



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

SZÁRAZ SÚRLÓDÁSÚ, HIBRID-KOMPOZIT
TENGE LYKAPCSOLÓ BETÉTEK TRIBOLÓGIÁJA

Doktori (PhD) értekezés

Biczó Roland

Gödöllő
2022

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Műszaki Tudományok

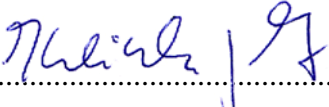
vezetője:

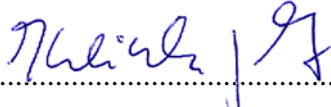
Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem,
Műszaki Intézet

témavezető:

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

társ-témavezető:


.....
Az iskolavezető jóváhagyása


.....
A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

*'An expert knows more and more about less and less until he or she knows everything about
nothing'*

/Nicholas Murray Butler nyomán/

„A szakértő egyre többet tud egyre kevesebb dologról, mígnem egyszer csak már mindent tud a
semmiről”

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	6
1 BEVEZETÉS	8
1.1 A téma időszerűsége, jelentősége.....	8
1.2 Célkitűzések	9
2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	10
2.1 Történeti áttekintés	10
2.1.1 A tengelykapcsoló feladata	10
2.1.2 A jármű tengelykapcsoló története	11
2.1.3 A tengelykapcsolók mai szerkezete és működése.....	12
2.1.4 A tengelykapcsolók súrlódó anyagával szemben támasztott követelmények.....	13
2.2 Polimerek, szálerősítéses kompozitok, mint súrlódó betétanyagok napjainkban	14
2.2.1 Modern, szálerősítéses hibrid kompozit súrlódó tengelykapcsolóbetétek gyártási lépései	16
2.2.2 Minőségellenőrző vizsgálatok.....	18
2.3 Jármű tengelykapcsoló súrlódó betétek kutatási területei	19
2.3.1 Mechanikai vizsgálatok.....	20
2.3.2 Termikus vizsgálatok	21
2.3.3 Tribológiai vizsgálatok	24
2.4 A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	29
3 ANYAG ÉS MÓDSZER	33
3.1 Mechanikai és hőtani modellalkotás	34
3.1.1 Próbatestek kialakítása, a megmunkálás hatásai.....	34
3.1.2 Mechanikai tulajdonságok meghatározása.....	36
3.1.3 Mátrix és erősítőszálak szeparált mechanikai vizsgálata	37
3.1.4 Anyagösszetétel-vizsgálat a kompozit mátrixára.....	40
3.1.5 Hőtani tulajdonságok meghatározása.....	41
3.2 Tribológiai modellezés	42
3.2.1 Tesztpadi és valós beépítési környezetben törtéti vizsgálatok.....	43
3.2.2 Laboratóriumi tű-tárcsa vizsgálatok.....	48
3.3 Az eredmények felhasználása a súrlódó tengelykapcsoló kontaktmodelljében.....	50
3.4 A modellezéshez használt szoftver és modellezési elvek ismertetése	51
3.4.1 Szoftverkörnyezet	51
3.4.2 Tranziens folyamatok modellezése	52
3.5 Kiértékelési módszerek	52

4	EREDMÉNYEK	53
4.1	Mechanikai tulajdonságok, a súrlódó kompozit betét merevségi mátrixa.....	53
4.1.1	A mátrixkomponens-csoport tulajdonságai.....	53
4.1.2	A hosszúszálerősítés-csoport tulajdonságai	55
4.1.3	A mechanikai anyagmodell létrehozása: a keverési szabály alkalmazása a szeparált anyagtulajdonságokra.....	56
4.2	Hőtani jellemzők.....	58
4.2.1	A hőtágulási tényező	58
4.2.2	Fajlagos hőkapacitás	60
4.2.3	Hővezetési tényező.....	60
4.3	Tribológiai vizsgálatok eredményei	61
4.3.1	Autóipari jármű és próbapadi tesztek eredményei	61
4.3.2	Tű-tárcsa vizsgálatok eredményei.....	78
4.4	Modellezés.....	89
4.4.1	Mechanikai terhelési modell – 3D	89
4.4.2	Tribo-thermomechanikai modellezés – 2D	90
4.5	Tribológiai jellemzők közti összefüggések keresése statisztikai úton.....	93
4.5.1	Kopásértékek elemzése	94
4.5.2	R_a felületi érdesség értékek elemzése radiális irányban.....	95
4.5.3	Állandósult állapotbeli súrlódási tényezők elemzése.....	97
4.5.4	A tribológiai jellemzők tapasztalt trendjeinek összefoglalása	98
4.6	Új tudományos eredmények	100
5	ÖSSZEFOGLALÁS.....	102
6	SUMMARY	103
7	MELLÉKLETEK	104

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

t_p	előformázási idő	[s]
μ	COF, súrlódási, együttható	[-]
p_v	felületi nyomás szorozva a sebességgel	[MPa·m/s]
E	rugalmassági modulus	[GPa]
σ_B	szakítószilárdság	[MPa]
E_M	a mátrix csoport rugalmassági modulusa	[GPa]
V_m	a mátrix csoport térfogata	[mm ³]
E_f	a szálerősítés csoport rugalmassági modulusa	[GPa]
V_f	a szálerősítés csoport térfogata	[mm ³]
E_{11}^*	terheléssel egyirányú fiktív rugalmassági modulus	[GPa]
E_{22}^*	terhelés irányára merőleges fiktív rugalmassági modulus	[GPa]
E	effektív rugalmassági modulus	[GPa]
G	effektív csúsztató rugalmassági modulus	[GPa]
ν	effektív Poisson-tényező	[-]
$vhk1$	extrúziót követő térhálósítással készült próbatestcsoport	
$gr2$	extrúziót nélkülöző eljárással készült próbatestcsoport	
t	a tengelykapcsolópedál felengedésének időpontja	[s]
T_c	átvitt tengelykapcsoló nyomaték	[Nm]
ω_r	forgási sebességkülönbség	[1/s]
z	a súrlódó felületek száma	[-]
R_m	súrlódási sugár	[mm]
F_m	szorítóerő	[N]
W	a tengelykapcsoló hőterhelése	[kJ]
r_{dyn}	dinamikus gördülési sugár	[mm]
$i_{1stgear}$	első sebességfokozati áttétel	[-]
i_{diff}	differentiáláttétel	[-]
n_{eng}	motorfordulatszám	[1/perc]
T_{engmax}	maximális motornyomaték	[Nm]
χ	motortípusfüggő nyomatéktényező	
T_{drag}	tapadási nyomatékveszteség	
S	legkisebb betét-méretkategória	
M	közepes betét-méretkategória	
L	nagyméretű betét-méretkategória	
d_i	belső átmérő	[mm]
d_w	súrlódási átmérő	[mm]
σ^2	számított szórásnégyzet	
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]
dv	sebességkülönbség	[m/s]
s_j	a j. adat eltérése a várható értéktől	
N	megfigyelés/mintavételezési szám	
S_k^2	szórásnégyzet	
C'_i	az i. lemez merevségi mátrixa	

Alkalmazott jelölések – folytatás

h_i	az i. lemez vastagsága	[mm]
n	lemezek száma	[-]
CTE	hőtágulási tényező	[1/K]
λ	hővezetési tényező	[W/(mK)]
ΣE	összes felületi aktivációs energia	[kJ]
R_a	szabvány szerinti aritmetikus átlagos érdesség	[μm]
R_z	a tízpontos átlagos érdesség	[μm]
R_{max}	maximális magasság érdességmérésnél	[μm]
dR	fajlagos felületiérdesség-változás	[μm]
$\sigma_{\varphi}(z)$	repedési fordulatszám hatására ébredő érintő irányú feszültség	[MPa]
R_A	betét külső sugara	[mm]
R_I	betét belső sugara	[mm]
ρ	sűrűség	[kg/m ³]
ν	Poisson-tényező	[-]
ω	szögsebesség	[1/s]
R^2	determinációs együttható	

Rövidítések

PAN	Poliakril-nitril
aramid	Aromás poliamid
PVA	Poli-vinil alkohol
TGA	Termogravimetrikus analízis
TEI	Termoelasztikus instabilitás
TEPI	Termo-elasztikus instabilitás
COF	Súrlódási tényező (coefficient of friction)
AFFRLS	Rekurzív legkisebb négyzetek módszere (forgetting factor approach)
ABS	Akrilnitril-butadién-sztirol
UHMWPE	Magas molekulatömegű polietilén (Ultra-High-Molecular Weight Polyethylene)
HOPE	Erős orientált polietilén (Highly Oriented Polyethylene)
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp (scanning electron microscopy)
SCF	rövid szénszálak
IR	infarvörös
T	próbad
H	autópálya
V	jármű
C	város
VT	jármű + pótkocsi
R	tesztpálya
RS	tesztpálya + lejtőn felfelé indítás
TH	vizsgálat autópálya körülményeket szimuláló próbadon
VC	járműteszt városban
VTC	jármű + pótkocsi teszt városban
VR	járműteszt a tesztpályán
VRS	járműteszt tesztpályán, lejtőn felfelé indítással
VTRS	jármű pótkocsival és pótkocsival tesztelés tesztpályán, lejtőn felfelé indítással
PoD	tű-tárcsa vizsgálat (pin-on-disc)

1 BEVEZETÉS

Doktori disszertációmban egyrészt új módszertant kidolgozva határozom meg egy modern, egytárcsás, szárazon súrlódó jármű tengelykapcsoló hibrid kompozit súrlódóbetétjének mechanikai tulajdonságait és termikus jellemzőit, másrészt járműipari teszteknek alávetve ugyanezt az anyagot vizsgálok élettartamára vetített, azaz különböző felületi aktivációs energiaértékekhez tartozó tribológiai jellemzőit tekintve. A kapott eredményekből levont következtetések és összefüggések a jármű tengelykapcsolók összetett kontaktmodelljének fejlesztését segítik elő a modellezési pontosság növelésével csökkentve a szükséges roncsolásos tesztek számát a fejlesztés során.

1.1 A téma időszerűsége, jelentősége

A járműipar egyik fontos, súrlódás jelenségére épülő szegmense a tengelykapcsolók, tengelykapcsolószerkezetek világa, melyeknek feladata a forgó mozgást és a nyomatékot a motortól a hajtómű felé továbbítani. A tengelykapcsoló funkciója az oldható kapcsolat mellett ennek a nyomatéknak a felépítése adott – céljárműtől függően – lágy, illetve merev rugózási karakterisztika alapján.

A súrlódás keltette hő, a pillanatnyi mechanikai igénybevételek, valamint a hosszú távú, élettartamra vonatkozó kihívások speciális összetételű anyagok alkalmazására készítetik e terület technológusait és fejlesztőmérnökeit. A fejlesztések eredményeként a tengelykapcsolószerkezetek súrlódó anyagai alatt olyan társított anyagrendszereket kell érteni, melyekben fém, kerámia, polimer struktúrák és szerves összetevők egyaránt szerepelnek. A szálerősítéses hibrid kompozitok a leggyakrabban használt száraz súrlódó anyagok az autópárhuzban. A súrlódás, mint tribológiai alapjelenség a tengelykapcsoló súrlódásában részt vevő anyagoknál szerkezeti és felületi változásokat is képes előidézni. Az egyes kompozit összetevők közti feszültség-, deformációviszonyok és hőtranszport folyamatok megértése képezi a tengelykapcsolók, azon belül is a tengelykapcsolótárcsák súrlódó anyagai fejlesztésének egyik alappillért.

Az évek során egyre magasabbá váltak a tengelykapcsolótárcsák súrlódó betétjével szemben támasztott teljesítménybeli követelmények. Az elvárások a súrlódási tényezőt, a kopási tulajdonságokat, az anyagok mechanikai jellemzőit, a tőrések által a geometriai korlátokat és a termikus terhelés alatti viselkedést is érintik.

Utóbbiak mellett a súrlódó betétek ma már nemcsak az élettartam és teljesítmény, de környezetkárosítás és egyre inkább biológiai lebonthatóság szempontjából is megfelelőek kell, hogy legyenek. A különböző anyagi minőségeknek az életciklus (gyártás, tárolás, terhelés) alatti eltérő viselkedése azonban számos új problémát tár fel a fejlesztések során.

A fejlesztések elengedhetetlen eszköze a modellezés, mely segítségével gyorsabb képet kaphatunk akár az anyag várható viselkedéséről különböző terhelések esetén, mint ha pusztán tesztek (gyakran roncsolásos vizsgálatok) eredményeire hagyatkoznánk. A működést jól leíró modellek paraméterezése azonban átfogó vizsgálatokat igényel, különösen a jármű tengelykapcsolók esetén, ahol a súrlódásos kontaktban részt vevő kompozit betétnek a mechanikai, termikus és tribológiai szempontok együttese határozza meg a viselkedését. Egy új anyag, vagy összetevő esetén a szükséges tesztek költségei csökkenthetők előzetes, modell szintű vizsgálatokkal.

1.2 Célkitűzések

A munkám során egy száraz súrlódású, hibrid kompozit tengelykapcsoló betét élettartam alatti tribológiai viselkedésének elemzését végzem. A vizsgálatok középpontjában egy olyan száraz súrlódó tengelykapcsolóbetét kompozit anyag áll, melynek a hosszúszal-erősítését üvegszál, aromás poliamid, réz és poliakril-nitril (PAN) szálak fonata képezi. Az adott anyag mátrix-összetevői közti ipari titoknak minősülő komponensek miatt a vizsgálatokat megelőzte az anyagidentifikáció is. A mechanikai, hőtani és tribológiai jellemzők a tengelykapcsolók fejlesztése során alkalmazott összetett, súrlódási kontakt modell bemenő paramétereiként szolgálnak. A vizsgálatokat a következő célokat megfogalmazva végeztem:

- adott rendeltetésű kompozit próbatestek létrehozási lehetőségeinek vizsgálata és a legjobb módszer kiválasztása a kompozitok ismert tönkremeneteleinek figyelembevételével,
- mechanikai anyagmodell megalkotása a tribo-termo-mechanikai érintkezés modellezéséhez,
- hőtani jellemzők meghatározása a tribo-termo-mechanikai érintkezés modellezéséhez,
- a termo-mechanikai modellalkotás vizsgálati lépéseinek módszertani összefoglalása hasonlóan összetett szálerősített hibrid kompozit elemzéséhez,
- tribológiai viselkedés feltérképezése újszerű módon: a teljes élettartamára vonatkozóan az ún. felületi aktivációs energia függvényében valós autóiipari tesztek után,
- tribológiai viselkedés feltérképezése laboratóriumi tű-tárcsa tesztnek alávetve a járműipari teszteknek alávetett súrlódó betétből kivágott próbatesteket,
- tribológiai viselkedés jellemzése a felületi érdesség változásának viszonyai, a fajlagos kopási értékek és a súrlódási tényezők, illetve az ezek közötti összefüggések és egyéb paramétereiktől való függésük tükrében,
- különböző tendenciák megfigyelése a kopási értékekben a növekvő felületi aktivációsenergia-skála mentén, az autóiipari tesztek e szerinti csoportosítása pl.: „kíméletlen használatú”, „normál használatú” csoportok,
- különböző tendenciák megfigyelése a felületi érdesség változásának értékeiben a növekvő felületi aktivációsenergia-skála mentén,
- tribológiai teljesítmény befolyásolása szempontjából fontos paraméterek megállapítása (pl. futásteljesítmény, kezdeti felületi érdesség és a vizsgálati körülmények (hűlési idő, próbapad-specifikus körülmények)),
- adott (pl. kopás) jellemzőnél tapasztalt tendenciától eltérő jellemzők (pl. felületi érdesség) eltérését okozó paraméterek megállapítása (pl.: betétméret, a súrlódási átmérő és mintavételezési irányok, valamint a vizsgálati körülmények hatásai),
- valós körülmények közti viselkedés összehasonlítása laboratóriumi (tű-tárcsa) tribológiai teljesítménnyel feltételezve, hogy a laboratóriumi körülmények közt ún. tű próbatesteken végzett vizsgálatok eredményei ugyanazt a kettős viselkedést mutatják, amit az autóiipari teljes betétes tesztek, valamint a súrlódási tényező kapcsán a „normál használatú” betétekből kivágott próbatestek eredményei esnek a még elfogadható tartományba,
- a teljesítményt befolyásoló fő paraméterek végleges megállapítása (pl.: a felületi aktivációs energia, a futásteljesítmény, a felületi érdesség és a vezetőprofil hatása, a betétméret és a súrlódási átmérő hatása).

