

SZERKEZETI ACÉLOK TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA TERMOVÍZIÓS MÓDSZERREL

Szabó Gyula *

RÖVID KIVONAT

A DUNAFERR Dunai Vasmu Rt. KUTATÓINTÉZETTEL közösen 1991-ben és 1992-ben kutatások folytak egy újfajta anyagvizsgálati eljárás kidolgozására [1]. A kutatói feladat során azt a hipotézist kellett megerősíteni vagy cáfolni, hogy szerkezeti acélok mechanikai tulajdonságainak számunkra elfogadható pontosságú méréséhez alkalmazhatók-e a termovíziós technika eszközei. Az Acélszerkezetek tanszéken a nyolcvanas évek végén már történtek elő-kísérletek, amik biztató eredményekkel szolgáltak, de anyagiak hiányában nem folytatódhattak. A DUNAFERRNÉL beszerzett AGA termo-kamera, valamint a tanszéken rendelkezésre álló ismeretanyag és tapasztalat lehetővé tette a kutatás folytatását.

I. ELMÉLETI ALAPOK

1.1. A termoelasztikus hatás

Már az 1800-as évek első felében a fizikusok feltételezték, hogy a gázokhoz hasonlóan a szilárd test összenyomásakor is megne minden egyes alkotó részecskéjének hőmérséklete (J. M. C. DUHAMEL, 1837). A termoelasztikus hatás pontosabb leírását Lord Kelvin publikálta 1853-ban, miszerint a szilárd testekben bekövetkező mechanikai feszültség változás hőmérsékletváltozást okoz.

Homogén lineárisan rugalmas anyagok esetén adiabatikus viszonyok mellett a feszültségállapotban bekövetkezett változás hatására kialakuló hőmérsékletváltozás a termodinamika alaptörvényéből származtatható:

$$\Delta T = \frac{T}{\rho C_e} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \varepsilon_{ij}$$

- ahol: DT - a feszültségváltozás hatására létrejövő hőmérsékletváltozás
 T - az abszolút hőmérséklet
 C_e - az állandó alakváltozáshoz tartozó fajhő
 r - a sűrűség
 S_{ij} - a feszültségváltozási tenzor
 e_{ij} - a fajlagos alakváltozási tenzor

* okl. építőmérnök, dr. techn., egyetemi adjunktus, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

A fenti összefüggésből az alábbi származtatható:

$$\Delta T = -\frac{E\alpha T}{\rho C_\varepsilon (1-2\nu)} \sum \varepsilon_i$$

ahol: E - a rugalmassági modulus
 α - a lineáris hőtágulási együttható
 ν - a Poisson szám
 $\sum \varepsilon_i$ - a három merőleges irányú fajlagos alakváltozás összege.

Felhasználva az állandó alakváltozáshoz és állandó nyomáshoz tartozó fajhő közötti összefüggést, valamint áttérve a feszültségekre

$$\Delta T = -\frac{\alpha T \sum \sigma_i}{\rho C_p}$$

Bevezetve a $K = \alpha / \rho C_p$ jelölést, amit termoelasztikus állandónak nevezünk, kapjuk:

$$dT = K T (s_1 + s_2 + s_3)$$

Boltzmann törvénye szerint a felületről kisugárzott teljes energiafluxus (Q) arányos a felület sugárzóképeségével (s) és a felszín abszolút hőmérsékletének (T) negyedik hatványával.

$$Q = s B T^4$$

ahol B - a Boltzmann állandó.

Ennek első deriváltja $dQ/dT = 4 s B T^3$. Ha ezt a változást alkalmas eszközzel rögzítjük, akkor a rögzített jel arányos lesz a hőmérsékletváltozással és így:

$$J a = -4 s B T^4 (s_1 + s_2 + s_3), \quad \text{amiből}$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = J A,$$

ahol A - a mérőműszertől és anyagminőségtől (beleértve annak felületi hőmérsékletét is) függő kalibrációs konstans.

