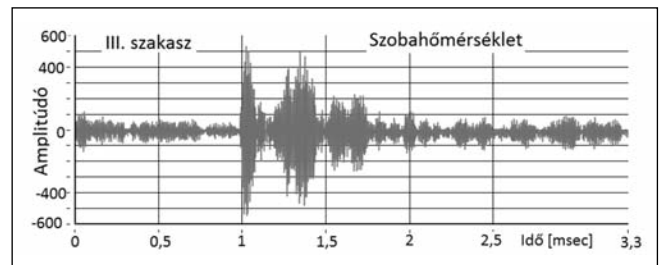
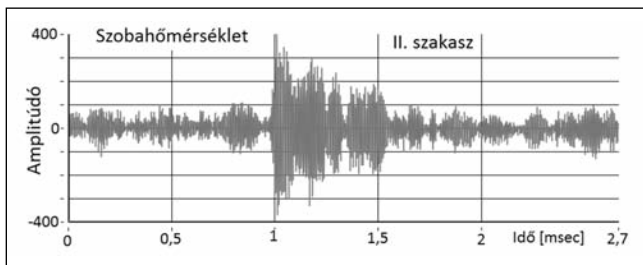
Mérések 100 °C-on és 150 °C-on

Ezek a hőmérsékleteken két jelentős csúcst fedezhetünk fel 35 kHz-nél és 20 kHz-nél (8. ábra). A szobahőmérsékleten észlelt 50 kHz-es csúcs nem fedezhető fel. A 35 kHz-es

csúcs a szakítás első szakaszában domináns, a 20 kHz-es csúcs a második és a harmadik szakaszban (9, 10. ábra). Olyan események is felfedezhetőek, melyeknél mindkét kiemelt csúcs észlelhető, főleg a II. szakasz elején. Látható néhány más frekvenciájú csúcs is amelyeket véletlenszerűen lehet megtalálni az eseményekben. Mérési eredményekről részletesebben olvashatnak a [7] számú forrásban.

Összegzés

TWIP-acélok végzett szakítóvizsgálat alatt mértünk és elemeztünk AE-eseményeket. A hagyományos küszöbszintes eljárással végzett detek-



■ 9. ábra. AE-esemény és spektruma (150 °C, II. szakasz)

■ 10. ábra. AE-esemény és spektruma (150 °C, III. szakasz)

tálással csak azokat az eseményeket látjuk, melyek kiemelkednek a háttérzajból. Az általunk bevezetett SPRT-módszer egészen kicsi, a háttérzajból alig kiemelkedő eseményeket is képes észlelni. Értelemszerűen az SPRT-vel megtalált események száma jóval nagyobb, körülbelül tízszer annyi, mint a küszöbszintes módszert alkalmazva.

A megtalált események spektrumának elemzésénél különbségek érzékelhetők a szobahőmérsékletű és az emelt hőmérsékletű szakítások során. Szobahőmérsékletnél egy jelentős csúcs látható 50 kHz-nél, a teljes szakítás során. Emelt hőmérsékletnél ez a csúcs teljesen eltűnik, és két másik jelenik meg, 35 és 20 kHz-nél. Az első szakaszt a 35 kHz-es csúcs uralja, a második és harmadik szakaszt a 20 kHz-es csúcs. Található egy átmeneti állapot, amikor mindkét csúcs megtalálható a spektrumban, főleg a második szekció elején.

Az AE-események elsősorban spektrumukban különböznek a TWIP-acélok szakítóvizsgálataiban azonosított három tartományban. Ebből következik, hogy az akusztikus emissziós mérés alkalmas a TWIP-acélok szakítása során fellelhető szakaszok megkülönböztetésére.

Köszönetnyilvánítás

A munkát és a publikációt a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0027 projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

- [1] Gleeble 3800; <http://www.bleeble.com>
- [2] ViKTÓRIA, – An Acoustic Emission measuring software package, Software description and operating instructions MAIDLAB, Dunaújváros, Hungary (2013)
- [3] J. Gereb, G. Gyorgy, J. Tabori (2010): AED-40/32 Sensophone AE diagnostic device, Manual
- [4] G. Manhertz, G. Gardonyi, G. Por (2014): Managing measured vibration data for malfunction detection of an assembled mechanical coupling, Int. J. Adv. Manuf. Technol. [manuscript accepted for publication, DOI: 10.1007/s00170-014-6138-3]
- [5] M. Linderov, C. Segel, A. Weidner, H. Biermann, A. Vinogradov: Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and ele-

vated temperature investigated by acoustic emission and scanning Electronmicroscopy Materials Science & Engineering A597, (2014), 183–193.

- [6] A. Vinogradov, A. Lazarev, M. Linderov, A. Weidner, H. Biermann: Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast, transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy: Influence of austenite stability on deformation mechanisms Acta Materialia 61 (2013) 2434–2449.
- [7] G. Pór, G. Csicsó, Zs. Danka, G. Gárdonyi, G. Manhertz, P. Bereczki, V. Szombathelyi, P. Trampus, B. Verő: Acoustic Events Detected During Tensile Testing of Twip Steels, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6–10, 2014, Prague
- [8] S. Curtze, V.-T. Kuokkala: Effects of temperature and strain rate on the tensile properties of twip steels, Matéria (Rio J.) vol.15 no.2 Rio de Janeiro (2010) <http://www.scielo.br/img/revistas/rmat/v15n2/11f01.gif>

SZALAI SZABOLCS

Nagy szilárdságú karosszériaelemek alakíthatósági vizsgálatai

A cikk a nagy szilárdságú acélelemek tulajdonságaira fókuszál, különös tekintettel a DP-és TRIP-acélminőségekre. A szakítóvizsgálatok eredményeire alapozva a keményedési kitevő és a síkbeli anizotrópia részletes elemzését végzi el. Az elemzések alapján bebizonyítja, hogy a paraméterek értéke erősen függ a definíciótól és számítási módtól. Különböző alakíthatósági vizsgálatok elemzését is bemutatja. Végül egy rövid elemzés kitér a korszerű szimulációs szoftverekben alkalmazott anyagtulajdonságok megfelelő kiválasztására és alkalmazására.

Bevezetés

A személygépkocsi-karosszériaépítésben egyre nagyobb teret hódítanak a nagy szilárdságú lemezek, elsősorban a többfázisú (DP, TRIP, CP) minőségek. Ezen lemezek előnyei

közismertek, esetükben a kiemelkedő szilárdság kedvező alakíthatósággal párosul. Ezt jellemzi a kettőnél nagyobb mélyhúzási viszony (LDR), a 12 körüli Erichsen-féle mélyítési szám, vagy a viszonylag nagy valódi nyúlás értékeket mutató alakíthatósá-

gi határdiagram (FLD). Az elemzések azonban azt mutatják, hogy a szakítóvizsgálatból meghatározható jellemzők, különösen a keményedési kitevő (n) és a síkbeli anizotrópia (r) egyetlen mennyiséggel való jellemzése nem meríti ki az alakítási folyamat teljes körű értelmezését, ezért ezek részletesebb vizsgálata mindenképpen indokolt. Különösen fontos az alakíthatósági jellemzők összekapcsolása a karosszériaelemek alakításában fontos szerepet játszó mélyhúzás és nyújtva húzás, illetve e műveletek kombinációja esetében.

Az alakváltozási keményedés és azt jellemző keményedési kitevő kutatása szinte egyidős a képlékeny alakí-