Mindez a száraz súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolóbetétek kapcsolt termomechanikai modelljének fejlesztését szolgálja.

2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintésben a jármű tengelykapcsolók kompozit súrlódó betétjeit vizsgálom a működtetési körülményeiknek megfelelően mechanikai, hőtani és tribológiai szempontból. Ismertetem a tengelykapcsolók múlt századbeli fejlődését a máig egyre növekvő elvárások közepette, illetve bemutatom a fejlődési út mai legkorszerűbb állomásán a gyártási lépéseket és komponenseket, amik a szárazon súrlódó, egytárcsás jármű tengelykapcsolók tengelykapcsolótárcsái súrlódó betétjeihez szükségesek.

A rendelkezésre álló irodalmi források alapján bemutatom a tengelykapcsoló súrlódó betétek üzemével kapcsolatos tudományos eredményeket és modellezési eljárásokat. Külön elemzem a mechanikai, hőtani és tribológiai vizsgálatokat. Részletesen elemzem a témában eddig elért tudományos eredményeket a száraz üzemű szálerősített kompozit súrlódó betétekkel kapcsolatban a modellezési eredményekkel együtt. Ismertetem az általam használt kísérleti eljárásokat és berendezéseiket, illetve azok kapcsolódását az általam választott modellezési eljáráshoz. A megismert kutatási eredményeket összefoglalom, értékelem, összehasonlítom és rámutatok azon területekre, melyeket még nem teljeskörűen vagy nem egyértelműen tártak fel.

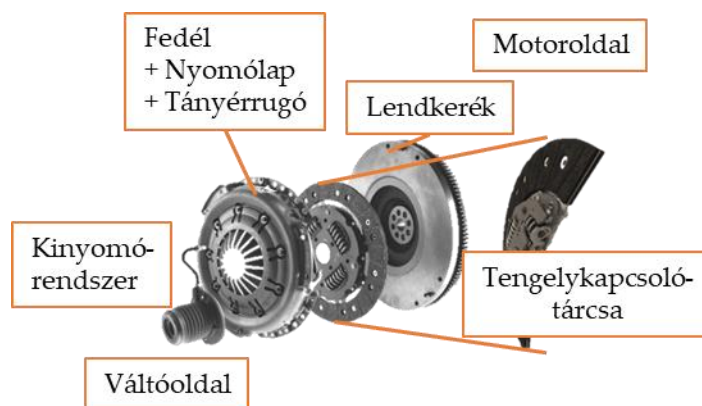
2.1 Történeti áttekintés

2.1.1 A tengelykapcsoló feladata

A járművekben a forgó mozgást és a nyomatékot, a kinetikus energiát a motortól, mint erőforrástól a hajtómű felé modulált nyomaték formájában egy tengelykapcsolószerkezet viszi át. (Jacko et. al., 2000)

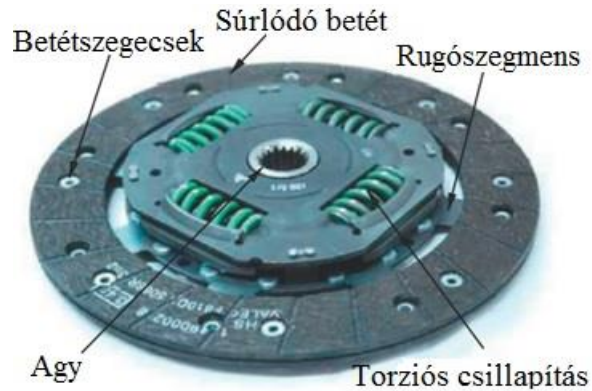
A tengelykapcsoló feladata az oldható kapcsolat mellett ennek a modulált nyomatéknak a felépítése adott – céljárműtől függően – lágy, illetve merev karakterisztika alapján. Működés közbeni csúszás esetén hő keletkezik, melyet elnyel, majd le is ad egyből a tengelykapcsoló a környezetébe. A súrlódó betétek alkalmazása jellemzően száraz vagy nedves. Nedves alkalmazások esetén a folyadék feladata a hő elvezetése is. (Jacko et. al., 2000)

A mai modern tengelykapcsolók egyik típusa a száraz súrlódó tengelykapcsoló, mely egymással kontaktba lépő adott terheléssel összenyomott forgó felületek közt a terhelés hatására ébredő súrlódási erővel viszi át a nyomatékot. Az ilyen szerkezetek – ld. 2.1. ábra – három fő részre tagolódnak a súrlódásban és annak keltésében részt vevő elemek szerint: lendítőkerék, a kompozit súrlódó felülettel ellátott súrlódó tengelykapcsolótárcsa, és tengelykapcsolószerkezet (a nyomólap, a tányérrugó és a fedél együttese). A szálerősítéses hibrid kompozitok - az ilyen alkalmazásokban súrlódó felületként leggyakrabban használt anyagok - egy évszázadnyi anyagfejlesztési folyamat eredményei (Biczó et. al., 2020).



2.1. ábra: A hajtáslánc részei a motortól indulva (Biczó et. al., 2020 alapján)

A tengelykapcsolótárcsa két fő feladata a motortól érkező rezgések csillapítása a hajtásrendszerben és az átviendő nyomaték modulálása kívánt rugó-karakterisztika alapján. Így két fő része a torziós csillapítás eleminek együttese, valamint a betétrugózás alkatrészeinek összeállítása, ahogy a 2.2. ábra mutatja. A moduláció lágysága befolyásolható a tárcsában lévő rugószegmensek, valamint a súrlódó betét által.



2.2. ábra: Konvencionális súrlódó tengelykapcsolótárcsa részei (Sfarni et.al., 2011)

2.1.2 A jármű tengelykapcsoló története

Az autóipar ezen területén a múlt században végbement figyelemre méltó szerkezeti konstrukcióra és anyagokra vonatkozó fejlesztéseket a gépjárművek tengelykapcsolórendszerének kompozit súrlódó anyagaina vonatkozó, folyton változó működési jellemzői támasztotta követelmények határozták meg.

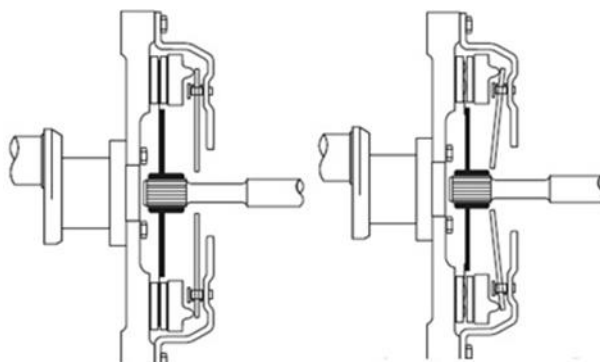
A fejlődés mérföldköveit az 1. táblázat foglalja össze, amelyek a mai modern hibrid polimer kompozit súrlódó anyagú tengelykapcsolókhoz vezetnek.

A múlt században a száraz súrlódó tengelykapcsoló súrlódó felülete anyagainak fejlődését elsősorban a tengelykapcsoló konstrukciója határozta meg. Az újabb tengelykapcsolótípusok (például szíjhajtású, kúpos és egytárcsás tengelykapcsolók) – amint azt az 1. táblázat mutatja – térnyerése következtében az anyagtechnológiában elért új eredmények a tengelykapcsoló szerkezetek geometriai korlátok közé szorított fejlesztését az optimális kialakítás felé vezették. A század második felében a különböző ipari területek hasonlóan terhelt súrlódási alkalmazásaihoz képest a fejlesztési irányokat a tudományos és ipari tribológia közös felfedezései vezették. Az anyagfejlesztést például nagymértékben befolyásolták az azbeszt kiváltására irányuló erőfeszítések. Eközben a rugalmas gyanták felfedezése révén a szálerősítésű anyagok széles körben elterjedtek (Biczó et. al., 2016a). A párhuzamos konstrukció- és anyagfejlesztés továbbá lehetővé tette a kenés javítását, a súrlódó anyagok újonnan felfedezett összetevőinek és bizonyos hatékony megmunkálási módszereknek a felhasználásával (Biczó et. al., 2016b). Amint az 1. táblázat mutatja, e két fejlesztési út szinergiája és összeolvadása hozta létre a mai modern, kompakt tengelykapcsolókat, amelyek ellenállnak a legkülönbözőbb szélsőséges kihívásoknak.

1. táblázat: Tengelykapcsoló szerkezetek és súrlódó betétanyagok fejlődése

Évszám	1886	1889 - 1920'	1918 - 1920'	-1920'	1900 - 1918	1900 -	('04) 1920 -	
Évszám	Betétanyag	súrlódó tengelykapcsoló						
		szíjhajtás	kúpos	NAG kúpos (szerelhető)	Daimler Al-kúpos	Daimler/Mercedes tekeresrugós	Weston (többlemezes) olaj/száraz	egy-tárcsás
1886	lapos bőrszíj	x						
1889	teveszór szíj		x	x				
1889+	ricinusolajba áztatott bőrszíj		x					
1889++	rúgós csap/laprugó+ bőrszíj		x					
1918	fém súrlódó betét		x			x		
1918+	olajozott alumínium				x			
1900 -	olajozott bronz és acél						x	
1900 -	szegecselt betét						x	
1920 -	grafit kenésű fém							x
1920 -	ferodo aszteszt							x
1990 -	Azbesztmentes polimer kompozit							x

2.1.3 A tengelykapcsolók mai szerkezete és működése



2.3. ábra: A tengelykapcsolószerkezet zárt és nyitott állapotban (LuK symposia 1986 – 2006)

A száraz súrlódó tengelykapcsolók mai szerkezete tehát a De Dion & Bouton által megálmodott konstrukcióból származtatható. Habár manapság már bizonyos autóiipari követelmények olyan alkalmazásokat is szülnek, mint az ultraszónikus tengelykapcsoló vagy a piezoelektromos tengelykapcsoló (Sfarni et. al., 2011), netán a hibrid, elektromos motorral helyszükséglet csökkentése miatt szinte egybeépített tengelykapcsolók, jelen munkában az egytárcsás, száraz súrlódó tengelykapcsolók fejlesztési potenciáljára koncentráltam.

A működtetés lényegét a 2.3. ábra mutatja be. A tengelykapcsoló tehát a nyomólaphoz és a váltótengelyhez csatlakozik a tárcsa bal, illetve a jobb oldalán. Zárt állapotban a nyomórugó a nyomólapon keresztül a lendkeréken tartja az összenyomott súrlódó elemeket, így a nyomaték útja folytonos. A váltóval azonban nyomatékmoduláció valósítható meg, ez akkor következik be, amikor – vegyünk egy kézi váltós személyautót – váltunk, azaz működtetjük a tengelykapcsolópedált, másik fokozatba kapcsolunk, majd elengedjük a tengelykapcsolópedált. Maga a pedál működtetését *kuplungolásként* szokás emlegetni. Ekkor a kinyomó-rendszer benyomja (ld. 2.3. ábra jobb oldala) a nyomórugót, ami csuklós mechanizmus útján a nyomólapot axiálisan a váltó felé mozdítja el. Így megszűnik a szorítóerő, ami súrlódó felületekre hatott, a súrlódó betétek és a köztük lévő laprugók is kirugóznak, elemelkedik a tárcsa a nyomólaptól. Ekkor kerül a tengelykapcsoló nyitott állapotba. A pedál felengedésekor ellentétes folyamat zajlik le, ez a tengelykapcsoló zárását eredményezi.

2.1.4 A tengelykapcsolók súrlódó anyagával szemben támasztott követelmények

A modern száraz tengelykapcsolók tengelykapcsolótárcsáinak súrlódó betétjei anyaguk szerint három alaptípusba sorolhatók: szőtt, szálerősítéses súrlódó betétek; porkohászati eljárással készült, fém hordozólemezü betétek; kerámia súrlódó felületű betétek. Előbbiek főleg hagyományos alkalmazásokban gyakoriak, de számos hibrid üzemű rendszerben is jelen vannak, azonban létezik ezekhez is hordozóréteggel ellátott típus az igénybevételek kielégítésének megfelelően. Ez a hordozóréteg lehet fém, vagy szintén szövessel készült szálerősített polimer kompozit koszorú.

A száraz súrlódó tengelykapcsoló betétek igénybevételi állapota a súrlódó erő súrlódó felületen ébredő komponenseivel jellemezhető:

- adhézió
- rugalmas és képlékeny alakváltozás.

A súrlódás következményei és a fellépő jelenségek (Jacko et. al., 2000):

- tapadás – tapadásmegszakadás jelensége
- abrázió
- repedés,
- súrlódó film nyíródása
- érdesség-csúcsok kapcsolódása.

A száraz súrlódó tengelykapcsolók súrlódó betétjeinek követelményei a következőképpen foglalhatók össze:

- súrlódási tényező állandósága
- kopásállóság, kopási jelenségek csökkentése a nyomólapon és lendkeréken egyaránt
- 10000 1/perc feletti üzemi fordulatszám (repedési fordulatszám-állóság)
- 300°C feletti hőmérsékleten való hibamentes működés
- kis tömeg
- komfortos indulás
- környezetbarát anyagok alkalmazása

Mivel azonban a súrlódási rendszer egyik kontaktban részt vevő felületéről van szó, a betétek tulajdonságai és nyomatékvitelteli képessége is változik az élettartamuk során. A beszállítók gyakran a futásteljesítményt jelölik meg, mint szavatosságot. A száraz tengelykapcsoló betétek teljesítményét azonban több más egyéb tényező is befolyásolja. Ráadásul az ilyen összetett hibrid kompozitok több különböző komponensből állnak, így még az azonosításuk és jellemzésük is összetett feladat.

2.2 Polimerek, szálerősítéses kompozitok, mint súrlódó betétanyagok napjainkban

A polimerek alkalmazása ma már széleskörű, akár súrlódó elemekként is használatosak kiváló mechanikai és tribológiai tulajdonságaik miatt. A járműiparban használt súrlódó betétek egy része üveg- és szintetikus, illetve fémszál-erősítéses kompozit, az egyes komponensek szeparáltan, célzottan alkalmazva teljesítik a súrlódó elemekkel szemben támasztott követelményeket, így ezek fejlesztéséhez szükséges a felületek súrlódási viszonyainak vizsgálata.

A kompozit olyan többfázisú, összetett (szabad szemmel is megkülönböztethető (> 10-2 mm) összetevőkből felépülő) erősítőanyagból (általában szál~) és beágyazó mátrixanyagból álló anyagrendszer, melyben a nagy szilárdságú és (általában) nagy rugalmassági modulusú erősítőanyag és a szívós mátrix között kitűnő, jelentős deformáció és/vagy igénybevétel esetén is tartós adhéziós kapcsolat van. (Czvikovszky et. al., 2000)

A súrlódó hibrid kompozit betét összetevők funkciók szerint a következőképpen osztályozhatók (Jacko et. al., 2000):

- abrazív anyagok,
- súrlódási állapotot befolyásoló összetevők,
- töltő (*filler*) anyagok és erősítő anyagok,
- kötőanyagok.