A fenti elvek alapján az ismertetett megkötések mellett a mérnöki szerkezetek anyagainál a húzáskor előálló hőmérsékletcsökkenés és a nyomáskor előálló

homérsékletnövekedés alapján meghatározható a feszültségi állapot. Az elmondott fizikai alapokon fejlesztették ki a ma TSA (Thermal Stress Analysis) vagy SPATE (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) névvel illetett mérési módszert. A módszer technikai alapját két katonai technológia - az éjszakai látást segítő infravörös érzékelés képalkotás és az igen sok területen használt számítógépes jelfeldolgozás - polgárisodása teremtette meg.

A mérés alkalmával a vizsgált darabot ciklikus terhelésnek vetik alá. Az adiabatikus kísérleti helyzetben a reverzibilis homérsékletváltozás és a fofeszültségek összege közötti viszony független a terhelési frekvenciától, a keletkező pillanatnyi homérsékletváltozások eredményeképpen kibocsátott infravörös fluxusokat kamera érzékeli a terhelési folyamattal összehangolt módon. A mérési adatokat számítógép értékeli és jeleníti meg.

1.2. A termoplasztikus hatás

Jóval a termoelasztikus hatás felismerése előtt ismertté vált a termoplasztikus jelenség, ami a nagyságrendekkel nagyobb homérsékletváltozás könnyebb észlelhetőségének következménye. A szilárd testeken képlékeny deformációt létrehozó munka egy része hőenergiává alakul. Anyagvizsgálók előtt jól ismert az acél próbatest szakításkori felmelegedése.

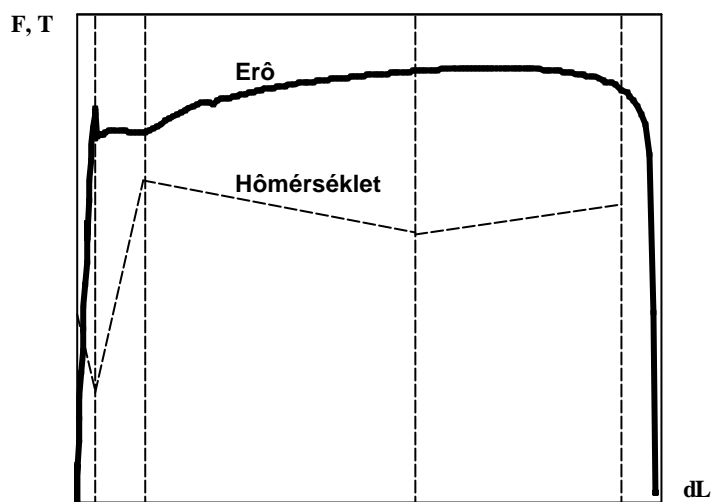
Mint ismeretes, periodikusan váltakozó terhelés hatására az anyag kifáradására lehet számítani. A fáradás okozta repedés csúcsa előtt egy képlékeny zóna alakul ki, ami a termoplasztikus hatás következtében jelentősen felmelegszik. Így alkalmas eszközzel figyelemmel kísérhető a képlékeny zóna kialakulása, mozgása, terjedése. A kialakuló repedések korán felfedezhetők, terjedésük nyomon követhető, a terjedés sebessége meghatározható.

2. SZERKEZETI ACÉLOK STATIKUS TERHELÉSI FOLYAMATA SORÁN TAPASZTALHATÓ HOJELENSÉGEK

A szerkezeti acélok gyakorlati szempontból legjelentősebb méroszámai a mechanikai tulajdonságok. A mechanikai tulajdonságokat a gyakorlati felhasználás szempontjából a szabványos anyagvizsgáló kísérletek alapján értékeljük. Ezek a vizsgálati módszerek illetve a belőlük származtatott méroszámok többnyire csak közelítései a mechanikai tulajdonságok elvben is helyes értékeinek.

A leggyakrabban használt méroszám-páros, az igénybevétel és alakváltozás kapcsolatát, valamint egyéb fizikai jellemzők változását jellemző görbéken megfigyelhető, hogy az egyes jellegzetes pontok több-kevesebb azonossággal egybeesnek (1. ábra).

