



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

SZÁRAZ SÚRLÓDÁSÚ, HIBRID-KOMPOZIT
TENGYELKAPACSOLO-BETÉTEK
TRIBOLÓGIÁJA

DOI: 10.54598/003020

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Biczó Roland

Gödöllő

2022

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:


Műszaki Tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár és Élettudományi
Egyetem,
Műszaki Intézet

Témavezető:

Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár és Élettudományi
Egyetem,
Műszaki Intézet


.....
a témavezető jóváhagyása


.....
az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK ÉS RÖVIDÍTÉSEK.....	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	5
1.1. A téma időszerűsége, jelentősége.....	5
1.2. Célkítűzések	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. Mechanikai és hőtani modellalkotás	7
2.2. Tribológiai modellezés	7
2.3 A modellezéshez használt szoftver és modellezési elvek ismertetése ..	8
2.5 Kiértékelési módszerek	8
3. EREDMÉNYEK	9
3.1 A súrlódó kompozit betét merevségi mátrixa	9
3.2 Hőtani jellemzők	9
3.3. Tribológiai vizsgálatok eredményei	9
3.4. Modellezés	13
3.5 Tribológiai jellemzők közti összefüggések keresése statisztikai úton	15
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	19
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	22
6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	23

JELÖLÉSJEGYZÉK ÉS RÖVIDÍTÉSEK

r_{dyn}	dinamikus súrlódási sugár	[mm]
$i_{1stgear}$	első sebességfokozati áttétel	[-]
i_{diff}	differenciál-áttétel	[-]
n_{eng}	motor fordulatszáma	[1/perc]
T_{engmax}	a motor maximális nyomatéka	[Nm]
χ	motortípustól függő nyomatéktényező	[-]
T_{drag}	ellenállási nyomaték	[Nm]
R^2	determinációs együttható	[-]
ΣE	összes felületi aktivációs energia	[kJ]
$p\nu$	kerületi sebesség és felületi nyomás szorzata	[MPa·m/s]
L_t	mérési hossz (felületi érdesség)	[mm]
F_S	súrlódási erő	[N]
$F_n = F_z$	normál erő	[N]
F_x és F_y	a súrlódó felülettel párhuzamos erőkomponensek	[N]
CTE	hőtágulási tényező	[1/K]
λ	hővezetési tényező	[W/(m·K)]
ΣE	összes felületi aktivációs energia	[kJ]
R_a	aritmetikus átlagos érdesség	[μm]
R_z	a tízpontos átlagos érdesség	[μm]
R_{max}	maximális magasság érdességmérésnél	[μm]

Rövidítések

T: próbapad, **H:** autópálya, **V:** jármű, **C:** város,
VT: jármű + pótkocsi, **R:** tesztpálya, **RS:** tesztpálya + lejtőn elindulás
PoD: *Pin-on-disc*, tű-tárcsa teszt

CoF: *coefficient of friction*, súrlódási tényező (μ)

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége, jelentősége

A járműipar egyik fontos, súrlódás jelenségére épülő szegmense a tengelykapcsoló-szerkezetek világa, melyeknek feladata a forgó mozgást és a nyomatékot a motortól a hajtómű felé továbbítani.

A súrlódás keltette hő, a pillanatnyi mechanikai igénybevételek, valamint a hosszú távú, élettartamra vonatkozó kihívások speciális összetételű anyagok alkalmazását igénylik e területen. A szálerősítéses hibrid kompozitok a leggyakrabban használt száraz súrlódó anyagok az autóiparban. Az egyes kompozit összetevők közti feszültség-, deformáció-viszonyok és hőtranszport folyamatok, súrlódás keltette szerkezeti és felületi változások megértése képezi a tengelykapcsolótárcsák súrlódó anyagai fejlesztésének alapját.

Az évek során egyre magasabbá váltak az ezen anyagokkal szemben támasztott teljesítménybeli és környezetvédelmi követelmények érintve a súrlódási tényezőt, a kopási tulajdonságokat, az anyagok mechanikai jellemzőit, a túrések által a geometriai korlátokat és a termikus terhelés alatti viselkedést is. A különböző anyagi minőségeknek az életciklus alatti eltérő viselkedése azonban számos új problémát tár fel a fejlesztések során.

A fejlesztések elengedhetetlen eszköze az anyag várható viselkedésének modellezése, mely gyorsabb képet ad akár különböző terhelések esetén, mint a tesztelés (jellemzően roncsolásos vizsgálatok). A működést jól leíró modellek paraméterezése azonban átfogó vizsgálatokat igényel, hiszen a kompozit betétnek a mechanikai, termikus és tribológiai szempontok együttese határozza meg a viselkedését. Egy új súrlódó anyag esetén a szükséges tesztek költségei csökkenthetők modell szintű elővizsgálatokkal.

1.2. Célkitűzések

A munkám során egy száraz súrlódású, hibrid kompozit tengelykapcsoló betét élettartam alatti tribológiai viselkedési jellemzőit elemzem. A mechanikai és hőtani tulajdonságokkal kiegészülve ezek a tengelykapcsolók fejlesztése során alkalmazott súrlódási kontakt modell bemenő paraméterei. Célom:

- a termo-mechanikai modellalkotáshoz szükséges kompozit próbatest-létrehozási lehetőségek vizsgálata, mechanikai anyagmodell megalkotása, hőtani jellemzők meghatározása, illetve a modellalkotás vizsgálati lépéseinek általánosabb, módszertani összefoglalása,
- a tribológiai viselkedés feltérképezése a felületi érdesség változásának viszonyai, a fajlagos kopási értékek és a súrlódási tényezők, illetve az ezek közötti összefüggések tükrében újszerű módon: valós autóipari tesztek után a teljes élettartamára vonatkozóan az ún. felületi aktivációs

energia függvényében, majd pedig laboratóriumi tű-tárcsa tesztnak alávetve az autóiipari tesztek betéteiből kivágott próbatesteket,

- különböző kopási és felületi érdességváltozási tendenciák megfigyelése a növekvő felületi aktivációsenergia-skála mentén, majd az autóiipari tesztek e szerinti csoportosítása,
- tribológiai teljesítmény befolyásolása szempontjából fontos paraméterek megállapítása, valamint tendenciától eltérését okozó paraméterek azonosítása valós és labor körülmények között.

A végső cél a tengelykapcsoló élettartama során a betétanyag tribológiai teljesítményének és viselkedésének kapcsolt termomechanikai modellel való előre jelezhetővé tétele.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Jelen fejezet az alkalmazott berendezések és mérőrendszerek működését, a termomechanikai anyagidentifikációs, majd a járműipari tribológiai, végül a laboratóriumi tribológiai vizsgálatokat és összefüggéseket ismerteti.

A súrlódó anyagok tribológiai szempontjainak az élettartamuk alatt az erőátviteli rendszer tulajdonságaira gyakorolt hatásait egy összetett terhelési esetek szimulálására is alkalmas kétszintes, termomechanikai kapcsolt érintkezési modellel lehet leképezni, ahogy az 2.1. ábra illusztrálja.



2.1. ábra A kapcsolt termomechanikai kontaktmodell sematikus ábrája

Szálérősített kompozit tesztelése során figyelembe kell venni a tönkremeneteli módokat (szálkihúzóadás) már a próbatestek kialakításánál. Megoldást az abrazív vízsugaras vágás nyújt. Továbbá egyes összetevők ipari titok részét képezik, így anyagösszetételi vizsgálatot igényelnek. A tribológiai vizsgálatok során nyomon követtem a tengelykapcsolóbetét a súrlódás hatására létrejövő felületi jellemzők változását az élettartam és a bejáratási szakaszok során eltérő üzemi körülmények (csúszási sebesség stb.) esetén, tekintettel a transzportfolyamatok alakulásának a megértésére.

