

HOT-SPOT VÁNDORLÁS HŐTANI ELEMZÉSE

DIE THERMISCHE ANALYSE DER „HOT-SPOT” WANDERUNG

Szűcs Péter MSc hallgató*; Dr. Váradi Károly MTA doktora, egyetemi tanár*
* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

INHALT. Während der Untersuchung ist die Heißpunktwanderung der Bremsklötze mit FE Analyse geprüft worden. Bei den Analysen sind die Bewegung und die Zunahme der Wärmequelle aufgrund der Grundsätze zweier unterschiedlichen Abnutzungsmechanismen gesteuert worden. Als Anfangspunkt dienten die Ergebnisse der Temperaturmessungen, die an der Technischen und Wirtschaftswissenschaftlichen Universität Budapest, Lehrstuhl für Eisenbahnfahrzeuge und Fahrzeugsystemanalyse gemessen worden sind. Als Ergebnisse haben wir den Vergleich der Analysen und der Temperaturmessungen zusammengefasst. Die Endergebnisse der thermischen Analysen haben die bewegende Abnutzung (Wärmequelle) eindeutig bestätigt.

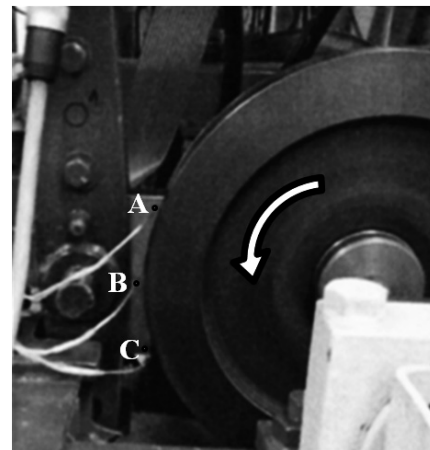
1. BEVEZETÉS

A tuskós fékrendszerek kopási folyamatainak megismerése és modellezése már több vizsgálat tárgyát képezte [1], [2]. A súrlódás, kopás, hőfejlődés valamint az anyagjellemzők hőmérsékletfüggése rendkívül bonyolulttá teszi a lejátszódó jelenség modellezését. A mai számítástechnikai háttér mellett is szükséges, hogy közelítő feltevésekkel vizsgáljuk a problémát. Vizsgálatunk célja az volt, hogy két kopási elmélet feltevéseire alapozva transziens hőtani analízisekkel közelítsük a hőmérsékletmérésből származó adatokat, majd az eredményeket kiértékelve megállapításokat tegyünk a lejátszódó folyamat lehetséges magyarázatára. A vizsgálatoknál elhanyagoltuk a kopást, a hőpartíciók időbeli változását, valamint a tuskóerő és a súrlódással fejlődött hő geometriát deformáló hatását is. A nagyléptékű egyszerűsítések mellett egy fontos alapelv érvényesült a hőtani analízisek terhelésvezérlésénél, mely szerint a hőforrás helye és az aktuális érintkezési tartomány minden időpillanatban megegyezik. A kiértékeléshez a hőtani számítások eredményeit transziens szilárdságtani analízisekbe importáltuk terhelésként, majd

az itt kapott eredményeket közelítő analitikus számításokkal ellenőriztük.

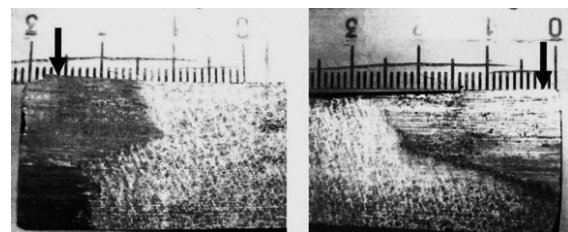
2. KIINDULÓ ADATOK

A mérések során a kisminta féktuskót 3 termoelemmel látták el (1. ábra), melyek a 100 másodperces mérés alatt hőmérsékleti adatokat szolgáltatottak. A mérés ideje alatt konstans értékű adatnak tekinthető a tuskóerő ($F_t=500$ N), a súrlódási tényező ($\mu=0,3$) és a kerületi sebesség ($v_k=11,6$ m/s).



1. ábra. A termoelemek elhelyezkedése [4]
(A: belépőoldali, B: középső, C: kilépőoldali)

Az 1:4-es méretarányú kisminta féktuskót úgy gyártották, hogy belső ívének sugara kisebb, mint a kerék sugara, így az érintkezési tartomány kezdetben a tuskó széléinél található. A 100 másodperces fékezés eredményeképpen kapott kopásminta a be- és kilépő oldalak esetén a 2. ábrán látható.



