



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Forrópont-vándorlás hőtani elemzése

Készítette:

Szűcs Péter, MSc hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki mesterszak, I. évfolyam

Témavezető:

Dr. Váradi Károly, egyetemi tanár, tanszékvezető, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

"A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című program támogatta."

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	2
1. BEVEZETÉS	3
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
3. AZ ANALÍZISEKHEZ FELHASZNÁLT MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA	6
4. AZ ANALÍZISEK BEMUTATÁSA	10
4.1 KÖZELÍTŐ FELTEVÉSEK	10
4.2 A GEOMETRIAI MODELL	11
4.3 ANYAGMODELL ÉS ANYAGJELLEMZŐK	11
4.4 AZ ANALÍZISEKHEZ HASZNÁLT HŐPARTÍCIÓK MEGHATÁROZÁSA	13
4.5 A PEREMFELTÉTELEK BEMUTATÁSA	14
5. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE NEM VÁNDORLÓ KOPÁS FELTÉTELEZÉSÉVEL	15
5.1 A VÉGESELEMES HÁLÓ	15
5.2 AZ IDŐVEZÉRELT HŐTERHELÉSEK BEMUTATÁSA	16
5.3 EREDMÉNYEK	17
6. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE VÁNDORLÓ KOPÁS FELTÉTELEZÉSÉVEL	20
6.1 A VÉGESELEMES HÁLÓ	21
6.2 AZ IDŐVEZÉRELT HŐTERHELÉSEK BEMUTATÁSA	21
6.3 EREDMÉNYEK	23
7. A HŐTÁGULÁS VIZSGÁLATA	27
7.1 HŐDEFORMÁLT ALAKOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	27
7.2 A HŐTÁGULT ALAK ÉS A TUSKÓERŐ KÖLCSONHATÁSA	28
7.3 HERTZ-FÉLE RUGALMAS BENYOMÓDÁS SZÁMÍTÁSA (GÖMB-SÍKFELÜLET PÁRRA)	30
7.3.1 KIINDULÓ ADATOK	31
7.3.2 GÖRBÜLETI VISZONYOK MEGHATÁROZÁSA	32
7.3.3 RUGALMAS ALAKVÁLTOZÁS SZÁMOLÁSA	32
8. ÖSSZEFOGLALÁS	33
8.1 ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK	33
8.2 MEGJEGYZÉSEK, JAVASLATOK A VÉGESELEM MODELL TOVÁBBFEJLESZTÉSÉRE	34
HIVATKOZOTT IRODALOM	35

1. BEVEZETÉS

A tuskós fékrendszerek kopási folyamatainak megismerése és modellezése már több vizsgálat és mérés tárgyát képezte [1] [2] [3]. A súrlódás, hőfejlődés, kopás, a mechanikai és hőtani igénybevételek által előidézett deformáció valamint az anyagjellemzők hőmérsékletfüggése rendkívül bonyolulttá teszi a lejátszódó jelenség modellezését, így mai számítástechnikai háttér mellett is szükséges, hogy közelítő feltevésekkel vizsgáljuk a problémát.

Vizsgálatom célja egy féktuskóval végzett fékezési folyamat során jelentkező forrópont vándorlási jelenség tranziens hőtani modelljének megalkotása volt. Kiindulási alapként a BME Közlekedésmérnöki Karának Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszékén folytatott mérések eredményei szolgáltak, melyek egy diplomaterv [4] keretein belül készültek. A méréseket egy 1:4-es méretarányú kisminta vizsgáló-berendezésen végezték 2008-ban. A cél egy olyan végeselem modell megalkotása volt, mely egy 100 másodpercig tartó fékezési folyamat felmelegedési görbéit adja vissza eredményül, a megfelelő helyen tartózkodó, megfelelő értékű hőforrás iteratív megkeresésével.

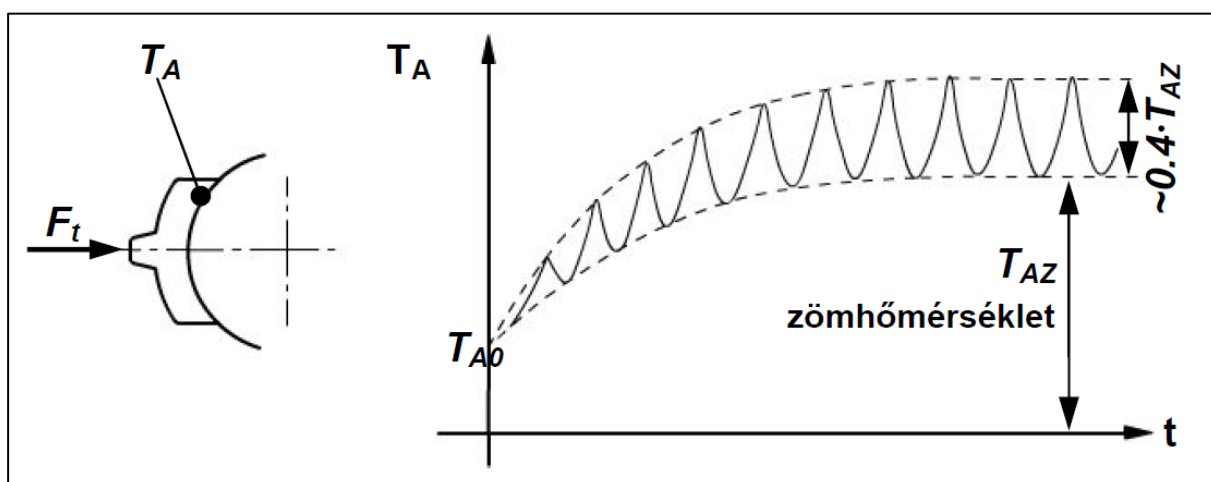
A mérési eredmények közelítése két tranziens hőtani analízissel történt, melyek vezérlésénél két különböző kopási folyamatot feltételeztem a féktuskóknál jelentkező hőmérsékletingadozási jelenség hátterében, így a hőforrások vezérlése a két analízisnél eltérő. Az egyiknél, a „hagyományos szemléletű” nem vándorló, az érintkezési tartomány szélesedésével együtt szélesedő kopást tekintettem. A másik esetén vándorló kopást, a forrópont vándorlással összhangban elmozduló érintkezési tartományt feltételeztem, melynél az érintkezési tartomány oda-vissza mozgult el úgy, hogy az eszerint vándorló hőforrás jó közelítéssel a mért hőmérsékleti értékeket adta vissza.

A mechanikai igénybevételek, valamint a kopás elhanyagolása a feladat közelítő megoldását eredményezi, ugyanakkor a megfelelő helyen lévő, megfelelő nagyságú hőforrás közvetlenül határozza meg az (ennek hatására ébredő) időben változó hőmérsékletmezőt, amelyre megfelelő mérések álltak rendelkezésemre. Az analízisek készítésénél fontos alapelv volt, hogy a súrlódási folyamat során fejlődött hőmennyiség működésének helye mindig megegyezik az aktuális érintkezési tartománnyal.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A végeselemes analízisek elkészítése előtt megismerkedtem a lejátszódó jelenség elméleti hátterével, melyet röviden összefoglalva itt ismertetek.

A vasúti fékek működése során jelentkező hőmérsékletingadozási jelenség már régóta ismert. A folyamatot a termoelasztikus instabilitás magyarázza, mely egy kritikus csúszási sebesség elérésekor jelentkezik. Kialakulása a csúszósurlódással fejlődött hő okozta hőtágulási viszonyok, rugalmas jellemzők és felületi kopásviszonyok kölcsönhatásának köszönhető. A vasúti szerelvényeken főleg tartamfékezések során figyelhető meg teljesen kifejlődött formában, ilyenkor a féktuskók belső íves felületén magas hőmérsékletű úgynevezett forrópontok jelennek meg, melyek a fékezés időtartama alatt az érintkezési felület íve mentén periodikusan mozognak. Egy féktuskó 'A' pontján kialakult hőmérséklet időbeli változását az 1. ábra szemlélteti. [5]



1. ábra. A féktuskóknál jelentkező hőmérsékletingadozás jellege [5]

A lokális mikro- és makrogeometriai egyenetlenségek kezdetben egyenlőtlen kopást okoznak, az pedig egyenlőtlen felületi nyomást idéz elő, ezáltal egy időben periodikus nyomásátrendeződés indul be. A felületi nyomás folyamatos átrendeződése a hőáramsűrűség, a hőtágulás és a lokális kopás átrendeződését okozza. A folyamat a fékbetét egy adott pontján a következőképpen magyarázható [5]:

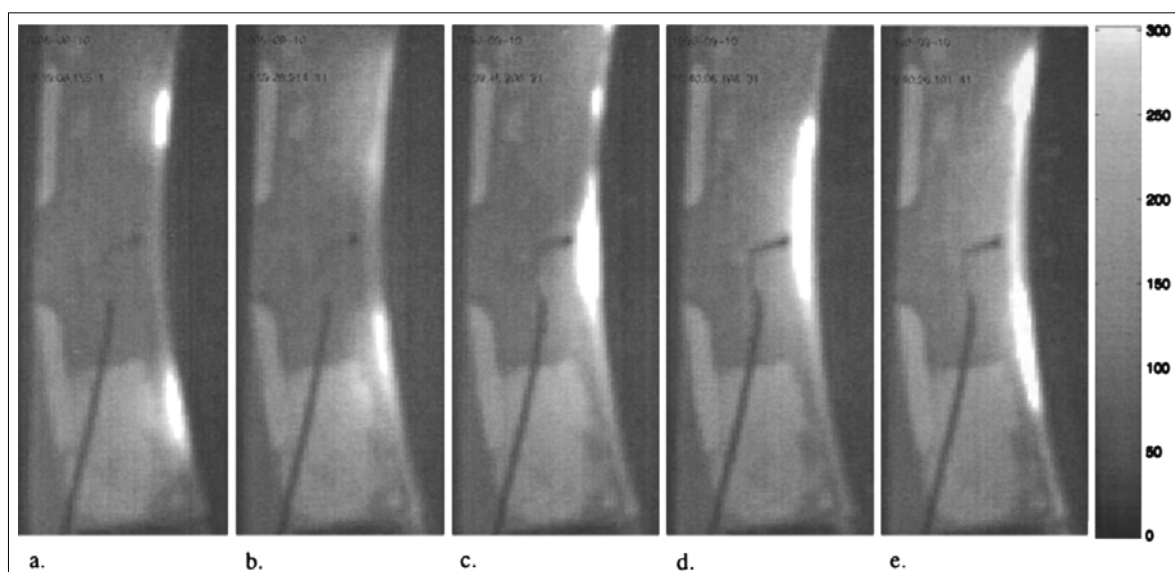
- Az érintkezési felület egy pontján létrejött lokális felületi dudornál a felületi nyomás lokális értéke kicsit nagyobb, mint a környezeti átlagos érték. Ezáltal itt a súrlódással fejlődött hőáram is nagyobb lesz, ami magasabb lokális hőmérsékletet eredményez. A magasabb hőmérséklet a rugalmassági jellemzők csökkenéséhez vezet. A nagy lokális

nyomás és érintkezési hőmérséklet intenzívebb helyi kopást eredményez, ezáltal itt sok anyagi rész kopik le, amely a kerék forgása miatt kihordódik az érintkezési felületről.

- Az erős kopás miatt a helyi kidudorodás mérete és ezzel a lokális felületi nyomás nagysága lecsökken, ami végeredményképpen a kopás csökkenését eredményezi. Emiatt a terhelést a dudor környezete veszi át, ahol szintén lejátszódnak az eddig ismertetett folyamatok és mindez periodikus jelleggel ismétlődik.

A forrópontok megjelenése általában hődeformációból származó felületi egyenetlenséget, valamint kisfrekvenciájú rezgést eredményez. A termoelasztikus instabilitás figyelembevétele főleg nagy teljesítményű fékek tervezése esetén fontos. [5] [6]

Állandó csúszási sebesség és állandó nagyságú fékezési erő mellett végzett mérések azt mutatták, hogy öntöttvas féktuskók esetén a forrópontok szinte azonnal megjelennek. Nagy fékező erő esetén helyzetük a kerék futófelületén szinte változatlan, ám hőmérsékletük a kerék egy körülfordulása alatt is jelentősen változhat. Méretük változó, de átlagos értéküket a 20mm-es hosszúsági és 4mm-es szélességi méret jellemzi. A féktuskók tekintetében megállapítható volt, hogy az érintkezési tartomány folyamatosan vándorol. Kezdetben a féktuskó széleinél helyezkedik el mivel a féktuskó görbületi sugara kisebb, mint a keréké, majd a féktuskó szélén bevezetett hő a féktuskó sugarának növekedéséhez vezet. Ennek hatására az érintkezési tartomány a féktuskó közepe felé mozdul el, majd az itt bevezetett hő és a féktuskó fokozatos átmelegedése a féktuskó záródását, azaz sugarának csökkenését okozza. Az érintkezési tartomány és egyben a forrópont vándorlását a 2. ábra szemlélteti. [2]



2. ábra. Az érintkezési tartomány vándorlása [2]
(a: $t=10s$, b: $t=30s$, c: $t=50s$, d: $t=70s$, e: $t=90s$)

3. AZ ANALÍZISEKHEZ FELHASZNÁLT MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A dolgozatom célkitűzése egy diplomaterv [4] keretein belül végzett hőmérsékletmérés felmelegedési görbéinek lekötése volt. A mérések kisminta féktuskóval, egy kisminta vizsgálóberendezésen készültek a BME Közlekedésmérnöki Karának Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszékén. A vizsgáló-berendezés kialakítását a 3. ábra szemlélteti.