Ezeket az összetevőket általában mechanikai szerepük és funkciójuk alapján megkülönböztetett csoportokba sorolják, de számos tanulmány bizonyította, hogy a célzott szempont mellett számos egyéb tulajdonságot befolyásolnak. Például még az erősítő szálak is hatékonyan módosíthatják a tribológiai súrlódási és kopási tulajdonságokat (Zhang et. al., 2014), ugyanúgy, ahogy a kötőanyagok is hatékony súrlódás-módosítók (Wongpayakytin et. al., 2021) és sok töltőanyag is e célból kerül a mátrixba (Bijwe et. al., 2008) (Gopal et.al., 1996) (Kumar és Bijwe, 2010a) (Kumar és Bijwe, 2010b) (Kumar és Bijwe, 2011). Sőt, az üvegszálak kompozitok szálorientációjáról megállapították, hogy hatással van a súrlódási és száraz kopási viselkedésre (Alotaibi et. al., 2021). A súrlódási és kopási jelenségeket befolyásolja a komponensek formája, eloszlása és részecskemérete. (Bijwe, 1997) A jellemzést gyakran további kihívások nehezítik, például egyes mátrix összetevők ipari titok mivolta.

Az abrazív komponensek feladata (Bijwe, 1997) a kapcsolódó felületek tisztaságának fenntartása, súrlódási film kialakítása. Gyakran használt anyagok:

- alumínium-oxid,
- vas-oxidok,
- kvartz,
- kovásvav ($(\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x})_n$),
- cirkónium szilikát (ZrSiO_4).

A súrlódási állapot létrehozásáért és módosításáért felelős anyagok létrehozzák a kenési állapotot, növelik súrlódás mértékét, reakcióba lépnek a környezeti levegőben található oxigénnel a súrlódó felületek közti film alakításához (Bijwe, 1997). Ilyen anyagok jellemzően:

- fémek, fémoxidok, fémszulfidok, fél- vagy átmenetifém-szulfidok: sárgaréz, vörösréz, ólom-oxid, alumínium, szilícium és vas vagy titánium-oxid, antimon-triszulfid (Sb_2S_3), molibdén-diszulfid,
- szerves anyagok: szén; petrolkocsz (finoman porított szén),
- ásványi fillerek.

A fillerek és az erősítő szálak felelnek az átlag összetétel fenntartásáért, illetve az orientált erősítésért (Bijwe, 1997). Anyaguk szerint lehetnek:

- szerves vegyületek: antioxidánsok; pamut,
- fémek: kálium-titanát (azbeszt-pótló),
- ásványi anyagok: azbeszt (hidratált Mg-szilikát); bárium-szulfát; kalcium-karbonát; cink-oxid,
- egyéb polimerek: gumi,
- egyéb: cashew dióhéj-olaj.

A kötőanyagok biztosítják a komponensek felületei közti adhéziót, felelnek a szerkezet egybefüggőségéért (Bijwe, 1997). Jellemzően alkalmazott kötőanyagok a következők:

- fenol-gyanta,
- Cu, Fe, Ni ötvözetek,
- módosított gyanták (olajokkal, elasztomerrel, foszforral, bórral stb.).

Az azbeszt ($Mg_3SiO_2O_5(OH)_4$) népszerűsége abban rejlett, hogy $500^\circ C$ -ig termikusan stabil, használat közben segít „regenerálódni” a súrlódó felületnek, szilikátjai keménysége magasabb az alapanyagnál, jó kopási tulajdonságokkal rendelkezik, erős, de hajlékony, olcsó volt viszonylag, szálas karakterisztikája $1400^\circ C$ -ig ép. Kiderült azonban, hogy a tüdőben lerakódik, rákkeltő, így 1986-ban az Environmental Protection Agency betiltotta a használatát. Az autóipart ‘90-es években érte el a határozat. Megkezdődött a kutatás az azbeszt kiváltására alkalmas anyagok után. (Bijwe, 1997) Az eredmények így csoportosíthatók:

- szerves anyagok: PAN, PE, aramid,
- szervesetlen anyagok: wollastonit (kálcium-szilikát), vermikulit (hidratált kalcium alumínium szilikát), csillámpala (Al-szilikát), fiberfrax kerámia szál, bazaltszál, kőgyapot, üvegszál (hőállóság szempontjából előnyösebb).

Az üveg a szilikátok családjába tartozik, összetételének több mint 50% SiO_2 , fennmaradó rész fémoxidok, melyek szilíciummal elsődleges, illetve kovalens és ionos kötésekkel egyetlen óriásmolekulává egyesülnek polimert képezve. Az üvegszál gyártása ömledékből fonófejen szálhúzással (8-14 μm átmérő) történik. Megjelenési formái: vágott üvegszál paplan, üvegfonal, roving, üvegszövet. Felületkezelést igényel; egyrészt védelem gyanánt a szövés, fonás és egyéb feldolgozás során esetleg fellépő károsodás ellen, összetartás fenntartása érdekében, ezt írézéssel érik el. Másrészt az üvegszál és polimer mátrix között határfelületi kapcsolódás biztosítása (elsődleges kötésekkel) érdekében kezelik epoxivegyületekkel, vinilszilánokkal, fenolgyanta típusú kapcsolószerrel. (Czvikovszky et. al., 2000)

Karbonszál esetén a grafitos szerkezet és nagy modulus kerül hasznosításra. A karbonszálgyártás előterméke (prekurzor) többféle polimerszál is lehet, ha azt úgy tudjuk elszenesíteni (karbonizálni majd grafitosítani), hogy közben ne olvadjon meg, ne égjen el, és a kívánt szénszerkezet alakuljon ki. Prekurzorai lehetnek (Czvikovszky et. al., 2000):

- poliakrilnitril (PAN),
- regenerált cellulóz (múselyem, viszkóz),
- kátrányalapú szál,

- kőolaj alapú vagy kőszénkátrány alapú szurok (pitch).

Karbonszál-gyártás főbb lépései PAN (Czvikovszky et. al., 2000):

- stabilizálás: enyhe oxidáció maximum 250 °C-ig, amelyben a szál elszenesedik, de nem olvad meg,
- karbonizáció: 250–1500 °C-ig történő szenesítés, amelyben a szál 90 %-ban szénné alakul, N₂ (inert) atmoszférában,
- grafítosítás: 1500–2500 °C-on, oxigénmentes atmoszférában, feszített állapotban kialakul a gyakorlatilag tiszta szénből álló grafitos szerkezet.

Az *aramid* szálak előnye az aromás poliamidok szerkezetéből adódó szilárdság és magas hőállóság. Az aromás poliamid szálak nagyfokú orientáció (azaz: nyújtás) során nyerik el nagy szilárdságukat, ami folyadékállapotban vagy géles állapotban megjelenő rendeződéssel párosul (folyadékkristályos polimer). Két fő típusa ismeretes: a para-kötéssel kapcsolódó *aramidok* (a benzolgyűrű átellenes pontjaihoz kapcsolódó kötésekkel) és a meta-kötéssel kapcsolódó *aramidok*. A para-kapcsolódású aromás poliamid szálak (KEVLAR, TWARON, TECHNORA) 3000 MPa feletti szakítási szilárdság és 60 - 120 GPa közötti húzó modulus jellemzi, sűrűségük csak 1,44 g/cm³. Az *aramid* szállal erősített kompozitok rendkívüli szívóssággal, ütésállósággal bírnak. Ezeket a szálakat kompozit erősítőanyagként gyakran alkalmazzák karbonszállal együtt, hibrid erősítőrendszerben (Czvikovszky et. al., 2000).

A polietilén szál előállítása nagy molekulatömegű (106 Dalton) úgynevezett UHMWPE típusból (Ultra-High-Molecular Weight Polyethylene) gél jellegű oldatból nagymértékű orientációt (nyújtást) alkalmazva történik, ezzel nagy szilárdságú polietilén szál (HOPE: Highly Oriented Polyethylene) képezhető. A 3000 MPa feletti szakítási szilárdság és víznél kisebb sűrűség teszik vonzóvá egyes alkalmazásokban. A PE hőállósága a HOPE esetén is korlátozott. A legmagasabb móltömegű PE is feloldhatóvá, felolvaszthatóvá válik 140 °C-on. A térhálósítás javíthat ezen a jellemzőn. PE csekély adhéziója miatt az alkalmazásaiban jellemző a felületi maratás, utólagos kopolimerizáció a kötődést javíthatja. A HOPE szálak alkalmazása vegyes erősítőszálakkal (hibrid kompozitban) pl. karbonszállal együtt, epoxi mátrixban jellemző (Czvikovszky et. al., 2000).

2. táblázat: Erősítőszálak szilárdsága – összehasonlítás (Czvikovszky et. al., 2000)

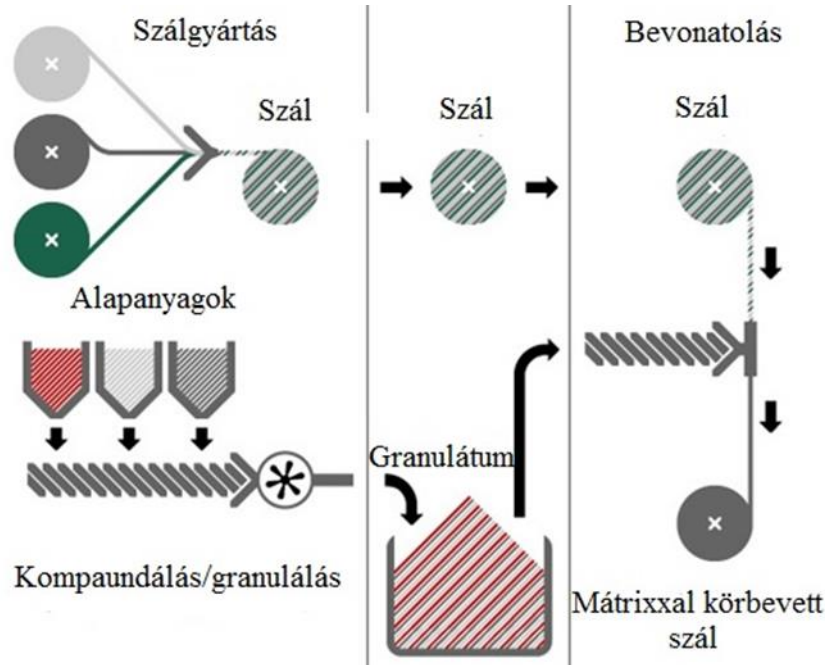
Szál típus	Sűrűség	Szakító- szilárd- ság	Rugal- massági modulus	Szakadá- si nyúlás	Fajlagos szakadá- si hossz
	ρ	σ	E	ϵ	σ/ρ
	g/cm ³	GPa	GPa	%	km
Üvegszál (E típus)	2,60	2,5	72	4,8	96
Grafitszál (HS)	1,78	3,4	240	1,4	190
Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,3	75	3,6	230
Polietilén (SK66)(HOPE)	0,97	3,3	99	3,7	340
Acélhuzal	7,86	4,0	210	1,1	50

2.2.1 Modern, szálerősítéses hibrid kompozit súrlódó tengelykapcsolóbetétek gyártási lépései

A szerves súrlódó tengelykapcsolóbetét anyagok kompozitok, amelyeket szövással állítanak elő. A szálakat mátrixba impregnálják, majd koszorúvá előformálják, vulkanizálják és a végső geometriára köszörülik (Sfarni et. al., 2011), (Zhang et. al., 2014). A szálerősítés orientációját a

súrlódási erő alkalmazás-specifikus, kerületi iránya határozta meg. Ez befolyásolta a gyártási eljárást is. A szerves hibrid polimer kompozit típusok szálainak gyártási lépéseit a 2.4. ábra szemlélteti.

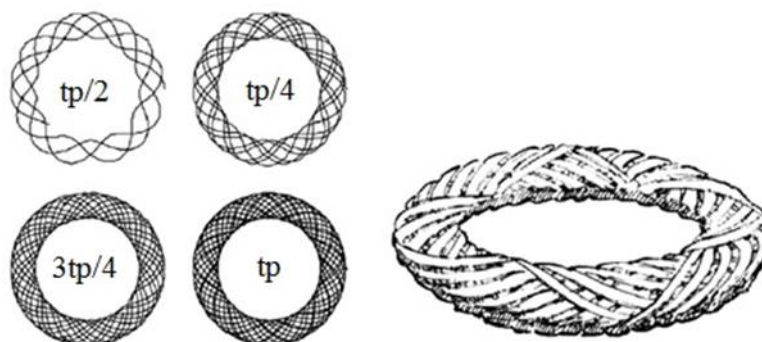
Aramid, üveg, PAN és rézszálak összefonását követően kerül a mátrixanyag az erősített szálra, mely különböző alapanyagok kompaundálása majd újabb extrudálása során kerül felvitelre.



2.4. ábra: Oldószermentes szálimpregnálás folyamata (LuK symposia 1986 – 2006)

Az úgynevezett texturerben történik két üvegszál egymás köré tekerése, egyik húzva, másik köré spirálisan, ezek lazán állnak. Egy fúvó segítségével „felpuffasztják” a szálakat levegővel, melyek így összetapadnak kvázi egy-szállá. A „Yarn-twister”-ben a szálgyártás során az üvegszálhoz további szálakat fonnak: egy aramid-szálat, egy rézszálat és két PAN-szálat. Ezt követi a csomómentes végtelenítés, a bolyhok leszívása majd az áztatás egy keverékbe az adhézió növeléséhez. Az extruder elvégzi a bevonatolást az extrudált granulátummal, mely a kompaundált alapanyagokból származik (ezek egy része ipari titok), majd hűtés (~60°C-ra) következik.

A lehűlt impregnált szálból szövással, fonással koszorú készül: szinuszos hullám és sugárirányú mozgatás eredőjeként (ld. 2.5. ábra). Az eljárás (Sfarni et. al., 2011) megfelelő sűrűségű és morfológiájú felületet képes kialakítani és a szövési módszer a legkedvezőbb a súrlódó betétre ható terhelések, igénybevételek szempontjából, így szinte a szőtt betétgyártás kezdeteitől ez a technika vált általánossá.

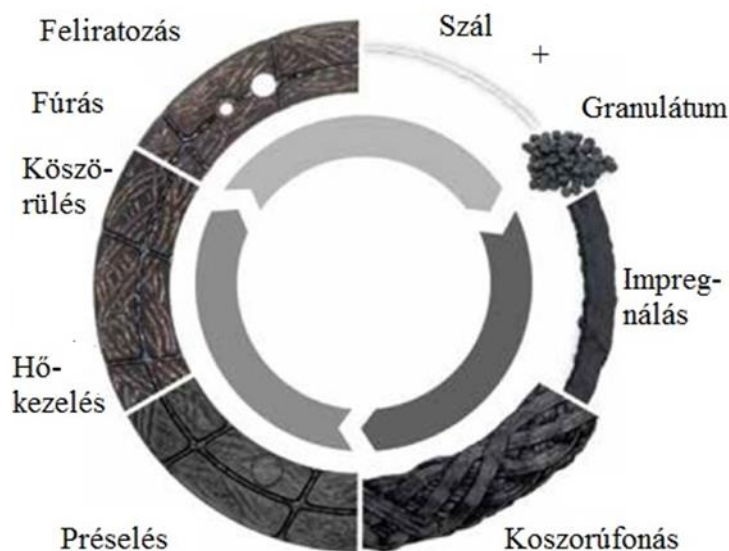


2.5. ábra: bal: Szálkoszorú az előformázási idő – t_p – függvényében, jobb: előforma (Sfarni et. al., 2011)

A gyártás következő lépése a préselés, melegpréssel, 150 – 180 °C-on a levegő kiszorítása, a nedvességtartalom-csökkentése és a por-, kopadék-elvezető rovátkák préselése céljából.

A kemencében történő hőkezelés alatt következik be a gyanta megdermesztése, a vulkanizáció: keresztkötések alakulnak ki fenol-formaldehid és melamin formaldehid molekulák, valamint gumi molekulák és kén közt. A hőkezelést köszörülés követi végleges vastagságra a jellemzően vastagabb, geometriailag pontatlan előformából. Ezután egy újabb hőkezelésnek vetik alá az anyagot.

A gyártási folyamatot a végmegmunkálás, a mikroköszörülés, a PVA impregnálás (por elleni védőréteg, mely csak a szállítás alatt fontos, hogy a felületen legyen, általában lekopik az első használat), az ellenőrzés, a feliratozás, és a fúrás lépéseivel zárul. Az egyes gyártási fázisok termékeit a 2.6. ábra szemlélteti.