2.1. Mechanikai és hőtani modellalkotás

A kompozit két fő egységre osztható, a hosszúszal-erősítést adó üvegszál, réz, aromás poliamid, valamint poli-akril-nitril fonatára és szálbevonatként jelen lévő mátrixra, mely szintén egy kompozit, rövid szálerősítéssel, valamint filler anyagokkal, kénnel, fenol- és melamin gyantával az alkotók között: anyagösszetétel-vizsgálat alapján epoxigyanta. A két egység mechanikai tulajdonságait meghatározva, majd egyesítve a véletlen orientációjú erősítés figyelembevételére alkalmas Tsai-Pagano egyenletek keverési szabályával alkottam meg a súrlódó betétanyag merevségi mátrixát. Így elsőként szakítóvizsgálatot, Iosipescu nyíróvizsgálatot és kétirányú nyúlásmérést végeztem az irányfüggő Young-modulushoz (E_{11} ; E_{22} ; E_{33}), nyíró modulushoz (G_{12} ; G_{13} ; G_{23}) és Poisson-tényezőhöz (ν_{12} ; ν_{13} ; ν_{23}).

A mechanikai szempontú anyagi viselkedés merevségi mátrixszal történő jellemzése mellett a hőtani reakciókhoz termikus tulajdonságokra is szükség van. A hőtágulási tényező meghatározására a németországi NETZSCH-Gerätebau GmbH laborjának termofizikai tulajdonságokat vizsgáló szekciójában került sor N-5667-P-16 NETZSCH TMA 402 F1 Hyperion® berendezés segítségével. A fajhőt és a hővezetési tényezőt a hőmérséklet függvényében a németországi morbach telephelyű Schaeffler Friction Products GmbH biztosította.

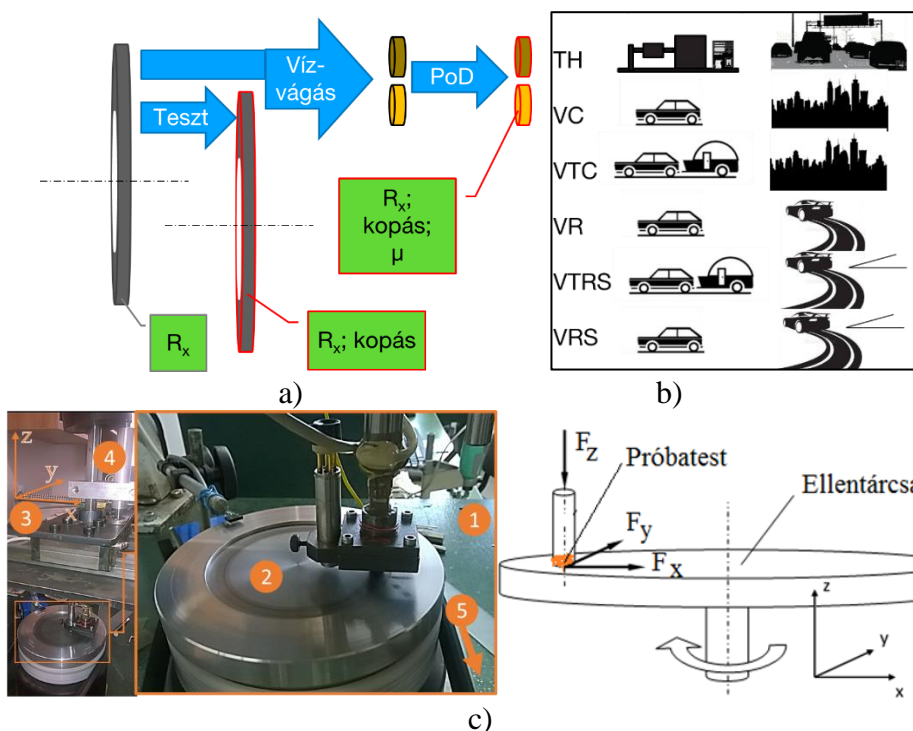
2.2. Tribológiai modellezés

Vizsgálataimban összehasonlítottam a felületi érdességi jellemzőket, a betétek vastagságvesztését és a szárazon súrlódó tengelykapcsoló betétjeinek tribológiai teljesítményét, amelyek különböző felületi aktivációs energiaértékekkel használtak előzetes, autóiipari szokásjog szerinti járműipari tesztek során. A vizsgálati eljárást a 2.2. a) ábra foglalja össze, míg a valós beépítési környezetbeli tesztek jellemzőit a 2.2. b) ábra szemlélteti, a 2.2. c) ábra pedig a tű-tárcsa berendezést mutatja be.

A felületi aktivációs energia meghatározásával összehasonlítható az intenzitás és a tribológiai hatások. A tengelykapcsoló hőterhelése a (2.1) egyenlet szerint számítható:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{r_{\text{dyn}}}{i_{1\text{stgear}} \cdot i_{\text{diff}}} \right)^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{\text{eng}})^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_{\text{drag}}}{T_{\text{engmax}} \cdot \chi}}, \quad (2.1)$$

A tesztek alatti összes kapcsolás számát és a megtett kilométerek számát figyelembe véve kiszámítható a teljes közölt energia, ami a próbadarabokra jellemző összes felületi aktivációs energia (ΣE).



2.2. ábra a) Tribológiai vizsgálatok b) Járműipari tesztek „komponensei”
 c) A tű-tárcsa rendszer részei [(1) asztal; (2) tárcsa; (3) pozicionáló rendszer; (4) holt tömeg; (5) villanymotor (csak a szíjhajtás látható)] és erők

A járműipari tesztek követő tű-tárcsa vizsgálati rendszerben ($\varnothing 7$ mm -es próbatest és GG25 ellentárcsa) három, a tengelykapcsoló kapcsolási folyamatára jellemző ún. p_v -szintet állítottam be. A mért eredményekből a dinamikus súrlódási együtthatókat a felületi erőkomponensek négyzetösszegének és a normálerőnek a hányadosaként határoztam meg.

2.3 A modellezéshez használt szoftver és modellezési elvek ismertetése

A meghatározott anyagmodell végeselemes alkalmazásához az Ansys Workbench 18.2 illetve 2021 R2 verzióját használtam. A pusztán mechanikai szimuláció eredményei a feszültség és deformációértékek, míg a kapcsolt elemzésé a hőeloszlás, hőterhelés hatására keletkező kontakt nyomás és erő.

2.5 Kiértékelési módszerek

A mérési eredmények több ismétlés átlagértékeként értendők, így azokhoz mindig meghatároztam a szórást is a szórásnégyzetből. A vizsgált tribológiai jellemzők aktivációs energiától való függését trendvonal-illesztéssel vizsgáltam. Az adott közelítő függvénnyel leírható kapcsolat erősségét az ún. determinációs együttható (R^2) jellemzi. $R^2=1$ esetén beszélünk tökéletes kapcsolatról.

3. EREDMÉNYEK

A kutatásom eredményei egy hibrid kompozit súrlódó betéttel ellátott tengelykapcsoló kapcsolt termomechanikai kontaktmodelljének inputjai.

3.1 A súrlódó kompozit betét merevségi mátrixa

A sajátos, gyártási folyamatból eredő orientáció és a különleges anyagok okán szükséges anyagidentifikáció eredményeként a hibrid kompozit merevségi mátrixának komponenseit a 3.1. táblázat tartalmazza.