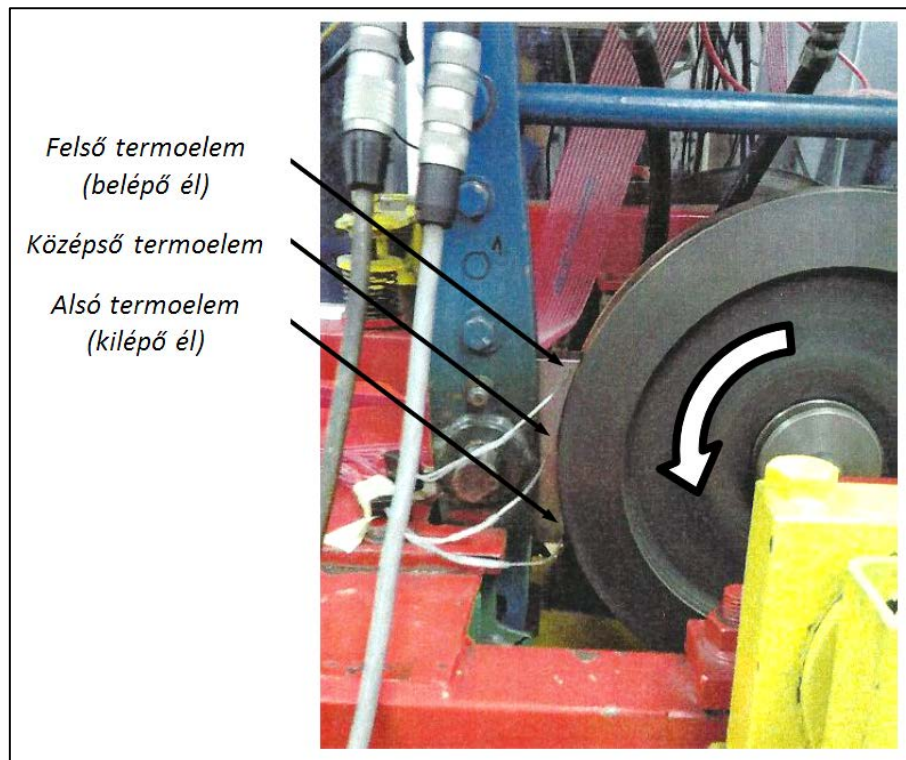
3. ábra. A vizsgáló-berendezés kialakítása [4]

A fékezési folyamatok során regisztrált adatok:

- *Tuskóerő:* A féktuskót a vasúti kerékhez szorító erő.
- *Hőmérséklet a belépő él közelében:* A féktuskón, a kerék forgási iránya szerinti belépő él közelében elhelyezett termoelemmel mért hőmérsékletértékek.
- *Hőmérséklet a kilépő él közelében:* A féktuskón, a kerék forgási iránya szerinti kilépő él közelében elhelyezett termoelemmel mért hőmérsékletértékek.
- *Hőmérséklet a tuskó közepén:* A féktuskó közepénél elhelyezett termoelemmel mért hőmérsékletértékek.

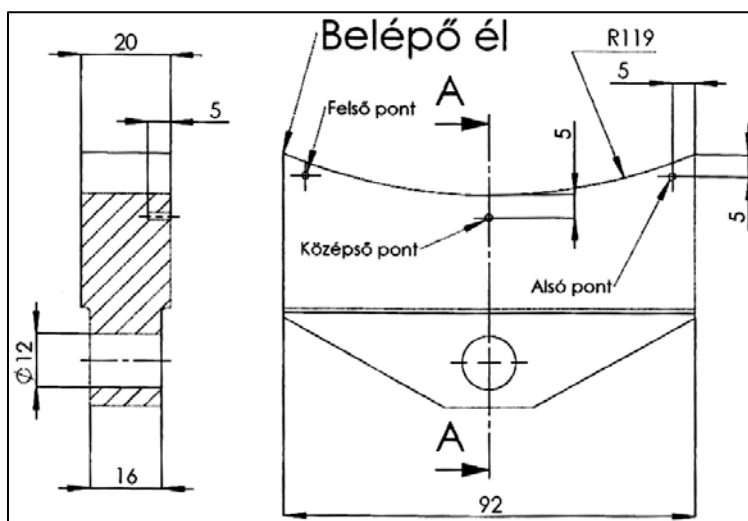
A mérések során a féktuskót három termoelemmel látták el, melyek a féktuskó két szélén, valamint a középső részén helyezkedtek el. Átmérőjük 1,5 mm, a tuskóba készített furat

mélysége 5 mm. A termoelemeket beépített állapotban a 4. ábra szemlélteti, ahol a kerék forgásirányát nyíl jelöli. A kerületi sebesség értéke a palástfelületen 11,6 m/s.



4. ábra. A termoelemek elhelyezkedése a tuskón [4]

A féktuskót úgy gyártották, hogy a kerékkel érintkező, belső, íves felületének sugara kisebb, mint a kerék sugara, ezáltal az érintkezési zóna a fékezési folyamat kezdetén biztosan a tuskó két szélén, a belépő- és kilépő éleknél található. A féktuskó fontosabb méreteit, melyek alapján geometriai modell is készült, az 5. ábra tartalmazza.



5. ábra. a féktuskó méretei [4]

A féktuskó belső ívének sugara:

$R_t = 119$ [mm]

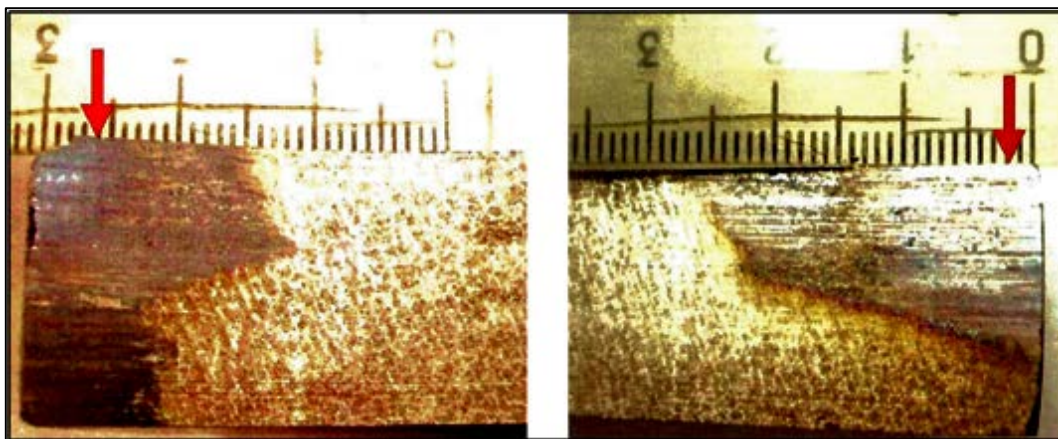
A kerék sugara:

$R_k = 121$ [mm]

A termoelemek átmérője:

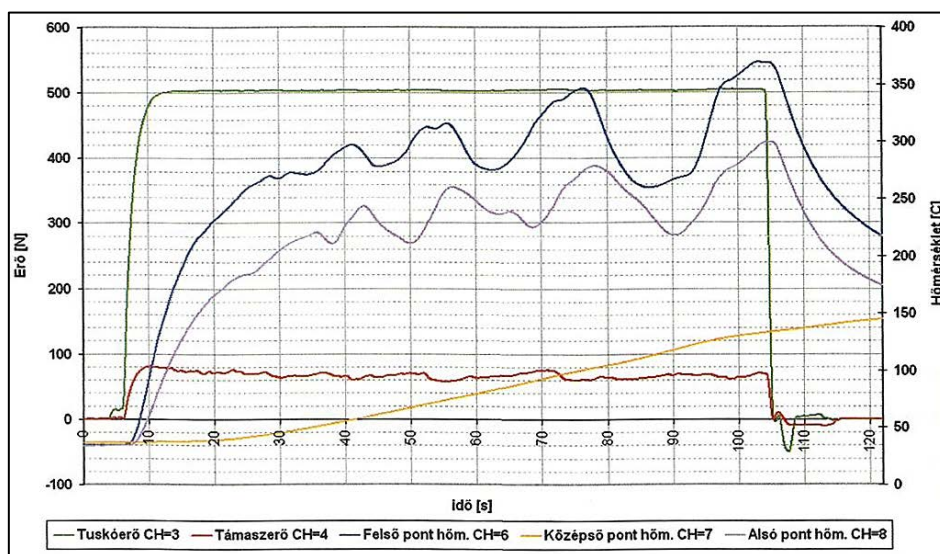
$D = 1,5$ [mm]

A 100 másodpercig tartó fékezési folyamat eredményeképpen kialakult bekopott felülettartományok alakja és mérete a belépő és kilépő élek közelében a 6. ábrán látható. A piros nyilak a termoelemek helyét jelölik. Látható, hogy a tuskó kopása mindkét szimmetriasíkra aszimmetrikus. A hosszirányban elhelyezkedő szimmetriasíkra mutatott aszimmetria a beépítési pontatlanságnak köszönhető, míg keresztirányra mutatott aszimmetria a belépő és kilépő oldalon kialakult erők különbségének tudható be. A mérés során regisztrált adatokat a 7. ábra szemlélteti.



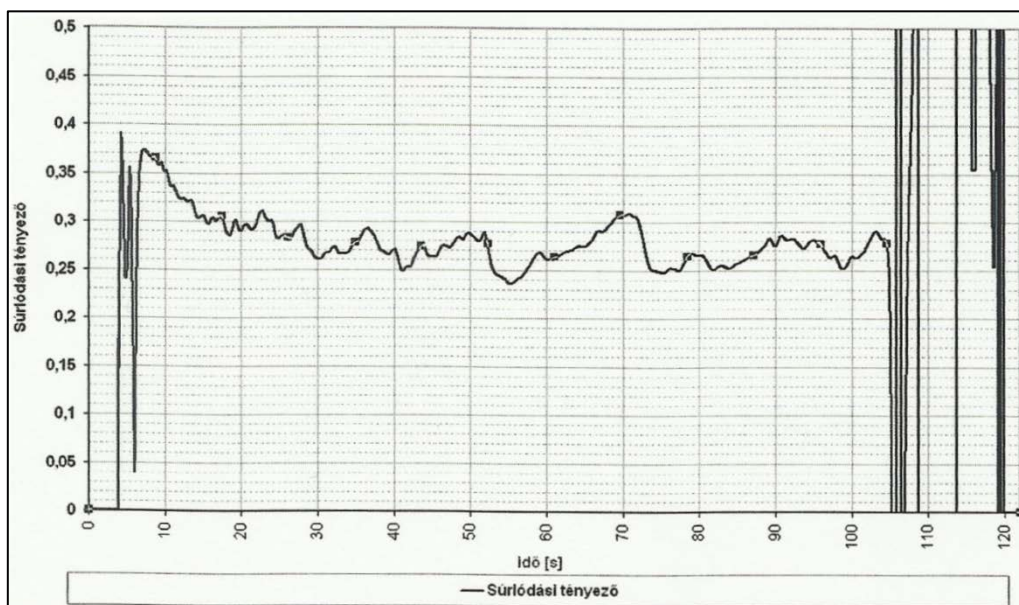
6. ábra. A kilépőoldali (balra) és a belépőoldali (jobbra) érintkezési zóna alakja a 100 másodperces fékezési folyamat után [4]

A 6. ábrán látható aszimmetrikus kopás természetesen nem jelent problémát az analízisek szempontjából, mivel, mint később bemutatásra kerül a féktuskó geometriai modelljének belső íves felületét kis felületdarabokra bontottam, a bekopott felületfoltok alakjának diskretizálásához.



7. ábra. A mérés során regisztrált adatok [4]

Az analízisek a mérési idő 10. másodpercétől a 110. másodpercéig tartanak. Ezen a tartományon a tuskóerő konstans 500 N nagyságú, a súrlódási tényező, amelynek időbeli alakulását a 8. ábra szemlélteti, jó közelítéssel 0,3 értékű.



8. ábra. Súrlódási tényező változása a mérés folyamán [4]

A belépő és a kilépő oldalon elhelyezett termoelemek által közölt adatok egyaránt a forrópont vándorlásra jellemző hőmérsékletingadozást mutatják. A féktuskó közepén a hőmérséklet fokozatosan emelkedik, lokális minimumok és maximumok nélkül. Ennek oka az, hogy az első mérést egy teljesen ép geometriájú féktuskóval végezték és a 100. másodperc végére még csak a tuskó szélei koptak be, emiatt középen még nem történt aktív hőbevezetés, amely meredekebb felmelegedési görbéket eredményezne. A hőáram legnagyobb része hővezetéssel jut el ide, a féktuskó szélei felől.

4. AZ ANALÍZISEK BEMUTATÁSA

A mérési eredményeket két tranziens hőtani analízissel közelítettem, melyek két különböző kopási folyamatot feltételeznek a féktuskónál lejátszódó hőmérsékletingadozási jelenség hátterében, így a hőforrások vezérlése a két analízisnél eltérő. Az egyiknél, a „hagyományos szemléletű” nem vándorló, az érintkezési tartomány szélesedésével együtt szélesedő kopási tartományt feltételeztem. A másikonál vándorló kopást, a forrópont vándorlással összhangban elmozduló érintkezési tartományt feltételeztem, melynél az érintkezési tartomány oda-vissza mozdul el úgy, hogy az eszerint vándorló hőforrás jó közelítéssel a mért hőmérsékleti értékeket adja vissza.

A valóságban lejátszódó folyamat egyszerűsítését jelenti, hogy a hődeformációt, a tuskóerő által okozott mechanikai igénybevételeket, valamint a kopást elhanyagolva hőtani szempontból vizsgáltam a folyamatot, viszont a megfelelő helyen lévő, megfelelő nagyságú hőforrás közvetlenül határozza meg azt a felületfoltot, ahol a valóságos folyamatban az érintkezési tartomány található a feltételezések alapján.

Mivel a geometriai modell, a peremfeltételek, a hőáramok nagysága, az anyagmodell és az anyagi jellemzők az analíziseknél megegyeztek, ezért ezeket együtt mutatom be, a numerikus számítások részletezése előtt.