2.6. ábra: bal: A súrlódó hibrid kompozit betégyártás főbb lépései és termékeik (LuK symposia 1986 – 2006)

2.2.2 Minőségellenőrző vizsgálatok

A tengelykapcsolótárcsa súrlódó betétek gyártási technológiájához kapcsolódó minőségellenőrzés lépései autóiipari szokásjog (LuK symposia 1986 – 2006) alapján a következők:

- repedési fordulatszám-mérés

- korróziós vizsgálat
- megcsúszási nyomaték-mérés
- alakváltozási vizsgálat
- alacsony energiájú teszt
- közepes energiájú teszt
- kezdeti nyomatékvesztési vizsgálat
- axiális rángatási vizsgálat
- sűrűségmérés
- kiegyensúlyozatlansági vizsgálat
- termo-gravimetrikus mérés (TGA)
- nagy energiájú teszt (lejtőn elindulás)

Az egyes vizsgálatok paramétereit, lebonyolításának körülményeit általában a gyártók belső szabványai, így ezek közlése nyilvánosan konkrét értékekkel nehézkes, lévén azok nem csak gyártónként, de anyagoként és méreteként is eltérnek.

A megcsúszási nyomaték-mérő vizsgálatot zárt tengelykapcsolószerkezettel adott hőmérsékleten és ideig szükséges végezni. Szobahőmérsékletre hűtés után mérendő az elfordulási nyomaték, amely megadja, hogy a váltótengelyt forgatva a tengelykapcsolótárcsa mekkora nyomaték esetén csúszik meg a nyomólap és lendkerék közt.

Az alacsony energiájú vizsgálat célja a súrlódási tényező és a kopási tényező meghatározása szerves betétek esetén adott súrlódó felületi hőmérséklet mellett a felületre kifejtett nyomás ébresztésével. A több napos teszt során a kopást előírt számú ciklus után kell ellenőrizni, hagyva, hogy a tengelykapcsoló szobahőmérsékletre hűljön. A teljes kopást a nyomólap és a betét kopása adja. Előbbi teszt előtti és utáni felületi jellemzők különbségéből nyerik. Az üzemszerű kopást az előírt számú ciklus végeztével mért teljes kopások függvényében határozzák meg. Az átlagos nyomaték a mért nyomaték integrálja a csúszási idő alatt. Az átlagos súrlódási tényező az átlagos összeszorító erőből és az átlagos nyomatékból származtatható.

A közepes energiájú teszt célja a súrlódási tényező és a kopási tényező meghatározása szerves betétek esetén a hőmérséklet függvényében. A hőmérsékletet minden súrlódó felület alatt előírt mélységben és a súrlódó felületek közepén is mérik. A kopási értékek az előző vizsgálatban bemutatottakhoz hasonlóan kerülnek megállapításra.

Az több órás kezdeti nyomatékvesztési vizsgálat tesztberendezése megegyezik a közepes energiájú tesztével. A cél a súrlódási tényező meghatározása a hőmérséklet függvényében. A hőmérsékletet itt is minden súrlódó felület alatt előírt mélységben és a súrlódó felületek közepén is mérik. A tesztprogram adott számú ciklusig vagy a súrlódási tényező kritikus érték alá csökkenéséig tart.

A lejtőn felfelé elindulás okozta terhelés vizsgálatához használt berendezés megegyezik a közepes energiájú tesztével, tárcsaátmérőnként eltérnek a vizsgálati paraméterek, azaz az összeszorító erő és a fordulatszám. A vizsgálat rendszerint több napot vesz igénybe.

2.3 Jármű tengelykapcsoló súrlódó betétek kutatási területei

A tengelykapcsolók terheléseiből és beépítési környezetbeli sajátosságaiból származó polimer kompozit súrlódó anyagaikkal szemben támasztott követelmények nemcsak a súrlódási együtthatójuk és kopásállóságuk stabilitását és hőállóságát határozták meg a hőterheléssel szemben, hanem befolyásolták a hirtelen fellépő mechanikai behatásokkal vagy nagy forgási sebességgel szembeni ellenállóképességüket is. Ezen anyagok összetevőit általában szálerősítés, kötőanyagok, súrlódási módosítók és töltőanyagok közé sorolják. Ennek a szétválasztásnak elsősorban a gyártás során van jelentősége, hiszen az egyik csoportba tartozó komponens általában egy másik komponenscsoport funkciójának szempontjából befolyásolja az anyag viselkedését.

Például a szálak (jellemzően aromás poliamid, üveg, szén, acél, cellulózzsál, hőre lágyuló szál és a tiltott azbeszt) kritikus szerepet játszanak nemcsak a mechanikai szilárdság, hanem a hőállóság és a súrlódási/kopási tulajdonságok meghatározásában is (Zhang et. al., 2014) Bijwe például megállapította, hogy a nagy szilárdságért és rugalmassági modulusért felelős szálak közül az aromás poliamid nemcsak garantálja a hőállóságot (pl. szén- és acélszálak), hanem hozzájárul a jó kopási tulajdonsághoz és a stabil súrlódási együttható biztosításához. (Bijwe, 1997) A modern hibrid kompozitok azonban sokféle összetevőből állnak, ami meglehetősen bonyolulttá teszi azonosításukat és jellemzésüket.

A hibrid kompozit anyagok összetevőit általában mechanikai szerepük és funkciójuk alapján csoportosítják. Egy-egy komponens azonban a célzott szemponton kívül általában számos más tulajdonságot is befolyásol: még a kötőanyagok is módosíthatják a kompozitok súrlódási viselkedését, ahogy azt Wongpayakyotin és munkatársai megállapították (Wongpayakyotin et. al., 2021). Továbbá Kumar és Bijwe (2011) vizsgálataiban a réz olyan komponensnek bizonyult, amely javítja a súrlódó anyagok minden fontosabb tulajdonságát.

A súrlódó anyagokkal kapcsolatos alkalmazás szintű vizsgálatok általában egy fő témát részleteznek a mechanikai, termikus és tribológiai hármashól, miközben a követelményekre, terhelésekre és üzemi körülményekre reflektálnak, még akkor is, ha a tengelykapcsolótárcsa súrlódó betétjénél fellépő különböző terhelések szétválasztása nehézségeket okozhat azok összetettsége miatt. A fő témakörök között mechanikai vizsgálatok, termikus szempontok vagy tribológiai kutatások szerepelnek (Biczó et. al., 2016).

2.3.1 Mechanikai vizsgálatok

A súrlódó kompozitok irodalmában mechanikai szempontból vizsgálják a vetemedést, zsugorodást és maradó feszültséget befolyásoló paramétereket, a szál és a mátrix közötti tapadást és az azt szabályozó paramétereket, a szálak közti súrlódási viszonyokat, valamint a szövési technológiai paraméterek hatását. Emellett általában különböző típusú mechanikai vizsgálatokat is végeznek (Biczó et. al., 2016).

A hibrid kompozitok gyártása során a kívánt geometria elérése is kihívást jelenthet. A hőre keményedő polimerek térhálósítása tipikusan két lépésben történik: izoterm lépés és hűtés. Az előbbi során a polimer zsugorodik, mivel a mátrix ömledék állapotból megszilárdul, míg a szál változatlan marad. A hűtés során a szál is zsugorodik, de a mátrixtól eltérő hőtágulási együtthatóval. Ily módon a térhálósodás során a maradó feszültséget a térfogatváltozás és az anyagtulajdonságok befolyásolják (Zhao et.al., 2007). Gurunath és munkatársai a zsugorodás elkerülése érdekében (ami a gyártás végén felmerülő probléma) új gyantát fejlesztettek ki súrlódó kompozitokhoz fenolgyanta kötőanyaggal (Gurunath et.al., 2006). Zarrelli és munkatársai szintén a gyártási hibákat, mint például a zsugorodás jelenségét, a vetemedést és a maradó feszültségeket (a térhálósítás okozta kémiai zsugorodás, a hőtágulás és a viszkoelasztikus modulus változása miatt) vizsgálták egy új érzékenységi modellel a gyantára vonatkozólag, miközben megpróbálták csökkenteni a szénszálal hőre lágyuló műanyagokban a gyártási folyamatok által okozott maradó hőfeszültségeket megfelelő gyártási paraméterek megválasztásával (Zarrelli et.al., 2006). Greisel és munkatársai (Greisel et.al., 2014) rámutattak, hogy a határfelületi törési szívósság növelése elérhető a kezeletlen kompozitnak a mátrix üvegesedési átmeneti hőmérsékletét meghaladó hőmérsékleten történő lágyításával. A zsugorodás minimalizálását célzó térhálósítási hőmérsékletek szabályozása, valamint az e jelenség és a hőtágulás által okozott különböző feszültségek szétválasztása volt a célja Kravchenko és munkatársainak, amikor egy kétkomponensű „termoset” válaszának többszörös modelljét alkották meg (Kravchenko et.al., 2014).

A szál-mátrix adhézió és a szál-a-szálon súrlódás szintén fontos témák, amelyeket a mechanika területén vizsgálnak. A természetes szálakkal történő szálerősítés egyik hátránya a szál és a mátrix közötti gyenge adhézió, amely a szál hidrofil felületének és a polimer nem poláros felületének inkompatibilitása miatt negatív hatással lehet a fizikai és mechanikai tulajdonságokra (Xie et.al., 2010). A belső súrlódás témakörében de Lange és munkatársai száلكihúzási vizsgálatok elvégzésével bizonyítékot találtak arra, hogy a térhálósodás során létrejövő diszperzív és poláris kölcsönhatások növelhetik a felületi energiát és erősíthetik az aromás poliamid szálak és a különböző mátrixok közötti adhéziót (de Lange et.al., 2001). Xie és munkatársai (Xie et.al., 2010) felfedezték, hogy a szilán, mint kötésjavító szer, nemcsak a természetes szálak határfelületi adhéziót növelik a célpolymer mátrixokhoz, hanem javítják a teljes kompozit mechanikai és „kültéri” teljesítményét is.

Gyártási folyamatok hatásának szempontból Bigaud és munkatársai (Bigaud et.al., 2005) megállapították, hogy egy speciális, úgynevezett háromdimenziós (3D) fonási technika alkalmazásával a PA12-vel különböző fonási szögek mellett szőtt szénszálak különböző merevségi és szilárdsági értékeket eredményeztek. A szövési paraméterek hatására csak néhány tanulmány tért ki, mivel ezek az eljárások jól le vannak írva a szabadalmakban, a szövött koszorúnak pedig el kell érnie egy bizonyos sűrűséget, ami miatt ezek a gyártási beállítási paraméterek szinte megváltoztathatatlanok. A tengelykapcsolóbetét mechanikai tulajdonságainak érzékenysége a szövési paraméterekre fontos téma az optimális geometriák kialakításához.

Az alapvető mechanikai vizsgálatok elengedhetetlenek az anyag mechanikai tulajdonságainak meghatározásához. Azonban csak néhány cikk foglalkozott kizárólag száraz tengelykapcsolóbetét anyagokkal. Ezek a vizsgálatok nem csak az új anyagok esetében elengedhetetlenek, hanem a gyártási folyamat részét képezik a tesztelési fázisban is. Mindazonáltal egy numerikus modell hatékonyabb a drága életciklus-vizsgálatokból eredő vizsgálati költségek csökkentésére. Daniel és társai háromféle tönkremeneteli kritériumot javasolva három dimenzióban (maximális feszültség; Tsai-Hill, Tsai-Wu; Hashin-Rotem, Sun, NU) a textilkompozitok teljes mechanikai jellemzésére szolgáló vizsgálati módszereket dolgoztak ki. (Daniel et.al., 2008)

2.3.2 Termikus vizsgálatok

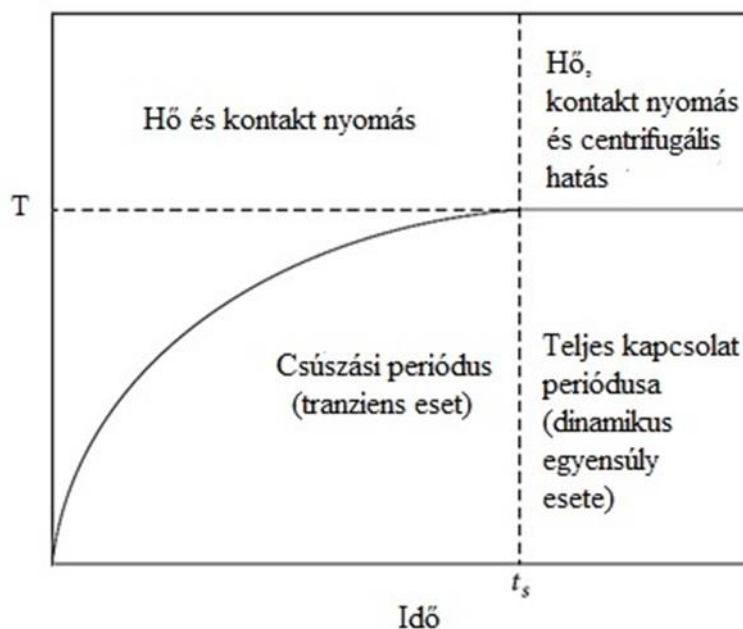
A termikus témák közül a legtöbb tanulmány a forró pontok (hot spot-ok, kis területek, ahol rendkívül magas hőmérséklet és nyomás lép fel, amikor a sebesség meghalad egy kritikus értéket) (Biczó et. al., 2016), a termo-elasztikus instabilitás, a térhálósodás okozta zsugorodás, az anyag vagy gyártási paraméterek által befolyásolt termikus tulajdonságok és a harmadik test jelenségek vizsgálatára irányult. Az összetett terhelési esetek miatt a termikus modellek esetében a cél az egyszerűsítés a számítási idő és a költségek csökkentése érdekében. A mai végesseleemes szoftverek olyan speciális funkciókat tartalmaznak, amelyek lehetővé teszik a termikus numerikus elemzést.

A tengelykapcsoló rendszerben a súrlódó felületek közti csúszás közbeni tribológiai kapcsolatot nagy mértékben befolyásolja a hő áramlása a rendszerben. A hő a felületeken fellépő súrlódási erő hatására disszipálódik. A hőmérséklet növekedését jórészt a súrlódó betétek termikus tulajdonságai befolyásolják. (Khamlichi et al., 2003)

A *hot spot*-ok, azaz forró pontok mechanizmusa a polimer súrlódó felületek $p\dot{v}$ (MPa-m/s) elméletének megfelelően a súrlódási hővel terhelt súrlódó rendszer részét képező instabilitásból áll. Az érintkező felületen keletkező hőáram arányos az érintkezési nyomással, ahol a nagyobb hőmérsékletnövekedés a nagyobb nyomású területeken fokozott hőtáguláshoz vezet, ezáltal tovább növelve a lokális nyomást. Ezt a jelenséget, amely a nyomáseloszlást inhomogénná teszi, súrlódás okozta termoelasztikus instabilitásnak (TEI) nevezzük. Zagrodzki és munkatársai szimulálták az instabil termoelasztikus súrlódó rendszer viselkedését (az anyagösszetétel és a geometria hibái miatt) egy nedves többletárcsás tengelykapcsolóban, és megállapították, hogy a

termoelasztikus stabilitás javítható (a gyártási korlátokat figyelembe véve) az acél tárcsa vastagságának csökkentésével, a forró pontok jelensége pedig a rugalmassági modulus segítségével szabályozható. A forró pont jelenség mérsékelhető még a súrlódó elem rugalmassági modulusának csökkentésével vagy a tárcsa geometriájának módosításával is. Ezek megnövelik a forró pont kialakuláshoz szükséges kritikus sebesség értékét és csökkentik a pontok számának növekedési rátáját a kritikus sebesség felett. A modulus-változtatás jól ismert eljárás az iparban. A súrlódó elem vastagságának növelésével hasonló eredmény érhető el, de ez konstrukciós szempontból hátrányos. Az acél súrlódó elemek vastagságcsökkentése még kedvezően hathat a forró pontok vándorlására és a termoelasztikus instabilitásra, de a kezdeti nyomáseloszlásbeli inhomogenitást nem javítja, sőt vékonyabb anyag a deformáció veszélyét még inkább magában hordozza. (Zagrodzki és Truncone, 2003) A nyomátviteli elemek vastagságának „átolása” ugyan bevett szokás és ennek a fém alkatrészek maradó alakváltozására gyakorolt hatása is szimulálható, ám a forró pontokra és konkrétan a súrlódó elemekre gyakorolt hatások gyakran elhanyagolásra kerülnek a modellezés során. Az ellenoldal egyenetlensége és kopása miatt ezek a pontok idővel módosulnak helyüket tekintve. Ezt a kopási mechanizmus befolyásolja. (Khamlichi et al., 2003) A forró pontok helyének változását hűtés után egy súrlódó rendszerben Ahn és Jang (Ahn és Jang, 2010) mutatta be egy kétdimenziós érintkezési problémát megoldó tranziens vége-seleemes szimulációval járó termo-elasztoplasztikus instabilitás (TEPI) segítségével.

