

## MARADÓ FESZÜLTSG MÉRÉSE SÍNFEJ FELÜLETÉN RÖNTGENDIFFRAKCIÓS MÓDSZERREL

### RAILHEADSURFACE RESIDUAL STRESS MEASUREMENT WITH X-RAY DIFFRACTION METHOD

ZIRIGH NORBERT<sup>1</sup>–MERTINGER VALÉRIA<sup>1</sup>–BENKE MÁRTON<sup>1</sup>–CSEH DÁVID<sup>1</sup>

A gördülő érintkezés okozta fáradás hatására hajszáltrepedések alakulhatnak ki a sínfejen a kerék/sín érintkezési pontján. Az ilyen sínhibákat sínfej-hajszáltrepedésnek (angolul: Head Checking, röviden: HC) nevezi a szakirodalom. A repedések kialakulására és növekedésére hatással vannak a sínfejen uralkodó feszültségviszonyok. A felületi maradó feszültség méréséhez röntgendiffrakciós módszert alkalmaztunk. Jelen cikkünk összefoglalja egy vélhetően HC hiba miatt tönkrement sín vizsgálata során kapott eredményeinket.

**Kulcsszavak:** röntgendiffrakció, maradó feszültség, sínfej-hajszáltrepedés

Due to rolling contact fatigue cracks may occur in the railhead at the wheel-rail contact point. These rail failures are called Head Checking (HC) in the literature. The stress distribution within the railhead strongly affects the formation and growth of cracks. X-ray diffraction stress measurement method was used to measure the residual stresses at the surface. This article summarizes our results of the analysis of a broken rail by HC failure.

**Keywords:** X-Ray diffraction, residual stress, Head Checking

#### Bevezetés

A gördülő érintkezés okozta fáradás hatására hajszáltrepedések alakulhatnak ki a sínfejen a kerék/sín érintkezési pontján (1. ábra.) a sín kereszt- és hosszirányában egyaránt.

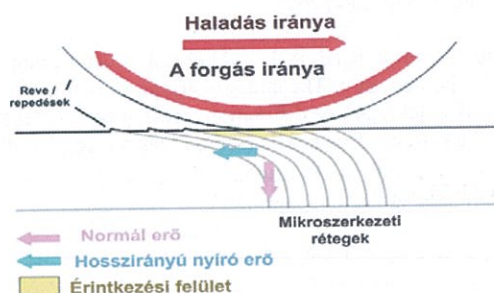
A jelentős teljesítménnyel és tengelyterheléssel rendelkező mozdonyok kerekei és a sínfej kis felületű érintkezésénél – elsősorban gyorsításkor és fékezésnél – kialakuló nagy hosszirányú nyíróerők a kristályrács síkjainak egymáson való elcsúszását okozzák (2. ábra.). Ez az elsődleges oka a futófelületen megjelenő hajszáltrepedéseknek.

A hiba minden vágánytípuson előfordulhat, de jellemzően az ívekben és a síndőlés nélküli kitérőkben találkozhatunk vele. Azokban az ívekben, amelyeknél túlelemelési hiány van, nagyobb valószínűséggel található meg. Az eddigi vizsgálatok alapján elmondható, hogy a sín korától és összetételétől függetlenül minden sín típuson megjelenik, azonban más-más előfordulási valószínűséggel. Kialakulhat elszeparáltan is, de tipikusan egy hosszú vágányhosszon van jelen, például egy ív külső sínszálának teljes hosszában.

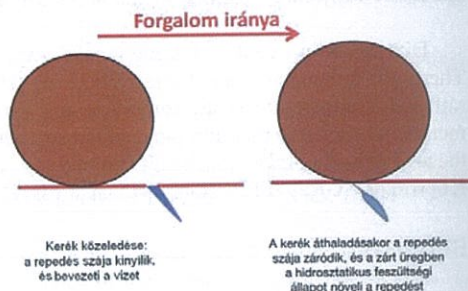
<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros  
zirighnorbert@gmail.com



1. ábra. Hajszálrepedések a futófelületen [1]



2. ábra. Repedések kialakulása a hosszirányú nyíróerők hatására [1]



3. ábra. Repedések növekedése a hidrosztatikus feszültség hatására [1]

A kisebb keménységű síneken – azonos igénybevételt feltételezve – hamarabb alakulnak ki a hajszálrepedések, és gyorsabban is növekednek, mint a keményebb síneken (pl. fedezett sínek a kitérőkben).