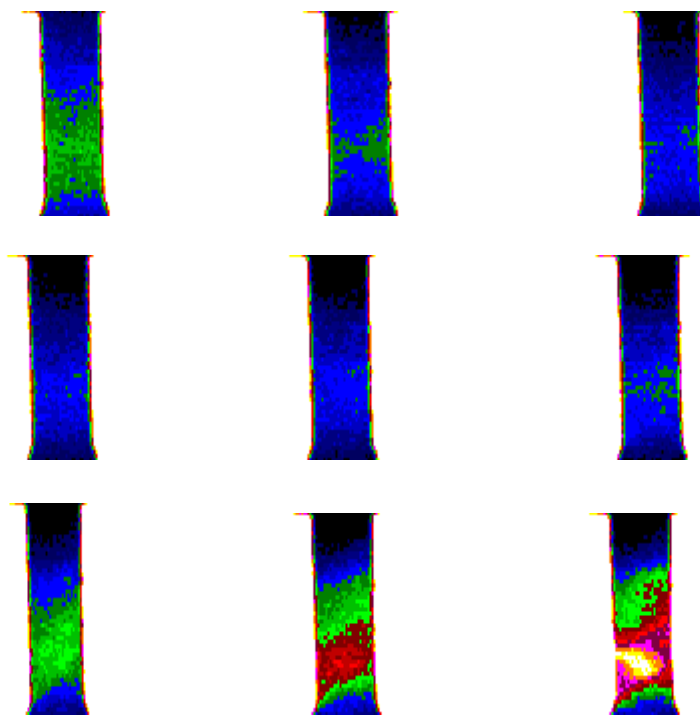
A szakítási diagramon kiemelkedő helyet jelent a folyáshatár környezete, mivel ezen a szakaszon az anyag viselkedése lényegesen megváltozik, rugalmas állapotból képlékenybe megy át. Az átmenet lehet hirtelen bekövetkező, vagy fokozatosan kialakuló. (Az általunk vizsgált acélok határozott folyáshatárral rendelkező anyagok voltak, így megállapításaink erre az esetre vonatkoznak.)



1. ábra: Homérséklet változás húzási igénybevételnél

2.1. Arányossági határ értelmezése

A szakítódíagram első szakaszán a rugalmas tartományban termodinamikai szempontból elsősorban a termoelasztikus hatás érvényesül, azaz a próbatest hőmérséklete az 1.1 pontban tárgyaltak szerint alakul.



2. ábra: A 6942 sorozatszámú mérés

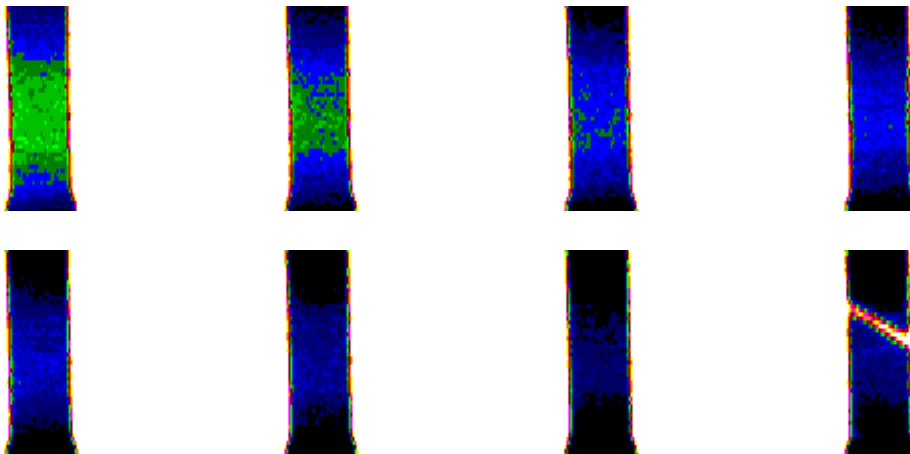
Ha azt tapasztaljuk, hogy az erő további növekedésével a hőmérsékleti viszonyok eltérően alakulnak, akkor ez a termoelasztikus szakasz végét jelenti, egy átmeneti részre jutottunk. A termoelasztikus szakasz végét arányossági határnak nevezhetjük, ugyanis eddig arányos a próbatest alakváltozása a hőmérsékletével a termoelasztikus jelenségnek megfelelően. Az arányossági határ kijelölése nagyban függ a használt mérőeszköztől, ugyanis a mérőeszköz érzékenységén múlik, hogy mikor vesszük észre a változást. Jól követhető ez a folyamat a 6942 sorozatszámú mérés első kilenc képén (2. ábra):