4.1 Közelítő feltevések

Az analízisek nem veszik figyelembe:

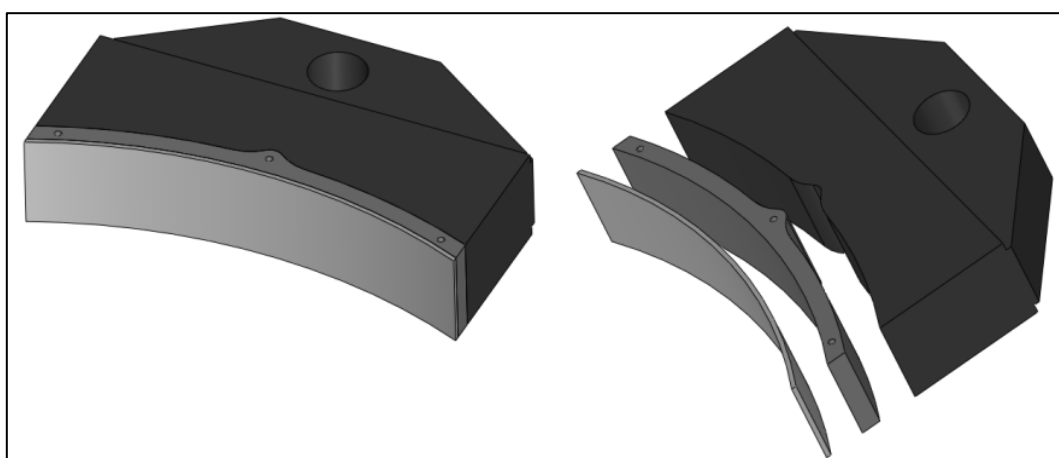
- a fékezés folyamat során lejátszódó kopást,
- a féktuskó-kerék kapcsolatban létrehozott tuskóerő geometriát deformáló hatását,
- az érintkezési zónában fejlődött hőmennyiség geometriát lokálisan és globálisan deformáló hatását (helyi kidudorodás, féktuskó „kinyílása” és „záródása”),
- valamint azt, hogy a bevitt hőmennyiségből létrejött hőpartíciók aránya sem a féktuskó-kerék kapcsolatban, sem a féktuskó két szélé között nem állandó a 100 másodperc alatt.

Fontos megjegyezni, hogy a fékezés hatására létrejött bekopott felületdarab alakja csak a mérés végén ismert. Az analízis egyes időpillanataiban definiált érintkezési zóna méretét, alakját és helyét mindig a mérési eredmények legjobb közelítése érdekében, iteratív módon véglegesítettem.

Az analíziseket az ANSYS Workbench 13.0 Steady-State Thermal, Transient Thermal Static Structural és Transient Structural moduljaiban készítettem.

4.2 A geometriai modell

A geometriai modellt (9. ábra) az 5. ábra méretei alapján készítettem el, majd 3 részre vágtam. A részekre tagolás által a belső íves felület közelében jelentősen kisebb elemméretet, míg a tuskó többi részén nagyobb elemméretet tudtam megadni egész térfogatra vonatkozóan. Az egyes elemek között ragasztott kapcsolatot definiáltam, kontakt hőellenállás megadása nélkül, így a darabok közötti határfelületnek nincs hatása a testen belüli hőáramra.



9. ábra. Az analízisekhez használt geometriai modell

4.3 Anyagmodell és anyagjellemzők

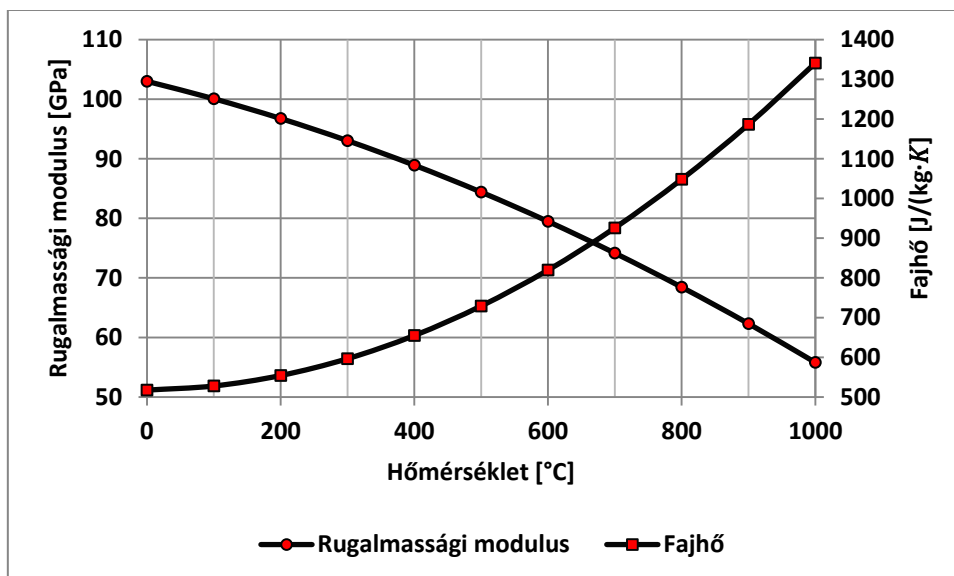
A számításokhoz lineárisan rugalmas anyagmodellt használtam, konstans sűrűség, konstans poisson-tényező, hőmérsékletfüggő rugalmassági modulus [1] és hőmérsékletfüggő hőtani anyagjellemzők [1] mellett.

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

$$\text{Poisson-tényező: } \nu = 0,25 [-]$$

$$\text{Izotrópikus rugalmassági modulus (10. ábra): } E = -0,00002 \cdot T^2 - 0,0272 \cdot T + 103 [\text{GPa}],$$

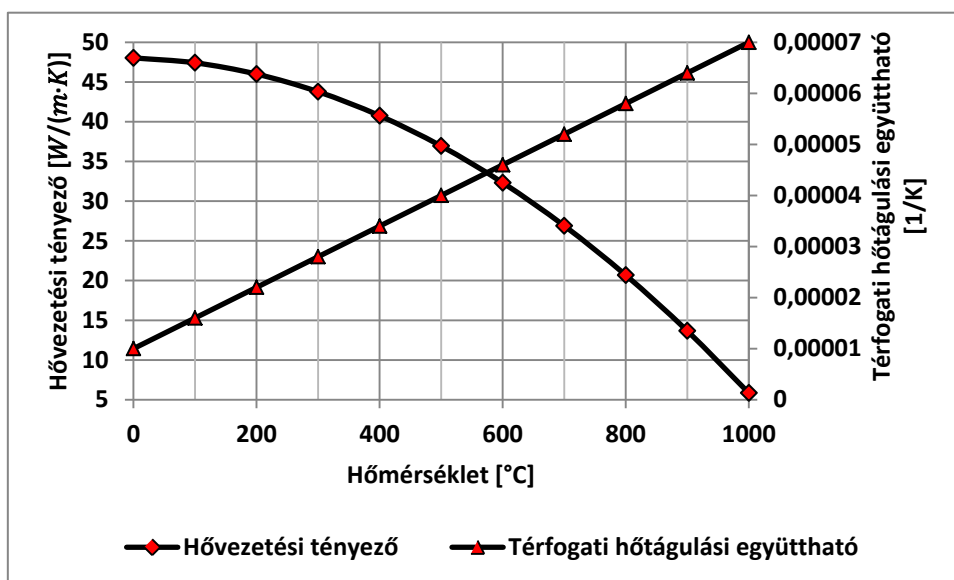
$$\text{Fajhő (10. ábra): } c = -0,0008 \cdot T^2 - 0,0236 \cdot T + 517,41 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$



10. ábra. Rugalmassági modulus és fajhő változása a hőmérséklet függvényében

Izotrópikus hővezetési tényező (11. ábra): $\lambda = -0,00004 \cdot T^2 - 0,0022 \cdot T + 48,042 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

Izotrópikus térfogati hőtágulási együttható (11. ábra): $\beta = 0,00000006 \cdot T + 0,00001 \left[\frac{1}{K} \right]$



11. ábra. Hővezetési tényező és térfogati hőtágulási együttható változása a hőmérséklet függvényében

A hőmérsékletfüggő anyagjellemzők értelmezési tartománya: $T \in [0, 1000][^{\circ}\text{C}]$ [1], [4]

4.4 Az analízisekhez használt hőpartíciók meghatározása

A súrlódással fejlődő hőmennyiség az 1. egyenlet szerint határozható meg.

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

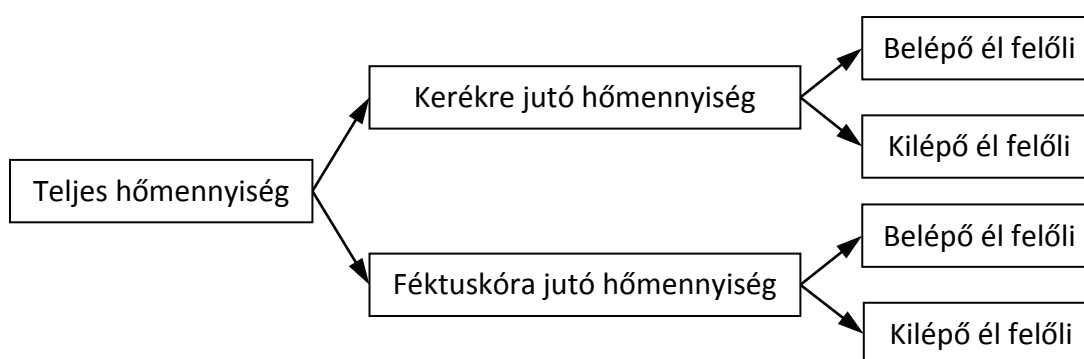
Q – súrlódással fejlődött hőmennyiség

F_T - tuskóerő

μ - súrlódási tényező

v_k – kerületi sebesség

A féktuskóra és a kerékre jutó hányadot a hőtani jellemzők befolyásolják. Meghatározásuk során teljesülnie kell annak a hőtani feltételnek, mely szerint a kapcsolatban lévő alkatrészek ténylegesen érintkező felületeinek hőmérséklete az érintkezési pontokban azonos értékű. A teljes hőmennyiség a következőképpen osztható fel (12. ábra):



12. ábra. A teljes hőmennyiség felosztása

A féktuskó esetén használt hőpartíciókat a 2. és 3. egyenlet mutatja.

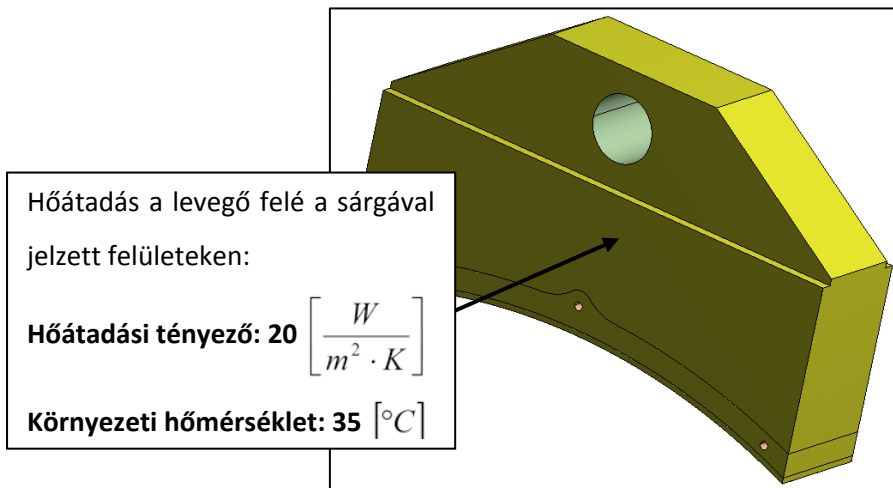
$$Q_{Féktuskó, belépő} = 0,183 \cdot 1740 [W] \cdot 0,58 = 185 [W] \quad (2.)$$

$$Q_{Féktuskó, kilépő} = 0,183 \cdot 1740 [W] \cdot 0,42 = 133 [W] \quad (3.)$$

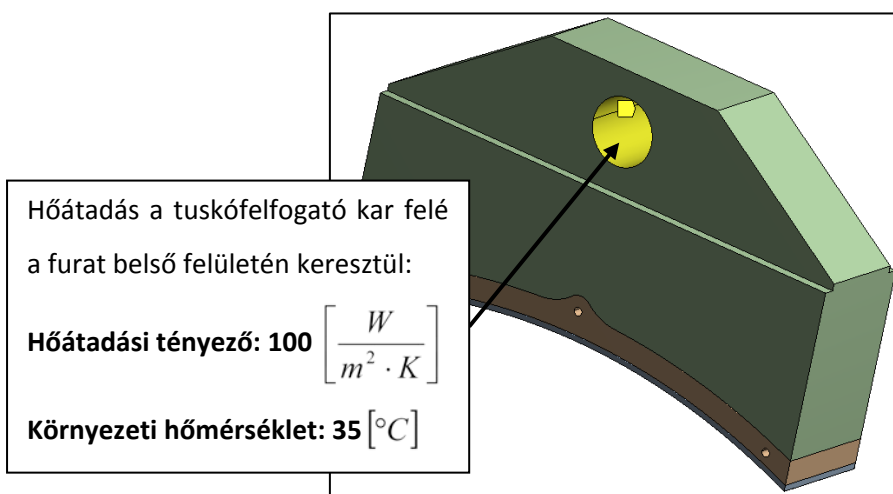
Az egyenleteket értelmezve a keletkezett teljes hőmennyiség 18,3%-a jut el a féktuskóhoz, és ez 58 - 42% arányban oszlik meg a belépő és a kilépő oldal között. Ezen értékek alapján az irodalomjegyzék [1] számú cikke szolgált, majd iteratív módon, több analízis futtatásával pontosítottam, úgy hogy az eredmények a mérési eredményeket leginkább közelítsék. Erre azért volt szükség, mert a hőpartíciók analitikus becslése nem volt elegendően pontos.

4.5 A peremfeltételek bemutatása

Mivel a peremfeltételek még mindkét tranziens hőtani számítás során megegyeztek ezért ezeket itt mutatom be, pontos helyeiket és értékeiket a 13. és 14. ábrák mutatják.