A repedések megjelenését elősegíti a száraz felületen a nagy súrlódási együttható miatt fellépő nagy nyíró feszültség. A növekedésükhöz azonban a folyadékok (víz és olaj) jelenléte nagy mértékben hozzájárul. A víz esőből, hóból és harmatból származik, az olaj pedig a sínkenőkből és a járművekből. A folyadékok beszívárognak a kialakult repedésekbe, és ott hidrosztatikus feszültséget fejtenek ki a repedések falára, amikor a kerék elhaladásakor a repedések szája bezárul a nagy függőleges irányú erőhatás következtében (3. ábra) [1–4].

A hiba fejlődését két fázisra oszthatjuk. Az elsőben a repedések a felület igen szilárd rétegén átnyomódva, mintegy 30 fokos szögben növekednek tovább lefelé. Ezzel egyidejűleg a hosszuk is növekszik kb. 20 mm-ig. Amíg a repedés mélysége nem éri el az 1 mm-t, csekély kitöredezési mélységgel kipattogzódások jelenhetnek meg a felületen. A második fázisban, 3–5 mm-es repedésmélységtől lefelé megváltozik a növekedésük lefolyása. Innen két lehetőség van a továbbterjedésre.

1. A szomszédos repedések összenőnek és együtt növekednek a felület alatt, ami később kitöredezésekhez vezethet a futófelületen. A kezdeti kipattogzódások után a hibás rész teljes hosszában kialakulhat, akár egy folyamatos hosszanti repedés is. A repedések felület alatti összenövéséről a felületen megjelenő fekete foltok árulkodhatnak. Ezeken a helyeken gyakran előfordulnak benyomódások a sín futófelületén.
2. A látható repedéshossz növekszik a futófelületen (meghaladja a 20 mm-t), ezzel egyidejűleg a repedés megváltoztatja a növekedési irányát, és lényegesen nagyobb szög alatt (közelít a 90 fokhoz) növekszik lefelé a sínfeljében, ami sántöréshez vezet.

A vizsgálat tárgyát képező sındarabok sínfeljének felületében uralkodó feszültségviszonyok megismerése érdekében maradó feszültség vizsgálatokat végeztünk. A méréshez röntgendiffrakciós módszert használtunk. A továbbiakban feszültség alatt az anyag méretével azonos nagyságrendben ható, makroszkopikus feszültségeket értjük.

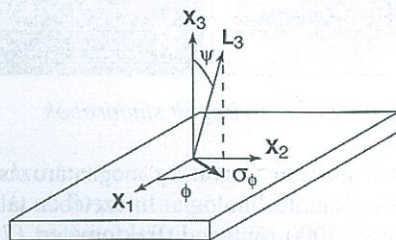
A makroszkopikus maradó feszültség a fémes anyagban a fémrács rácspontjaiban elhelyezkedő fém atomtörzsek egyensúlyi helyzetből való kitérését eredményezi. Kristálytani megközelítésben ez azt jelenti, hogy változik a darab rácsparamétere. Mivel az anyagban a rugalmas maradó rácsfeszültség hatására a rácscsokk távolsága megváltozik, a rácscsokk távolságok megváltozásának mérésével visszaszámolható a feszültség. Tehát maradó feszültség meghatározásakor a mérésnél alkalmazott röntgensugárzás hullámhosszának ismeretében ( $\lambda$ ) az adott  $d_{hkl}$  rácscsokk távolság változás okozta Bragg-szög ( $\theta$ ) eltolódását mérjük.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

A 4. ábra szerint lemez alapanyagon a tetszőlegesen választott  $\sigma_\phi$  irányú feszültség meghatározásakor abba a problémába ütközünk, hogy nem tudjuk megmérni az ilyen irányú rácsstorzulást, mivel a röntgensugárzás csak igen kismértékben hatol be a vizsgálati anyagba. Ezt az ellentmondást a  $\sin^2\psi$  módszer alkalmazásával lehet feloldani.

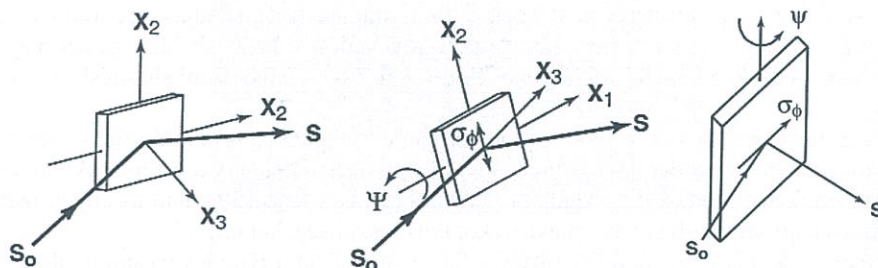
A módszer lényege, hogy a kiválasztott síksorozat távolságának változását az ábra szerint  $X_3$  illetve azzal  $\psi$  szöget bezáró  $L_3$  irányból ( $d_3, d_\psi$ ) határozzuk meg, és ennek, valamint a vizsgált anyag rugalmassági modulusa ( $E$ ) és Poisson-száma ( $\nu$ ) ismeretében a keresett irányú feszültség számítható:

$$\sigma_\phi = \frac{d_\psi - d_3}{d_3} \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2 \psi} \quad (2)$$