Az első kép terheletlen állapotban készült. A második -harmadik -negyedik -ötödik képen a termoelasztikus hatás érvényesül: az egyre növekvő húzóerő hatására a próbatest fokozatosan hűl. A hatodik felvételen már jól érzékelhető a folyamat változása, ugyanis a színkép a próbatest vizsgált felületének melegeledését jelzi. A további három kép a folyás kialakulásának kezdetét szemlélteti.

2.2. A folyáshatár értelmezése

A szakítódigramon kiemelkedő helyet foglal el a folyáshatár körzete. Ezen a szakaszon az anyag magatartása megváltozik, rugalmas állapotból képlékenybe megy át. Az átmenet lehet éles, vagy fokozatos. A folyáshatár érzékeny az alakváltozás sebességére és a vizsgálati hőmérsékletre. A terhelési sebesség növelésével növekszik, a hőmérséklet növekedésével pedig csökken a folyáshatár.

A képlékeny alakváltozás a próbatest hossza mentén nem folytonos, az éppen aktív sávok hőforrásként mutatkoznak. Így az első hőfolt megjelenése és a folyás kezdete összekapcsolható. A jelenséget jól szemlélteti az előző pontban szereplő képsor utolsó három képe.

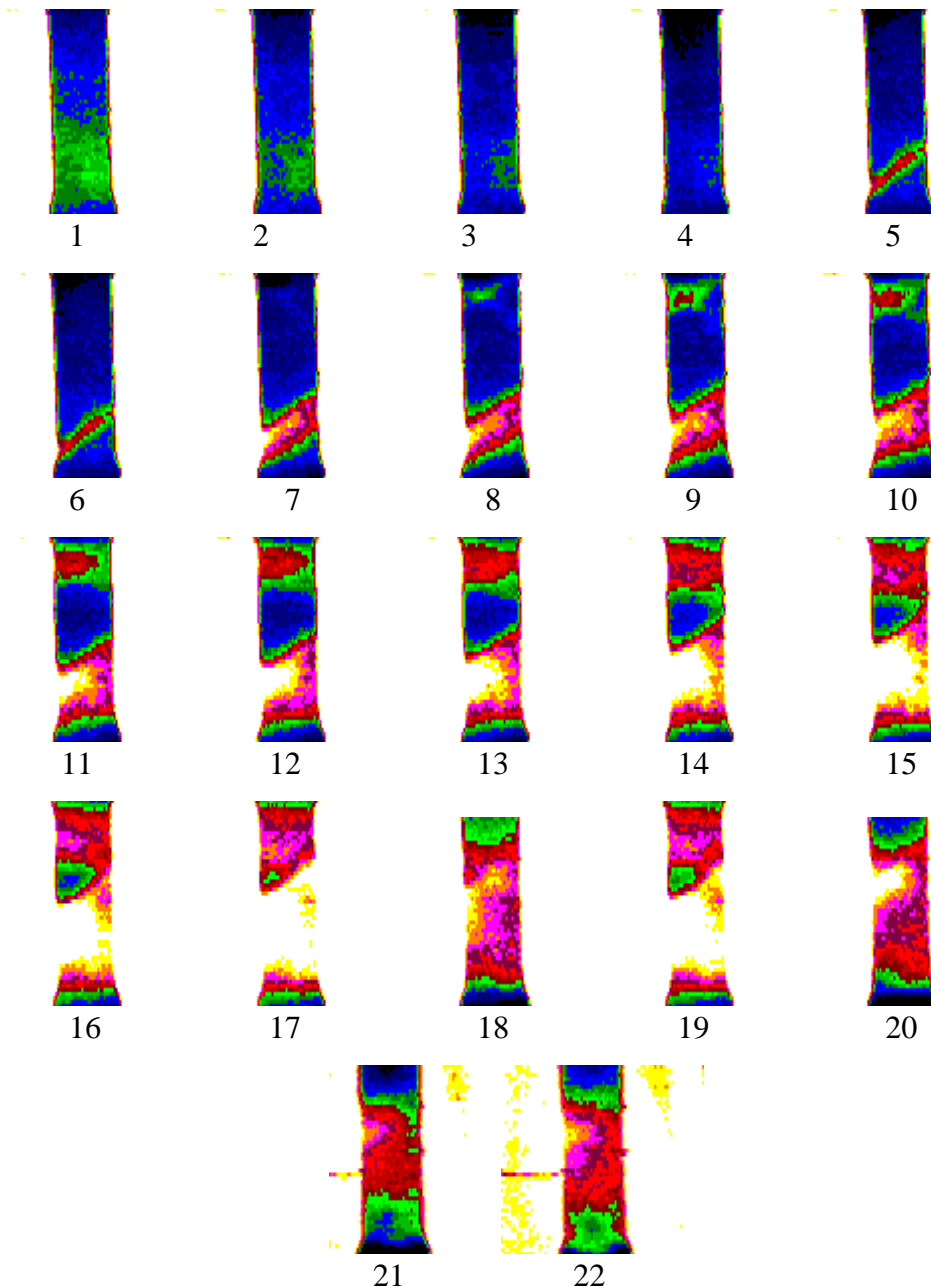


3. ábra: A B6932 mérési sorozat

A B6932 mérési sorozat első kilenc képsorát (3. ábra) kiemelve nyomon követhetjük a fokozatosan növekvő húzóerő hatására lehülő próbatesten a folyási sáv hirtelen kialakulását.

2.3. A folyási plató, a csúszókötegek kialakulásának sorozata

Az acél próbatestek felületén a folyáshatáron túl jellegzetes, szabályos vonalrendszerek keletkezését fedezték fel. Ezek a vonalak arról tanúskodnak, hogy a képlékeny alakváltozás a folyási határon nem folytonos, hanem olyan felületseregekben, csúszókötegekben jelenik meg, melyeknek nyomai a próbatest felszínén éppen ezek az úgynevezett Lüders-Hartmann-féle vonalseregek.