13. ábra. Hőátadás a levegő felé



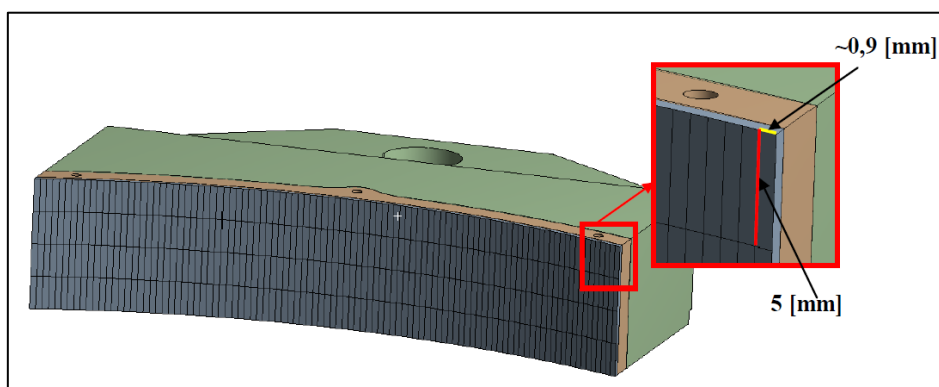
14. ábra. Hőátadás az elhagyott géprészek felé

A féktuskó kezdeti hőmérséklet szintén 35°C volt, amely a korábban már bemutatott 7. ábrán is látható.

5. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE

NEM VÁNDORLÓ KOPÁS FELTÉTELEZÉSÉVEL

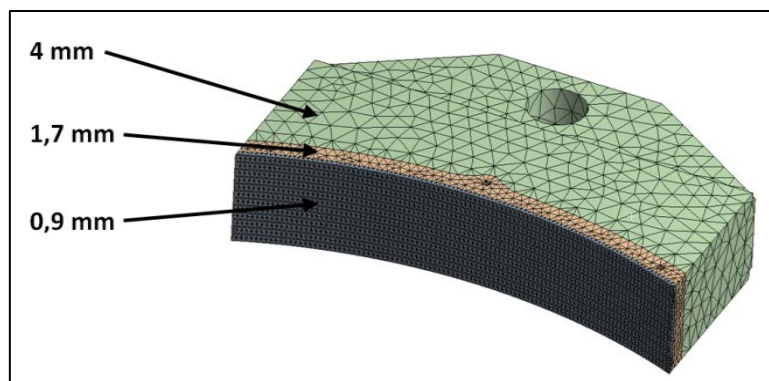
Az analízis lényege, hogy folyamatos, egy menetben megvalósuló, az érintkezési tartománnyal együtt szélesedő kopási tartományt feltételezve, a konstans értékű hőpartíciók egyre nagyobb méretű felületfoltokon hatnak. Az analízis elején a féktuskó mindkét oldalán, egy-egy kis felületfolton, majd az analízis végére a már bemutatott mérés végén kapott, kopott felületeknek megfelelő méretű foltokon. A kontaktfelület diszkretizációját a 15. ábra mutatja, ahol látható, hogy a féktuskó íves felülete 0,9x5 mm-es befoglaló méretű felületdarabokra van felosztva. Az egymást követő lépésekben, mindkét oldal esetén egyre több felületdarabon hat az oldalanként eltérő nagyságú, de időben konstans értékű két hőpartíció. Ha a mérés és az analízis kellően sokáig tartana, akkor a féktuskó két oldaláról induló folyamatosan növekvő érintkezési zónák összeérnének.



15. ábra. A féktuskó belső felületének felosztása

5.1 A végeselemes háló

A végeselemes háló 10 csomópontos tetraéder elemekből épül fel, melynek elemméreteit a 16. ábra mutatja be. A féktuskó két illesztési felületén (amely a három darabra vágás miatt keletkezett) az elemméretet azonos méretűre állítottam, így az elemméret növekedése folytonos. Helyi hálósűrítést a termoelem-furatok felületein adtam meg, itt az elemméret: 0,9 mm.

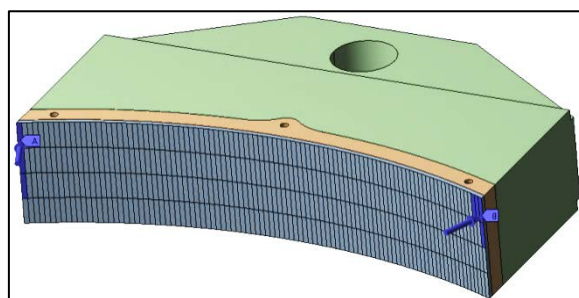


16. ábra. A végeleemes háló

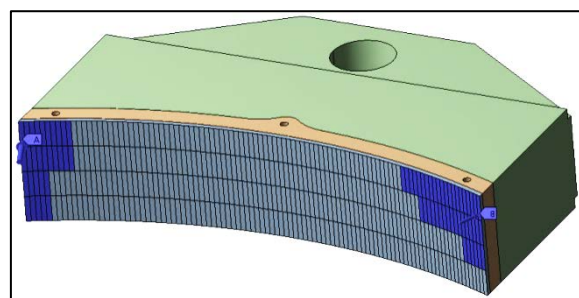
5.2 Az idővezérelt hőterhelések bemutatása

Az analízisidő elejéről, közepéről és végéről egy-egy terhelésképet kiragadva láthatóak az érintkezési tartományok megadott méretei és alakjai. Ezt szemlélteti a 17., 18. és 19. ábra. A hőteljesítmények értéke, mint már bemutatásra került, a belépő oldal esetén 185 W, míg a kilépő oldal esetén 133 W. A folyamat során a konstans értékű hőteljesítmény és a degresszíven növekedő érintkezési tartomány egyre kisebb hőáramsűrűséget eredményez.

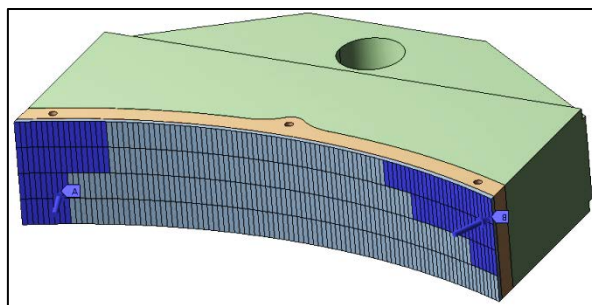
Az egyes időlépések közötti átvezetés során egy másodpercig tart az adott felületcsoport leterhelése és egy másodpercig tart a következő felületcsoport felterhelése. A le- és felterhelések egyszerre indulnak így a féktuskót minden időpillanatban ugyanakkora hőáram terheli.



17. ábra. Érintkezési zóna mérete és alakja 0-5 másodperc között



18. ábra. Érintkezési zóna mérete és alakja 45-54 másodperc között

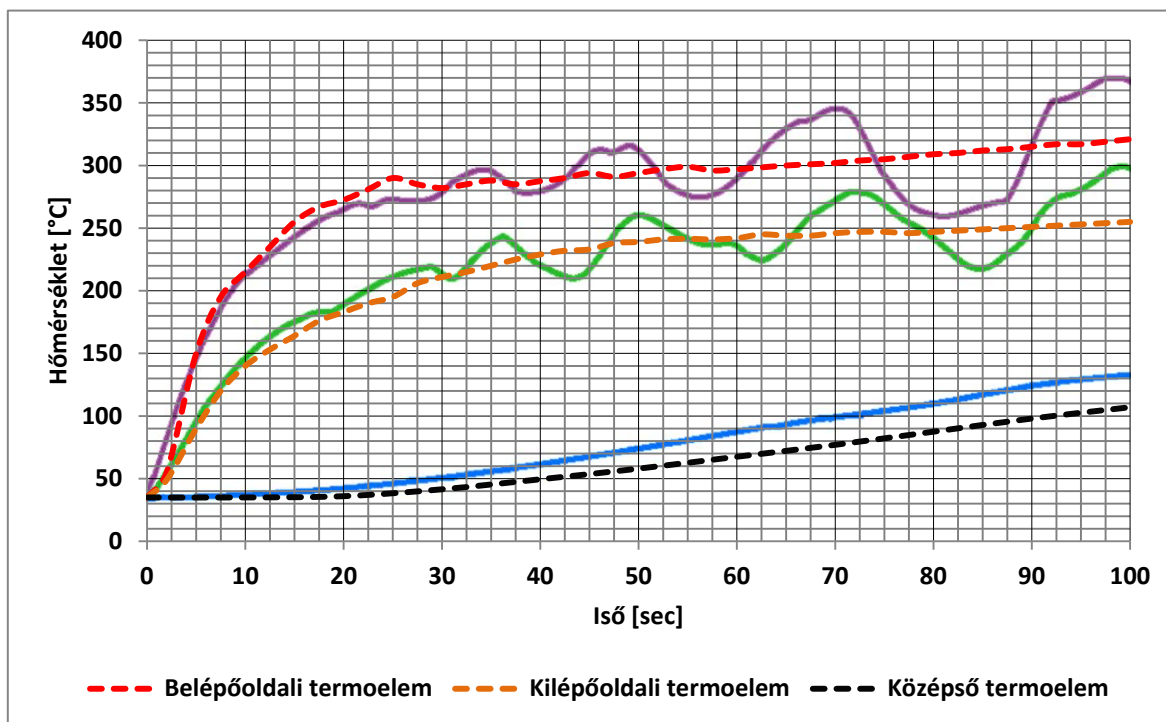


19. ábra. Érintkezési zóna mérete és alakja 91-100 másodperc között

Az előző három ábra alapján látható, hogy az analízisidő első felében az érintkezési zóna mérete már majdnem eléri a véglegesen kialakult kopott felületfoltét. Ez megfelel a lineáris kopásmodell szerinti viselkedésnek, mivel, ha az időlépésenkénti kopási térfogatot állandó tekintjük, akkor egyre nagyobb kopási felülethez egyre kisebb kopási mélység társul, így az időlépésenkénti felületnövekmény is egyre kisebb lesz.

5.3 Eredmények

A bemutatott konstans értékű peremfeltételek, idővezérelt hőterhelések és a definiált anyagjellemzők a 20. ábra által mutatott felmelegedési görbéket eredményezték, melyen a három jelölt adatsor az analíziseredményeket mutatja, a másik három (kék, zöld és lila színnel jelölt görbék) pedig a hőmérsékletmérési eredményeket.

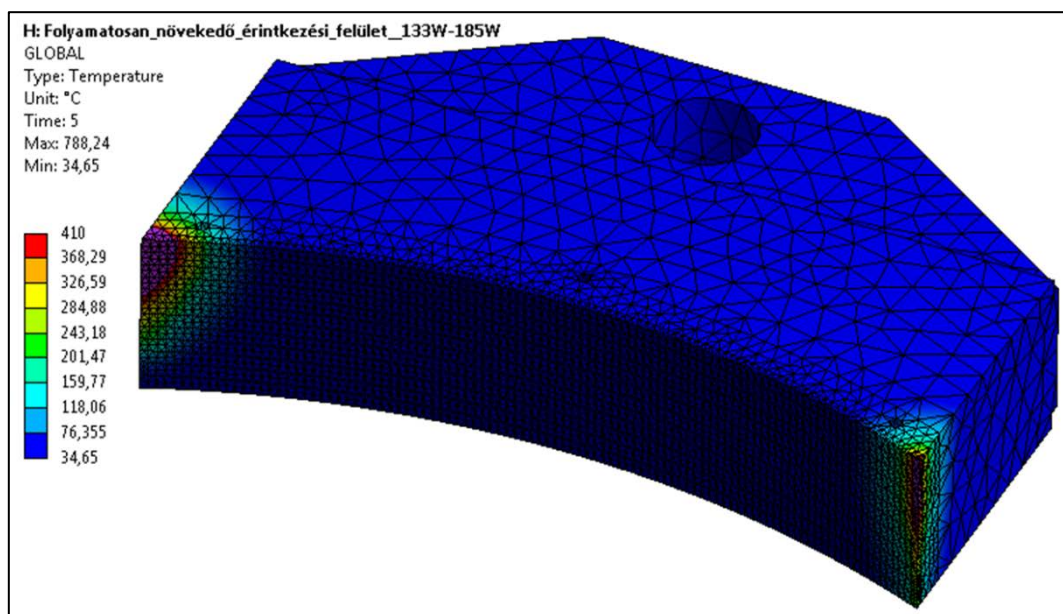


20. ábra. Felmelegedési görbék
(**lila**: belépőoldalon mért, **zöld**: kilépőoldalon mért, **kék**: középső termoelemmel mért értékek)

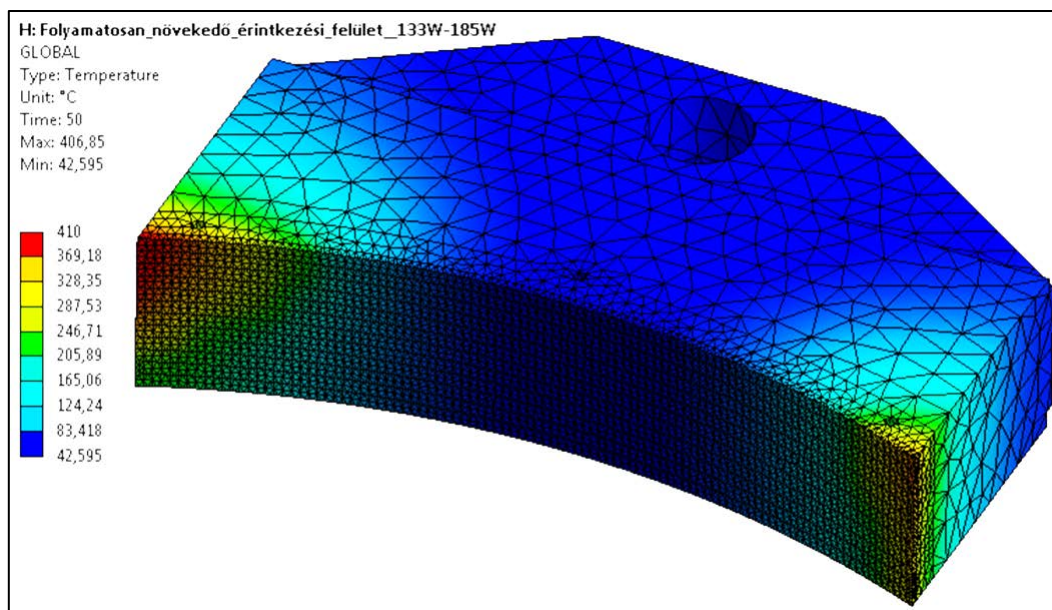
A hőmérsékleti eredmények lekérdezéséhez a modellen létrehozott termoelem furatok palástfelületeit termoelemenként 3 felületdarabra osztottam fel. A 20. ábrán látható görbéket a termoelemenkénti három felületdarab minimális és maximális hőmérsékleteiből képeztem átlagolással, amely a valós körülmények szempontjából is megfelelőbb.