3.1. táblázat. A szálerősítéses kompozit merevségi mátrixkomponensei

E_{11} (GPa)	12.3
E_{22} (GPa)	12.3
E_{33} (GPa)	4.3
ν_{12}	0.46
ν_{23}	0.38
ν_{13}	0.38
G_{12} (GPa)	7.6
G_{23} (GPa)	1.3
G_{13} (GPa)	1.3

3.2 Hőtani jellemzők

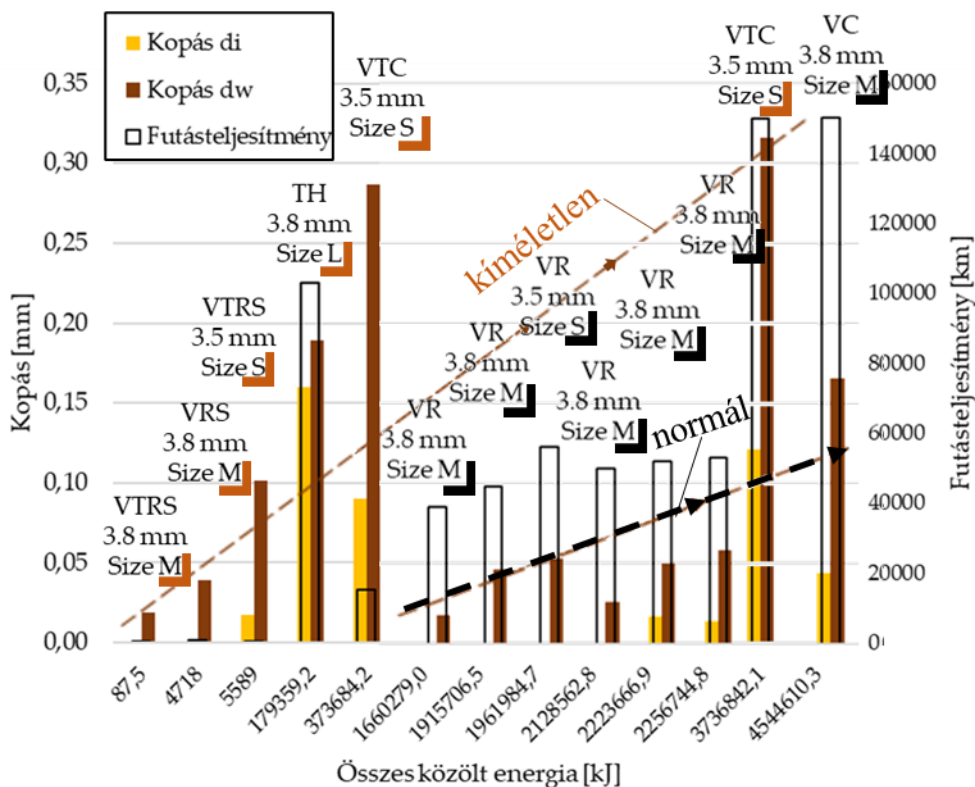
A hőtágulási tényező vizsgálata radiális, axiális és normál, azaz a vastagsággal párhuzamos irányban történt a hőmérséklet függvényében. A vizsgálatokra 0 °C-tól 180 °C-ig (5 K/perc fűtési sebességgel) levegő atmoszférában került sor 7-11 mm hosszú próbatesteken. Működési körülmények között a hőmérséklet 300-500 °C-ra emelkedik a betét egyes érintkezési pontjain. A teljes betétet figyelembe véve pedig körülbelül 200 °C-ra melegszik fel. Ezért a mérések során a melegítés 180 °C-ig történt, két felmelegítési ciklussal. A fent említett üzemi hőmérsékleti viszonyokat figyelembe véve történt a hőmérséklet-függő fajhő meghatározása, mely a 0,6 – 2 J/gK tartományban mozog. A hővezetési mérések eredményeit egy Lee-féle készülék szolgáltatta. Az eredmények szerint a vizsgált tengelykapcsolóbetét hővezetési tényezője 0,398 W/(m·K).

3.3. Tribológiai vizsgálatok eredményei

Járműipari tesztek utáni kopásértékek

A tribológiai vizsgálatokkal először a tengelykapcsolótárcsák betéteinek kopási értékeit vizsgáltam a járműipari tesztek követően a betétek belső (di) és az úgynevezett súrlódási (dw) – kezdeti súrlódási – átmérője mentén. A 3.1

ábra trendjei jól mutatják, hogy a járműipari tesztek két fő kategóriára oszthatók: kíméletlen és normál tengelykapcsoló-használatra.



3.1. ábra: A belső és a súrlódási átmérő kopási értékei futott kilométerekkel a Joule-skála mentén – Első trend: növekvő, kíméletlen terhelési esetek: VTRS, VRS, TH, VTC; – Második trend növekvő, normál terhelési esetek: VR, VC (nagy futásteljesítmény)

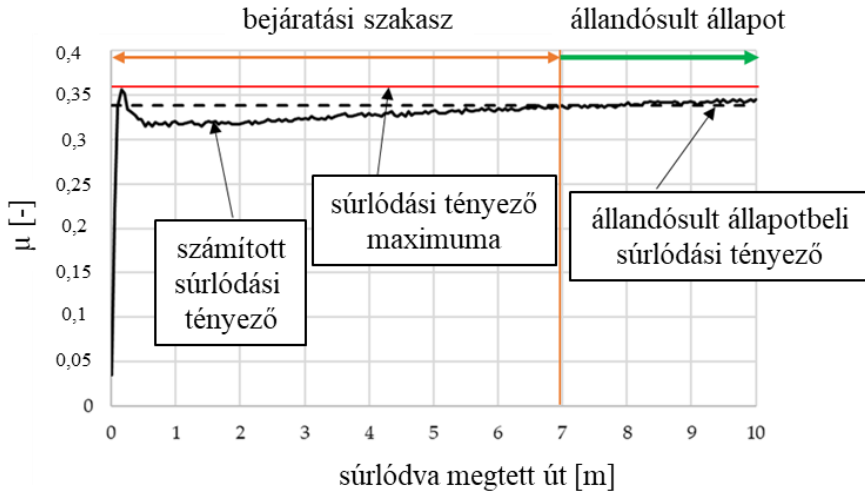
Járműipari tesztek utáni felületi érdességmérés

Kopásvizsgálat mellett érdességmérést végeztem a PHT 350 tapintójú MarSurf felületi érdességmérő készülékkel kopott és gyártás utáni betétek felületén. E mérések során a mérési hossz $L_t = 4,8$ mm volt, és az R_a , R_z és R_{max} értékek kerültek kiértékelésre. Az érdességi eredmények ugyanazt a kettős trendet mutatták, amit a kopási eredményeknél is tapasztaltam.

