

A HŐTÁGULÁS OKOZTA REPEDÉS VIZSGÁLATA VÉGESELEMES MÓDSZERREL

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CRACKS CAUSED BY THERMAL EXPANSION

Máté Tamás, M.Sc. hallgató

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: matetamas01@gmail.com*

Dr. Zwierczyk Péter T., Adjunktus

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: z.peter@gt3.bme.hu*

ABSTRACT. In this paper, a new FE crack propagation method called SMART was studied in order to validate to implement in the next investigation of Thermal RCF phenomena. The validation was performed on a CTS specimen with mixed-mode loading conditions, evaluating the crack propagation angle. The results indicate that the new method performs well and shows similar values as the experimental evaluation.

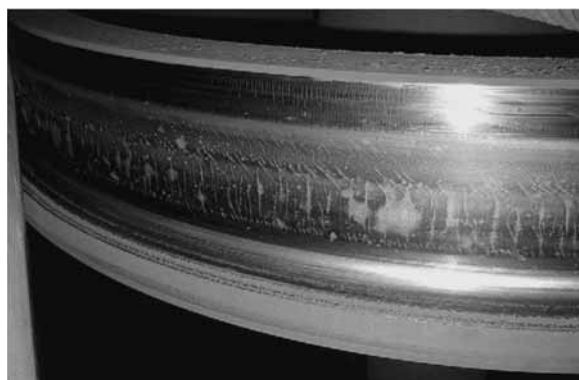
1. BEVEZETÉS

Vasúti kerekek esetében számos ok vezethet meghibásodáshoz, amely jelentősen befolyásolhatja a biztonságos menettulajdonságokat és a karbantartás költségeit. Az intenzív fékezésekkel járó tapadásvesztés blokkolásgátlóval szerelt járművek esetében nemkívánatos hőterhelést vonhat maga után a kerék futófelületén, amely jelentős hőtágulást eredményez nem csak a felületen, hanem közvetlenül alatta is [1]. Ezáltal káros maradó feszültségek keletkezhetnek a lehűlést követően.

Ezek az alkalmanként jelentkező hőterhelések és a folyamatos ciklikus sín-kerék kapcsolatból származó terhelések együttesen úgynevezett gördülő felületi kifáradáshoz (angol irodalomban Rolling Contact Fatigue, RCF) és ezáltal termikus repedések keletkezéséhez vezethetnek (1. ábra.).

Számos kutatás irányul az RCF jelenség mechanizmusának feltárására annak érdekében, hogy a tönkremenetelhez szükséges időt pontosabban meglehessen becsülni és ezzel a járművek üzemeltetési és biztonsági kockázatait csökkenteni lehessen.

A cikk célja egy új végeselemes repedésterjedési metódus bemutatása és validálása, amely a későbbiekben implementálható lehet különféle RCF problémák vizsgálatára.



1. ábra. Termikus repedésekkel borított kerék felülete [2]

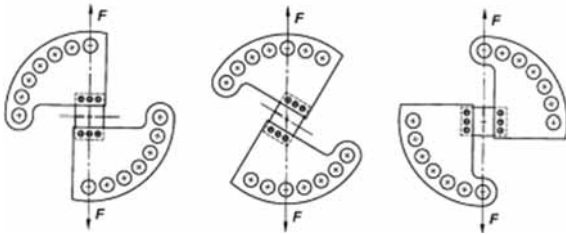
2. REPEDÉSEK VIZSGÁLATA

Repedések esetén tiszta egyirányú igénybevétel nagyon ritkán van jelen a gyakorlatban. Esetünkben az RCF jelenségnél is, Mode-I és Mode-II (4. ábra. Repedés terhelési módok), húzó és nyíró igénybevétel keveréke adja a terhelést. Ilyenkor a terjedő repedés sík normálisának iránya változik a kezdeti repedéséhez képest [3] (3. ábra.).

A vegyes terhelésű kifáradás tesztelése a mai napig nincs szabványosítva, ezért nehéz egyértelmű párhuzamokat vonni különböző geometriájú és mérés elrendezésű vizsgálatok között. Az egyik közkeletesen alkalmazott mérés Richard [4] által leírt és alkalmazott vizsgálat, amely a CTS (Compact Tension Shear specimen) próbatest és a terhelőkészülék (2. ábra) segítségével ad információt a repedésterjedés paramétereiről.

