

## **MARADÓ FESZÜLTÉG 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 hajszálrepedések alakulhatnak ki a sínfejen a kerék/sín érintkezési pontján. Az ilyen sínhibákat sínfej-hajszálrepedésnek (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-hajszálrepedés

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**

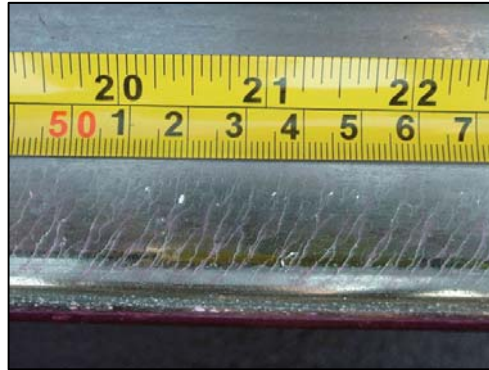
A gördülő érintkezés okozta fáradás hatására hajszálrepedések alakulhatnak ki a sínfejen a kerék/sín érintkezési pontján (1. ábra.) a sín kereszt- és hosszirányában egyaránt.

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 hajszálrepedéseknek.

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

---

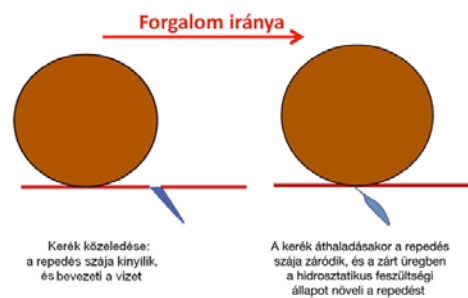
<sup>1</sup> Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet  
3515 Miskolc-Egyetemváros  
zirighnorbert@gmail.com



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. fejedzett 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 sinkenőkből és a járművekből. A folyadékok beszívórognak 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 1mm-t, csekély kitérő 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. Ezek 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 sínfejben, ami sántöréshez vezet.

A vizsgálat tárgyát képező síndarabok sínfejének 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.

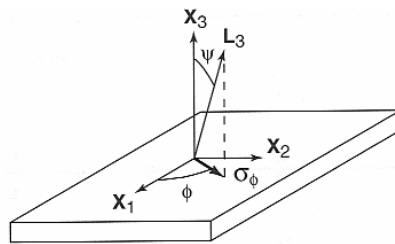
A makroszkopikus maradó feszültség a fém anyagban a fémrács rácspontjaiban elhelyezkedő fém atomtörzsek egyensúlyi helyzetből való kitérését eredményezi. Kristálytani megközelítésben ez azt jelenti, hogy változik a darab rácsparamétere. Mivel az anyagban a rugalmas maradó rácsfeszültség hatására a rácscsúcsok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

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

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

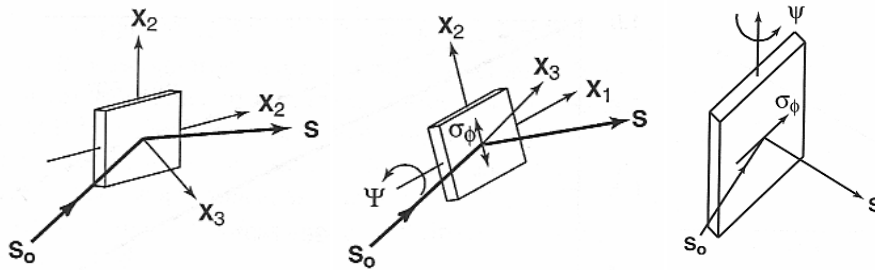
A módszer lényege, hogy a kiválasztott síksorozat távolságának változását az ábra szerint  $X_3$  illetve azzal  $\psi$  szöget bezáró  $L_3$  irányból ( $d_3, d_\psi$ ) határozzuk meg, és ennek, valamint a vizsgált anyag rugalmassági modulusa ( $E$ ) és Poisson-száma ( $\nu$ ) ismeretében a keresett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