4. ábra: A B8134 mérésorozat

A vonalseregek a folyási határon hirtelen jelentkeznek, a terhelés növekedésével surusódnak, és szélesednek. A Lüders-Hartmann vonalak megjelenése az acélsanyag inhomogén viselkedését jelenti, a folyási állapotban két különböző minőségű, különböző jellemvonású anyag van jelen a próbatestben. Az anyag a folyási határon, a folyási zónában diszkontinuáns, inhomogén tulajdonságokat mutat.

A fentieket különböző mérési módszerekkel próbálták alátámasztani. Feltételezték, hogy a folyási vonalak a felkeményedés kezdetéhez tartozó alakváltozási állapotban, míg a folyási vonalak közötti részek rugalmas alakváltozási állapotban vannak.

A szerkezeti acélok folyáshatáron történő viselkedésének igen nagy jelentősége van a ma használatos képlékeny méretezés és felhasználás szempontjából.

A folyáshatáron lejátszódó jelenségek termovízióval való követése igen szemléletes eredményeket szolgáltat. Nyomon követhetjük a csúszási sávok egymás utáni kialakulását, érzékelhetjük az inhomogenitást.

A továbbiakban a B8134 méréssorozat képein (4. ábra) szemléltetjük a fentebb elmondottakat. Az 1-től 4-ig terjedő képeken a próbatest lehulése érzékelhető, az 5. képen az első csúszási sáv megjelenése látható. A további képeken a csúszási sáv terjed, kiszélesedik. A 9. képen újabb csúszóköteg aktiválódik a próbatest felső szakaszán, majd ez is szélesedik. Az utolsó három képen a maradék kis felület aktív már csak, a többi felületen már lezajlott a folyás. A képeken látható ferde csúszási irányok a lapos próbatesteken tipikusnak mondhatók.