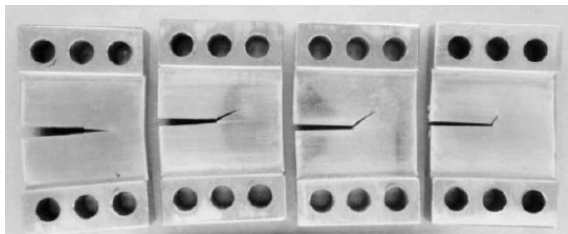
Peixoto és de Castro [5] ezt a módszert használta a vasúti kerék felszín alatti RCF repedésterjedés szimuláció paramétereinek validálására. A validálás a különböző numerikus számítások

és a kísérleti próbatest repedésterjedési szögének összehasonlításával történt.



2. ábra. Compact Tension Shear (CTS) próbatest geometriája és a terhelőkészülék [3]

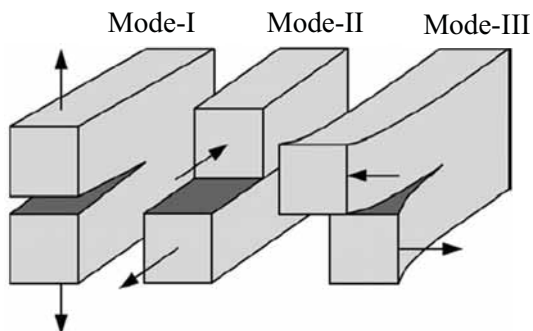
Ebben a cikkben az Ansys 19-es verziójában megjelent S.M.A.R.T. (Separation Morphing and Adaptive Re-meshing Technology) [6], új numerikus repedésterjedést modellező módszer kerül validálásra Peixoto és de Castro [5] mérésiének segítségével.



3. ábra A repedésterjedés iránya különböző vegyes terhelési irányokra CTS próbatesten [3]

3. VÉGESELEMES VIZSGÁLAT

A vizsgálatot három terhelési szögben végezzük: 30°, 45°, 60°, Peixoto és de Castro [5] cikke alapján.



4. ábra. Repedés terhelési módok [7]

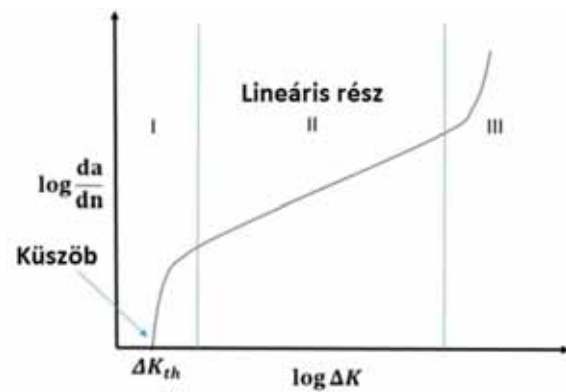
3.1. Repedésterjedés módszer - S.M.A.R.T.

A S.M.A.R.T. repedés-terjedést modellező eszköz előnye, hogy a repedés terjedésével egyidőben, lépésről lépésre frissíti a modellt a számításához szükséges hálót, így a felhasználó

könnyedén tudja vizsgálni az előre definiált repedést, hogy az miként és merre terjed tovább. A módszer lineáris törésmechanikai feltételezéssel dolgozik (LEFM – Linear Elastic Fracture Mechanics) [6]. A módszer által használt repedésterjedés modell a Paris törvény (1), amely megadja az adott anyagra és repedésre a repedés növekedési faktort [8] a repedésterjedés lineáris szakaszán (5. ábra.).

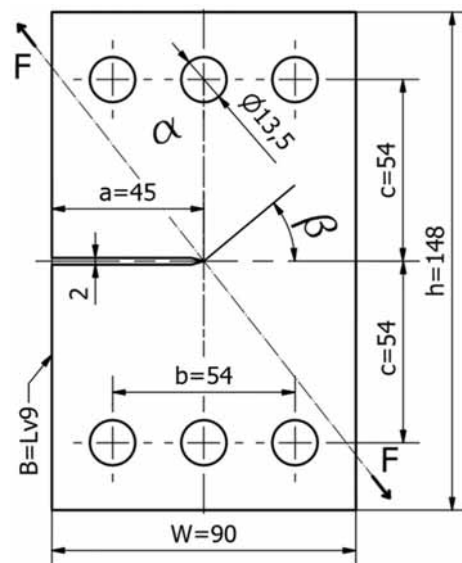
$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

C és m a Paris törvény konstansai (a a repedés hossza, N a terhelési ciklusok száma, ΔK a feszültségintenzitási tényező tartománya), melyek az anyagtól és a repedés karakterisztikájától függenek.