Tű-tárcsa tesztek alatti súrlódási tényezők

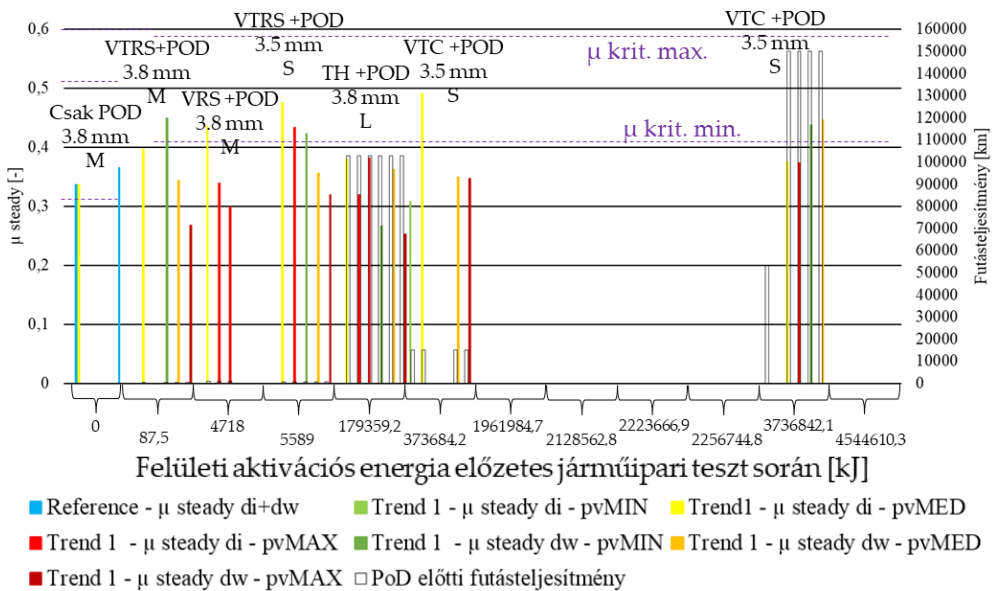
A tű-tárcsa vizsgálatok során folyamatosan rögzített próbatestre ható erők nagyságát mérő nyúlásmérők online erőiből számítottam ki a súrlódási tényező értékeit. A 3.2. ábra egy példát mutat be az online mérésből származó

súrlódási együtthatóra, értelmezve az egyes szakaszokat a súrlódva megtett út függvényében.



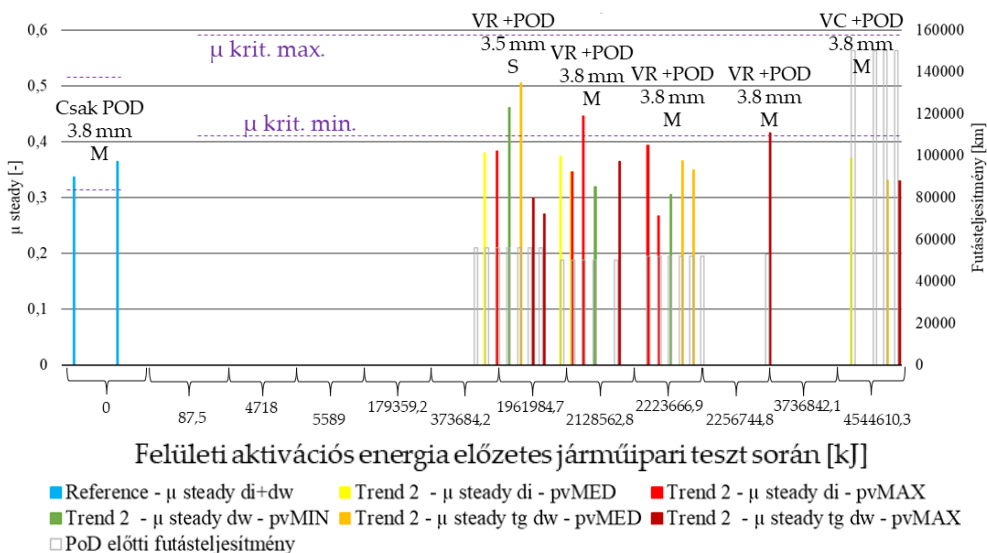
3.2. ábra: Példa a súrlódási együttható grafikonjára

A 3.3. és a 3.4. ábrák a járműipari tesztek eredményeiből következtetett járműipari tesztcsoportosítás szellemében mutatják a különböző felületi aktivációs energiához (azaz tesztípushoz) tartozó állandósult állapotbeli súrlódási tényezők értékét. Az egyes színek a három különböző p_v -szintet, a színárnyalatok a kivágási átmérőket jelzik.



3.3. ábra: A "kíméletlen" járműipari tesztek betétjeiből származó PoD-minták állandósult állapotú súrlódási tényező értékei

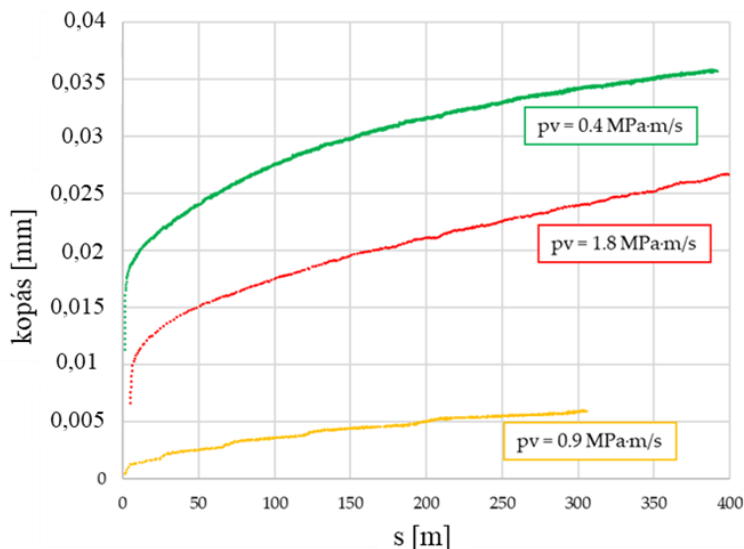
Eredmények



3.4. ábra: A "normál használatú" járműipari tesztek betéteiből származó PoD-minták állandósult állapotú súrlódási tényező értékei

Tű-tárcsa tesztek utáni fajlagos kopási értékek

A kopási értékeket a tű-tárcsa tesztek során is nyomon követtem, és a kalibrált magasságérzékelő jeléből értékeltem ki, amely a tű tartójának függőleges elmozdulását mérte. Bár ilyen módon a deformációs értékeket együtt mértem a kopásként kezelt elmozdulással, a vizsgálati minta kis mérete miatt előbbieket elhanyagoltam. A 3.5. ábra egy példát mutat a kopásérzékelés (a vastagság lineáris csökkenése (mm)) eredményeire különböző pv -értékek esetén ugyanazon mintakategória esetében a súrlódva megtett út (s) mentén.



3.5. ábra: Kopási értékek egy mintakategória tű-tárcsa vizsgálata során

A különböző felületi aktivációs energiaszintek miatt, amelyek a járműipari tesztekben származnak, a vizsgálati paramétereket és a mérési hossz kopási értékeit a tű-tárcsa vizsgálat során alkalmazott felületi aktivációs energiára normalizáltam. Ily módon az anyag élettartamának bizonyos szakaszaiban az 1 kJ aktivációs energiához tartozó fajlagos kopási értékek összehasonlíthatók. A két trend hatása itt is megmutatkozik: a kíméletlen eredményekkel (0,01-0,03 mm/kJ) összehasonlítva a belső átmérős normál használatú fajlagos kopási értékek (0,01 mm/kJ) jelentősen alacsonyabbak.

Tű-tárcsa tesztek utáni fajlagos felületi érdességváltozási értékek

A vizsgálat újabb lehetőséget ad arra, hogy a vizsgált szárazon súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolóbetét anyagának az élettartam különböző pontjaihoz tartozó tribológiai viselkedési jegyeit – a nem lineáris Joule-skála mentén – összehasonlíthassam. A referencia értékekhez képesti felületi érdességi különbségek dR_a , dR_z és dR_{max} értékeit minden próbatestre kiszámítottam, majd a tű-tárcsa vizsgálat során közölt aktivációs energiára normalizáltam. A trendek közti különbség itt is megfigyelhető, például az első trend eredményei esetén – a referencia minták belső és súrlódási átmérős felületi érdességkülönbség viszonyával ellentétben – a belső átmérőjű minták szolgáltatnak erőteljesebben csökkenő felületi érdességi adatokat, míg a második (normál használatú) trendhez tartozó értékeknél a referencia viszony megmarad, ami azt jelenti, hogy a belső átmérő megnövekedett tribológiai teljesítményvesztését okozó deformációk megelőzhetők a tengelykapcsoló megfelelő sofőr általi kezelésével.