2. ábra. Belépőoldali (jobbra) és kilépőoldali (balra) kopásminta a mérés végén [4]

3. A VÉGESELEM MODELL FELEPÍTÉSE

Az analízisekhez a bemutatott kisminta féktuskó modelljét használtuk, melynél tuskó belső íves felületét kis felületdarabokra osztottuk a kopásminta diszkretizálásához. Hálósűrítési okok miatt a geometriai testmodellt 3 részre vágtuk.

3.1 Anyagmodell és anyagjellemzők

A számításokhoz lineárisan rugalmas anyagmodellt használtunk, melynél figyelembe vettük az anyagjellemzők nagy részének hőmérsékletfüggését is. A sűrűség kivételével, az anyagjellemzők megegyeznek a [3]-as irodalomban található értékekkel.

$$\text{- Sűrűség: } 7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

3.2 Hőtani peremfeltételek

A féktuskó által felvett hőmennyiség a tuskó felületein át környezeti levegő és a befogószerkezet felé hőátadással távozik. Az oldalfelületeken a hőátadást $20 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ hőátadási tényező és $35[^\circ\text{C}]$ -os környezeti hőmérséklet jellemzi. A csatlakozó furaton intenzívebb hőterjedést feltételeztünk a fém részek felé, ezért itt $100 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ hőátadási tényezőt adtunk meg. A féktuskó kiinduló hőmérséklete szintén $35[^\circ\text{C}]$.

3.3 Terhelések

A hőtani analízisek terhelését az időben konstans értékű, mozgó hőforrások jelentik. A súrlódási folyamat során fejlődő hőmennyiség az 1. összefüggés alapján számítható.

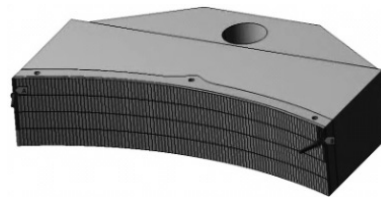
$$\begin{aligned} Q &= F_N \cdot \mu \cdot v_k = \\ &= 500 \text{ [N]} \cdot 0,3 \text{ [-]} \cdot 11,6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = 1740 \text{ [W]} \quad (1.) \end{aligned}$$

A teljes hőmennyiség egyik része a kerék felé, másik része pedig a féktuskó felé terjed. Mind a kerékre jutó, mind a féktuskóra jutó hányszor további két részre bontható a két érintkezési tartomány miatt. Az egyik rész a belépő él környezetében, a másik rész pedig a kilépő él környezetében fejlődött hő. Terhelésként a belépő oldalon 185 [W] míg a kilépő oldalon 133 [W] hőteljesítményt használtunk [3.], [4.]. A hőterhelések nagysága, a féktuskó mindkét oldalán, az analízis végéig konstans értékű.

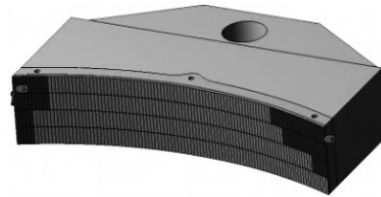
4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE A NEM VÁNDORLÓ KOPÁS ELVE ALAPJÁN

Az analízisnél a hőterhelés megadásának helye (későbbiekben érintkezési tartomány) és mérete, azt az elvet követi, hogy az érintkezési tartomány a tuskó széleitől indulva a tuskó közepe felé folyamatosan növekedik a fékezési folyamat végéig. A folyamat során a konstans hőteljesítmény és a degresszíven növekedő érintkezési tartomány egyre kisebb hőáramsűrűséget eredményez.

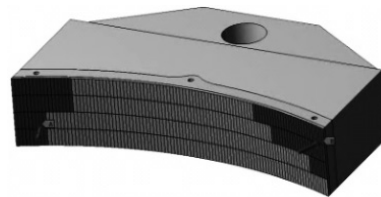
Az analízis három időintervallumban érvényes érintkezési tartományokat a 3., 4. és 5. ábrák szemléltetik.



3. ábra. Érintkezési zónák 0-5 másodperc között

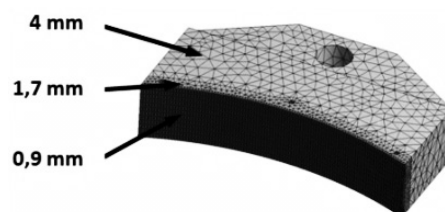


4. ábra. Érintkezési zónák 45-54 másodperc között



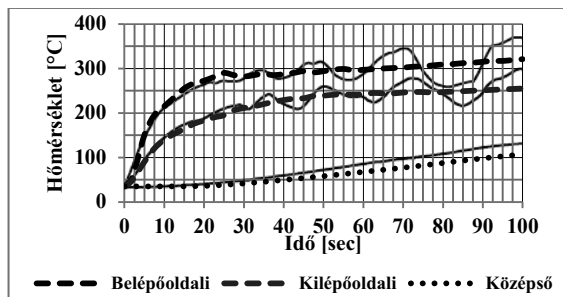
5. ábra. Érintkezési zónák 91-100 másodperc között

A végeselemes háló, amely 10 csomópontos tetraéder elemekből épül fel a 6. ábrán látható.