5. ábra. Fáradásos repedés viselkedése fémekben [6]

3.2. Geometria felépítése – Repedés definiálása



6. ábra. CTS próbatest és méretei

3.3. Anyagjellemzők

A repedésterjedés modellnek megfelelően a próbatest anyaga homogén izotrópnak feltételezett, lineárisan rugalmas viselkedésű acél. $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$.

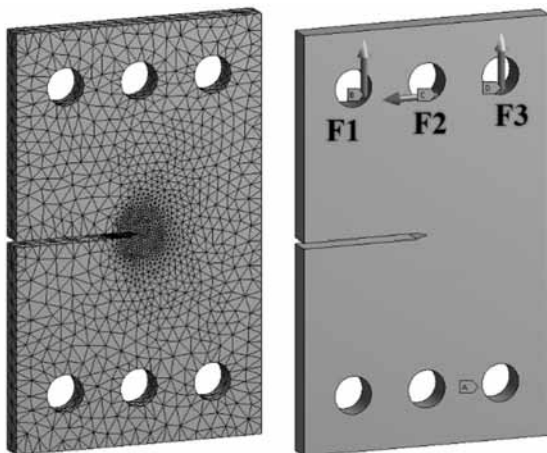
1. táblázat Paris törvény három terhelési estre adódó konstansai [5]

α	C	m
30°	2.87E-11	4.81
45°	7.49E-11	4.45
60°	3.24E-11	4.82

3.4. Végeselem háló felépítése

A háló tetraéder elemekből épül fel. Globális mérete 3 mm, a repedés torkánál 10 mm-es sugárban 1 mm-es elem sűrítés található (7.ábra.).

3.5. Peremfeltételek – Terhelések



7. ábra. A háló felépítése a próbatesten valamint a terhelések és a peremfeltételek

A próbatest az alsó 3 furatban hengeres kényszerrel van rögzítve axiális és radiális irányban. Terhelése $F = 1000 \text{ N}$ erő, amely a felső 3 furat (F_1, F_2, F_3) között van elosztva sorban, a következő összefüggések szerint [4]:

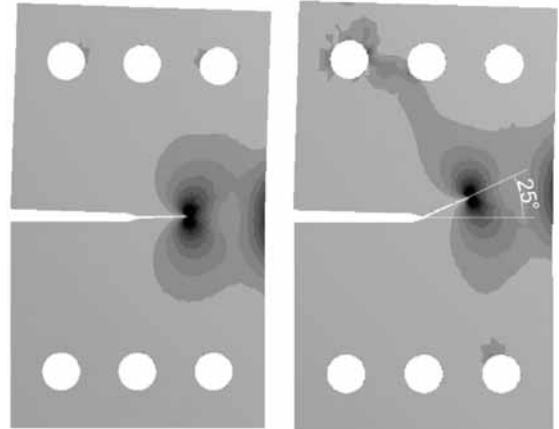
$$F_1 = F \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{c}{b} \sin \alpha \right), \quad (2)$$

$$F_2 = F \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

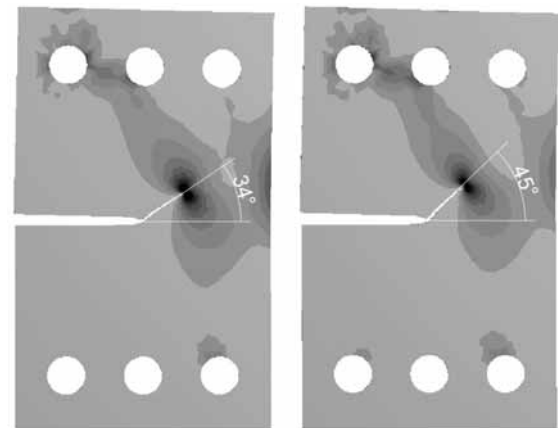
$$F_3 = F \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{c}{b} \sin \alpha \right). \quad (4)$$

3.6. Eredmények

A kiértékelés nem feszültségoldalról, hanem fizikai-geometria oldalról történt, ebből kifolyólag az ábrákon látható skála nem mérvadó. Ahogy a 8. és 9. ábrán látható, a repedések terjedési szöge a terhelési szög növelésével szintén növekszik, tehát a tendencia megfelelő.