Nem vándorló kopást feltételezve nem lehetett lekövetni a hőmérsékletmérési eredményeknél látható lokális hőmérsékleti maximumokat, minimumokat. A felületcsoportok idővezérlésével a felmelegedési görbék meredekségére lehetett hatást gyakorolni, viszont a hőmérsékletmérés eredményein látott hőmérsékletingadozást ez a hőforrás-vezérlési elv nem tudja lekövetni. Az analízissal kapott felmelegedési görbék a kezdeti szakaszon jó közelítik a mérési eredményeket, de 30 másodperc után már csak a hullámhegyek, hullámvölgyek középértékénél haladnak végig. Ezáltal elmondható, hogy a féktuskók esetén nem ez a kopási folyamat érvényesül.

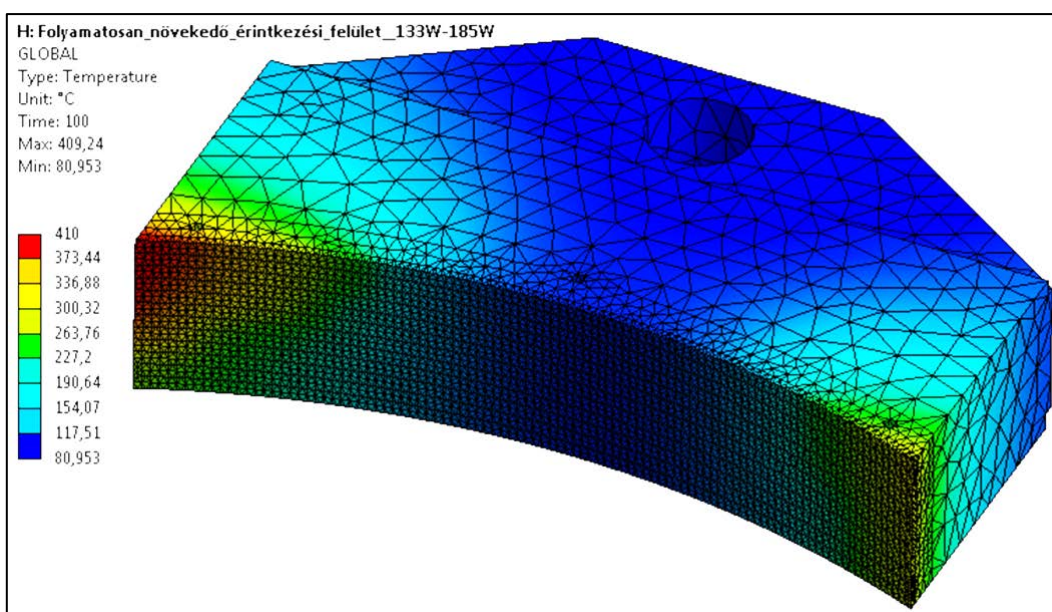
A hőmérsékletmezőt három időpillanatban a következő három ábra mutatja be. A hőmérsékleti skálát levágtam a 100 másodpercnél kialakult maximális 409°C-os hőmérsékleti érték közelében (410°C-nál). Az 5. másodpercet szemléltető kép esetén a féktuskó széleinél látható lila színárnyalatok azt jelentik, hogy ebben az időpillanatban a hőmérséklet itt vágási határérték fölött volt a nagy hőáram sűrűség miatt.



21. ábra. Hőmérsékletmező az 5. másodpercben



22. ábra. Hőmérsékletmező az 50. másodpercben



23. ábra. Hőmérsékletmező a 100. másodpercben

6. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK KÖZELÍTÉSE VÁNDORLÓ KOPÁS FELTÉTELEZÉSÉVEL

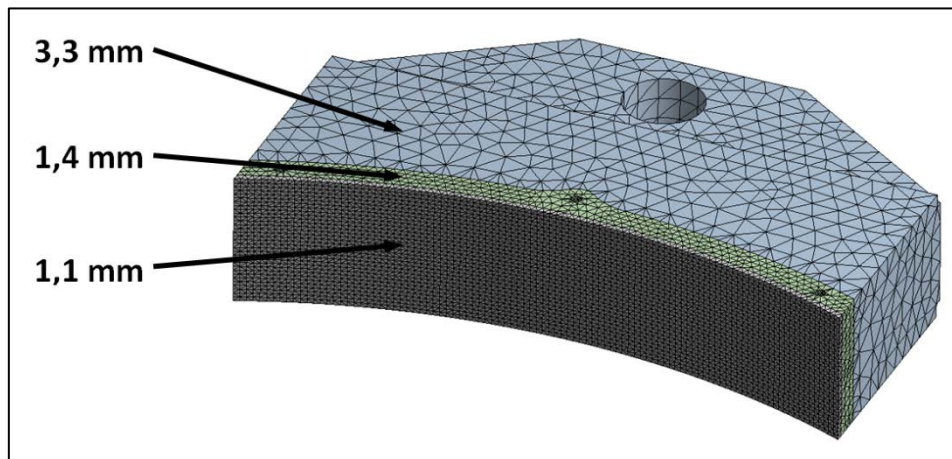
Ebben az esetben a modellezett folyamat lényege, hogy nem egy egy menetben, folyamatosan növekedő érintkezési tartományról beszélünk, hanem egy kisebb méretű folyamatosan mozgásban lévő érintkezési felületet feltételezünk. Ez azt jelenti, hogy a kopási, súrlódási folyamat megkezdődik a fékféktuskó ki- és belépő éleinél, a kis érintkezési felületből adódó nagy hőáramsűrűség az éppen aktuális érintkezési tartományon magas kontakthőmérsékletet eredményez, amely helyi felületkidudorodással jár, másrészt az érintkezési felület globális hőmérsékletének emelkedése a betét nyílását, azaz a belső íves felület sugarának növekedését is eredményezi. Az érintkezési zóna közben elkezd a féktuskó közepe felé haladni. A beljebb ható hőterhelés, valamint a féktuskó belső íves és külső felületei közötti hőmérsékletkülönbség csökkenése ezután a féktuskó záródását okozza, ezáltal a hőforrás visszaindul a féktuskó szélei felé. A következő tuskónyíláskor az érintkezési zóna már kicsit beljebb vándorol, mielőtt a tuskó ismét záródni kezd. A fékezés folyamat időtartamától függően a forrópont vándorlás ciklus többször is lejátszódik és a kerék futófelülete az érintkezési tartomány minden kifelé és befelé haladásakor egy-egy réteget koptat le a féktuskóról.

Kezdetben a féktuskó belső sugara kisebb volt a kerék sugarától. A fékezés folyamán a kerék a felmelegedett tuskót az érintkezési tartományon magával egyező sugarúra koptatja. A fékezési folyamat után a féktuskó visszahül, és a belső sugár csökken a féktuskó záródásának köszönhetően. Emiatt a legközelebbi fékezéskor ismét a féktuskó széleinek közeléből indul az érintkezési zóna.

Ez az elv úgy mutatkozik meg az analízis esetén, hogy az érintkezési tartomány ismét a féktuskó széleitől indul, elkezd növekedni, majd egy bizonyos méretet elérve és eközben a tuskó széleit kellően felforrósítva beindul a ciklikus mozgása a korábban leírtak szerint. Eközben a lokálisan létrehozott dudor az érintkezési tartománnyal vándorol. Az érintkezési zóna alakja és mérete a vándorlás közben folyamatosan változik.

6.1 A végelelemes háló

A végelelemes háló 10 csomópontos tetraéder elemekből épül fel (24. ábra). Lokális hálósűrítés a termoelem furatok felületein lett definiálva, itt az elemméret: 0,5 mm.



24. ábra. Végelelemes háló

6.2 Az idővezérelt hőterhelések bemutatása

A hőteljesítmények helyeinek vezérlésénél a kezdeti felmelegedési szakaszon elegendő volt 5 másodperces időlépésekkel definiálni a felületvezérlést ahhoz, hogy közelíthető legyen a mérési eredmények görbéje. 20-50 másodperc között 2-3 másodperces időlépésekre, majd 50-100 másodperc között 2 másodperces időlépésekre csökkentettem az érintkezési tartomány léptetését. A megadott hőteljesítmény értékek a korábban kiszámolttal egyeznek meg (133 W a kilépő és 185 W a belépő élnél). A fékbetét belső íves felületét a nem vándorló kopás geometriai modelljéhez képest még kisebb felületdarabokra osztottam, az érintkezési zónák pontosabb alak- és méretbeli diszkretizálásához, így itt összesen 16x100 darab 1,25x0,9 mm-es felületdarab alkotja a féktuskó belső íves felületét.

A hőteljesítmény vezérlését néhány ábrával mutatom be, melyek értelmezéséhez a következők ismerete szükséges:

- *A kék határgörbe:* Azokat a határgörbéket jelentik, amelyeket a 100 másodperces fékezés végére az érintkezési tartománynak, jelen esetben a hőteljesítményeknek el kellene érniük, tehát a valóságban kapott kopott felületfolt 0,9x1,25 mm-es felületdarabokkal diszkretizált alakja.

- *A sárga határgörbék:* Ezen határgörbék az aktuálisan már bekoptatott felületek határgörbéit jelentik. A hőteljesítmény helye, azaz az érintkezési tartomány, kezdetben a betét

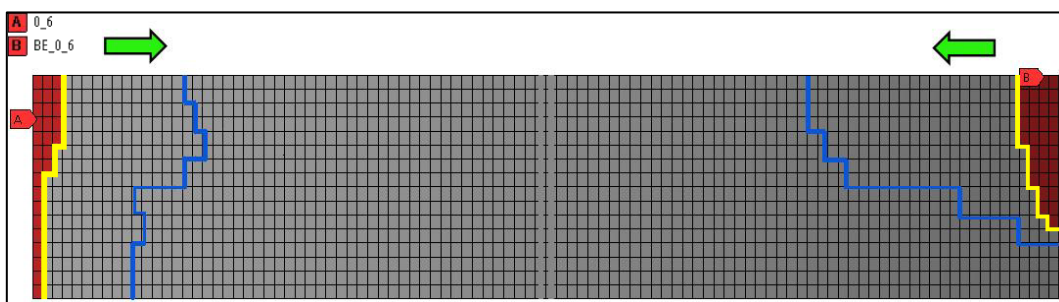
közepe felé halad, amikor visszafordul, a betét szélei felé akkor a bekopott terület határvonala nem változik mindaddig, amíg az érintkezési tartomány ismét befelé haladva tovább nem koptatja a belső íves felületet.

- *A nyilak jelentése:* Az aktuális érintkezési tartomány előző pozíciójához képesti elmozdulás irányára utalnak

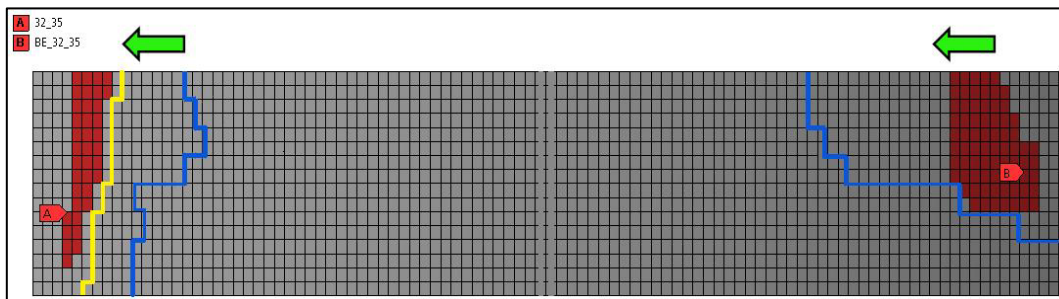
- Az „A”-val jelölt felületek: A kilépő oldali aktuális érintkezési tartományt jelölik.

- A „B”-vel jelölt felületek: A belépő oldali aktuális érintkezési tartományt jelölik.

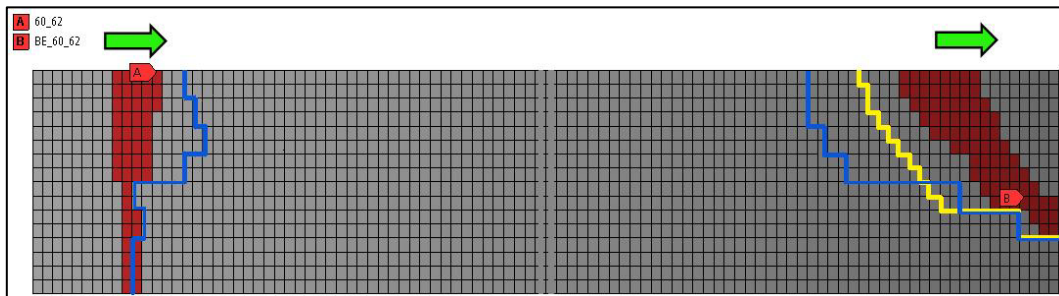
Öt időintervallum terhelésképe a következő öt ábrán látható.