3.4. Modellezés

A mechanikai vizsgálatokkal meghatározott merevségi mátrix, mint anyagmodell validálását analitikus képlettel is ellenőrizhető terhelési esettel, a repedési fordulatszámra történő szimulációval végeztem el. Az eredmények igazolták a paraméterek helyességét.

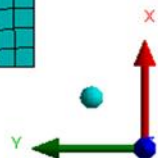
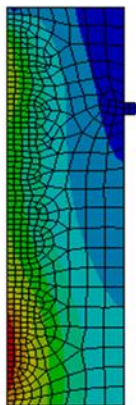
Egy 3D kontaktmodell fejlesztéséhez célszerű első körben 2D-ben elvégezni az első vizsgálatokat. Az általam létrehozott kapcsolt temomechanikai modell képes bármelyik autóipari teszt bármely építőblokkjának szimulációjára. Összehasonlításképpen a ma használatos modellezési módszerrel, megvizsgáltam a modellem p_v -függő súrlódási tényezőjének hatását. A 3.6. ábra eredményei mutatják, hogy a hagyományos méretezési eljárás potenciálisan túlméretezi hőterhelés szempontjából az erőátviteli rendszer alkatrészeit, azaz a modellem a szerkezetek költségcsökkentési potenciálját is felfedte.

Eredmények

E: Step0-1-5, t0-1-4s, Coupled Field Transient 228-160 3.5

Temperature PP
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 5 s

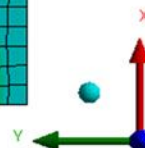
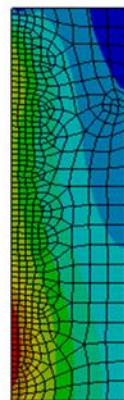
132.63 Max
128.91
125.2
121.48
117.76
114.05
110.33
106.62
102.9
99.188 Min



E: v02_Step0-1-5, t0-1-4s, Coupled Field Transient 228-160 3.5

Temperature PP
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 5 s

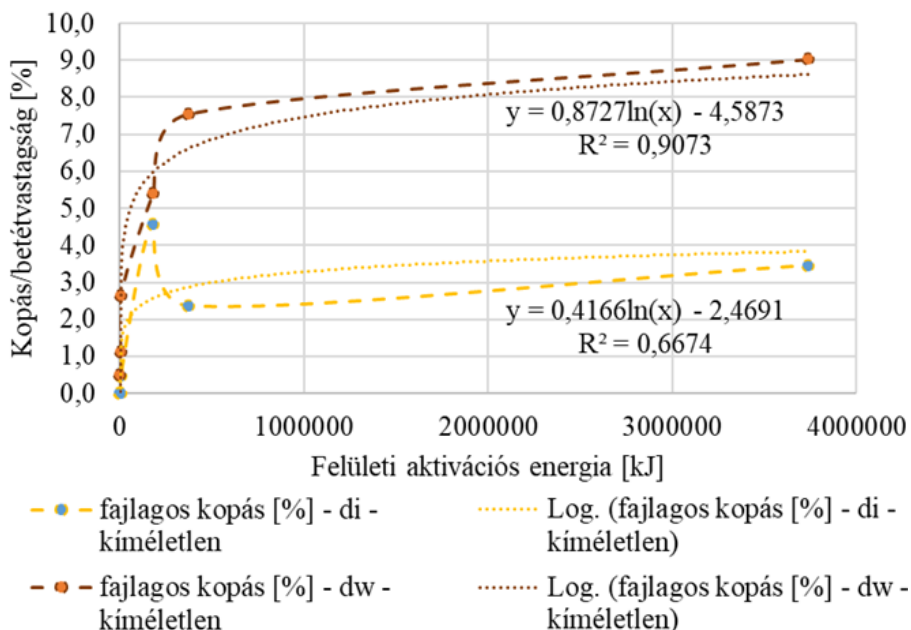
125.45 Max
122.27
119.1
115.93
112.75
109.58
106.41
103.23
100.06
96.887 Min



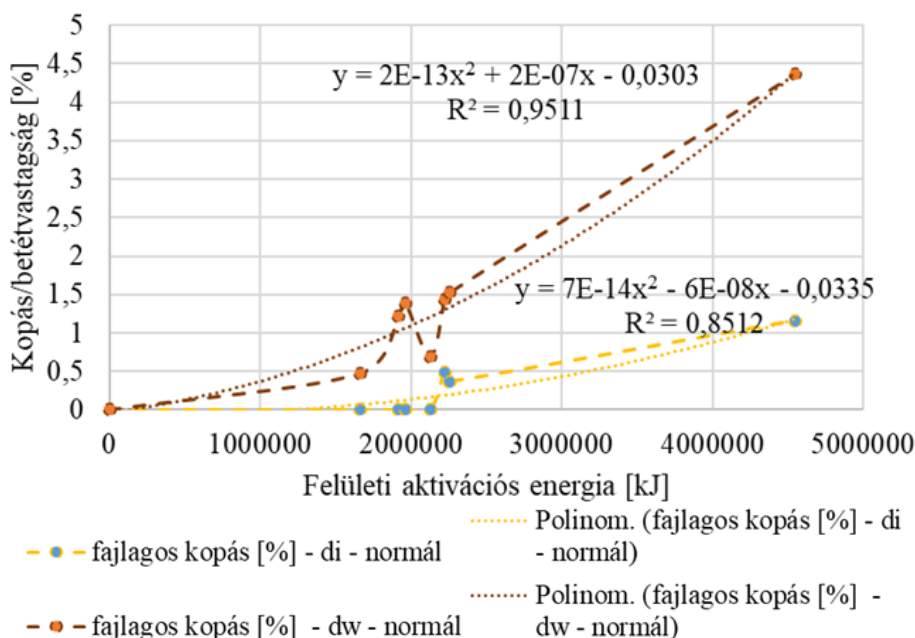
3.6. ábra: Hőmérsékleteloszlás a nyomólapon: jobb oldal: konstans CoF, bal oldal: p - v -függő CoF

3.5 Tribológiai jellemzők közti összefüggések keresése statisztikai úton

A kopásértékek elemzése – vastagságcsökkenés az eredeti vastagsághoz képest

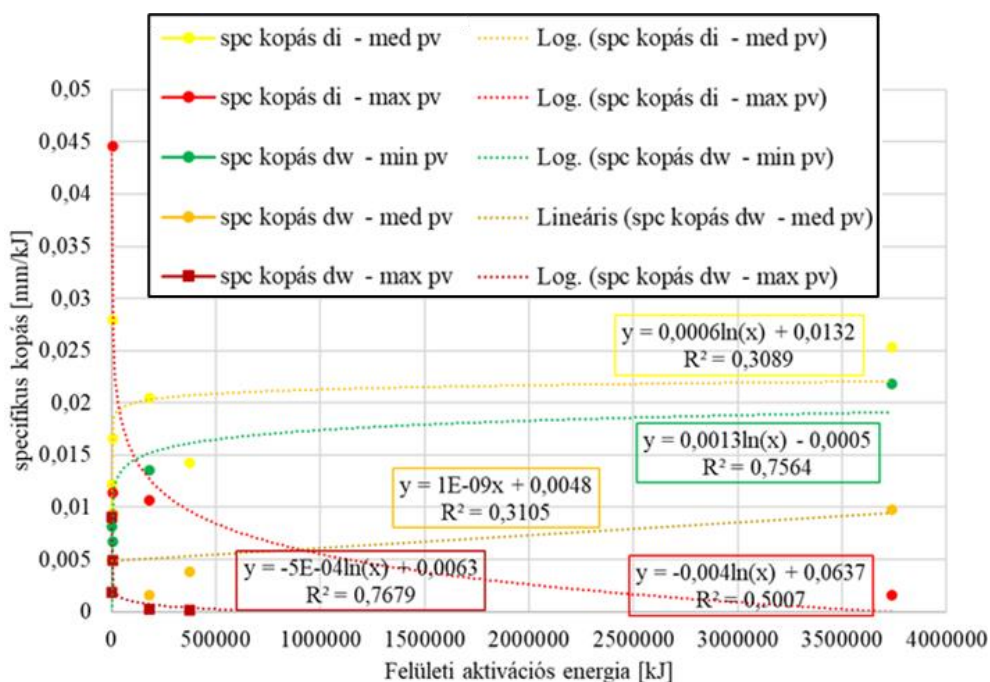


3.7. ábra: Betétvastagsághoz viszonyított %-os kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek

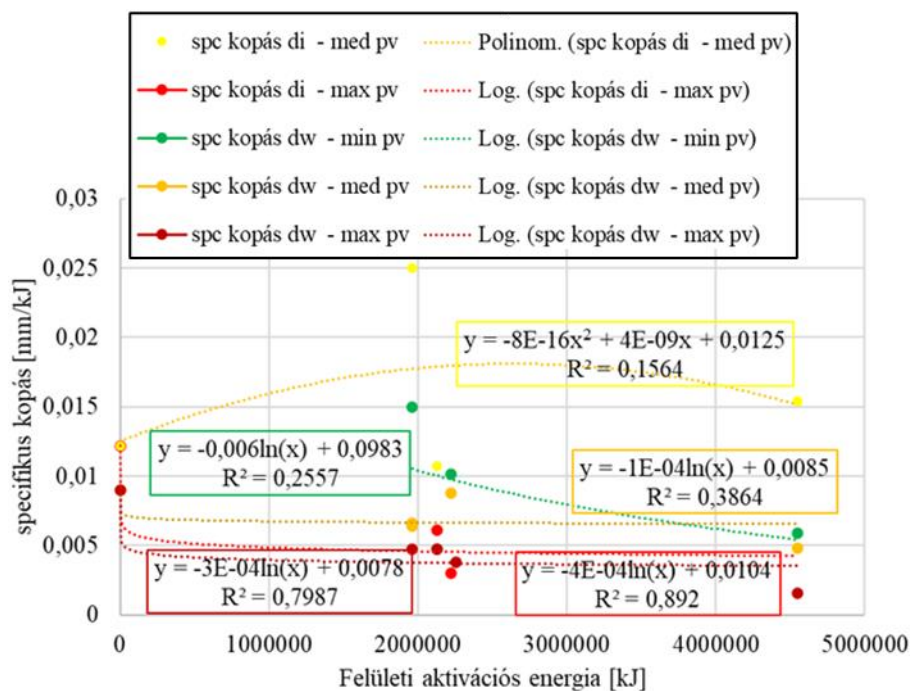


3.8. ábra: Betétvastagsághoz viszonyított %-os kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