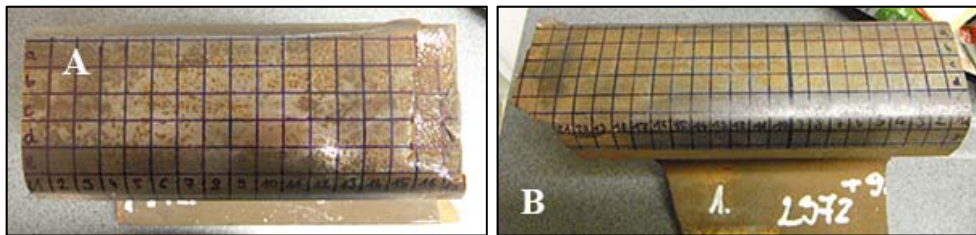
Méréstechnikai oldalról ez azt jelenti, hogy a normál méréstechnika mellett a sugármenet ( $s_0$ ,  $s$  vektorok szimbolizálják) és a minta felülete között  $\psi$  döntési helyzetet is meg kell valósítanunk. A döntési pozíció kétféle lehet. Normál,  $\psi$  és  $\Omega$  elrendezésre mutat példát az 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 sinszálból 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 Fémtechnológiai, 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 síndarab 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 síndarab felületén mért feszültségeket táblázatokba foglaltuk, majd felületdiagramokon ábráztuk a négyzetháló koordinátáinak megfelelően. Az „A” jelű síndarab vizsgálatának eredményeit az 1–2. táblázat és a 8–9. ábra, a „B” jelű síndarabét az 3–4. táblázat és a 10–11. ábra tartalmazza.

1. táblázat

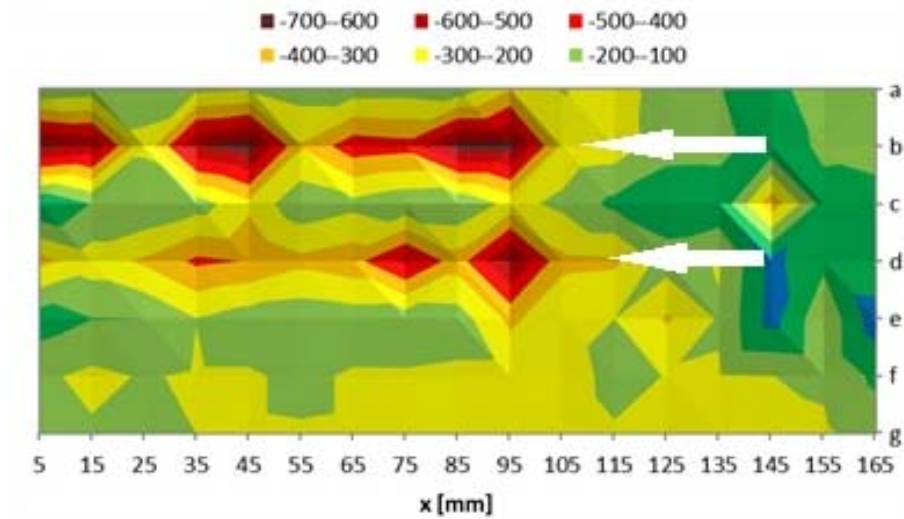
Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa] az „A” jelű  
sínarab felületén, hosszirányban