Mikor a tengelykapcsolótárcsa elkezd kapcsolatba lépni a nyomólappal a csúszási periódus végére a kontakt nyomás eléri a maximumát és állandó marad a teljes kapcsolódás ideje alatt, ahogy a 2.7. ábra mutatja. Nagy relatív csúszási sebesség esetén nagy mennyiségű hő generálódik, ami nagy mértékben növeli a hőmérsékletet a tengelykapcsolótárcsa súrlódó betétjének a felületén, ami termikus deformációhoz vagy a fent említett termoelasztikus instabilitáshoz vezethet. Ez növeli a tönkremenetel és a túlzott kopás fellépésének kockázatát. A nyomáseloszlás tehát fontos tényező, hisz befolyásolja a csúszás közben keletkező hőt. (Abdullah és Schlattmann, 2013)



2.7. ábra: Súrlódó tengelykapcsoló kapcsolásakor fellépő terhelések (Abdullah és Schlattmann, 2013)

A gyártási lépések közül a hő- és felületi tulajdonságokat befolyásoló zsugorodás miatt a térhálósítás lehet a legbefolyásosabb ugyanakkor a legnehezebben szabályozható fázis a végső alak meghatározásának szempontjából. A térfogati zsugorodás kémiai indukált zsugorodásként

van jelen a súrlódó kompozitok gyantájában, ami egyértelműen befolyásolja a maradó feszültségeket és a vetemedési jelenségeket (Xiong et. al. 2009). A maradó alakváltozások és feszültségek modellezéséhez a térfogatváltozás és a hőgradiensek közötti kapcsolatot Nawab és társai (Nawab et. al., 2012) figyelembe vették, hogy vizsgálják a hőre keményedő polimerek kémiai zsugorodását. Arra a következtetésre jutottak, hogy mivel azonos tömeg esetén annál a gyantánál, melybe már szálakat ágyaztak, kisebb kémiai zsugorodást tapasztaltak, mint a tiszta gyanta esetében, a kompozit anyag zsugorodásból eredő maradó feszültségeit a szálak csökkentik.

A magasabb szál-mátrix arány gyorsan el tudja vezetni a súrlódás által indukált hőt, amikor a súrlódó felületek érintkezése ciklikusan ismétlődik - ez a jelenség egyszeri érintkezéskor nincs jelen, amint azt Khamlichi és társai (Khamlichi et.al., 2003) felfedezték.

A nyomatékvesztést a szakirodalom „fading” jelenségnek írja le, amit a tengelykapcsolókban alkalmazott súrlódó betétekhez rendkívül hasonló összetételű fék súrlódó elem esetében, mint a fékezési teljesítmény romlását, a betét szerves kompozit mátrixa fenolgyanta összetevőjének tudnak be. Cristol-Bulthé et al. (2008) a kémiai, termikus és mechanikai jelenségek leírása érdekében folyamatosan, irányított hőmérsékleten végzett súrlódási vizsgálatokat folytattak. Elsőként a kémiai degradációt az emelkedő hőmérséklet mellett thermo-graviometriával és tömegspektroszkópiával vizsgálták. Másodjára a súrlódási modellvizsgálatok lehetővé tették az anyag tribológiai jellemzését. Megfigyelések, vizsgálatok és kopott felületek összefüggésre vezetnek a szerves kompozit degradációja és a súrlódási jelenségek, valamint harmadik test áramlások közt. Sok tanulmány foglalkozott a különféle összetevők, mint szálak, fém, oxidok és gyanták hatásával a súrlódó jellemzők romlására, de a kontaktban fellépő mechanizmust nem jellemezték. Magas hőmérséklet esetén így megfigyelhető, hogy hogyan befolyásolja a kémiai összetétel a kontaktban fellépő tribológiai jelenségeket, és hogy hogyan romlanak le a súrlódási viselkedési jellemzők. Mivel működés közben nehéz vizsgálni a fékeket, érdemes szabályozott hőmérsékletű folyamatos súrlódási vizsgálatokat végezni. A magas hőmérsékletű mátrix-degradáció sűrűség és kompozit-kohézió csökkenést okoz, ami a harmadik test réteget nagymértékben táplálja. Majcherczak et al. (2007) termikus numerikus modelljében a harmadik testet egy energiatárolásra és vezetésre képes egységes réteg képviselte.

A hibrid súrlódó kompozitok rájuk ható terhelésekre adott válasza pillanatnyi vagy fáradási viselkedésként kategorizálható. Sfarni et al. (2011) kapcsolatot talált e két típus között. Ráműtattak arra, hogy a beágyazódást – a súrlódó tengelykapcsoló élettartama alatt a súrlódó anyag maradó deformációját okozó acél alkatrészek miatt kialakuló jelenséget – részben a nagy mechanikai és termikus ütésterhelés és a helyi érintkezési nyomáeloszlási csúcsok miatti intenzív kopás idézi elő. Másrészt Menday és Rahnejat bizonyítékot talált arra, hogy a kifáradási reakció befolyásolhatja a száraz súrlódó tengelykapcsoló betétek viselkedését. Beműtatták, hogy az ún. „judder”, azaz rángatás – egy nem kívánt, ütészzerű terhelésként fellépő axiális rezgés – kisebb valószínűséggel károsítja az erőátviteli rendszert, ha a súrlódó betét súrlódási együtthatója változásának gradiense az élettartam alatt pozitív vagy legalább 0 marad (Menday és Rahnejat, 2010).

Az átlagos súrlódási tényezőnek kiemelkedő szerepe van a tengelykapcsoló oldása és kapcsolása alatti hőmérséklet-emelkedésben. Mivel ez a tényező hőmérsékletfüggő, főként igaz ez az ilyen szerves szőtt szálerősítéses súrlódó betétekre, összetett hőátadási problémával állunk szemben, mely termikus és mechanikus rendszerek egymást gerjesztését foglalja magába. A tengelykapcsoló súrlódó betétek termikus jellemzői, melyek általában anizotróp mennyiségek, nagymértékű hőmérséklet-emelkedést idéznek elő, és befolyásolják a tribológiai tulajdonságokat a határfelületeken. Ezek a termikus tulajdonságok függenek az anyagösszetételtől és a gyártási folyamattól. Így sikeres optimalizációhoz nem árt egyszerű, analitikus összefüggéseket keresni a tulajdonságok változása és a gyártási lépések paraméterei közt. (Khamlichi et.al., 2003)

2.3.3 Tribológiai vizsgálatok

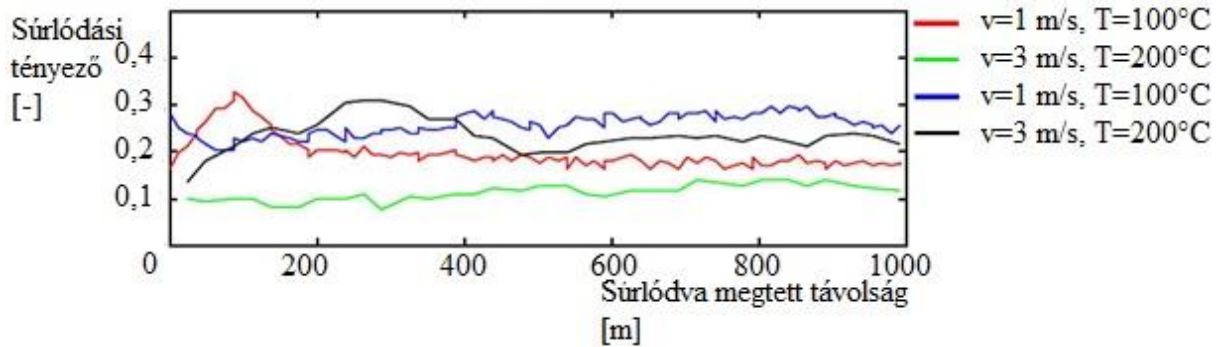
A polimerek tribológiája egy máig jellemzően feltáratlan terület, mivel ezeknek az anyagoknak a mechanikai tulajdonságai (alakváltozó képesség, nemlineáritások az anyag viselkedésében) mellett a súrlódási és kopási mechanizmusai is különböznek például a fémek esetén megismert viselkedéstől. A tribológia 1960-as évektől önálló tudománya az utóbbi évtizedben teret engedett a végeelem módszerrel történő súrlódási vizsgálatoknak, melyek egyre széleskörűbben szolgálják ki az ilyen irányú elemzések szimulációs hátterét, akár fémkompozit vagy szálerősített anyagok esetén is. A tribológiai vizsgálatok összetettségük szerint több szinten is végezhetők, az egyszerűtől fölfelé nő a rendszerben részt vevő alkatrészeket a valós működés és a kísérlet közben érő erők hasonlósága, ahogy a vizsgálatok költsége és a ráfordítási idő is. Ahogy egyre több befolyásoló tényezőt (paramétert) vizsgálunk, változtatunk, úgy nő a köztük lévő kölcsönhatásokra vetített modellérzékenység. Emiatt első lépésként modellkísérlettel kell a súrlódó elemet tanulmányozni, majd az azon a szinten érzékenység szempontjából fontos paraméterek megtartásával feljebb lépni a vizsgálati szinttel. (Kozma, 1994)

A súrlódó tengelykapcsoló-betétek tribológiai viselkedésének meghatározására földrészenként eltérő tesztelőírásokat alkalmaznak: Európában a Raybestos teszt; Japánban a JIS D-4311; az USA-ban pedig a SAE J661a szavatolja a megfelelőséget. Ezek azonban a fejlesztést nem tudják hatékony gyorsasággal szolgálni időigényük miatt, így egyéb vizsgálati összeállításokra van szükség, mint például a tű-tárcsa modellre. (Chaikittirana et. al., 2012) (Bezzazi et. al., 2007)

A tű-tárcsa vizsgálat

Tribológiai vizsgálatokhoz általános alkalmazott az úgynevezett tű-tárcsa (pin-on-disc) modell, amit ismert hiányosságaival kell kezelni. A tű-tárcsa tesztkészülék lehetőséget biztosít az olyan vizsgálatok elvégzésére, melyek során az előzetesen koptatott tárcsák tribológiai viselkedését és teljesítményét illetően meghatározzák a megbízhatóságot – a tengelykapcsoló alkalmazásában való további felhasználhatóságot –, további vizsgálatokra van szükség. Ezért, mivel a kerámia anyagokat nagy terhelésű alkalmazásokban súrlódó betétként is használják, Poser és munkatársai (Poser et. al., 2005) ezt a készüléket használták arra, hogy összehasonlítsák az Al_2O_3 -alapú kerámia kompozit tengelykapcsolóbetét tribológiai teljesítményét a monolitikus alumínium-oxiddal kapott eredményekkel. Arra a következtetésre jutottak, hogy a jobb súrlódási együttható-stabilitás a súrlódó felületbe ágyazódó TiN-részecskének köszönhető. Időközben, mivel a szőtt hibrid kompozitok még mindig a legszélesebb körben használt autóiipari száraz tengelykapcsoló súrlódási anyagok, Bezzazi és munkatársai (Bezzazi et. al., 2007) pin-on-disc tesztfelépítést használtak a szerves tengelykapcsoló-betétek súrlódási együttható és kopási értékeinek meghatározására. Értékelték a kopásállóságot és a súrlódási együttható stabilitását. Ugyancsak a pin-on-disc berendezésen mért súrlódási együttható eredményekből Senatore és munkatársai (Senatore et.al., 2011) mesterséges neurális hálózatot hoztak létre, amely képes a fő csúszási paraméterek hatásának előrejelzésére. Mind fém-, mind autóiipari tengelykapcsoló anyagokat vizsgáltak, és a csúszási gyorsulást fontos paraméternek találták. A pin-on-disc súrlódási modellek hasznosnak bizonyultak az enyhe kopásról az intenzív kopásra való áttérés megfigyelése során a keménység, a normál terhelés, a felületi érdesség, a csúszási sebesség és a hőmérséklet által szabályozott meghatározott terhelési körülmények között az idő múlásával, ahogyan Fernandes és társai megállapították. Fém a fém ellenében, súrlódó fékbetét fém ellenében és súrlódó tengelykapcsoló betét fém ellenében súrlódó párok tű-tárcsa kísérleteinél mind megfigyelhető egy átmenet az enyhe és intenzív kopás közt adott terhelési körülményeken, melyet a keménység, a felületre merőleges terhelés nagysága, a felületi érdesség, a csúszási sebesség és a hőmérséklet befolyásol az idő függvényében. (Fernandes et. al., 2013). Másrészt ezek a vizsgálati eszközök csak a súrlódási viselkedés kiindulási és végső feltételeinek vizsgálatát teszik lehetővé a súrlódási kopadék mennyiségével. Az átmenet mechanizmusa azonban csak becsülhető.

Khamlichi et al. (2008) tű-tárcsa tribológiai vizsgálatai tengelykapcsoló súrlódó betétek súrlódási tényezőjének anyagi összetevőkre mutatott érzékenységére terjedtek ki. Bonyolult, nem egyértelmű összefüggést találtak a gyártási lépések (alakadás, köszörülés) paraméterei és a kapott súrlódó felület textúrája közt, mely így nem fejezhető ki a faktorok függvényeként. Kísérleteik alapján a súrlódási együtthatót nagyrészt a csúszási sebesség vagy a csúszási sebesség és a hőmérséklet kapcsolata befolyásolja, ahogy a 2.8. ábra mutatja. Utóbbi alapján lineáris modellel nem jellemezhető a súrlódási viselkedése a vizsgált súrlódó betéteknek.



2.8. ábra: Súrlódási tényező függése a súrlódva megtett távolságtól különböző sebességeken és hőmérsékletek mellett (Khamlichi et al., 2008)

Tű-tárcsa modellt használt Bezzazi et al. (2007) kereskedelemben kapható, modern súrlódó tengelykapcsolótárcsák szőtt szálerősítéses betéte száraz súrlódó viselkedésének feltérképezéséhez. Itt azonban a hagyományostól eltérően nem a vizsgált súrlódó elem, hanem az ellentárcsa anyagát képviselő fém szolgált tűként, ami a kérdéses tribológiai viselkedésű kompozit ellenében súrlódott. Ezzel a cserével el tudták kerülni a kopadék felhalmozódását, amit a korábbi kutatások eredményeinél szem előtt kellett tartani. A súrlódási tényezőt és a kopási rátát a hőmérséklet, a csúszási sebesség és a futáshossz függvényében határozták meg.