Eredmények

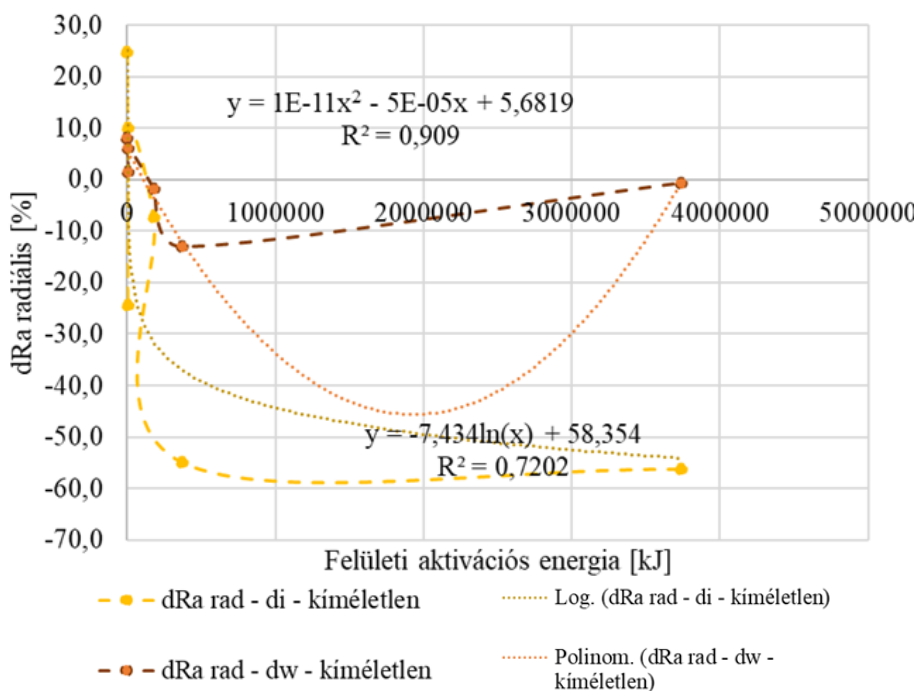


3.9. ábra: Fajlagos kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek

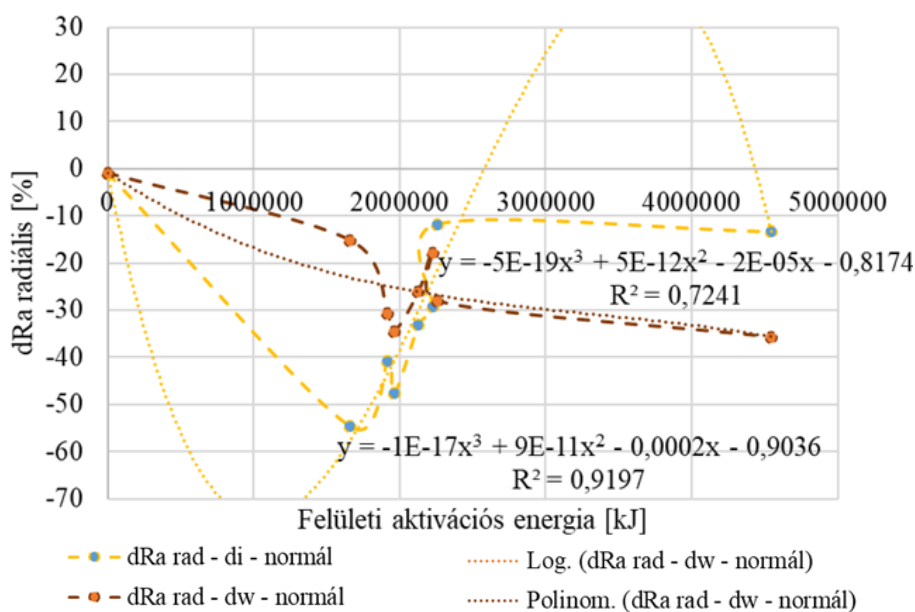


3.10. ábra: Fajlagos kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

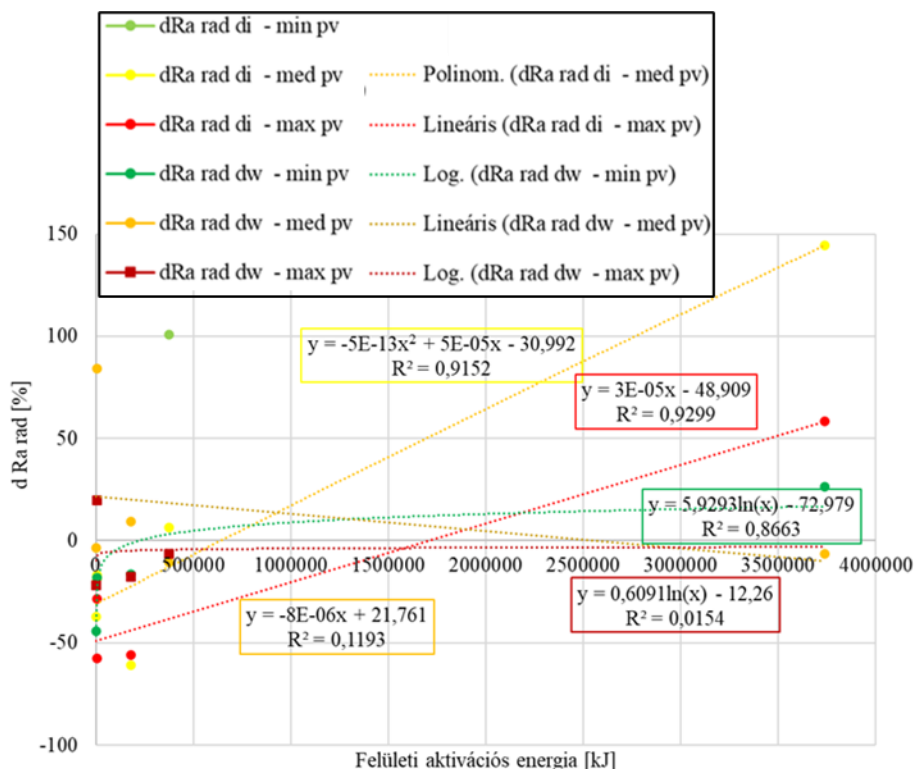
R_a felületi érdesség értékek elemzése radiális irányban



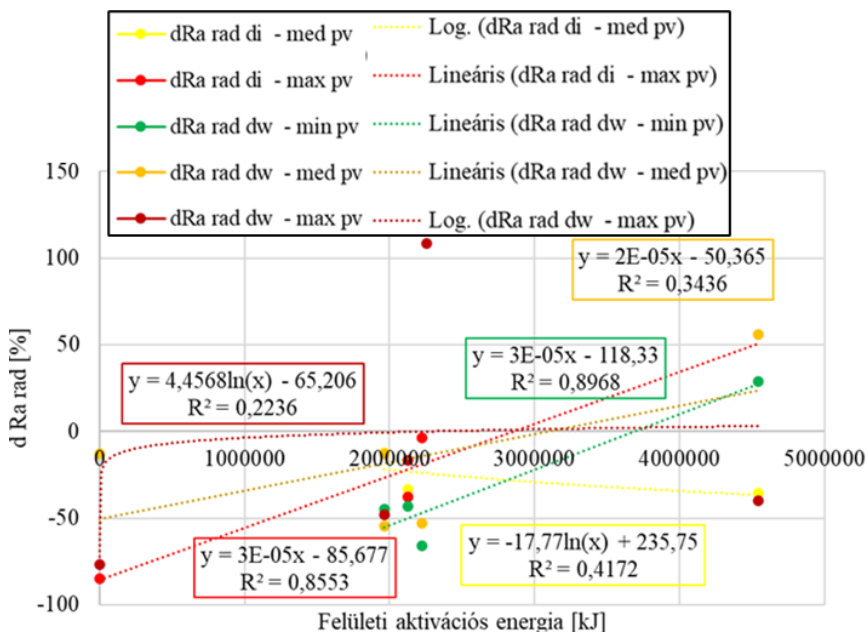
3.11. ábra: Radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek



3.12. ábra: Radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek



3.13. ábra: Pin-on-disc utáni radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek



3.14. ábra: Pin-on-disc utáni radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Anyagidentifikációs eljárás és numerikus modellek

Az elvégzett anyagvizsgálatok és matematikai elemzések alapján a szimulációs vizsgálataimhoz kifejlesztett numerikus modellekkel kapcsolatban a következő megállapításokat teszem:

- A laminátumokra használatos, komponens-csoportosítást és keverési szabályt alkalmazó anyagvizsgálati módszer alkalmazható az adott irányban orientált, tetszőleges kompozitok esetén is, így a koszorúfonással készült erősítőszálas struktúrájú, hibrid kompozit súrlódó tengelykapcsoló betétekre is. Az alkalmazás bővíthető más anyagösszetételekre.
- A repedési fordulatszámra, mint a tengelykapcsoló betétet jellemző mechanikai terhelésre vonatkozó analitikus és végeselemes számításaim alapján igazoltam, hogy a száraz súrlódású, szőtt szálerősítésű, hibrid kompozit tengelykapcsoló betétek a komponensek szeparációs elvén alapuló keverési szabállyal létrehozott, ortotróp anyagmodellel modellezhetők.
- A szimulációs és a valós mérési adatokból számított p_v -szintekkel történő validálást követően kijelentem, hogy a száraz súrlódású, szőtt szálerősítésű, hibrid kompozit tengelykapcsoló betétek összetett tribo-termomechanikai érintkezése az általam alkalmazott ortotróp anyagmodellel, kapcsolt termomechanikai szimulációval modellezhető. Az általam létrehozott modell figyelembe veszi a kopás, valamint a p_v -függő súrlódási tényező hatását és továbbfejleszhető automatikus és paraméterezett kopásszimulációs modellé.

2. Járműipari tesztek kategorizálása

A járműipari tesztekhez használt súrlódó betétek és a tű-tárcsa mérések eredményeiből bizonyítottam, hogy a tribológiai jellemzőkre, mint a kopásra, a súrlódási tényezőre és a felületi érdességre gyakorolt hatásuk alapján a száraz súrlódású, szőtt szálerősítésű, hibrid kompozit tengelykapcsoló betétek járműipari tesztjei két kategóriába sorolhatók: a normál használatúakra és kíméletlen használatúakra.

Ezt bizonyítják a tribológiai jellemzőknek a felületi aktivációs energiára (a (2.1.) egyenlet alapján a tesztre jellemző összes kapcsolással számolt hőterhelésre) normált, kategóriánként mégis különböző differencia-értékei. A tesztek ilyen szempontból való felülvizsgálata a tribológiai jellemzők tükrében egy-egy teszt kiválthatóságát mutatja.

3. Járműipari súrlódó elemek új élettartamjellemzője

A méréseimből és az általam kidolgozott modellekkel végzett numerikus szimulációk eredményeiből megállapítom, hogy a bevett autóiipari gyakorlattal szemben a száraz súrlódású, szőtt szálerősítésű, hibrid kompozit tengelykapcsoló betétek élettartam alatti tribológiai teljesítménye a km-ben kifejezett futásteljesítmény helyett a felületi aktivációs energia függvényében jellemezhető.

4. Súrlódó betétek tribológiai teljesítményének érzékenysége járműipari tesztek jellemző paramétereire

Állandósult súrlódási állapotban, a tengelykapcsoló kapcsolási szakaszára jellemző 3 különböző *pv*-szinten végzett tű-tárcsa vizsgálataim állandósult állapotbeli súrlódási tényező eredményeiből (3.3. ábra és 3.4. ábra) megállapítom:

- hogy az élettartam során előzetesen alacsony felületi aktivációs energiával, de kíméletlen módon terhelt betétek súrlódási tényezőjének *pv*-érzékenysége magasabb, mint a nagyobb energiával, de normál módon használt betéteké,
- normál módon, de különböző előzetes aktivációs energiával használt betétek egyenletesebb teljesítményt mutatnak a *pv*-szintek függvényében,
- az előzetesen kíméletlen módú energiaterhelésnek kitett betéteknél a súrlódási tényező csökkenése minimumról maximum tű-tárcsa *pv*-terhelésre váltva az 50%-ot is elérheti.