Oszlop	x [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

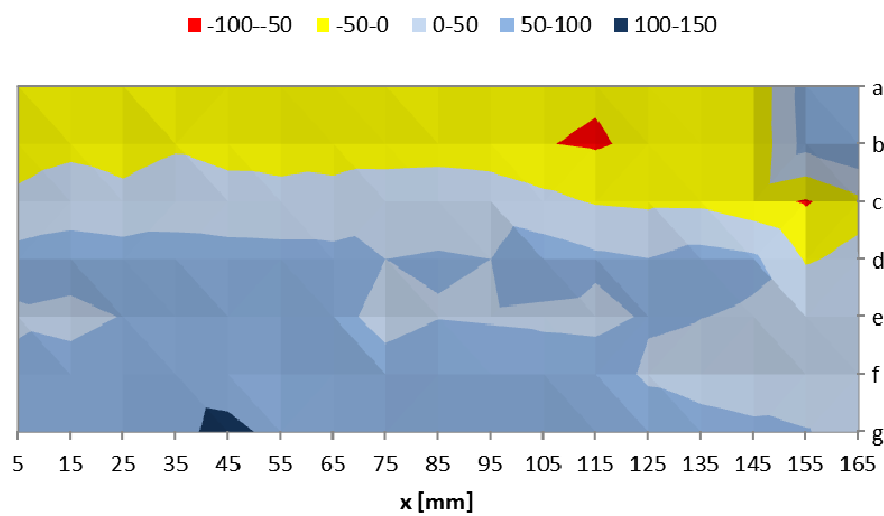
2. táblázat

Csúsztató feszültség  $\tau$  [MPa] az „A” jelű  
sínarab felületén, hosszirányban

Oszlop	x [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. Csúsztató feszültség  $\tau$  [MPa] az „A” jelű síndarab felületén, hosszirányban

3. táblázat

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

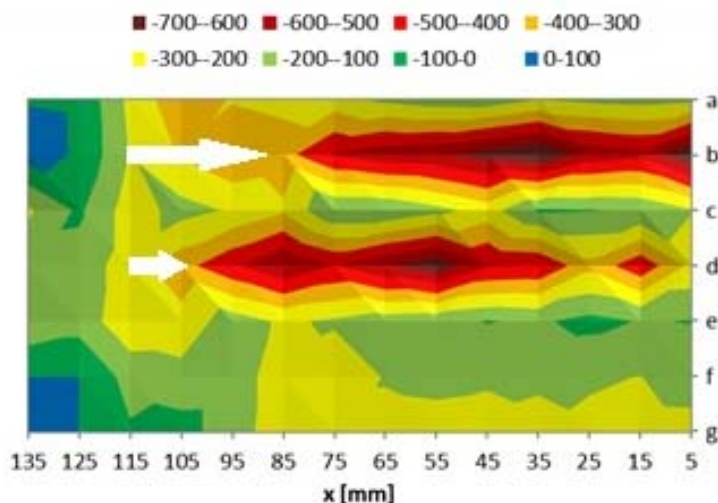
Oszlop	x [mm]	Sor						
		a	b	c	d	e	f	g
10	5	-178	-780	-194	-273	-96	-164	-228
11	15	-159	-528	-108	-471	-106	-201	-231
12	25	-173	-567	-96	-330	-70	-194	-212
13	35	-198	-702	-89	-496	-114	-182	-236
14	45	-132	-644	-244	-512	-96	-193	-221
15	55	-142	-579	-169	-669	-129	-190	-214
16	65	-174	-563	-107	-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

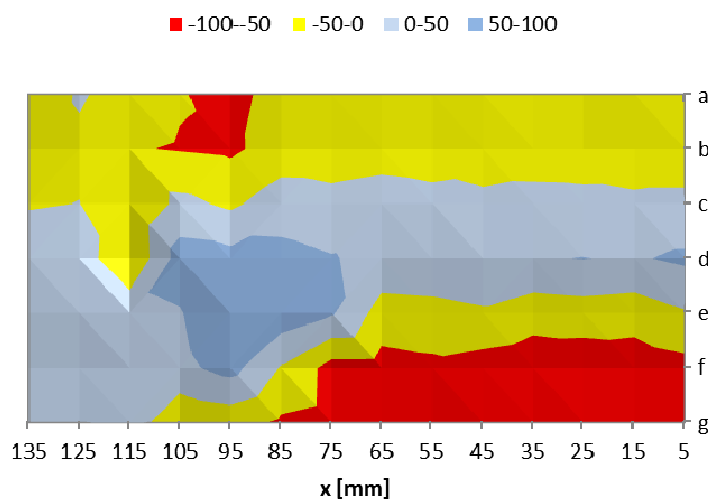
Csúsztató feszültség  $\tau$  [MPa]  
a „B” jelű sánc felületén, hosszirányban