4. ábra.  $\sigma_\phi$  irányú feszültség meghatározása lemez felületén [5]

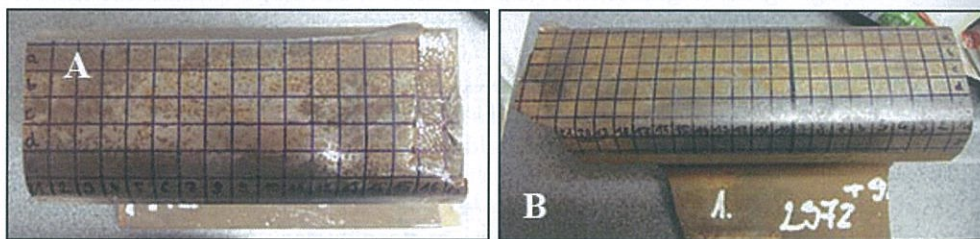
Méréstechnikai oldalról ez azt jelenti, hogy a normál méréstechnika mellett a sugármenet ( $s_0$ ,  $s$  vektorok szimbolizálják) és a minta felülete között  $\psi$  döntési helyzetet is meg kell valósítanunk. A döntési pozíció kétféle lehet. Normál,  $\psi$  és  $\Omega$  elrendezésre mutat példát az 5. ábra. Méréstechnikai okokból a  $\psi$  módszer az elterjedtebb [5–6].



5. ábra. A minta és a sugármenet helyzete normál,  $\psi$  és  $\Omega$  elrendezésű feszültség méréskor [5]

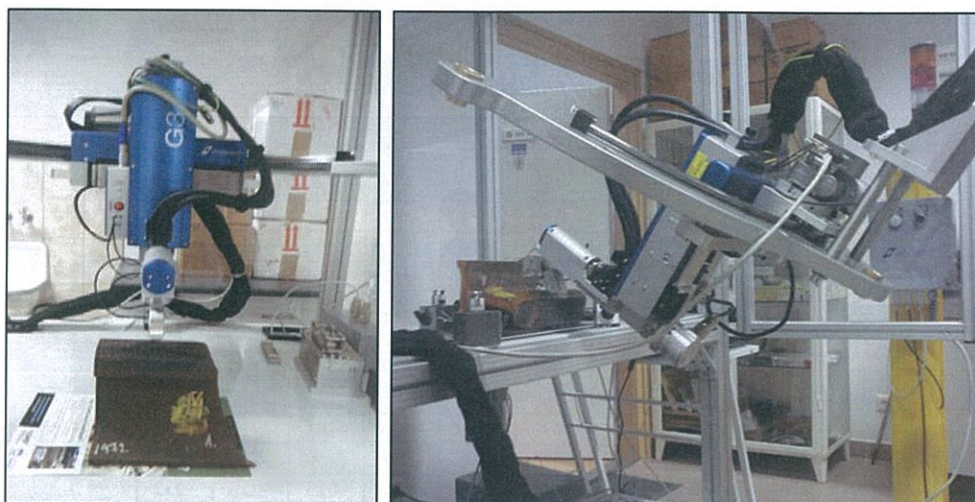
## 1. Vizsgálat bemutatása

A vizsgált síndarabok (6. ábra.) egy vélhetően Head Checking hiba miatt tönkrement sínszálból származnak. Az „A”-val és „B”-vel jelölt síndarabok futófelületére felrajzolásra került egy, a mérést segítő háló. Ennek sorait a görög abc kisbetűivel, az oszlopait arab számokkal jelöltük. A sorok a sínfej hosszanti irányában húzódnak, az oszlopok pedig keresztirányban osztják fel a futófelületet. A számozás a síndarab törettel ellentétes végétől indul. Az eredményekben szereplő távolságok az „A” jelű síndarab ezen végének vonalától értendő. A „B” jelű síndarabon a méréseket a 10. oszloptól kezdtük, így itt a képen berajzolt vastag vonaltól értendők a mérési távolságok. A mérési pontokat a négyzetháló elemeinek középpontjában, egymástól 10 mm-re vettük fel.