A pin-on-disc elrendezésnek megvannak a maga korlátai, ugyanis a két felület kiterjedése közti különbség a súrlódó felület szélén ugrást okoz a nyomásoszlásban, ami nem jelentkezik (legalábbis nem olyan mértékben), két, tegyük fel, végtelen kiterjedésű forgó sík súrlódó kapcsolata során. Így ez a modell-összeállítás általában különböző súrlódó párok – például súrlódási tényezője stabilitásának – összehasonlítására alkalmas. (Khamlichi et al., 2008) Bár a tű-tárcsa modell igen hatékony eszköz ebből a szempontból, a statikus viselkedésről nem ad képet. (Chaikittiratana et. al., 2012) (Bezzazi et. al., 2007) és a gyártási tűréseket figyelembe véve, például a teljes súrlódási felület tribológiai viselkedésének leírása egy kis felületű „tű” eredménye alapján természetesen csak közelítés.

Ezért Hoic és társai (Hoic et. al., 2016) egy speciális pin-on-disc (tárcsa-tárcsa) típusú tribométert terveztek, hogy képesek legyenek a teljes száraz súrlódó tengelykapcsoló betétek statikus és dinamikus súrlódási viselkedésének jellemzésére más súrlódási párosok mellett. A gépet használó kísérleteik fő paraméterei a normálerő, a csúszási sebesség és a hőmérséklet. Továbbá ezt a készüléket, a „tárcsa-tárcsa” berendezést Hoic és társai (Hoic et. al., 2021) arra is felhasználták, hogy kimutassák, hogy a súrlódási felület hőmérsékletszintjének minden egyes változása tranzienst viselkedést idéz elő.

Egy másik szempont, ami az alap pin-on-disc beállításból hiányzik, az a magas hőmérsékletű környezet, amelyet a jármű tengelykapcsoló üzeme során tapasztalható. Ezért Humphrey és munkatársai (Humphrey et. al., 2016) a termikus tribodinamikai viszonyokat egy speciális, fűtőrendszerrel ellátott pin-on-disc tribométerrel – egy speciális réztárcsával – reprodukálták.

Megállapították, hogy a növekvő érintkezési hőmérséklet és a növekvő csúszási sebesség felelős a tengelykapcsolóbetét súrlódási kinetikai együtthatójának csökkenéséért.

Tribológiai modellek

A tribológiai vizsgálatok az empirikus adatok mellett gyakran támaszkodnak modellekre is. Az általánosan használt súrlódási modellek két csoportba sorolhatók: empirikus modellek és fizikai egyenleteken alapuló modellek. Az előbbiek bizonyos alkalmazásoknál jobban működnek, előnyben részesítve a sebességfüggés használatát; az utóbbiak a csúszás előtti súrlódást képesek leírni (Saha et. al., 2015).

Többek között Duque és társai (Duque et. al., 2012) a dinamikus Stribeck-súrlódási modellt értékelték ki a Coulomb-modell mellett, hogy összehasonlítsák alkalmazhatóságukat a száraz tengelykapcsoló kapcsolásának energia alapú szimulációjában a járműindítás során. Következtetésük az volt, hogy a Coulomb-modell – amely molekuláris hatásokat hoz létre és képes a felületi adhézió figyelembevételére – elfogadhatóbb eredményt mutatott. Másrészt Chu és társai (Chu et. al., 2014)) a rekurzív legkisebb négyzet módszert alkalmazták a felejtési tényező megközelítésével (*forgetting factor approach, AFFRLS*) a száraz tengelykapcsoló súrlódási együtthatójának meghatározására.

Grzelczyk és Awrejcewicz (2015) kísérletekkel alátámasztott matematikai és numerikus elemzést végzett a száraz tengelykapcsoló érintkezésének vizsgálatára. Vizsgálataikban differenciális és integrál kopási modellekkel vették figyelembe a súrlódó anyagok kopási tulajdonságait és rugalmasságát. A súrlódó anyagok rugalmasságának figyelembevétele lehetővé tette a kopási folyamatok alaposabb leírását, és a teljes érintkező felületen a kopási eloszlások kiszámítását az átvitt nyomatékkal együtt. Li és munkatársai (Li et. al., 2015) ezzel szemben egy módszert mutattak be egy papír alapú, nedves tengelykapcsoló súrlódó betét kopásának előrejelzésére, amelyet ismételt indítási ciklusoknak vetettek alá, szem előtt tartva azt a ténytet, hogy a súrlódó anyag kopási viselkedése szorosan összefügg mind a szerves szálak termikus degradációjával, mind a csúszófelületen lévő feszültségi állapottal. A modelljükből származó előrejelzéseket összehasonlították a kétlépcsős kopási tényező jelenségével, és kiderült, hogy a modell képes figyelembe venni ezt a tendenciát.

Kompozit alkotók, gyártási paraméterek és működési körülmények hatása a súrlódásra

A tribológiai kutatók gyakran részletezik az alkatrészek és a gyártási paraméterek hatását az anyag súrlódási tulajdonságaira. A tengelykapcsoló súrlódó felületei közt létrejövő súrlódási kontakt közben időben változó csúszó kapcsolat lép fel. A hibrid kompozit súrlódó betétek fejlesztésének – a megfelelő energiafolyam fenntartását szem előtt tartva a hajtásláncban – egyik célkitűzése a súrlódási tényező megfelelő magas értéken tartása széles nyomás és hőmérséklet spektrumok esetén ellenállva a kopás és hőmérsékletcsúcsok hatásainak a teljes élettartam során. (Chaikittiratana et. al., 2012) Mivel ennek érzékenysége nem mutat szabályos összefüggést a gyártási folyamatra, az anyagösszetételt és a gyártási lépések paramétereit kell vizsgálat alá vetni a súrlódó felület paramétereit mellett. Utóbbiak a hőmérséklet, a csúszási sebesség, a felületre merőleges irányban vett kontakt nyomás, a felületi érdesség és az ellenfelület állapota, melyek közül utóbbiak a hagyományos alkalmazások esetén állandóak a szakirodalmi kutatásokban.

Basavarajappa és munkatársai (Basavarajappa et. al., 2012) megállapították, hogy a különböző térfogatszázalékú töltőanyagok jelentősen hozzájárulnak az üveg-epoxi kompozit száraz csúszási jellemzőihez. Továbbá Chang és munkatársai (Chang et.al., 2007) kétféle magas hőmérsékletnek ellenálló, rövid szénszákkal (SCF), grafitpelyhekkkel és szubmikro részecskékkel ellátott hőre lágyuló kompozit tribológiai tulajdonságait vizsgálták pin-on-disc elrendezéssel. Arra a következtetésre jutottak, hogy az alappolimer kopásállósága és teherbíró-képessége hatékonyan

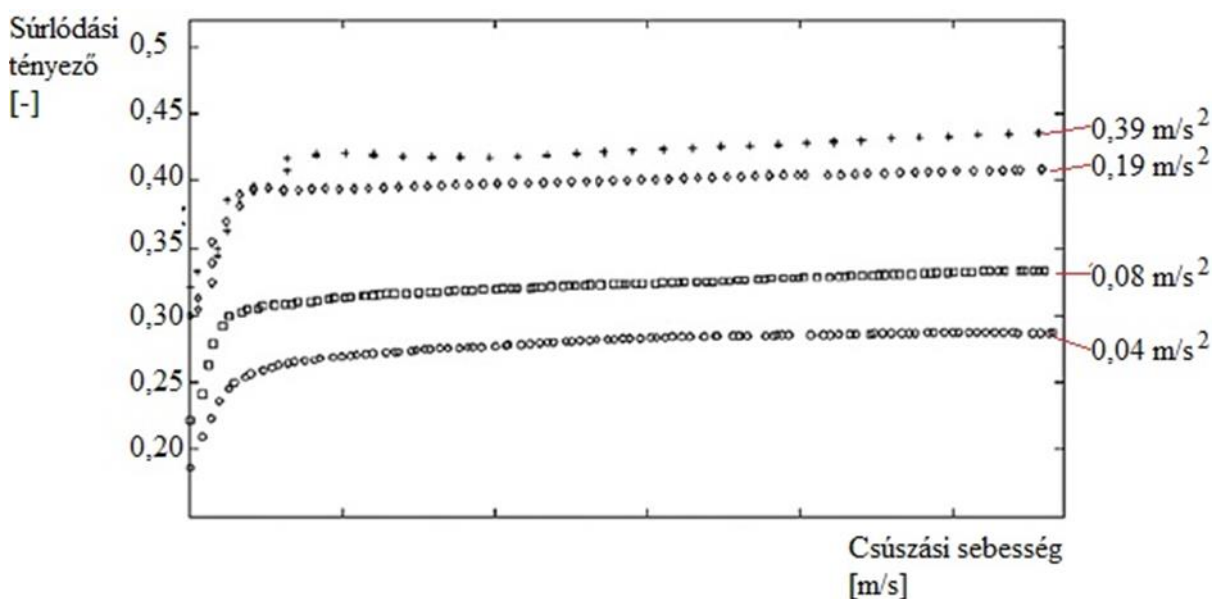
növelhető a hagyományos töltőanyagokkal, míg a súrlódási együttható és a kopási intenzitás tovább csökkenthető magas hőmérsékleten ezen részecskék hozzáadásával. Míg Olifirov és társai (Olifirov et al., 2021) Al-Cu-Cr kvázikristályokkal, politetrafluor-etilénnel, szintetikus grafittal és korommal töltött fluorozott etilén-propilén súrlódási együtthatóját és kopásállóságát vizsgálták egyéb tulajdonságok mellett, megállapítva, hogy a töltőanyagok bizonyos aránya optimális tribológiai tulajdonságokhoz vezet. Rangaswamy és munkatársai (Rangaswamy et al., 2021) beszámoltak hibrid, szén nanocsövekkel töltött és tiszta E-üveg, kevlár, epoxi kompozitok kopásállóságának összehasonlításáról, megállapítva, hogy az előbbi kisebb kopást eredményezett. Bajjal et al. (2020) pedig különböző töltőanyagok felhasználását javasolta a cianátészteres hőre keményedő gyantához, annak ipari alkalmazhatóságát a tribo-mechanikai tulajdonságok javításával kiszélesítendő. A grafitot megfelelő anyagnak találták, amely alacsonyabb fajlagos kopási rátát és alacsonyabb súrlódási tényezőt eredményezett.

Nirmal (2018) csapágyalkalmazások pin-on-disc vizsgálati eredményeit használta fel a szálerősítésű poliészter kompozit öregedése hatásának meghatározására a súrlódási együttható csökkentésére. Kiderült, hogy az alacsonyabb kinematikai viszkozitású öregedési oldatok alacsonyabb súrlódási együtthatót mutattak. A 3D-nyomtatott polimer kompozitok, nevezetesen az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) súrlódási és kopási reakcióját grafitporos kenőanyag jelenlétében Keshavamurthy és társai (Keshavamurthy et al., 2021) pin-on-disc berendezésen vizsgálták. Ők kimutatták, hogy az ABS mátrixban a grafit hozzáadásának eredményeként csökkent a súrlódási együttható. Időközben Mrówka és munkatársai (Mrówka et al., 2021) fémipari gyártási hulladékok töltőanyagként való felhasználásának súrlódási hatású jellemzését végezték el öntéssel előállított szilikon kompozitokban. A pin-on-disc vizsgálatok újra kimutatták, hogy a cinkhulladékok töltőanyagként való újrafelhasználásával csökkenthető a kopás és ezáltal a környezetszennyezés.

Még a mezőgazdasági rosthulladékok, mint például a kukorica-, a cukorszálak és a pálma rostjai is képesek növelni a súrlódási együtthatót, miközben csökkentik a kopást Bakry és társai (Bakry et al., 2013) vizsgálatai alapján, amelyeknek célja a kompozit alkatrészek környezetbarát súrlódási anyagokkal való helyettesítése volt fékbetétek és tengelykapcsolóbetétek esetében. Tamayo et al. (2021) részéről a fékbetétek kedvezőbb viselkedését sikerült előállítani a súrlódási együttható tekintetében úgy, hogy a kompozit fékanyagokhoz újrahasznosított, elhasználandó gumiabroncsok gumi részecskéit adták hozzá. A jobb tapadás fokozta a hosszú élettartam alatti kedvező viselkedést. Jubsilp és munkatársai (Jubsilp et al., 2021) megállapították, hogy az ultrafinom, teljesen vulkanizált akrilnitril-butadién gumirészecskék módosítják az azbesztmentes polibenzoxazin súrlódó kompozitok viselkedését, így a súrlódási tényező és a kopásállóság optimálisan javul, és a kompozit elfogadhatóvá válik az azbesztalapú súrlódó fékbetétek helyettesítő anyagaként. Mindezek alapján megállapítható, hogy az összetevők hatása a teljesítményre olyan komplex, hogy az optimális kompozit-összetétel elérése inkább művészet, mint tudomány (Kumar és Bijwe, 2010b). Mivel számos vizsgálati módszer létezik ebben az altémában, az összetevők tribológiai hatásai jól ismertek. Ezek szinergiája megnehezíti az optimális összetétel elérését.

Súrlódási együttható és kopási tényező vizsgálata, kopott felületek tulajdonságai és hatásaik

Senatore et al. (2011) az aktív rendszerek elmúlt években az autóiparban tapasztalt terjedése nyomán kezdtek fékek és tengelykapcsolótárcsák súrlódási együtthatójának vizsgálatával foglalkozni. Munkájuk a csúszási gyorsulás nem csekély befolyására mutatott rá (ld. 2.9. ábra) a száraz súrlódó rendszerekben.



2.9. ábra: Tengelykapcsoló súrlódó betétje súrlódási tényezőjének változása a csúszási sebesség függvényében eltérő csúszási gyorsulásokon (Senatore et. al., 2011)

A felületi érdesség a tribológiai rendszerek egyik meghatározó paramétere. Kubiak és társai (Kubiak et.al., 2010) megállapították, hogy a kezdeti felületi érdesség jelentősen befolyásolja a súrlódási együtthatót a részleges csúszás és a teljes csúszás közötti átmenetnél. Továbbá Fernandes és munkatársai (Fernandes et. al., 2016) módosított felületi érdességű öntött tárcsák hatását vizsgálták egy tengelykapcsolórendszer kopási rátájára és súrlódási együtthatójára (COF). Megállapították, hogy a sima felületű öntöttvas tárcsa csökkentette a kopási rátát, és hozzájárult a magasabb és stabilabb bejáratási szakaszhoz tartozó súrlódási együttható szinthez azáltal, hogy nem károsította a kialakult tribofilmekeket, és stabilabban tartotta azokat az érintkezési felületi feszültségek csökkenése miatt. A $p \cdot v$ -értékek (a felületi nyomás és a sebesség szorzata) módosítása az intenzív felhasználási körülmények felé befolyásolta a bejáratási COF-ingadozást. Az említett megközelítések mellett Abdullah és társai (Abdullah et. al., 2015) a felületi érdességnek a termoelasztikus viselkedésre gyakorolt hatását vizsgálták a keletkező hőn keresztül, és egy új, tengelyszimmetrikus végeeselemes modellt hoztak létre a tengelykapcsoló csúszási periódusának tanulmányozására, amelyben az általános síkfelületi modellek helyett tényleges felületi érdességet vettek figyelembe. Arra a következtetésre jutottak, hogy az érintkezési nyomás nagyságát és eloszlását nagymértékben befolyásolja az érintkező párok érdessége.