3. SZERKEZETI ACÉLOKON VÁLTAKOZÓ TERHELÉS HATÁSÁRA TAPASZTALHATÓ HOJELENSÉGEK.

A váltakozó terhelésnek kitett szerkezetek károsodása a megfigyelések szerint a csúszási vonalak megjelenésével kezdődik. Majd később a felületen csúszási sávokká szélesednek a vonalak, mikrorepedésekké alakuló árkok képződnek. A további terhelés hatására a mikrorepedések látható makrorepedésekké duzzadnak, és kedvezőtlen körülmények között szakaszosan terjednek, elobb-utóbb töréshez vezetnek.

Ha az anyagban a feszültség meghaladja a kritikus értéket, kialakulnak a törés feltételei, képlékeny alakváltozási mezők jönnek létre, egyéb más energia-disszipációs jelenségek mellett hofejlődés indul meg, ami előre vetíti a törés bekövetkeztét. Így a próbatest homérsékletének emelkedéséből már jó előre következtetni tudunk a fáradt törés kialakulásának lehetőségére.

3.1. A feszültséggyujto hely és a hokép

Mint ismeretes, a sima felületű, hibátlan próbatestekkel végzett fáradtvizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy magasabb szilárdságú acéloknak magasabb a fáradási szilárdsága. Ha azonban valamilyen feszültséggyujto hellyel ellátott próbatesttel végezzük a vizsgálatokat, a fenti jelenség közel sem ennyire egyértelmű. Ennek az a magyarázata, hogy az

ismételt igénybevételeknek kitett anyagok különbözőképpen érzékenyek a feszültséggyűjtő helyekre. Az acélananyagok feszültséggyűjtő helyekre való érzékenysége igen nagy jelentőséggel bír a gyakorlat számára, ugyanis a tényleges szerkezetek minden esetben tartalmaznak többkevesebb ilyen helyet. Az idő folyamán változó terhelések hatására fellépő mikrorepedések is hasonló feszültségkoncentrációs helyeket idéznek elő.

Számos szerkezeti elemnél keletkezett fáradt törés gondos vizsgálata során megállapítható volt, hogy a fáradási repedések keletkezésének és továbbfejlődésének egyik oka az, hogy olyan kis területek jelennek meg, amelyekben sokkal nagyobb feszültségek ébrednek, mint az anyag többi részében. A feszültségek egyenlőtlen megoszlását okozhatja a szerkezet változó alakja, például hirtelen keresztmetszet-változások, bemetszések, furatok, éles sarkok stb. Ide sorolhatók a megmunkálatlan, gyengébb minőségű varratok geometriai egyenetlenségei, szegélybeégések, egyéb varrathibák. Hasonló hatásúak lehetnek az úgynevezett érintkezési erők (kis területre jutó nagy terhelés). Ugyancsak a feszültségek egyenlőtlen megoszlását okozzák az anyagban található belső hibák, salakzárványok stb.

A feszültséggyűjtő helyek környezetében a termoelasztikus jelenségek tartományában a SPATE vagy hozzá hasonló eljárással igen szemléletesen mutathatók ki a feszültségek. A külső hatások növekedésével a termoplasztikus tartományba érve a feszültséggyűjtő helyek aktivizálódnak, megindul a hőtermelő folyamat, ami alkalmas eszközzel láthatóvá tehető, nyomon követhető. Minél intenzívebb a hőfejlődés, annál kedvezőtlenebb a feszültséggyűjtő hely a teherbírási nézve.

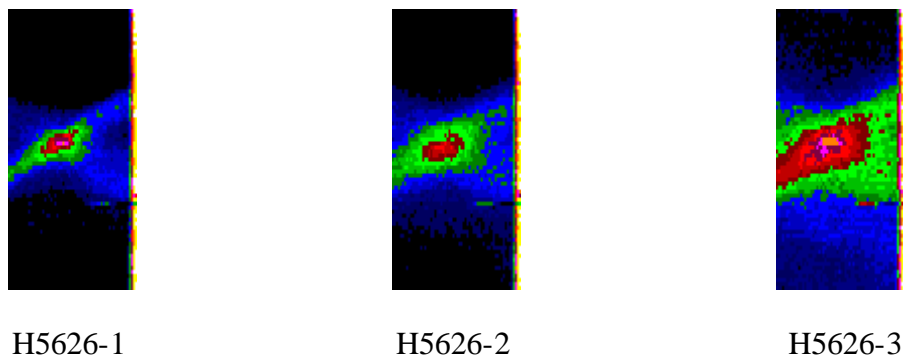
E gondolatmenet alapján összehasonlíthatjuk a különböző feszültséggyűjtő hellyel ellátott alkatrészeket néhány vizsgálat alapján anélkül, hogy nagyszámú törésig terjedő vizsgálatot kellene végeznünk.