6. ábra. A vizsgált síndarabok

A sínfej felületén mérhető maradó feszültség meghatározásához a Miskolci Egyetem Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében található, a Stresstech GmbH. által gyártott, G3R / XSTRESS 3000 röntgendiffraktométert (7. ábra.) használtuk. A méréshez és kiértékeléshez XTronic szoftvert alkalmaztunk. A berendezés a minta roncsolása, darabolása nélkül képes mérni a darab felületében ható maradó húzó- és nyomó feszültségeket, valamint a csúsztató (nyíró) feszültséget, mind  $\psi$ , mind  $\Omega$  módban.



7. ábra. A Stresstech G3R és a sínarab vizsgálat közben

## 2. Vizsgálati eredmények

A vizsgálat során arra kerestünk választ, hogy a repedés kialakulásában milyen szerepe volt a sínszál gyártásakor a hengerlés következtében létrejött, valamint a használat során a sínfejet érő erőhatások miatt kialakult maradó feszültségeknek. Mivel a repedések általában a felület közelében alakulnak ki, és onnan terjednek tovább a sín belseje felé, így a felületben lévő feszültségeket mértük a sín hosszanti irányában. A maradó feszültség negatív előjele a nyomó irányú, míg a pozitív előjele a húzó irányú feszültséget jelöli. Az alkalmazott mérési módszernél a csúsztató feszültség előjelét az határozza meg, hogy milyen előjelű döntési szög ( $\psi$ ) esetén mérünk nagyobb rácssík távolságokat.

A két sínarab felületén mért feszültségeket táblázatokba foglaltuk, majd felületdiagramokon ábrázoltuk a négyzethálós koordinátáinak megfelelően. Az „A” jelű sínarab vizsgálatának eredményeit az 1–2. táblázat és a 8–9. ábra, a „B” jelű sínarabét az 3–4. táblázat és a 10–11. ábra tartalmazza.



1. táblázat

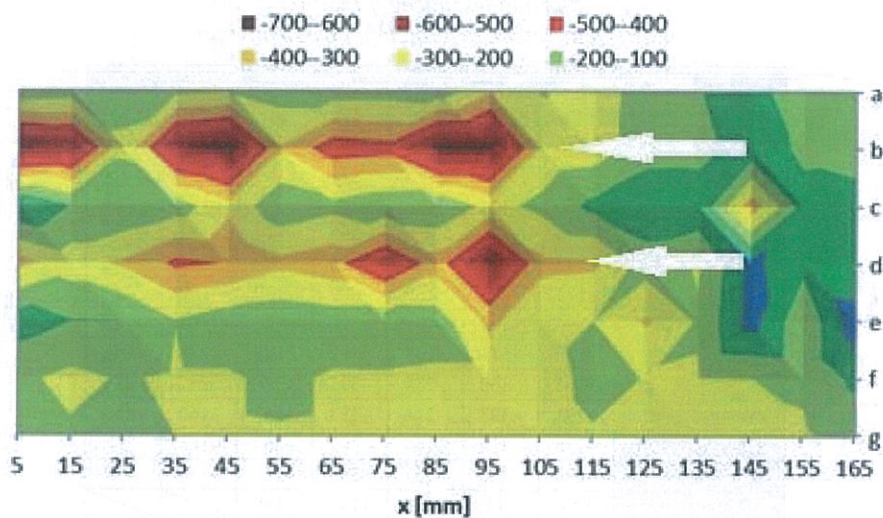
Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa] az „A” jelű  
sindarab felületén, hosszirányban