5. Tribológiai jellemzők összefüggései a járműipari tesztek után

A járműipari tesztek követően, a tesztekre jellemző összes kapcsolódás után kiértékelt kopás- és felületi érdesség vizsgálati eredményeinek statisztikai elemzéséből (3.7-8. és 3.11-12. ábrák) bizonyítottam, hogy

- a normál használatú betétek másodfokú függvény szerint növekvő fajlagos kopást mutatnak az aktivációs energia függvényében, míg a kíméletlen használatú betétek értékeire logaritmikus trendvonal illeszthető, mutatva, hogy már kis mértékű aktivációs energiaszinteknél is jelentős kopás lép fel.
- A fajlagos kopás mértéke a súrlódó betét sugarának függvényében is eltérő, mindkét módú használat esetén a súrlódási átmérőn mért relatív kopásértékek a nagyobbak
- A radiális irányban mért felületi érdességváltozás szempontjából a normál használatú betétek harmadfokú függvény szerint változó érdességkülönbséget mutatnak, míg a kíméletlen használatú betétek átmérőtől függően másodfokú vagy logaritmikus trendet követnek.

6. Tribológiai jellemzők összefüggései a tű-tárcsa tesztek után

A járműipari tesztvizsgálatok során elkopott betétekből kivágott minták állandósult súrlódási állapotban, a tengelykapcsoló kapcsolási szakaszára jellemző 3 különböző p_v -szinten végzett tű-tárcsa tribológiai modellvizsgálati eredményeinek statisztikai elemzéséből (3.9-10. és 3.13-14. ábrák) bizonyítottam, hogy

- a kíméletlen és normál használatú betétek fajlagos kopására jelentősen különböző trendgörbével, 3 eltérő függvénycsoporttal leírható értékek adódtak, ami mutatja, hogy a kopásintenzitás változik a kapcsolat során, azaz a p_v értékének függvényében és a mintavételi, azaz súrlódási átmérő függvényében is,
- a radiális irányban mért felületi érdességváltozás szempontjából a két különböző használati módú betétcsoport mintáinak értékei 3 eltérő függvénycsoporttal írhatók le, ami szintén a súrlódási sugártól és p_v -től, mint szignifikáns paraméterektől való függést mutatja.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom kezdeti szakaszában több a témámhoz kapcsolódó részterületre vonatkozóan végeztem irodalomkutatást a szálerősítésű hibrid kompozitokkal, azaz a leggyakrabban használt száraz súrlódású járműipari súrlódóanyagokkal kapcsolatban. Áttekintést adtam a tengelykapcsoló szerkezetek és súrlódó anyagok párhuzamos fejlődéstörténetéről. A tengelykapcsolókra jellemző összetett tribo-termomechanikai érintkezés fényében rávilágítottam a mechanikai, hőtani és tribológiai irodalom jelenlegi állására és hiányosságaira.

Vizsgálataim középpontjában egy olyan száraz súrlódó tengelykapcsolóbetét anyag állt, melynek a hosszúszal-erősítését üvegszal, aromás poliamid, réz és poliakril-nitril szálak fonata képezi. Az identifikálás és az anyagra jellemző tönkremeneteleket figyelembe vevő próbatest kialakítási módszerek vizsgálata során felmerülő kihívásokkal is szembenézve sikerült kialakítanom egy anyagvizsgálati módszertant, mely hatékony referenciát és újszerű útmutatást biztosít a hasonló összetett anyagok vizsgálataihoz. Ezek után megalkottam a vizsgált kompozit mechanikai anyagmodelljét és meghatároztam a hőtani jellemzőit.

A kapott eredményeket bemeneti paraméterekként használtam egy általam fejlesztett végeselemes termomechanikai szimulációs kontakt modellhez, mely p -függő súrlódási tényezővel képes volt feltárni a nyomatékátviteli szerkezetek elemiben rejlő potenciális költségcsökkentési lehetőségeket.

A tengelykapcsolóbetétek kopási és felületi jellemzőit újszerű módon tártam fel: különböző, valós autóiipari tesztek után, mintegy az élettartamuk alatt egy-egy elhasználtsági szintnek megfelelő pontban vizsgálva. Ezt követően a betétekből kivágott mintákon „*pin-on-disc*” vizsgálatokat végeztem.

A növekvő felületi aktivációsenergia-skála mentén a kopási értékek két különböző tendencia szerint növekedtek, az autóiipari tesztek így két fő csoportba soroltam, nevezetesen a "kíméletlen" és a "normál használat" csoportba. A kopási eredmények rávilágítottak a futásteljesítmény és a vizsgálati körülmények hatására is. A *pin-on-disc* vizsgálatok során a súrlódási együttható értékeit, a kopást és a felületi érdesség különbségeit három p v (felületi nyomás és sebesség szorzata) terhelés mellett tártam fel szintén "kíméletlen" és normál használatú csoportokra osztva a mintákat.

Végül jellemeztem a tribológiai viselkedést a felületi érdesség változásának viszonyai, a fajlagos kopási értékek és a súrlódási tényezők, illetve az ezek közötti összefüggések és egyéb paraméterektől való függésük tükrében. Az eredményeket elemezve a felületi aktivációs energia, a futásteljesítmény és a vezetőprofil hatása mellett a betétméret és a súrlódási átmérő hatása is feltárult.

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk idegen nyelven

1. **Biczó, R.**; Kalácska, G.; Mankovits, T. (2020): Micromechanical Model and Thermal Properties of Dry-Friction Hybrid Polymer Composite Clutch Facings. *Materials* (2020), 13, 4508. <https://doi.org/10.3390/ma13204508>
2. **Biczó, R.**; Kalácska, G. (2021): Novel sample creation methods and mechanical modeling of dry friction fibre reinforced hybrid composite clutch facings, *Scientific Bulletin Series C: Fascile Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing 2021*: 35 pp. 13-16., 4 p.
3. **Biczó, R.**; Kalácska, G.; Mankovits, T. Effects of Automotive Test Parameters on Dry Friction Fiber-Reinforced Clutch Facing Surface Microgeometry and Wear. *Polymers* 2021, 13, 3896. <https://doi.org/10.3390/polym13223896>
4. **Biczó, R.**; Kalácska, G. Effects of Automotive Test Parameters on Dry Friction Fiber-Reinforced Clutch Facing Surface Microgeometry and Wear—Part 2. *Polymers* 2022, 14, 1757. <https://doi.org/10.3390/polym14091757>

Lektorált cikk magyar nyelven

5. **Biczó R.**, Kalácska G. (2018): Szálerősített hibrid kompozit súrlódó tengelykapcsolóbetétek fejlődése, *Műanyagipari Szemle* (2018/5), pp 89-95., HU ISSN 1785-7856
6. **Biczó R.**, Kalácska G. (2020): Szálerősített hibrid kompozit száraz súrlódó tengelykapcsolóbetétek felületi jellemzői és élettartam alatti terhelésintenzitása, *Műanyagipari szemle* (2020/1), pp 68-74. <https://quattroplast.hu/muanyagipariszemle/2020/01/szalerositett-hibrid-kompozit-szaraz-surlodo-tengelykapcsolobetetek-feluleti-jellemzoi-es-elettartam-alatti-14.pdf>
7. **Biczó R.**, Kalácska G. (2021): Mezőgazdasági nehézgépjárművek száraz súrlódó tengelykapcsolóbetéjének mechanikai és termikus tulajdonságai, *Mezőgazdasági technika*, 2021 – augusztus, <http://technika.gmgi.hu/mezogazdasagi-technika/archivum/2021-augusztus>