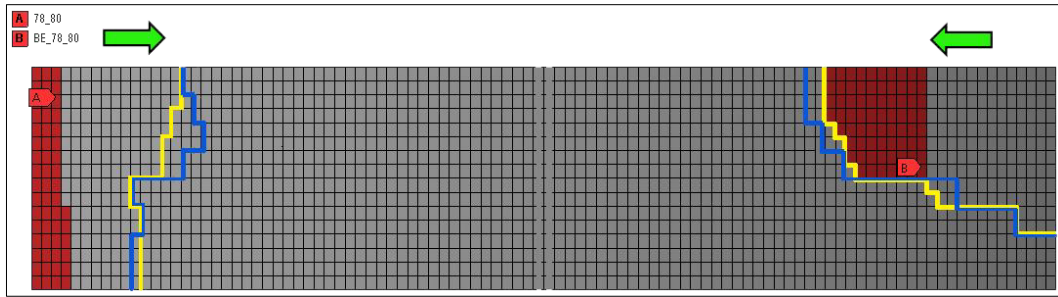
25. ábra. Hőterhelések definiálásának helye 0-6 másodperc között



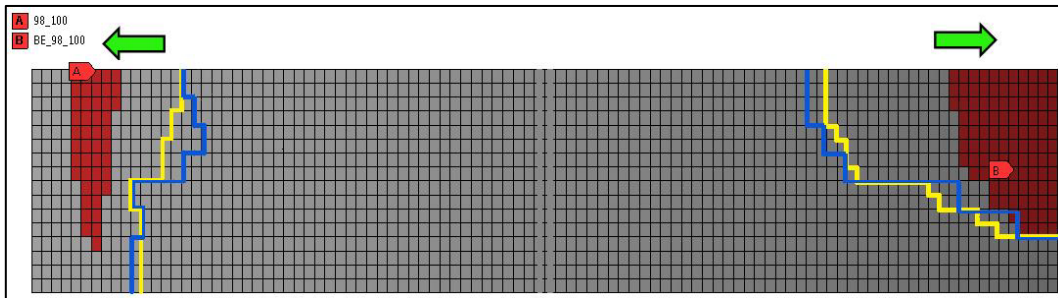
26. ábra. Hőterhelések definiálásának helye 32-35 másodperc között



27. ábra. Hőterhelések definiálásának helye 60-62 másodperc között



28. ábra. Hőterhelések definiálásának helye 78-80 másodperc között



29. ábra. Hőterhelések definiálásának helye 98-100 másodperc között

6.3 Eredmények

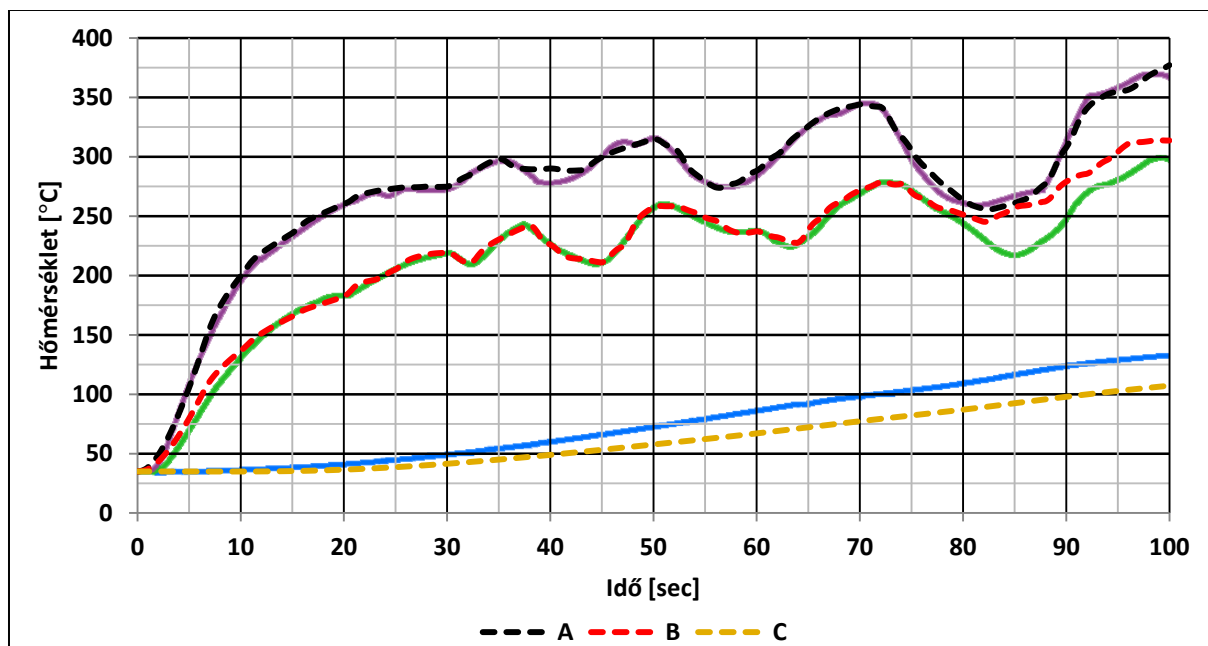
Az analízis felmelegedési görbéi és a mérési eredmények összehasonlítása a 30. ábrán láthatóak, míg a 31. ábrán, a termoelem furatokon végzett hőmérséklet lekérdezés és a termoelem furatok feletti érintkezési felületfoltokon végzett hőmérséklet lekérdezés összehasonlítása látható. A két ábra adatsorait a következő magyarázat alapján lehet értelmezni:

- A: Belépőoldali termoelem furat felületein lekérdezett hőmérséklet
- B: Kilépőoldali termoelem furat felületein lekérdezett hőmérséklet
- C: A középső termoelem furat felületein lekérdezett hőmérséklet
- D: A belépőoldali termoelem furat feletti érintkezési tartományon lekérdezett hőmérséklet
- E: A kilépőoldali termoelem furat feletti érintkezési tartományon lekérdezett hőmérséklet
- F: A középső termoelem furat feletti érintkezési tartományon lekérdezett hőmérséklet

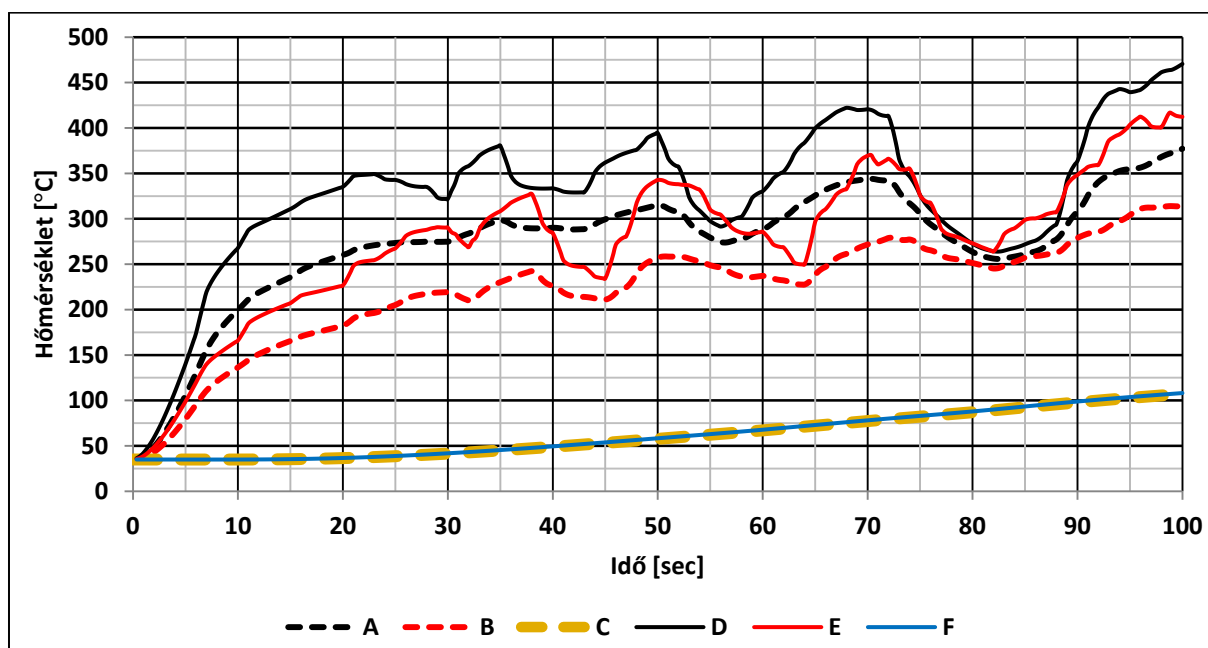
lila görbe: Belépőoldalon elhelyezett termoelemmel mért hőmérséklet (30. ábra)

zöld görbe: Kilépőoldalon elhelyezett termoelemmel mért hőmérséklet (30. ábra)

kék görbe: A középben elhelyezett termoelemmel mért hőmérséklet (30. ábra)



30. ábra. Analíziseredmények és mérési eredmények összehasonlítása

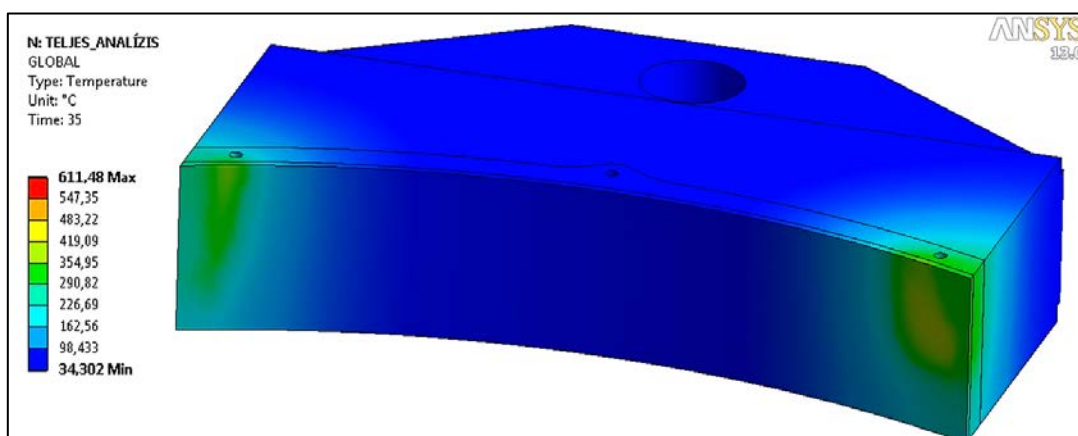


31. ábra. Termoelemfurat hőmérsékletek és az érintkezési felület hőmérsékleteinek összehasonlítása

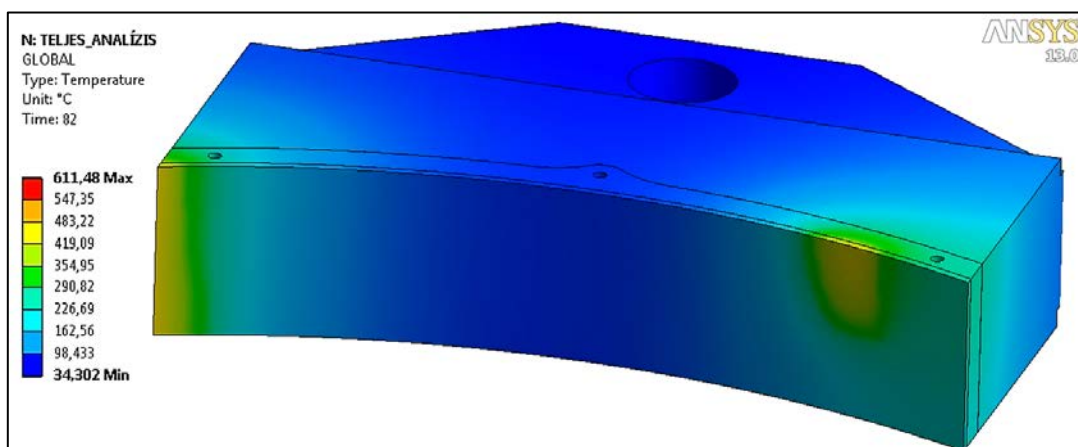
Ezzel a terhelésvezérlési elvvel a hőmérsékletmérési eredmények jól közelíthetőek. A mérési eredmények grafikonját tekintve látható, hogy mind a kilépő él oldalán mért, mind a belépő él oldalán mért felmelegedési görbék négy lokális hőmérsékleti maximumot és négy lokális hőmérsékleti minimumot tartalmaznak. Ez az analízis szempontjából azt jelentette, hogy az érintkezési tartományoknak négy alkalommal kellett elhaladniuk a termoelemek felett és négyszer kellett eltávolodniuk innen. Ez többféleképpen is megtörténhet. Amikor az

érintkezési zóna először ér a termoelemek fölé és lokális hőmérsékleti maximumot okoz, akkor kétféleképpen indulhat el a hőmérséklet csökkenése. Az egyik lehetőség szerint azt feltételezhetjük, hogy az érintkezési zónák visszakerülnek a betét széleihez, a másik szerint az érintkezési zóna tovább halad a betét közepe felé, és ezzel okoz hőmérsékletcsökkenést a termoelemek környezetében. A 30. ábránál látható, hogy a B adatsor, azaz a kilépő oldali termoelem helyén lekérdezett hőmérsékleti értékek görbéje az utolsó hőmérsékletingadozást már nem követi le. Ez a hőterhelés vezérlésével magyarázható, mivel ezen az oldalon az utolsó 20 másodpercben a hőforrás a féktuskó kilépő éle felé mozgott, ami nagyon közel található a kilépőoldali termoelemhez így a hőteljesítmény még itt is jelentős hatást gyakorolt a termoelem helyére. A korábbi lépésekben ez még nem okozott problémát, mivel a féktuskó globális hőmérséklete alacsonyabb volt.

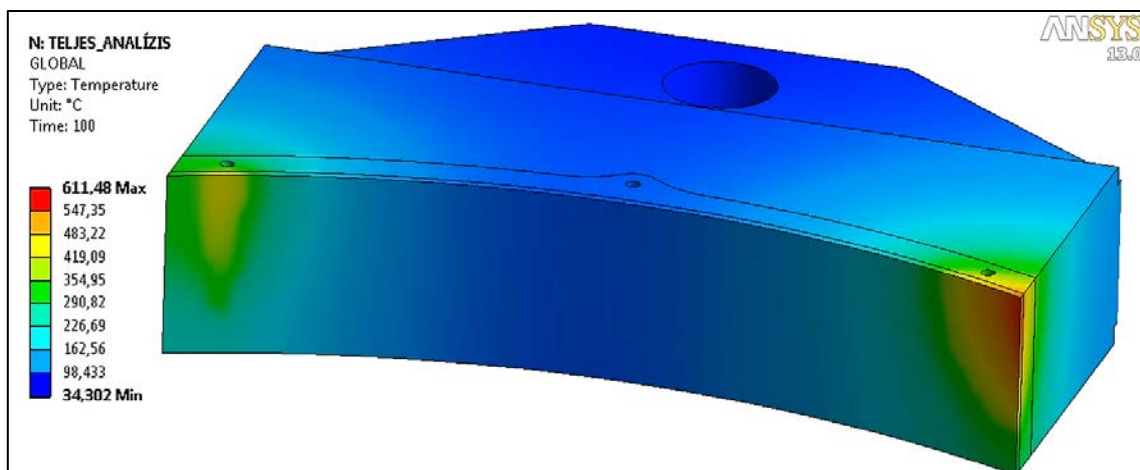
Az analízis három időpillanatában a hőmérsékletmezőket a 32., 33. és 34. ábrák szemléltetik.