| Oszlop | x<br>[mm] | Sor  |      |      |      |      |      |      |
|--------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |           | a    | b    | c    | d    | e    | f    | g    |
| 1      | 5         | -115 | -627 | 0    | -331 | -46  | -182 | -148 |
| 2      | 15        | -138 | -580 | -104 | -250 | -98  | -223 | -188 |
| 3      | 25        | -153 | -224 | -100 | -317 | -100 | -193 | -200 |
| 4      | 35        | -173 | -597 | -150 | -420 | -198 | -211 | -200 |
| 5      | 45        | -190 | -658 | -275 | -396 | -144 | -211 | -211 |
| 6      | 55        | -151 | -312 | -125 | -329 | -128 | -180 | -207 |
| 7      | 65        | -150 | -460 | -170 | -366 | -145 | -211 | -211 |
| 8      | 75        | -154 | -439 | -119 | -526 | -141 | -210 | -200 |
| 9      | 85        | -131 | -649 | -108 | -348 | -150 | -219 | -218 |
| 10     | 95        | -291 | -647 | -231 | -625 | -323 | -220 | -232 |
| 11     | 105       | -192 | -272 | -176 | -326 | -223 | -240 | -243 |
| 12     | 115       | -270 | -256 | -73  | -317 | -200 | -175 | -208 |
| 13     | 125       | -134 | -147 | -10  | -156 | -313 | -203 | -254 |
| 14     | 135       | -106 | -142 | -22  | -209 | -190 | -208 | -225 |
| 15     | 145       | -48  | -33  | -364 | 26   | 40   | -201 | -225 |
| 16     | 155       | -188 | -123 | -59  | -75  | -180 | -184 | -215 |
| 17     | 165       | -163 | -151 | -50  | -100 | 57   | -78  | -161 |

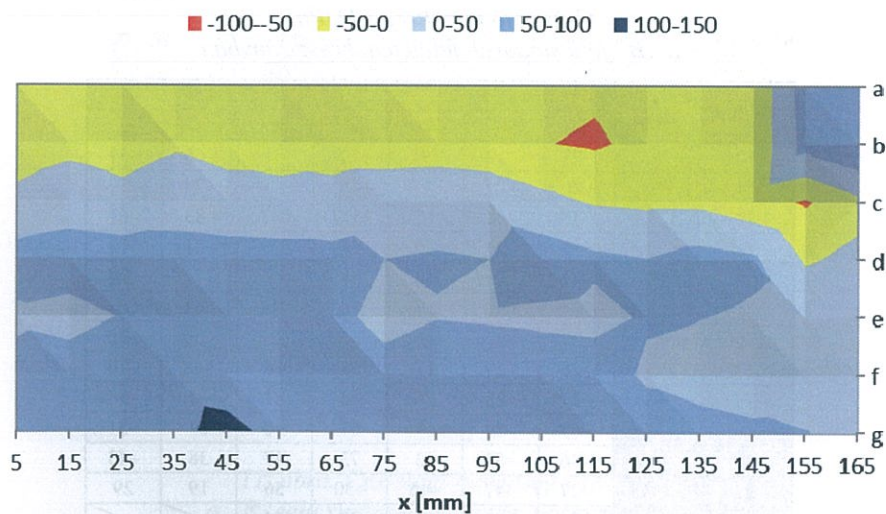
2. táblázat

Csúszótató feszültség  $\tau$  [MPa] az „A” jelű  
sindarab felületén, hosszirányban

| Oszlop | x<br>[mm] | Sor |     |     |    |    |    |     |
|--------|-----------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|
|        |           | a   | b   | c   | d  | e  | f  | g   |
| 1      | 5         | -23 | -21 | 9   | 69 | 43 | 61 | 89  |
| 2      | 15        | -29 | -11 | 24  | 77 | 34 | 71 | 96  |
| 3      | 25        | -26 | -25 | 17  | 71 | 52 | 76 | 85  |
| 4      | 35        | -33 | -6  | 28  | 70 | 57 | 92 | 95  |
| 5      | 45        | -18 | -23 | 26  | 65 | 72 | 89 | 106 |
| 6      | 55        | -30 | -32 | 25  | 63 | 58 | 60 | 94  |
| 7      | 65        | -25 | -24 | 20  | 63 | 68 | 65 | 87  |
| 8      | 75        | -29 | -25 | 31  | 50 | 30 | 73 | 86  |
| 9      | 85        | -39 | -23 | 34  | 53 | 48 | 89 | 90  |
| 10     | 95        | -32 | -27 | 28  | 50 | 44 | 88 | 87  |
| 11     | 105       | -46 | -48 | 13  | 79 | 40 | 78 | 77  |
| 12     | 115       | -43 | -56 | -4  | 60 | 36 | 76 | 86  |
| 13     | 125       | -37 | -37 | -9  | 51 | 55 | 42 | 82  |
| 14     | 135       | -45 | -41 | -10 | 69 | 51 | 22 | 77  |
| 15     | 145       | -40 | -38 | -30 | 59 | 44 | 11 | 64  |
| 16     | 155       | 75  | 69  | -55 | -4 | 33 | 15 | 53  |
| 17     | 165       | 94  | 100 | -13 | 10 | 22 | 10 | 23  |



8. ábra. Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa] az „A” jelű síndarab felületén, hosszirányban