Oszlop	x [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		



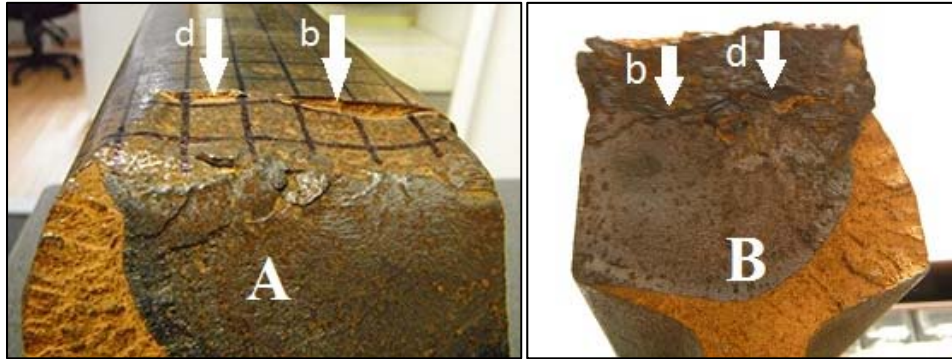


10. ábra. Maradó feszültség  $\sigma$  [MPa]  
a „B” jelű sındarab felületén, hosszirányban



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

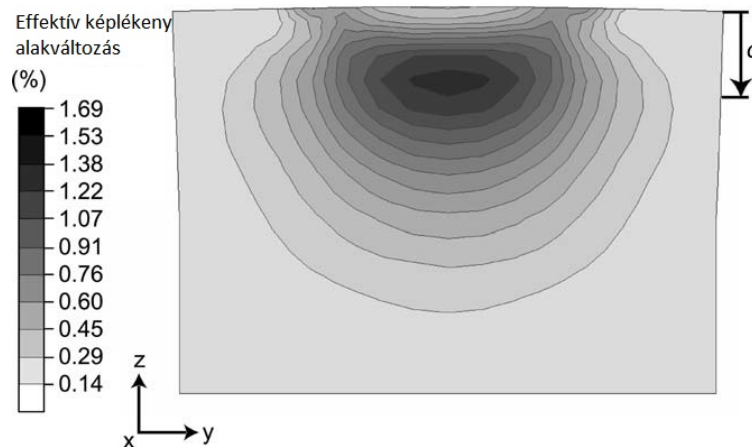
Az eredményekből az látszik, hogy a „b” és „d” sorokban lényegesen nagyobb nyomó feszültségek mérhetők, mint a környezetükben. A sínfej ezen felülete vélhetően nagy igénybevételnek volt kitéve. Továbbá a 12. ábrán megfigyelhető, hogy ezekben a sorokban alakultak ki a repedések a felület alatt a sín hosszanti 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 síndarab 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 vonalhálózatán (1. rész)*. Sínek világa 2010/2.
- [2] Béli János: *Sínfej-hajszálrepedés megjelenése a MÁV vonalhálózatán (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 vonalhálózatán (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–DongHyeong Lee: *Numerical stress analysis and rolling contact fatigue of White Etching Layer on rail steel*, International Journal of Fatigue, 33 (2011), pp. 203–211.

Kiadja a Miskolci Egyetem Tudományszervezési és Nemzetközi Osztálya  
A kiadásért felelős: Prof. Dr. Dobróka Mihály rektorhelyettes  
Megjelent a Miskolci Egyetemi Kiadó gondozásában  
A kiadó felelős vezetője: Burmeister Erzsébet  
Készült a Miskolci Egyetem Sokszorosító Üzemében, Miskolcon  
A sokszorosításért felelős: Pásztor Erzsébet  
Példányszám: 200  
TNO – 2013 – 39 – ME

ISSN 2063-6784