6. ábra. A végeselemes háló

A nem vándorló érintkezési tartomány feltevései alapján vezérelt analízis a mérési eredményeket csak globálisan tudta lekövetni, nem volt alkalmas a forrópont vándorlásra jellemző lokális hőmérsékleti maximumok és minimumok visszaadására. Az érintkezési tartomány méretének időbeli alakulása csak a felmelegedési görbék meredekségére volt hatással. Az analízis és a hőmérsékletmérési eredményeit a 7. ábrán hasonlítjuk össze. A mérési eredmények fekete folytonos vonallal láthatóak a diagramon.



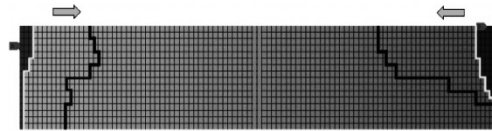
7. ábra Felmelegedési görbék

5. MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE A VÁNDORLÓ KOPÁS ELVE ALAPJÁN

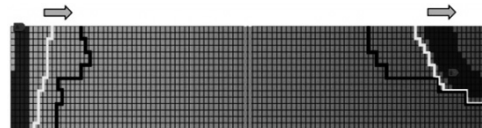
A hőterhelés-vezérlés elve azon alapul, hogy egy kisebb, folyamatosan mozgásban lévő érintkezési felületet feltételezünk. Ez azt jelenti, hogy a kopási, súrlódási folyamat megkezdődik a féktuskó ki- és belépő éleinél, majd kis idő elteltével az érintkezési tartomány elkezd a féktuskó közepe felé haladni. A kis érintkezési felületből adódó nagy hőáramsűrűség az éppen aktuális érintkező felületeknél magas kontakt-hőmérsékletet eredményez, amely helyi felületkidudorodással jár. Emellett, a tuskó globális hőmérsékletének emelkedése a tuskó nyílását eredményezi. Az érintkezési tartomány kis távolság megtétele után mozgásirányt vált és ismét a tuskó széleihez közelít. A következő befelé vándorlásakor az érintkezési tartomány már nagyobb utat tesz meg befelé, mielőtt ismét mozgásirányt váltana. A fékezési folyamat időtartamától függően a forrópont vándorlás ciklus többször is lejátszódik és az érintkezési tartomány minden kifelé és befelé haladásakor, a kerék egy-egy réteget koptat le a tuskóról. A fékezési folyamat közben a felmelegedett féktuskó hozzákopik a kerékhez, utána viszont visszahűl, és a belső sugara csökken a féktuskó záródásának köszönhetően. Emiatt a legközelebbi fékezéskor ismét a féktuskó széleitől indul az érintkezési tartomány.

5.1 A végeselem modell bemutatása

Az analízis két időintervallumának terhelésképét a 8. és 9. ábrák mutatják be. Az ábrákon látható felületfoltok az aktuális érintkezési tartományokat, a fekete határvonal a 100. másodperc végén elérendő kopási határvonalat, míg a fehér a már bekoptatott felület határvonalát adja meg. Az ábrák felső részén található nyilak az érintkezési tartomány aktuális mozgásirányára utalnak.

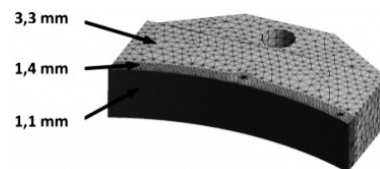


8. ábra. Érintkezési zónák 0-6 másodperc között



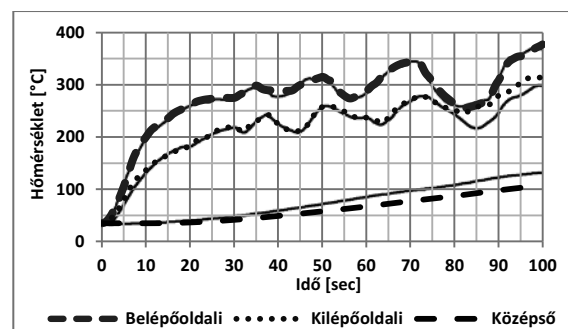
9. ábra. Érintkezési zónák 43-45 másodperc között

A végeselemes háló, mely a 10. ábrán látható, 10 csomópontos tetraéder elemekből épül fel.