3.2. Varratok hoképe

A legtükéletesebb hegesztett kapcsolatok is megváltoztatják a hegesztés környezetében az anyag belső szerkezetét, így fizikai tulajdonságait is. A minőségi követelményektől függően a varratok eltérő szövetszerkezete, a kisebb-nagyobb belső hibák, geometriai formák, egyéb anomáliák (szegélybeégés) stb. hatása a változó teher szempontjából lényegében azonos az előzőekben tárgyalt feszültséggyűjtő hellyel. Azonban ha lehet, még bonyolultabbá teszi a helyzetet a hegesztési maradék feszültségek jelenléte. A hegesztési feszültségek nagyon sok tényezőtől függenek, meghatározásuk igen költséges, sok esetben ma még nehézségekbe ütközik. Ugyanakkor a szerkezeti elem fáradási teherbírásiára döntő jelentőséggel van.

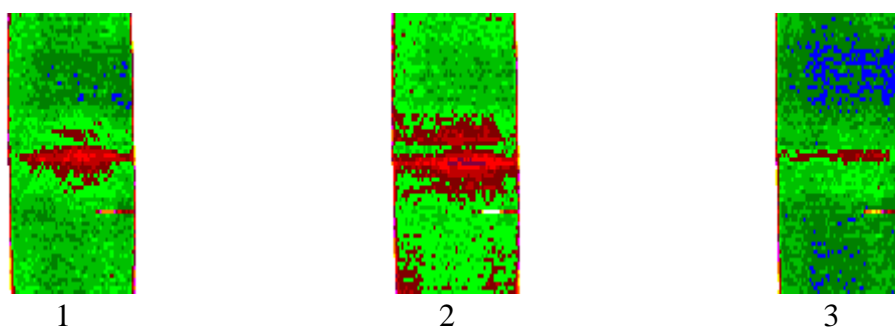
A hegesztett kapcsolatok fáradási szilárdságának vizsgálata az elmondottak miatt sok bizonytalanságot vet fel. Ilyen körülmények között itt még nagyobb jelentősége van egy olyan vizsgálati módszernek, ami valamennyi befolyásoló körülmény hatását figyelembe veszi, az eddigiekhez viszonyítva olcsó és rövid idő alatt megvalósítható.

Az elmondottakat jól szemlélteti a H5626 sorozatszámú mérés (5. ábra), ahol a próbatest két darabját összekapcsoló varratban egy a varrat gyökméretével azonos nagyságú folytonossági hiba volt. A képen látható, hogy a viszonylag kis terhelési szinten is igen aktív a feszültséggyűjtő hely. A későbbi törés természetesen innen indult el.



5. ábra: A H5626 méréssorozat

Markánsan jelentkezik a V65-3-1 méréssorozaton (6. ábra) a keresztirányú varrat átmeneti zónájának feszültséggyűjtő hatása is.



6. ábra: A V65-3-1 méréssorozat

A fentiek alapján megállapítható, hogy az alkalmazott vizsgálati módszerrel szemléletesen ellenőrizhetők, egymással eredményesen összehasonlíthatók a különböző intenzitású feszültséggyűjtő helyek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok a DUNAFERR Rt. Kutatóintézetnek, hogy lehetővé tette a termovíziós mérések elvégzését. Köszönöm a Kutatóintézet munkatársainak a kísérletek során végzett lelkes, szakszerű munkáját.

HIVATKOZÁSOK

- [1] DUNAFERR Rt. Kutatóintézet: *Kutatási Jelentés* „Vizsgálati eljárás kifejlesztése szerkezeti acélok terhelhetőségének megítéléséhez termovíziós módszer segítségével”, Dunaujváros, 1993.