9. ábra. Csúszótató feszültség  $\tau$  [MPa] az „A” jelű síndarab felületén, hosszirányban

3. táblázat

Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa]  
*a „B” jelű síndarab felületén, hosszirányban*

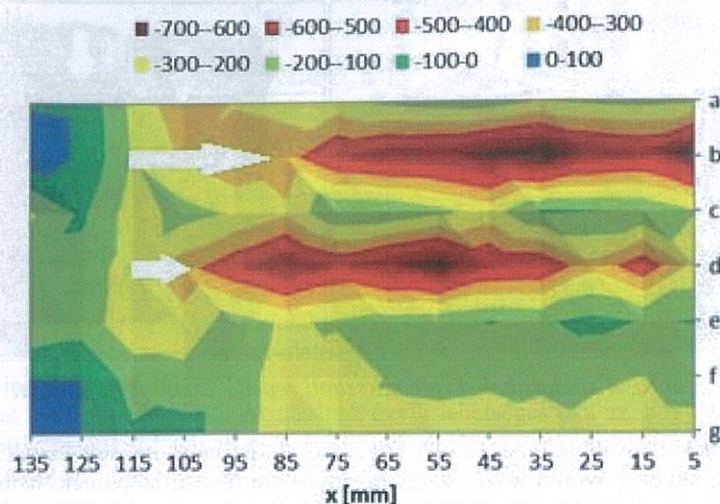
| Oszlop | x<br>[mm] | Sor  |      |      |      |      |      |      |
|--------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |           | a    | b    | c    | d    | e    | f    | g    |
| 10     | 5         | -178 | -780 | -194 | -273 | -96  | -164 | -228 |
| 11     | 15        | -159 | -528 | -108 | -471 | -106 | -201 | -231 |
| 12     | 25        | -173 | -567 | -96  | -330 | -70  | -194 | -212 |
| 13     | 35        | -198 | -702 | -89  | -496 | -114 | -182 | -236 |
| 14     | 45        | -132 | -644 | -244 | -512 | -96  | -193 | -221 |
| 15     | 55        | -142 | -579 | -169 | -669 | -129 | -190 | -214 |
| 16     | 65        | -174 | -563 | -107 | -593 | -145 | -193 | -231 |
| 17     | 75        | -238 | -511 | -103 | -499 | -185 | -278 | -231 |
| 18     | 85        | -266 | -360 | -284 | -593 | -216 | -242 | -252 |
| 19     | 95        | -291 | -393 | -211 | -483 | -147 | -160 | -159 |
| 20     | 105       | -375 | -314 | -164 | -362 | -267 | -165 | -57  |
| 21     | 115       | -226 | -206 | -251 | -253 | -274 | -139 | -87  |
| 22     | 125       | -13  | -11  | -82  | -141 | -140 |      |      |
| 23     | 135       | -6   | 40   | -216 | -132 | -178 |      |      |

4. táblázat

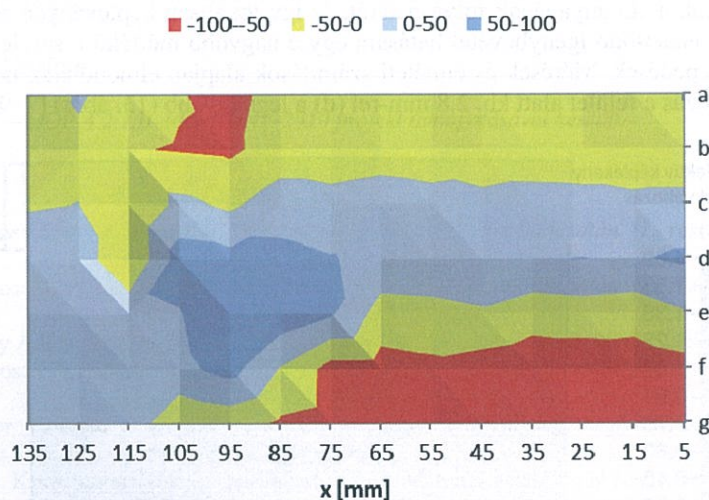
Csúszótató feszültség  $\tau$  [MPa]  
*a „B” jelű síndarab felületén, hosszirányban*