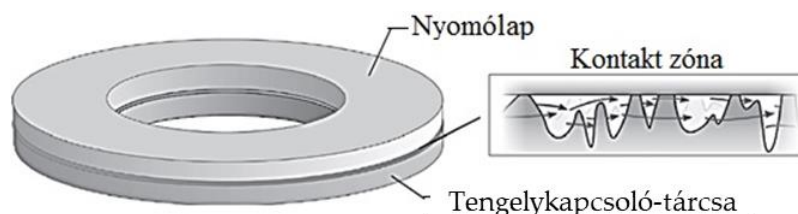
Súrlódó kapcsolat negatív következményei

A tengelykapcsolók betétjeinek fémtárcsák ellenében történő üzemszerű súrlódásánál tapasztalt zaj és mechanikai rezgések, rángatás oka a súrlódási tényező csúszási sebességtől való függése. Gyakran alakulhat ki „stick-slip”, azaz tapadásos csúszás. Ezeket a jelenségeket befolyásolja a súrlódó kompozit betét összetétele és felületi jellemzői, a nyomáseloszlás és a keletkező hő, valamint utóbbi lokalizáltsága. (Menday és Rahnejat, 2010)

A súrlódási együttható és a kopási tényező a súrlódó hibrid kompozitok tribológiai viselkedésének leírásához szükséges alapvető jellemzők. Vizsgálatuk összetett tudományos terület, amely magába foglalja az ezen jellemzőkkel kapcsolatos kutatásokat, illetve a *fading*-effektust és a harmadik test jelenségeket. Száraz súrlódó tengelykapcsoló betétje és a nyomólap közti súrlódó kapcsolat létrejötte közben, hasonlóan a szakirodalomban a fékekre széleskörűen kielemezett módon, részecsketranszport jön létre, a fiziko-kémiai folyamatok során egy „3. test réteg”, súrlódó film alakul ki, ami szintén befolyásolja a kopási mechanizmust és a kapcsolódó felületek geometriáját.

A harmadik test-áram jelenlétének a tengelykapcsoló rendszer teljesítményére kifejtett hatását Fernandes és munkatársai (Fernandes et.al., 2015) (Senatore-vel közösen) vizsgálta laboratóriumi körülmények között valós rendszerre jellemző terhelésekkel tű-tárcsa modell segítségével. A standard teszt-összeállítástól annyiban tértek el a kísérletek során, hogy tisztították a tárcsa felületét eltávolítva a képződő kopadékokat. Utóbbi csökkentette a kopási rátát. Ezt követte a felületek vizsgálata SEM segítségével. A kísérletek igazolták a tű-tárcsa („pin-on-disc”) módszer alkalmasságát a súrlódó film vizsgálatával kapcsolatban. Beigazolódott, hogy a tribológiai rendszert a képződő súrlódó film „irányítja”. A kopadék eltávolítással mért súrlódási tényező magasabbnak, a kopási tényező pedig alacsonyabbnak adódott.

A „fading” jelenség felel a gyors átvitt nyomatékvesztésért extrém hőterhelés esetén. Szinkronizáció alatt lép fel és elvileg nincs konkrét magyarázat a jelenségre. Akkor keletkezik, amikor a szerves összetevő elemeire bomlik folyékony és gáz halmazállapotú termékeket létrehozva (ld. 2.10. ábra). Két elképzelhető magyarázata a jelenségnek: az egyik szerint a megjelenő folyadék csökkenti a súrlódási tényezőt, a másik alapján a kialakuló gázpárna csökkenti a súrlódást. Egyéb megközelítések a termo-elasztikus instabilitást, a kopást és a kopadék súrlódó felületek közti hatását veszik alapul. (Fidlin et. al., 2015)



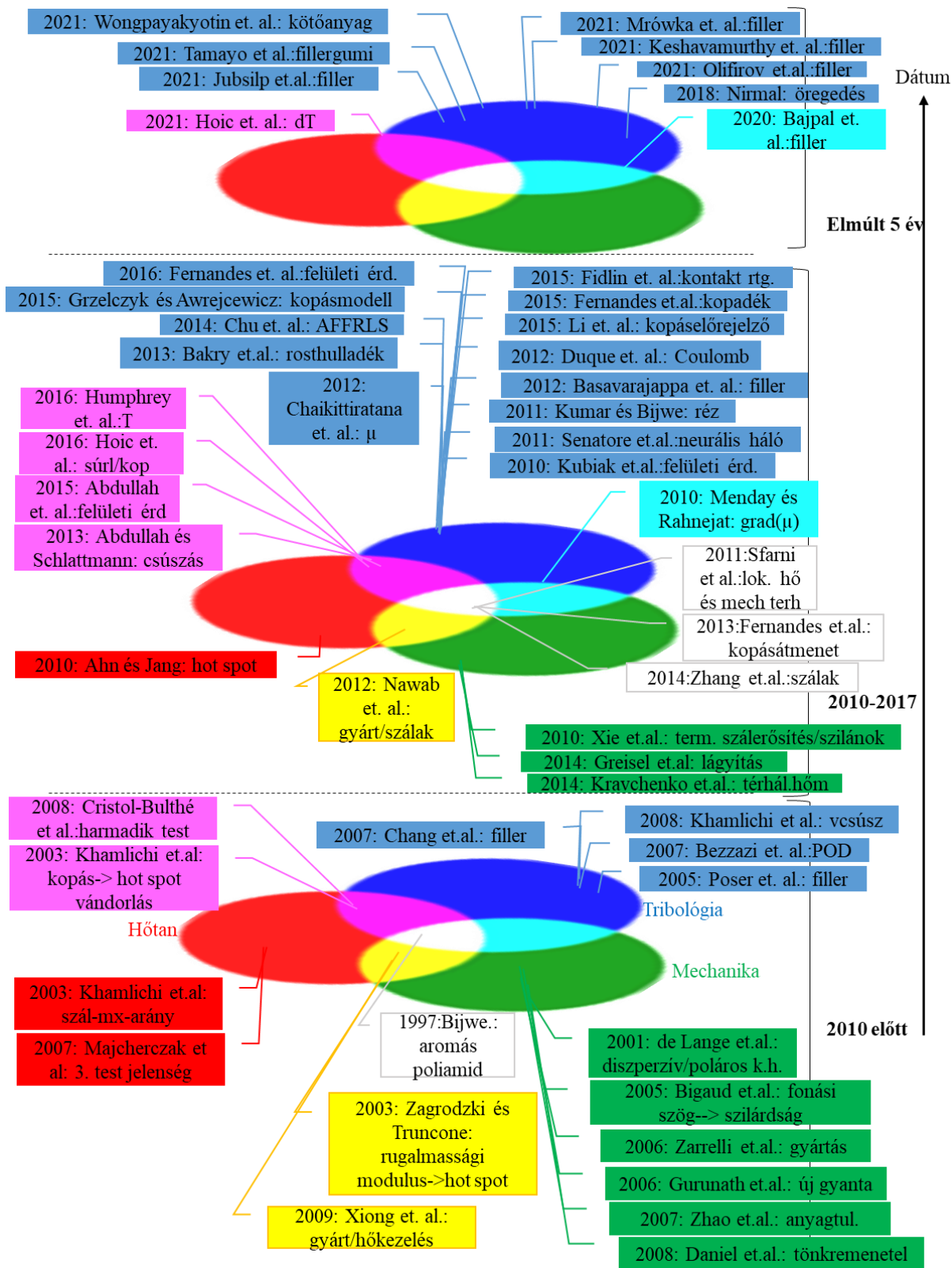
2.10. ábra: A nyomatékvesztés („fading”) jelenségének értelmezése (Fidlin et. al., 2015)

Fidlin és munkatársai (Fidlin et. al., 2015) célja egy olyan fizikai modell létrehozása volt, mely képes leírni és vizsgálni a gáz halmazállapotú részecskék kiválásának „fading”-re gyakorolt hatását száraz súrlódó tengelykapcsolók esetén. Kiindulásként a gázpárna és ezzel egy nyomásmező kialakulását feltételezi, úgy, hogy a nyomásmezőn kívül más nem befolyásolja az átvihető nyomatékot és a „fading”-et. A kopás és a kopadék transzport hatását elhanyagolták. Három modellszintet használtak: egyszerű forgásszimmetrikus modell (nyomásmező felvétele), tengelyhiba figyelembevétele (befolyásolja-e a nyomásmezőt), termoelasztikus nyomólap-deformáció figyelembevétele („recovery effect”). Az eredmények alapján a létrehozott modell képes volt szimulálni a jelenséget, a felület áteresztőképessége tűnt meghatározónak a „fading” szempontjából, méghozzá úgy, hogy minél nagyobb az áteresztő képesség, annál kevésbé jelentkezik a dekompozíció. Éles, valós gyártási körülmények közt nem igazolták a feltevéseiket a fázisátalakulással kapcsolatban.

2.4 A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

Összefoglalva, a tengelykapcsoló kompozit súrlódó anyagai a tengelykapcsoló-szerkezetekkel párhuzamosan fejlődtek az anyagipar olyan mérföldkövein keresztül, mint például a rugalmas gyanták felfedezése és felhasználása, a különböző erősítő szálakkal kapcsolatos fejlesztések, valamint a környezetvédelmi és egészségügyi szempontok, amelyek a mai korszerű alkalmazásokat eredményezték (Biczó et. al., 2016a). A terület nyitott kérdései még mindig a különböző körülmények közötti súrlódási viselkedés körül forognak, a kopási jellemző érzékenységgel, a termikus terhelésekkel és válaszokkal, sőt a gyártási lépésekkel együtt, a vetemedés, zsugorodás és maradó feszültségek, a különböző töltőanyagok hatásai, a gyártásból adódó problémák vagy a biológiailag lebomló anyagok meghatározása érdekében végzett vizsgálatokkal (Biczó et. al., 2016b).

Általában nehéz szétválasztani az anyagi összetevők és a gyártási paraméterek termikus, tribológiai és mechanikai hatását. E rendszerek összetett szinergiája határozza meg a tulajdonságokat. Ráadásul az alkatrészek tulajdonságai nem egyenesen arányosan hatnak a végső értékekre, mivel a kölcsönhatások veszik át a főszerepet a terhelés alatti viselkedés figyelembevételével.



2.11. ábra: Súrlódó kompozitok irodalmának téma szerinti megoszlása az idő függvényében

Bár a tengelykapcsolóban fellépő terheléseket eredetük és egymásra hatásuk, egymást gerjesztésük okán nehéz szétválasztani, a súrlódó betétek tudományával foglalkozó kutatók mégis törekednek egy-egy témakör köré csoportosítani munkájukat. A közelmúlt fejlesztési és kutatási irányvonalai közt kiemelkednek a mechanikai vizsgálatok, a hőtani elemzések és a tribológiai kutatások. A 2.11. ábra a súrlódó kompozitok irodalmának e három fő téma, a mechanika, a hőtan és a tribológia szerinti megoszlását mutatja az elmúlt közel 30 év során. A kezdeti, főleg az azbeszt helyettesítésére tett törekvések hajtotta mechanikai kutatások túlsúlyát a tribológiai modellek és végeselemes lehetőségek bővülésével az utóbbi 15 évben felváltották a pusztán tribológiai, vagy thermo-tribológiai kapcsolt elemzések. Az elmúlt években a hangsúly ismét eltolódott az egyetlen területre, jellemzően tribológiai teljesítményre koncentráló kutatások felé köszönhetően a környezettudatosság és újrahasznosíthatóság jegyében tett, új, kevésbé környezetkárosító anyagok használatára való törekvéseknek. A szárazon súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolótárcsa betétek szakirodalom így továbbra is számos ponton hiányos:

- Bár számos jelentős kutatás történt az anyagfejlesztés terén egy vagy két komponens módosításával, nincs általános komplex anyagmodell a hibrid súrlódó kompozit betétanyagokhoz, amely helyesen írná le a viselkedésüket (pl. a vizsgálati költségek csökkentése érdekében) elméleti úton, a kísérletekkel történő validálást megelőzően annak ellenére, hogy a mai fejlesztési trendek numerikus modelleket igényelnek a gyors és hatékony optimalizáláshoz (például a tesztelési költségek csökkentését szem előtt tartva),
- A felület morfológiája ezen anyagoknál szintén nem egy részleteiben körülírt terület. Különböző felületi érdességű ellentárcsák, vagy különböző kezdeti felületi érdességű súrlódó kompozitok kontaktja esetén nem állnak rendelkezésre fajlagos kopási együtthatók, súrlódási tényezők. Illetve a súrlódási életciklus állandósult állapotát és futási körülményeit a szakirodalom nem írja le jól, így a súrlódási rendszerek fejlesztése során pl. az alkalmazott biztonsági tényezők nem optimálisak.
- A kémiai reakciók, a fizikai változások és a felületi diszkontinuitások hatásai még nem tisztázottak, ami teret enged a további optimalizálásnak. Bár a TEI-t alaposan kutatták a szakemberek, az alkalmazott termikus tesztberendezések jellemzően a végállapotokat képesek vizsgálni, míg a köztes lépések és mechanizmusok csak becsülhetők. Ezenkívül a felületi tulajdonságokra és a morfológiára gyakorolt hatásokat nem vizsgálták mélyrehatóan. A felületi változásokkal járó súrlódást és kopást általában vizsgálatokkal írják le, és csak néhány végeselemes szimulációról számoltak be erről a területről. A végeselemes szoftverek képességeinek fejlődése lehetővé tette komplex modellek használatát a súrlódás, kopás vagy termikus szempontok leírására. Ezeket a modelleket elsősorban a rezgések és a termikus hatások leírására fejlesztették ki.
- A súrlódási együttható stabilitását és a polimer kompozit súrlódási anyagok kopásállóságát a mai tengelykapcsolók esetében a terhelésekből és a környezetből származó követelmények határozzák meg, ugyanúgy, mint az átmeneti mechanikai ütésekkel és a nagy forgási sebességgel szembeni szilárdságot, a deformálhatóságot és a hőállóságot a hőterhelésekkel szemben (Biczó et. al., 2020). Ezért a tribológiai kutatások gyakran részletezik az alkatrészek és a gyártási paraméterek hatását az anyag súrlódási tulajdonságaira.
- Például a súrlódási együtthatót és a kopást általában tű-tárcsa tesztberendezésekkel vizsgálják és értékelik. Továbbá a tribológiai viselkedést a súrlódási érintkezés káros hatásaival együtt gyakran empirikus vagy fizikai egyenleteken alapuló modellekkel írják le. A súrlódási érintkezés káros hatásainak, a beágyazódási jelenségeknek, a *fading*-effektusnak és a rázkódásnak az okait a szakirodalom jól leírja. A súrlódási anyag módosítása nem mindig akadályozza meg ezeket a jelenségeket; az érintkezési részek is befolyásolják az érintkezési modell létrehozására irányuló kísérleteket.

- A súrlódási együttható az egyik fő irányadó paraméter ezekben az érintkezési modellekben. Ez a paraméter nem csak egy tengelykapcsolás során változik a hőmérséklet stb. miatt, hanem a tengelykapcsoló élettartama alatt is, mivel a kopás és az alkalmazott energia hatása egyre jelentősebbé válik.
- Annak ellenére, hogy sok pin-on-disc vizsgálat foglalkozik az ilyen súrlódó betétek tribológiájával, ezek általában a gyártás utáni, előterhelés nélküli állapotról szolgáltatnak eredményeket. Az irodalom hiányos az élettartam alatti súrlódási jelenségek vizsgálata tekintetében. Különösen az autóiipari száraz tengelykapcsolókkal kapcsolatos vizsgálatokból hiányzik a valós életben vagy a teszt pályán való használat hatásainak vizsgálata a felület morfológiájára, a kopásra és a súrlódási együttható stabilitására tényleges járművekben, valamint ugyanazon anyag tribológiai teljesítményének összehasonlítása a súrlódó felület különböző előzetes felületi aktiválási energiaszintjei mellett.
- A súrlódás stabil („steady state”) és bejáratási („running in”) szakasza nincs részletekbe menően körülírva. Nincs adat kopási élettartam jelleggörbékről, a kezdeti felkeményedés okozta átalakulásokról.

Az 1.2. fejezetben közölt célkitűzésem a szakirodalmi hiányosságok fényében tehát indokoltak. A szakirodalmi áttekintést követően megfogalmazott kutatási céljaim 3 szakaszra bonthatók. Az első szakaszban munkám célja az adott paraméterekkel gyártott, szálerősítésű, szőtt, száraz súrlódó anyag mechanikai merevségi mátrixparamétereinek és hőtani tulajdonságainak meghatározásához szükséges vizsgálatok bemutatása. Az identifikációs erőfeszítések előtt álló kihívások feltárásával és megoldásával ez a tanulmány iránymutatásul szolgálhat a hasonló összetett anyagok anyagazonosítási módszereihez. A kísérleti eredmények bemeneti paramétereket szolgáltatnak a termomechanikai szimulációs érintkezési modell fejlesztéséhez.