32. ábra. Hőmérsékletmező a 35. másodpercben



33. ábra. Hőmérsékletmező a 82. másodpercben



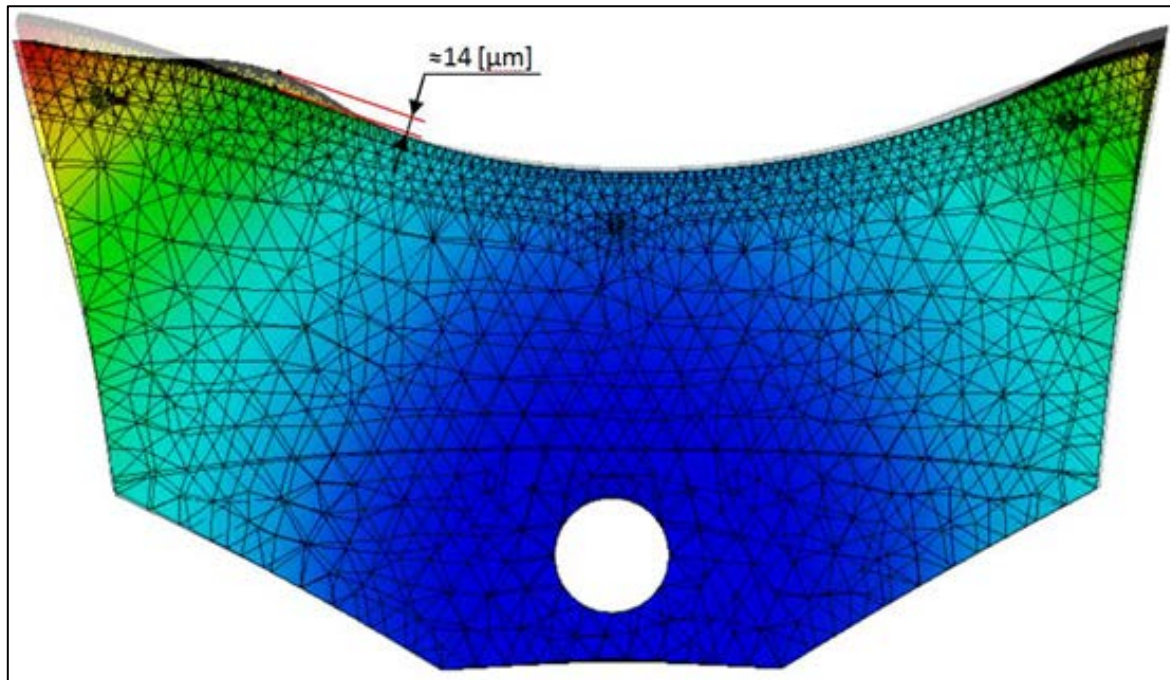
34. ábra. Hőmérsékletmező a 100. másodpercben

Az érintkezési tartomány aktuális helye mindegyik ábrán jól kirajzolódik egy magasabb hőmérsékletű felületfoltként. Összességében az analízis alapján elmondható, hogy a féktuskóknál jelentkező felületi hőmérsékletingadozás elsődleges okozója az érintkezési zóna vándorlása. Kérdésként jelenik meg, hogy a kisebb mozgó érintkezési tartomány és az ebből következő nagyobb hőáramsűrűség képes-e lokális felületi dudort eredményezni a féktuskó íves felületén, valamint ha képes, akkor a keletkezett dudor méretére, alakjára milyen hatással van a korábban szilárdságtani szempontból elhanyagolt tuskóerő. Ezek vizsgálatát a következő pontokban foglalom össze.

7. A HŐTÁGULÁS VIZSGÁLATA

7.1 Hődeformált alakok összehasonlítása

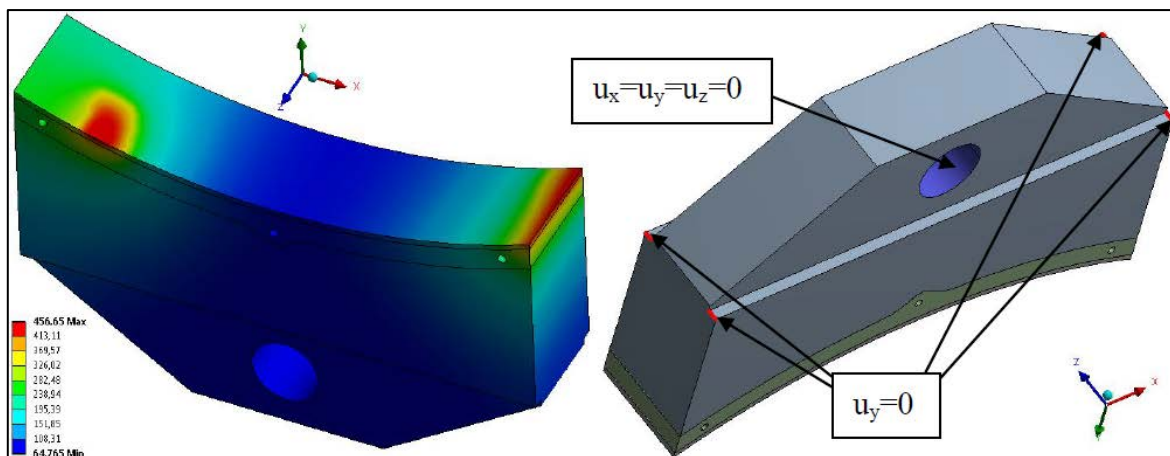
Az előzőekben bemutatott analízisek eltérő hőmérsékletmezőt mutattak a 30. másodperctől kezdve. A 82. másodpercben a vándorló kopást feltételező analízis hőmérsékletgörbéjének lokális hőmérsékleti minimuma van. Ebben az időpillanatban a hőmérséklet mintegy 75°C-kal van a nem vándorló érintkezési tartomány esetén lekérdezett hőmérsékletérték alatt a belépő oldali termoelem helyén. A két hőmérsékletmező hatására létrejött deformált alakot a 35. ábrán hasonlítom össze. Peremfeltételként a féktuskó rögzítésére szolgáló furat palástfelületén fix megfogást alkalmaztam, terhelésként pedig a tranziens hőtani számítás 82. másodpercében létrejött hőmérsékletmezőt importáltam a szilárdságtani számításba. Mivel ebben az időpillanatban a nem vándorló kopást feltételező analízisnél a hőáram nagyobb felületdarabon működött, nem jelentkezett lokális kidudorodás a féktuskó felületén. Ezzel szemben a vándorló kopást feltételező analízis esetén lokális kidudorodást tapasztalhatunk a nagy hőáramsűrűség miatt. A dudor csúcsához tartozó elmozdulások radiális komponensét összevetve, a különbség mintegy 14 μm nagyságú.



35. ábra. Hődeformált alakok összehasonlítása a 82. másodpercben
(Deformációs lépték: 100x)

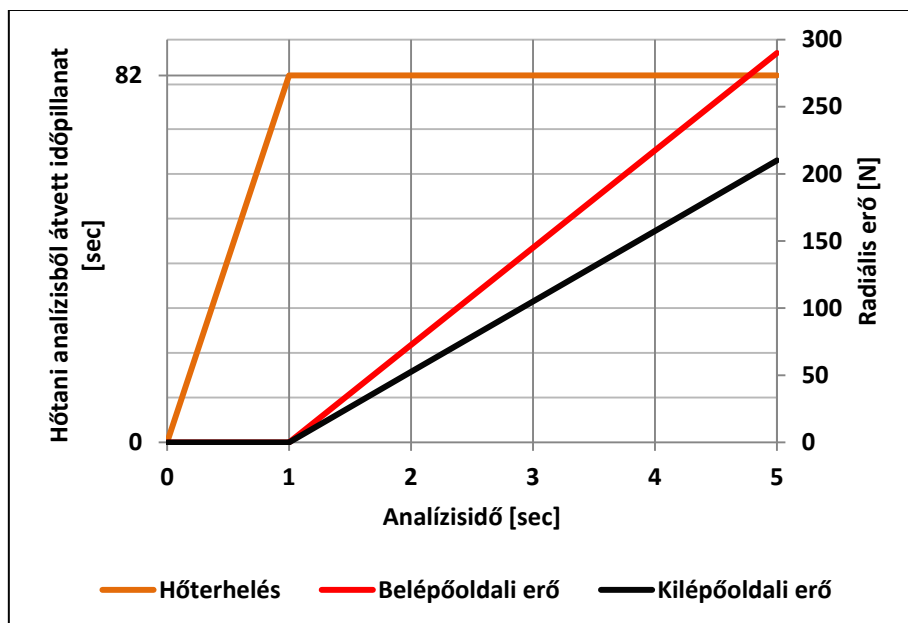
7.2 A hőtágult alak és a tuskóerő kölcsönhatása

A vándorló kopást vizsgáló hőtani analízis esetén a 82. másodpercben keletkező dudor alakjának változását vizsgáltam a tuskóerő hatására. Ehhez egy szilárdságtani analízist készítettem, melybe terhelésként a 82. másodpercben aktuális hőmérsékletmezőt importáltam, majd a hőforrások helyén a tuskóerővel terheltem a modellt. Az importált hőmérsékletmezőt és a peremfeltételeket a 36. ábra mutatja.

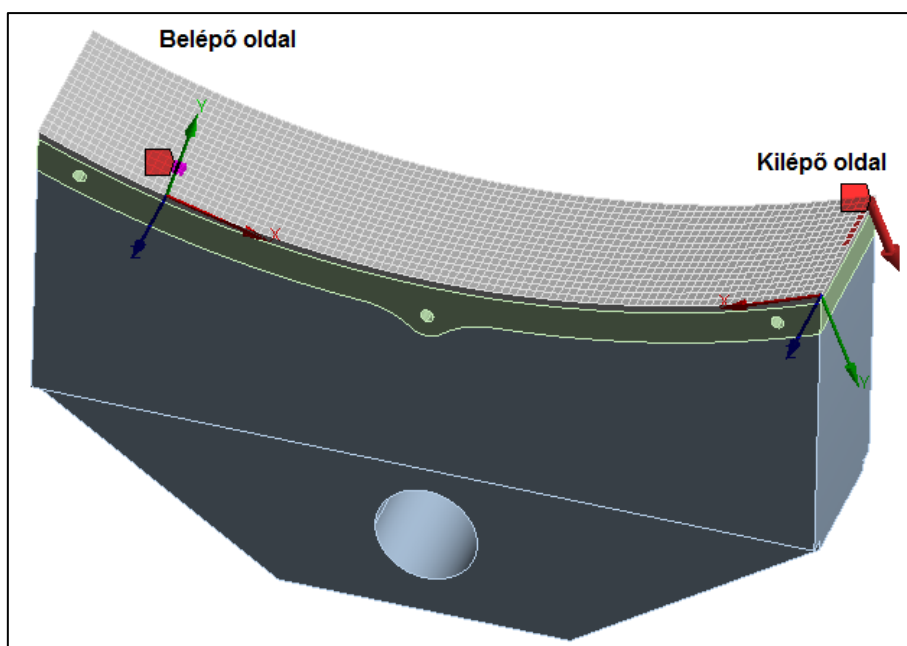


36. ábra. Az importált hőmérsékletmező és a megadott peremfeltételek

A teljes féktuskóra ható erő nagysága 500 N. Ezt az erőt a tuskó két oldala között a már korábban ismertetett hőpartíciók arányban (185/133) osztottam fel, így a belépő oldalra 290 N, a kilépő oldalra 210 N jutott, melyeket radiális irányban definiáltam. A féktuskónál fix megfogást alkalmaztam a rögzítő furat palástfelületén és a tuskó négy élén meggátoltam az y irányú elmozdulást. Erre azért volt szükség, hogy féktuskó belépő oldalára helyezett 290 N nagyságú erőből és a kilépő oldalára helyezett 210 N nagyságú erőből keletkező nyomatékok különbsége ne csavarja el a féktuskót a rögzítő furat körül. A felterhelés két szakaszát a 37. ábra mutatja be. Az első szakasz 0-1 másodpercig tart, ezen a szakaszon a 35°C-os kezdeti hőmérséklettel rendelkező féktuskót az első másodperc végére a tranziens hőtani analízis 82. másodpercéből átvett hőmérsékletmezővel terheltem. A második szakaszban ezt a hőmérsékletmezőt konstans értéken tartva, 1-5 másodpercig megtörtént a tuskóerők ráadása az aktuális érintkezési zóna egy részterületére. Az erők megadásának helyét, és irányát a 38. ábra mutatja be. A belépő él oldalán a terhelő erőt összesen 15 csomóponton működtettem, melyek a dudor csúcsának környezetében helyezkedtek el.