| Oszlop | x<br>[mm] | Sor |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        |           | a   | b   | c   | d   | e   | f   | g   |
| 10     | 5         | -27 | -22 | 9   | 59  | -4  | -66 | -51 |
| 11     | 15        | -20 | -27 | 9   | 45  | -28 | -78 | -59 |
| 12     | 25        | -38 | -28 | 15  | 51  | -23 | -83 | -61 |
| 13     | 35        | -36 | -24 | 16  | 47  | -29 | -81 | -74 |
| 14     | 45        | -27 | -23 | 10  | 48  | -7  | -72 | -74 |
| 15     | 55        | -31 | -30 | 19  | 38  | -17 | -61 | -84 |
| 16     | 65        | -24 | -21 | 24  | 35  | -21 | -69 | -72 |
| 17     | 75        | -26 | -29 | 17  | 53  | 56  | -68 | -70 |
| 18     | 85        | -27 | -28 | 26  | 65  | 81  | -4  | -58 |
| 19     | 95        | -69 | -59 | -9  | 67  | 90  | 67  | -31 |
| 20     | 105       | -46 | -53 | 13  | 73  | 47  | 38  | -43 |
| 21     | 115       | -27 | -47 | -46 | -50 | 36  | 19  | 29  |
| 22     | 125       | 7   | -13 | 1   | 32  | 44  |     |     |
| 23     | 135       | -44 | -38 | -6  | 44  | 38  |     |     |

Az  
feszülts  
igénybe  
alakult  
tetni, ho  
lásának

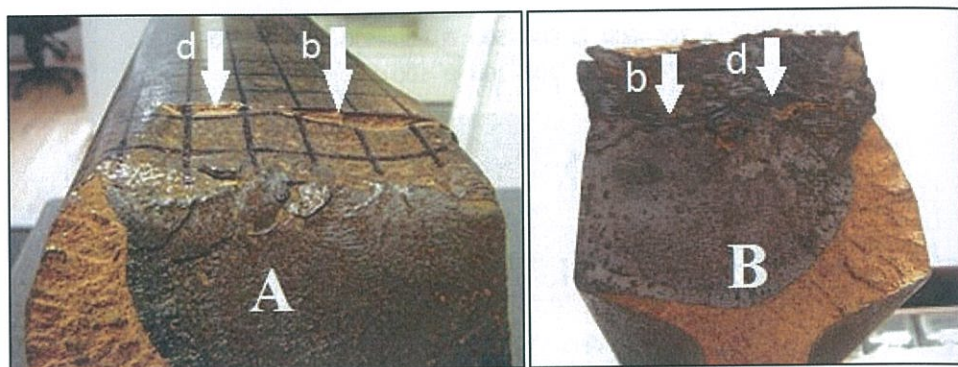


10. ábra. Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa]  
a „B” jelű sındarab felületén, hosszirányban



11. ábra. Csúsztató feszültség  $\tau$  [MPa]  
a „B” jelű sındarab felületén, hosszirányban

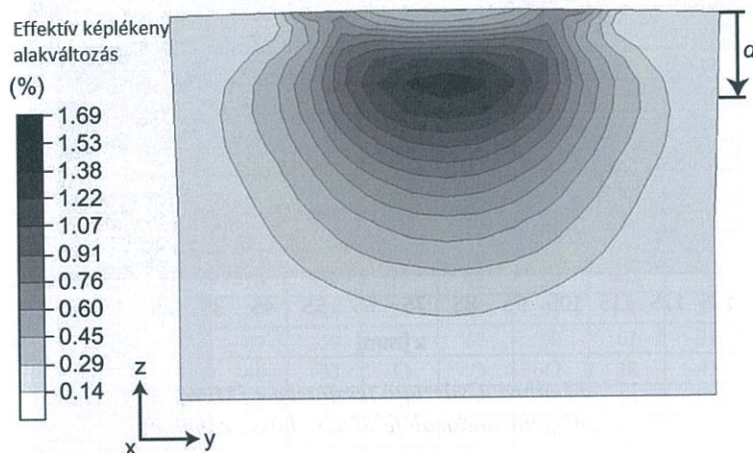
Az eredményekből az látszik, hogy a „b” és „d” sorokban lényegesen nagyobb nyomó feszültségek mérhetők, mint a környezetükben. A sínfej ezen felülete vélhetően nagy igénybevételnek volt kitéve. Továbbá a 12. ábrán megfigyelhető, hogy ezekben a sorokban alakultak ki a repedések a felület alatt a sín hosszanti irányában. Ebből arra lehet következtetni, hogy ezzel a mérési módszerrel meg lehet határozni a felület alatti repedések kialakulásának várható helyét.



12. ábra. A síndarabok törete hosszanti repedésekkel a felület alatt

A diagramokat tovább elemezve megfigyelhető az is, hogy ha már kialakult a felület alatti repedés, akkor a nyomó feszültségek bizonyos mértékben leépülnek. Mindkét sín-darab maradó feszültség ábráján kivehető, hogy a felület alatt meddig húzódik a repedés (8. és 10. ábrán fehér nyilak).