8. ábra. $\alpha = 0^\circ$ és $\alpha = 30^\circ$ -os terhelés esetén a repedés β szöge



9. ábra. $\alpha = 45^\circ$ és $\alpha = 60^\circ$ -os terhelés esetén a repedés β szöge

2. táblázat Peixoto és de Castro [5] - SMART módszer eredményeinek összehasonlítása

α	30°	45°	60°
β - Numerikus	26°	37°	49°
β - Abaqus (MTS)	25°	36°	48°
β - Kísérleti	23°	34°	46°
β - S.M.A.R.T.	25°	34°	45°

A 2. táblázatban találhatóak összehasonlítva a [5]-ben számított eredmények az Ansys új S.M.A.R.T. moduléval. Látható, hogy az eltérés

a kísérleti értékekhez képest csak 1-2 fok, és az egyéb numerikus módszerekhez képest sem számottevő, tehát elmondhatjuk, hogy az algoritmus megfelelően számítja a repedésterjedés irányát összehasonlítva a korábban publikált számításokkal.

Látható, hogy a módszer minimális eltérést mutat mind a kísérleti, mind a numerikus és az Abaqus által széles körben elterjedt módszerhez képest.

4. AZ IMPLEMENTÁLÁSI TERÜLETRŐL

A nagy hőterelés hatására termikus repedések keletkezhetnek. Ezt már feszültségi oldalról vizsgálta Zwierczyk Péter T. [9] és Váradi Károly [1]. Azért, hogy egy átfogóbb képet kapjunk a jelenség mechanizmusának megértésére szükséges, hogy a feszültség oldal mellett bemenő kritériumként vizsgáljuk a repedésterjedést is.



10. ábra. Termikus mikrorepedések a kerék felületén és a kerék oldalára is kiterjedt fáradásból adódó repedés [10]

5. ÖSSZEFOGALALÁS

Ebben a vizsgálatban CTS próbatesten tanulmányoztuk numerikus számítással a repedésterjedés irányát vegyes terhelés (Mode-I, Mode-II) hatására. A repedés irányának meghatározására az Ansys új S.M.A.R.T. módszerét használtuk, amely előnye, hogy minden megoldási lépésben automatikusan újrahálózza a modellt, így a felhasználó időt spórolhat. A cél az új módszer validálása volt Peixoto és de Castro [5] CTS kísérletei alapján. A lefutott számítások alapján elmondható, hogy a módszer eleget tesz a vártaknak, megfelelően kis hibával szimulálja a fizikai kísérletet.

A validálásra azért volt szükség, mert a későbbiekben ezt a módszert szeretnénk termikus repedések vizsgálatára használni.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az alábbi tanulmány és publikáció a Knorr-Bremse Ösztöndíjprogram keretében kerülhetett megvalósításra a Knorr-Bremse Rail Systems Budapest támogatásával.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] P. T. Zwierczyk and K. Váradi, "Thermal Stress Analysis of a Railway Wheel in Sliding-Rolling Motion," *J. Tribol.*, vol. 136, no. 3, pp. 031401-031401-8, May 2014.
- [2] K. Handa, Y. Kimura, and Y. Mishima, "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat," *Wear*, vol. 268, no. 1, pp. 50-58, Jan. 2010.
- [3] S. B. Biner, "Fatigue crack growth studies under mixed-mode loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 23, pp. 259-263, Jan. 2001.
- [4] H. A. Richard, "Bruchvorhersagen bei überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung von Rissen," *VDI-Forschungsheft*, vol. 631, pp. 1-60, 1985.
- [5] D. F. C. Peixoto and P. M. S. T. de Castro, "Fatigue crack growth of a railway wheel," *Engineering Failure Analysis*, vol. 82, pp. 420-434, Dec. 2017.
- [6] "SMART Crack Growth." [Web]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v190/wb_sim/ds_smart_crack.html?q=smart. [Accessed: 24-Oct-2018].
- [7] A. Ekberg and E. Kabo, "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview," *Wear*, vol. 258, no. 7, pp. 1288-1300, Mar. 2005.
- [8] P. C. Paris, M. P. Gomez, and W. P. Anderson, "A Rational Analytic Theory of Fatigue," *The Trend in Engineering*, no. 13, pp. 9-14, 1961.
- [9] P. T. Zwierczyk, "Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact," PhD Thesis, Budapest, 2015.
- [10] E. R. Wuhrer, M. Cortie, P. Laczko, and P. J. Mutton, *Metallurgical and Ndt Aspects in the Management of Overheated Railway Wheels*. 2006.