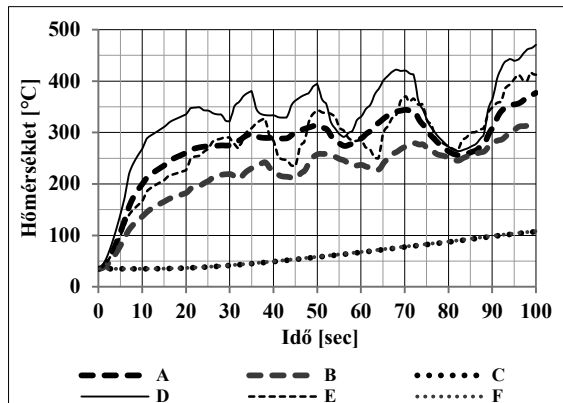
10. ábra. A végeselemes háló

Az analízis eredményei és a mérési eredmények 11. ábrán láthatóak. A hőmérséklet lekérdezéseket, a méréseknek megfelelően a termoelemeknek készített furatok felületein végeztük. A mérési eredmények fekete folytonos vonallal láthatóak a diagramon.



11. ábra. Felmelegedési görbék

A 12. ábra a termoelemeknél mérhető és a termoelemek felett, a féktuskó íves felületén mérhető hőmérsékleteket mutatja be. Jól látható a magasabb felületi hőmérséklet a furatokban mért hőmérsékletekhez képest.



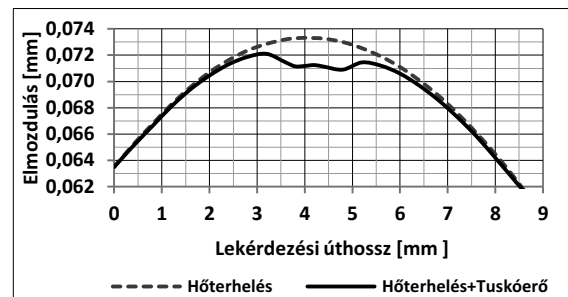
12. ábra. Termoelem és felület hőmérsékletek

- A: Hőmérséklet a belépőoldali termoelemnél
- B: Hőmérséklet a kilépőoldali termoelemnél
- C: Hőmérséklet a középső termoelemnél
- D: Belépőoldali felület hőmérséklete
- E: Kilépőoldali felület hőmérséklete
- F: Középső termoelem feletti felület hőmérséklete

6. SZILÁRDSÁGTANI SZÁMÍTÁSOK

A vándorló hóforrás, a nagyobb hőáramsűrűség, valamint a hőtágulás miatt, lokális kidudorodást idézett elő a felületen. Megvizsgáltuk a lecsökkent rugalmassági modulusú felületi dudor és a tuskóerő kölcsönhatását. A dudor terhelő erő számításához a teljes tuskóerőt a féktuskó két szélén működő hőpartíciók arányában osztottuk fel, majd az így kapott erőkkel a dudorok csúcsait terheljük radiális irányban. Peremfeltételként a féktuskó csatlakozó furatának palástfelületén fix megfogást alkalmaztunk. A tranzien szilárdságtani számítás első lépésében a kezdetben 35°C-os betétet a 82. másodpercben aktuális hőmérsékletmezővel terheljük. Az analízis második lépésében ezt a hőmérsékletmezőt megtartva a féktuskó két oldalán található dudoron a tuskóerő megfelelő hányadait működtettük. Az eredmények kiértékeléséhez lekérdeztük a radiális irányú elmozdulásokat a dudor környezetében. Ezt mutatja a 13. ábra. Az itt látható benyomódás értéke 0,0020 mm. A végeselemes számításokat Hertz-féle rugalmas benyomódás számításával

ellenőriztük gömb-síkfelület párra, a dudorkörnyezetnek megfelelő rugalmassági modulusal és az elmozdulás értékekből számított dudorgörbületi sugárral. Az analitikus számítások alapján a rugalmas benyomódás értéke 0,0027 mm.



13. ábra. Tuskóerő és dudorkörnyezet kölcsönhatása

7. KONKLÚZIÓ, ÖSSZEFOGLALÁS

Az analízisek eredményei alapján elmondható, hogy a vándorló kopási mechanizmus és így a vándorló hóforrás az elsődleges okozója a hot-spot vándorlásra jellemző hőmérsékletingadozásnak. A mérésnél alkalmazott tuskóerő nagysága nem elegendő ahhoz, hogy a lokális dudort visszanyomja, azaz a hőtágulás hatása dominánsabb.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TAMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

9. IRODALOM

- [1] T. Vernersson: Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels Part 1: brake rig experiments, *Wear* 236 (1999) 96-15
- [2] T. Vernersson: Thermally induced roughness of tread braked railway wheels Part 2: modelling and field measurements, *Wear* 236 (1999) 106-116
- [3] Liktör, B., Váradi, K.: Kisminta féktuskó hőtani analízise, GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület folyóirata, LXIII. évfolyam, 2012. 67-70. old.
- [4] Szűcs J.: Vasúti féktuskó-kerékabroncs érintkezési és kopási viselkedése, Diplomaterv, Budapest, 2010