A felület alatti repedések kialakulásának egyik lehetséges oka az, hogy a vonat kereke által kifejtett nagy nyomó irányú és nyíró feszültségek (esetenként  $>1000$  MPa) egyes esetekben elérhetik a sín anyagának folyáshatárát, és így lokálisan képlékenyen alakváltozhat az anyag. Az ismétlődő igénybevétel hatására egyre nagyobb mértékű a sérülés, és megjelenhetnek a repedések. Mérések és elméleti számítások alapján elmondható, hogy a képlékeny alakváltozás a felület alatt kb. 2,8 mm-rel (d) a legnagyobb (13. ábra) [7–9].



13. ábra. Effektív képlékeny alakváltozás mértéke a sín keresztmetszeti képén [7]

A csúsztató feszültségek ábráiról az olvasható le, hogy a futófelületen elhaladó vonatke-rekek milyen irányú nyíróerőket fejtettek ki a felületre. A csúsztató feszültségek iránya megegyezik a nyíróerők irányával a sín hosszanti irányában.

## Összefoglalás

A vizsgálat során arra kerestünk választ, hogy a repedések kialakulásában milyen szerepet játszanak a sín felületében kialakult maradó feszültségek.

Az eredmények azt mutatják, hogy az ismétlődő igénybevételek hatására a sín futófelületén nyomó irányú maradó feszültség alakult ki. A „b” és „d” sorokban lényegesen nagyobb (2–4x) nyomó feszültségek mérhetők, mint a környezetükben. Ebből arra következtethetünk, hogy a sínfej ezen felületét érte a legnagyobb igénybevétel, ami párhuzamot mutat azzal a ténnyel, hogy ezekben a sorokban alakultak ki a hosszanti repedések a felület alatt. Ez a párhuzam arra engedtet következtetni, hogy ezzel a mérési módszerrel meg lehet határozni a felület alatti repedések kialakulásának várható helyét. Megfigyelhető továbbá az is, hogy ha már kialakult a felület alatti repedés, akkor a nyomó feszültségek bizonyos mértékben leépülnek a felületen.

A felület alatti repedések kialakulásának egyik lehetséges oka az, hogy a vonat kereke által kifejtett nagy nyomó irányú és nyíró feszültségek (esetenként  $>1000$  MPa) egyes esetekben elérhetik a sín anyagának folyáshatárát, és így lokálisan képlékenyen alakváltozhat az anyag. Az ismétlődő igénybevétel hatására egyre nagyobb mértékű a sérülés, és megjelenhetnek a repedések.

A felszínen mérhető csúsztató feszültségek a futófelületen elhaladó vonatkerekek által kifejtett nyíróerők hatására alakultak ki. Irányuk megegyezik a nyíróerők irányával a sín hosszanti irányában.

## Köszönetnyilvánítás

*Jelen cikk a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010 projekt támogatásával készült.*

## Irodalom

- [1] Béli János: *Sínfej-hajszálrepedés megjelenése a MÁV vonalhálózaton (1. rész)*. Sínek világa 2010/2.
- [2] Béli János: *Sínfej-hajszálrepedés megjelenése a MÁV vonalhálózaton (2. rész)*. Sínek világa 2010/3.
- [3] Szemerey Ádám: *Sínfej-hajszálrepedés – Gyakorlati tapasztalatok (3. rész)*. Sínek világa 2010/4.
- [4] Béli János: *Sínfej-hajszálrepedés megjelenése a MÁV vonalhálózaton (4. rész)*. Sínek világa 2011/1.
- [5] Mertinger V.–Cseh D.–Benke M.–Zirigh N.: *Maradó feszültség meghatározásának innovatív eszköze a Lisa laboratóriumban*. (megjelenés alatt)
- [6] Aaron D. Krawitz: *Introduction to Diffraction*. In: Material Science and Engineering, pp. 298–
- [7] Jonas W. Ringsberg–Torbjörn Lindbäck: *Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheelrail contact loads*. International Journal of Fatigue, 25 (2003), pp. 547–558.
- [8] U. Zerbst–R. Lundén–K.-O. Edel–R. A. Smith: *Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review*. Engineering Fracture Mechanics, 76 (2009), pp. 2563–2601.
- [9] JungWon Seo–Seok Jin Kwon–HyenKue Jun–DongHyeon Lee: *Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel*, International Journal of Fatigue, 33 (2011), pp. 203–211.