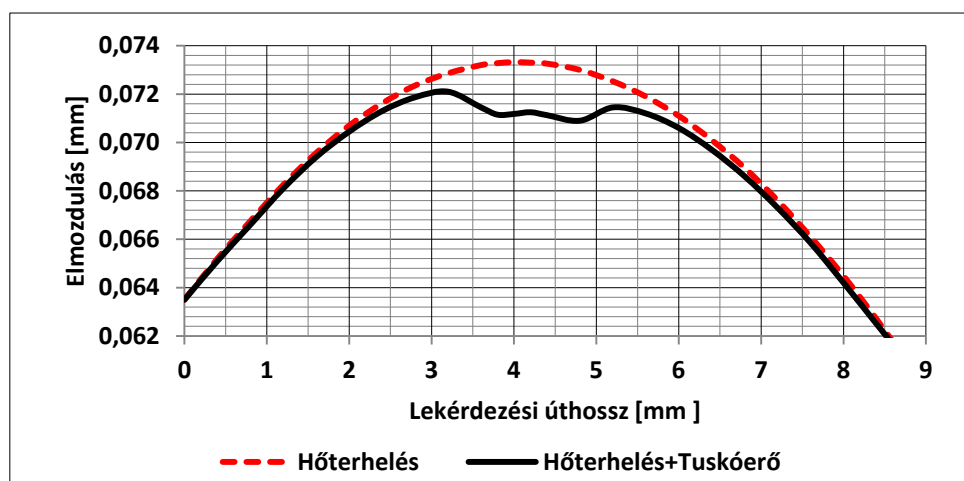


37. ábra. Időgörbék a szilárdságtani analízishez



38. ábra. A tuskóerő-komponensek megadásának helye a modellen

A dudor benyomását követő elmozdulásokat szemlélteti a 39. ábra a dudor környezetéből.



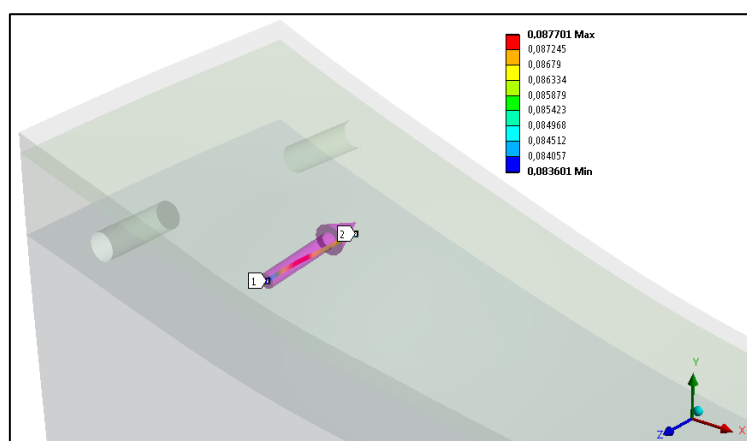
39. ábra. Elmozdulás a dudor környezetében

Látható, hogy a tuskóerő okozta benyomódás nem jelentős a dudor magasságához képest, azaz a tuskóerő nem képes a dudort visszanyomni, ezért a dudort a kerék futófelületének kell lekoptatni.

A lokális benyomódás értéke körülbelül 0,002 mm. További számításokkal ellenőrizni lehetne, hogy az adott hőmérsékleten létrejött dudor, melynek környezetében a rugalmassági modulus lecsökkent, lekoptatás szempontjából jelentős méretűnek számít-e.

7.3 Hertz-féle rugalmas benyomódás számítása (gömb-síkfelület párra)

A tuskóerő által előidézett dudor benyomódást egyszerűsítések mellett Hertz-elmélettel analitikusan ellenőriztem. Ehhez szükséges volt a dudor görbületi sugarának becslésére. A görbületi sugár meghatározásához a 40. ábrán látható helyen végeztem elmozdulás lekérdezést.



40. ábra. Elmozdulás lekérdezése a görbületi sugár számolásához

Az elmozdulás értékeit a feltüntetett koordináta-rendszer szerinti y és z tengelyekre végeztem el. Az 1. táblázatban található eredmények közül a színezett öt pontra két kört illesztettem, melyek sugarait lemértem majd az átlagukat vettem az analitikus számításhoz.

A sugarak átlaga 1130 mm lett. Az így kapott sugarat a Hertz-elmélet szerinti számolásokhoz használtam fel gömb és síkfelület összenyomását feltételezve, az érintkezési felület hőmérsékletének megfelelő rugalmassági modulussal és a belépő oldalon ható 290 N nagyságú tuskóerővel.

	y koord.	z koord.	dy	dz	z _{új}	Y _{új}
Mesh Node 1	30,8130	2,5000	0,0840	0,0532	2,5532	30,8662
Mesh Node 2	30,8130	2,8125	0,0850	0,0502	2,8627	30,8632
Mesh Node 3	30,8130	3,1250	0,0858	0,0472	3,1722	30,8602
Mesh Node 4	30,8130	3,4375	0,0866	0,0443	3,4818	30,8573
Mesh Node 5	30,8130	3,7500	0,0872	0,0415	3,7915	30,8545
Mesh Node 6	30,8130	4,0625	0,0877	0,0387	4,1012	30,8517
Mesh Node 7	30,8130	4,3750	0,0881	0,0360	4,4110	30,8490
Mesh Node 8	30,8130	4,6875	0,0883	0,0333	4,7208	30,8463
Mesh Node 9	30,8130	5,0000	0,0885	0,0307	5,0307	30,8437
Mesh Node 10	30,8130	5,3125	0,0886	0,0282	5,3407	30,8412
Mesh Node 11	30,8130	5,6250	0,0887	0,0257	5,6507	30,8387
Mesh Node 12	30,8130	5,9375	0,0886	0,0233	5,9608	30,8363
Mesh Node 13	30,8130	6,2500	0,0884	0,0209	6,2709	30,8339
Mesh Node 14	30,8130	6,5625	0,0882	0,0185	6,5810	30,8315
Mesh Node 15	30,8130	6,8750	0,0879	0,0162	6,8912	30,8292
Mesh Node 16	30,8130	7,1875	0,0876	0,0139	7,2014	30,8269
Mesh Node 17	30,8130	7,5000	0,0871	0,0117	7,5117	30,8247
Mesh Node 18	30,8130	7,8125	0,0866	0,0096	7,8221	30,8226
Mesh Node 19	30,8130	8,1250	0,0860	0,0074	8,1324	30,8204
Mesh Node 20	30,8130	8,4375	0,0854	0,0053	8,4428	30,8183
Mesh Node 21	30,8130	8,7500	0,0847	0,0033	8,7533	30,8163

1. Táblázat. Elmozdulások a dudorkörnyezetből

7.3.1 Kiinduló adatok

Terhelő erő (tuskóerő a belépő oldalon): $Q=290 \text{ N} = 29 \text{ daN}$

A dudor görbületi sugara: $r=1130 \text{ mm}$

Rugalmassági modulus: $E_1=E_2=86,71 \text{ GPa} = 8671 \text{ daN/mm}^2$

Poisson tényező: $\nu_1=\nu_2= 0,25$

7.3.2 Görbületi viszonyok meghatározása

$$\text{görbületek: } \rho_{I1} = \frac{1}{r_{I1}} = \frac{1}{1130}, \rho_{I2} = \frac{1}{r_{I2}} = \frac{1}{1130}, \rho_{II1} = \frac{1}{r_{II1}} = 0, \rho_{II2} = \frac{1}{r_{II2}} = 0$$

$$\text{főgörbületek összege: } \sum \rho = \rho_{I1} + \rho_{I2} + \rho_{II1} + \rho_{II2} = \frac{1}{565}$$

görbületi viszony:

$$F(\rho) = \frac{\sqrt{(\rho_{I1} - \rho_{I2})^2 + 2 \cdot (\rho_{I1} - \rho_{I2}) \cdot (\rho_{II1} - \rho_{II2}) \cdot \cos(2\omega) + (\rho_{II1} - \rho_{II2})^2}}{\sum \rho} = 0$$

érintkezési ellipszis fél nagytengelye:

$$a = a^* \sqrt[3]{\frac{3Q}{2 \sum \rho} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} = 5,3146, \quad \text{ahol } a^*=1, \text{ táblázatból}$$

a^* =érintkezési ellipszis fajlagos fél nagytengelye

érintkezési ellipszis fél kistengelye:

$$b = b^* \sqrt[3]{\frac{3Q}{2 \sum \rho} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)} = 5,3146, \quad \text{ahol } b^*=1, \text{ táblázatból}$$

b^* =érintkezési ellipszis fajlagos fél kistengelye

7.3.3 Rugalmas alakváltozás számolása

$$\text{Redukált rugalmassági modulus: } Er = \frac{1}{\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}} = 4624,533 \text{ daN/mm}^2$$

$\delta^* = 1$, táblázatból

$$\text{Rugalmas alakváltozás: } \delta = \delta^* \sqrt[3]{\frac{9Q^2}{32Er^2}} \sum \rho = 0,00278 [mm]$$

A Hertz-féle rugalmas benyomódás 0,00278 mm Ez jól közelíti a numerikus számítás eredményeit, így belátható, hogy a féktuskó-kerék kapcsolatban működő tuskóerő nem elegendően nagy ahhoz, hogy a keletkezett dudort visszanyomja. Ezáltal a dudor mindaddig jelen van, és hatást fejt ki a kopási folyamatokra, amíg a kerék futófelülete le nem koptatja.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

8.1 Összefoglalás, következtetések

A forrópont-vándorlás hőtani vizsgálata során, két tranziens hőtani számítást készítettem a hőmérsékletmérési eredmények közelítésére, melyek idővezérlése két különböző kopási folyamatot feltételezett a féktuskóknál jelentkező hőmérsékletingadozás hátterében.

Az először bemutatott, nem vándorló kopás feltevéseire alapozó analízis, a mért felmelegedési görbéket csak globális léptékekben közelítette. Az érintkezési tartomány folyamatos növelése esetén, a növekedés mértéke csak a felmelegedési görbék meredekségére volt hatással. A mérési eredményeken látható lokális hőmérsékleti minimumokat és maximumokat nem lehetett közelíteni.

A vándorló kopás feltételezése jelen esetben az volt, hogy a kezdeti geometria miatt, az érintkezési tartomány a féktuskó széleitől indul, majd a kopási folyamatok során növekedni kezd. Egy bizonyos méretet elérve a féktuskó hőmérsékletmező miatt bekövetkező lokális és globális deformációja beindítja azt a folyamatot, mely során az érintkezési tartomány egy periodikus mozgásba kezd. Ennek oka, egyrészt a nagy hőáramsűrűség miatti lokális kidudorodás, másrészt a globális hőmérsékletemelkedés miatt bekövetkező féktuskó kinyílás. Az analízis során változtatható bemeneti adatként jelent meg az érintkezési zóna alakja, helye és mérete. Ezzel a hőterhelés-vezérlési elvvel a mérési eredmények pontosan lekövethetőek voltak és ezzel igazolták, hogy a féktuskóknál jelentkező hőmérsékletingadozás elsődleges okozója az érintkezési tartomány vándorlása.

A tranziens hőtani számításokból nyert hőmérsékletmezőket alapul véve szilárdságtani számításokat is készítettem. A szilárdságtani számításokhoz konstans sűrűség, konstans poisson-tényező és hőmérsékletfüggő rugalmassági modulust használtam. A számítások során egy hőmérsékleti értékek szempontjából megfelelő időpillanatban összehasonlítottam a vándorló és a nem vándorló érintkezési zónát feltételező analíziseknél létrejött deformált geometriát. Míg a vándorló érintkezési zónánál megjelent a várt lokális felületkidudorodás, addig a nem vándorló érintkezési zóna főként csak globális deformációt okozott.

Fontos kérdésként jelent meg, hogy a vándorló érintkezési tartomány nagyobb hőáramsűrűsége által okozott felületdudor méretére milyen hatással van a korábban szilárdságtanilag elhanyagolt tuskóerő. A numerikus, valamint a Hertz-elmélet szerinti

analitikus számítási eredmények azt mutatták, hogy a tuskóerő még a magas hőmérsékletű és ez által lecsökkent rugalmassági modulusú dudort sem képes visszanyomni.

8.2 Megjegyzések, javaslatok a végelem modell továbbfejlesztésére

- A féktuskó belső íves felülete jelenleg 16x100 db 1,25x0,94 mm-es befoglaló méretű darabra van felosztva melyeken a hőteljesítmény adott időpillanatokban működik. A kopott felület részletesebb diszkretizációjával pontosítani lehet a feltételezett érintkezési zóna alakját.

- Az analízis eredményei között látható, hogy a ki és a belépő oldalak felmelegedési görbéit a vándorló kopás feltételezéseivel jól lehet közelíteni, mivel itt közvetlenül változtatható volt az érintkezési zóna alakja, mérete és helye. A középső termoelem helyéhez a hő hővezetéssel jut el, amelynek aktivitását a hővezetési tényező befolyásolja. A hővezetési tényező hőmérsékletfüggése is figyelembe lett véve mérési eredmények alapján, viszont a középső termoelem által mért értékeket így sem sikerült olyan kis hibával közelíteni, mint a be és kilépő élekhez tartozó felmelegedési görbéket. Ezt okozhatja a hővezetési tényező pontatlan definiálása, esetleg a hőteljesítmény pontatlan értéke és annak vezérlése, valamint az egyéb hőbeviteli formák (pl.: hősugárzás a kerék futófelülete felől a tuskó felé) elhanyagolása.

- A hőteljesítményekhez tartozó felületek mozgatása az analízis folyamán leggyakrabban 2-3 másodpercenként történt, ez az idő tovább csökkenthető a pontosabb eredmények érdekében.

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Liktör, B., Váradi, K.:Kisminta féktuskó hőtani analízise, GÉP, A Gépipari Tudományos Egyesület folyóirata, LXIII. évfolyam, 2012. 67-70. old.
- [2] T. Verneresson: “Thermally induced roughness of tread-braked railway wheels Part 1: brake rig experiments”, Wear, Vol. 236, pp: 96-105 (1999)
- [3] T. Verneresson: Thermally induced roughness of tread braked railway wheels Part 2: modelling and fiels measurements, Wear 236 (1999) 106-116
- [4] Szűcs János – Vasúti féktuskó-kerékabroncs érintkezési és kopási viselkedése, Diplomaterv, 2010, Budapest
- [5] Prof. Dr. Zobory István: Járműdinamika és hajtástechnika, I.rész: Járműdinamika, jegyzet, 2012
- [6] J.R.R. Ayala; K. Lee; M. Rahman; J.R. Barber: „Effect of intermittent contact on the stability of thermoelastic sliding contact”, Journal of Tribology, Vol. 118, pp: 102-108 (1996)