A második szakasz a betétek tulajdonságaira és a terepen végzett vizsgálatok alatti tribológiai viselkedésre vonatkozó legújabb tesztjeinek eredményeit emeli ki. A harmadik szakaszban a cél a száraz súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolóbetétek tribológiai, élettartamra ható aspektusainak feltárása ellenőrzött, kontrollált energiaterhelések mellett, pin-on-disc tesztberendezésen, a súrlódási, kopási és felületi érdességi értékekre, a köztük lévő lehetséges összefüggésekre és egymásra gyakorolt hatásokra koncentrálni. A 3. szakasz bemutatja a súrlódási, kopási és felületi érdességi eredményeket a korábban vizsgált betétekből kivágott mintákon végzett laboratóriumi pin-on-disc vizsgálatok után, feltárva az élettartam alatti tribológiai teljesítményt.

Továbbá cél a száraz tengelykapcsoló végeselemes kontakt modelljének továbbfejlesztésével a súrlódó anyag élettartamának a száraz tengelykapcsoló tribológiára gyakorolt hatásainak lefedése. A cél a tribológiai tulajdonságok és tényezők alkalmazott energiafüggésének meghatározása.

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

Jelen fejezet a kutatómunka során alkalmazott berendezések és mérőrendszerek működését, valamint az adatok feldolgozása során alkalmazott módszereket, összefüggéseket ismerteti. A fejezet három részre osztva mutatja be előbb a termomechanikai anyagidentifikációs, majd a járműipari tribológiai, végül a laboratóriumi tribológiai vizsgálatokat és összefüggéseket.

Az azonos anyagösszetételű száraz súrlódású szálerősítéssel hibrid kompozit tengelykapcsolóbetéteket több kategóriában vizsgálom élettartam (használati ciklus: a betétet alkalmazó jármű által futott kilométerek) szerint csoportosítva. Technológiai modellekből kiindulva az egész betét szerkezetének viselkedésére koncentrálok, hiszen a tengelykapcsolószerkezet adott, akárcsak a struktúra.

A súrlódó anyagok tribológiai szempontjainak az élettartamuk alatt az erőátviteli rendszer tulajdonságaira gyakorolt hatásait egy termomechanikai kapcsolt érintkezési modellel lehet leképezni, mely alkalmas összetett terhelési esetek létrehozására. A termomechanikai modelleket általában a hőcsúcsok miatti átvihető nyomatékvesztés vizsgálatára használják, hogy összehasonlítható szimulációs adatokat szolgáltatassanak bizonyos vizsgálati (teszt-) eredményekkel. A figyelembe vett megfelelő szempontok körének kiszélesítésével és a szükséges vizsgálatok számának esetleges csökkentésével azonban költség- és időmegtakarítás érhető el. Ráadásul ezek a vizsgálatok általában a súrlódó felületek romlását vagy a súrlódó anyag tartós hibáit eredményezik növelve a hulladék mennyiségét.

A 3.1. ábra által bemutatott modellrendszer két szintre osztható: termomechanikai (1. modellszint) és további kapcsolt tribológiai (tribomechanikai) modell (2. modellszint).



3.1. ábra: A modell sematikus ábrája, amelyhez a bemenő paramétereket meg kell határozni.

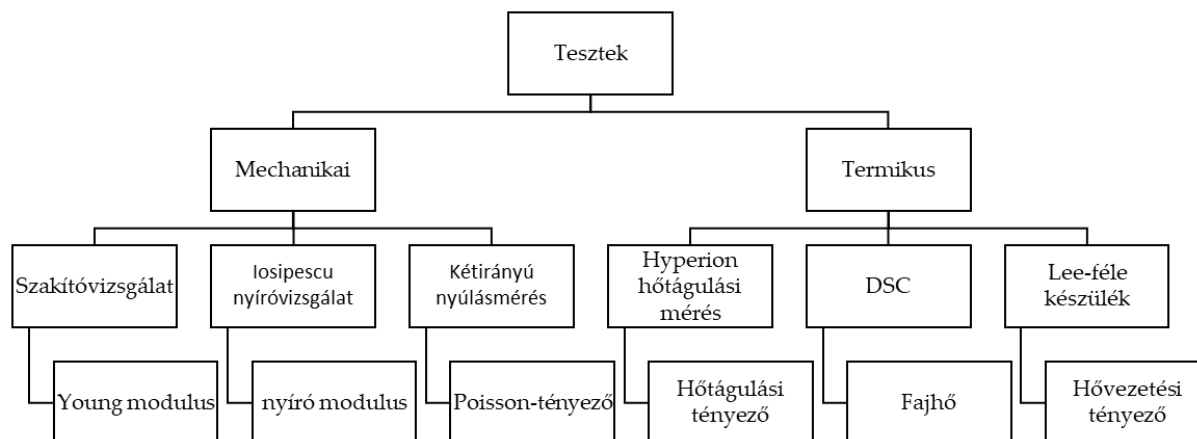
A vizsgált anyag egyrészt szálerősített kompozit, így tesztelése során figyelembe kell venni a tönkremeneteli módokat már a próbatestek kialakításánál, azaz külön elemzést igényel, hogy milyen lehetséges megmunkálási módok jöhetnek szóba a próbadarabok kialakításához. Másrészt egyes összetevői ipari titok részét képezik, így anyagösszetételi vizsgálatot igényelnek. Mindezen külön vizsgálatok eredményei azonban, noha szorosan kapcsolódnak hozzá, nem képezik a dolgozat fő célját, így ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra és nem az eredmények között.

A vizsgált anyag nem minden mechanikai vagy termikus tulajdonsága ismert, így első lépésként anyagidentifikációt (mechanikai és termikus) kell végezni minden egyes tulajdonságkategóriára. A hőtani tulajdonságok közül a hőtágulási, a hővezetési tényező és a fajhő kerülnek meghatározásra. Az anyagösszetételt is vizsgálat alá kell vetni a súrlódó felület paraméterei (a hőmérséklet, a csúszási sebesség, a felületre merőleges irányban vett kontakt nyomás, a felületi érdesség és az ellenfelület állapota) mellett. A felületi érdesség és az ellenfelület állapota állandóak a szakirodalmi kutatásokban. Ezek a vizsgálatok nagyrészt a súrlódási tényező csúszási sebesség- és hőmérsékletfüggését vizsgálják. (Khamlich, et al., 2008)

A tribológiai vizsgálatok során nyomon követem a tengelykapcsolóbetéten a súrlódás hatására létrejövő felületi jellemzők (mint felületi érdesség) változását az élettartam és a bejáratási szakaszok során eltérő üzemi körülmények (csúszási sebesség stb.) esetén tekintettel a transzportfolyamatok alakulásának a megértésére. A tribológiai méréseket támogató vizsgálatok kísérik: a felületanalízis segítségével az alkatrész viselkedésének és működésbeli igénybevételeinek, illetve a működést kísérő körülményeinek átfogó feltérképezése és megértése érdekében.

3.1 Mechanikai és hőtani modellalkotás

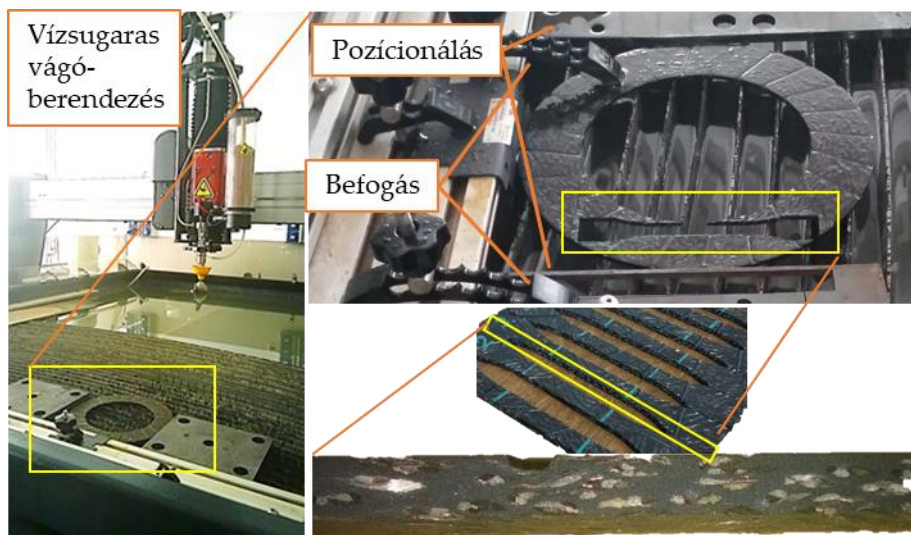
A mechanikai szempontú anyagi viselkedés jellemzése mellett a hőtani reakciókhoz termikus tulajdonságokra is szükség van. A 3.1. ábra által illusztrált modell méreteitől függően változik a szükséges paraméterek száma. A tengelykapcsoló rendszerben jelenlévő, megközelítőleg tengelyszimmetrikus geometriák esetén gyakran kétdimenziós (2D) modelleket használnak, bár ez jelentős mennyiségű egyszerűsítést is jelent a valósághoz képest. Például a súrlódó anyagok felületei élettartam alatti változásainak meghatározására alkalmatlanok a 2D-s egyszerűsítésekkel operáló modellek. Ezért háromdimenziós viselkedést leíró tulajdonságokat kell meghatározni. Mechanikai szempontból ez a különböző irányú rugalmassági és nyíró modulusok, valamint Poisson-tényezőt jelenti. Hőtanilag a különböző irányú hőtágulási tényezők, a hőmérséklet függvényében mért fajhő és a hővezetési tényező szükségesek, ahogy a 3.2. ábra mutatja.



3.2. ábra: Mechanikai és hőtani jellemzők a meghatározásukhoz szükséges vizsgálatokkal

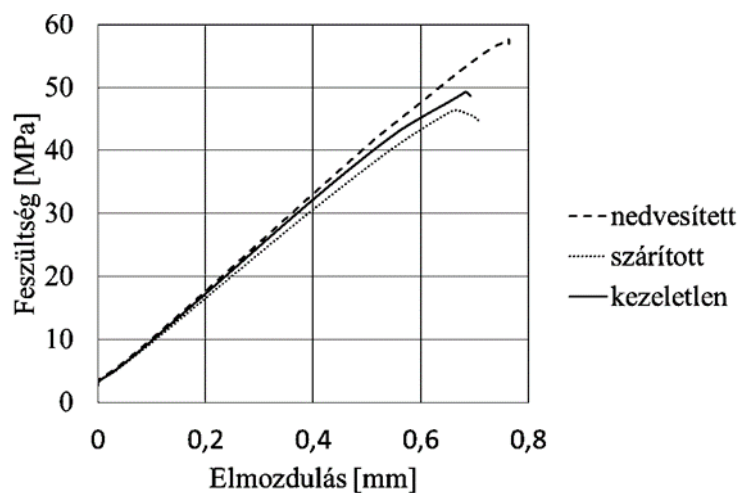
3.1.1 Próbatestek kialakítása, a megmunkálás hatásai

Az előző fejezetben bemutatott vizsgálatokhoz megfelelő próbatestekre van szükség. Ezek a próbatestek megbízható és pontos anyagleválasztást igényelnek, lévén a szálerősített kompozitok egyik tönkremeneteli formája a száلكihúzóadás, azaz az adhézió megszűnése az erősítő szálak és a mátrix között, és az olyan mechanikai megmunkálások, mint a fűrészelés, marás előidézhetik ezt, míg a lézerrel történő vágás az anyag gyúlékonysága miatt nem alkalmazható. Megoldást az abrázív vízszugaras vágás nyújt, ahol az anyageltávolítást a magas nyomású, nagy sebességű víz és a nagy sebességű, durva csiszolóanyag eróziója végzi (Relekar et al., 2015), ahogy a 3.3. ábra által bemutatott 1515 MAXIEM OMAX típusú berendezés esetén is. A megmunkálás nem generál hőt, kis erők ébrednek a megmunkált felületeken és tetszőleges kontúr kivágható. (Hoogstarte et al., 1997) A problémát a víz jelenléte okozhatja, - gondoljunk csak a reggeli, párás időben fellépő „hidegrángatására” a tengelykapcsolónak.



3.3. ábra: Az abrazív vízugaras vágóberendezés és a vágandó súrlódó betét a szorítóelemek közt, valamint a vágott él simasága

Mivel a szálerősítés orientációt ad a kompozit anyagnak, szabványos, DIN53455 szerinti szakítóvizsgálattal ellenőrizhető, hogy okoz-e mechanikai jellemzőkben módosulást a megmunkálás és annak körülményei, azaz a majdan kivágandó tribológiai próbatestek mechanikai szempontból egyezni fognak-e a vizsgálandó anyaggal. (Biczó et al., 2017)

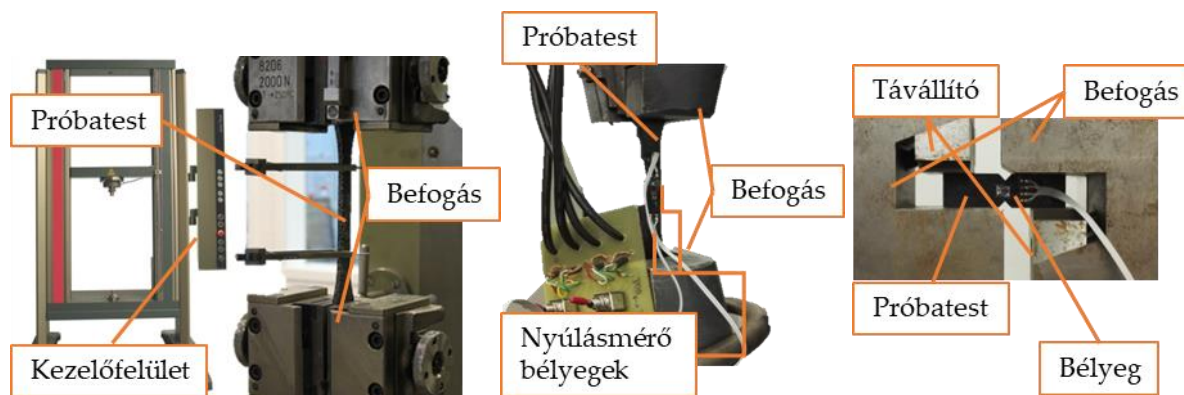


3.4. ábra: Nedvesítés hatásának vizsgálata

A víznek az anyag viselkedésére és tulajdonságaira való befolyását három, különböző nedvességi állapotban lévő, 1515 MAXIEM OMAX abrazív vízugaras vágóberendezéssel készült szakítópróbatétel-csoporton a DIN 53455 szerinti szakítóvizsgálattal vizsgáltam. Az első csoport próbatestjeit 15 percig 150°C-on száritottam, a második csoportba tartozókat 15 percig nedves textília között tartottam, míg a harmadik csoport a vízvágás után nem részesült további kezelésben. A 3.4. ábra eredményeiből jól látható, hogy a vágás utáni hozzáadott és elvont víz mennyisége nem változtatott a próbatestek mechanikai viselkedésén, így az abrazív vízugaras vágás alkalmazható próbatestek kialakítására. (Biczó et al., 2017)

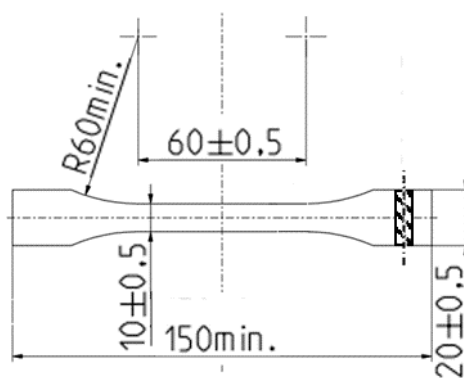
3.1.2 Mechanikai tulajdonságok meghatározása

Az alfejezet bevezetőjében ismertetett mechanikai mérések szakítógép segítségével elvégezhetőek. A mérendő paraméterek különbözősége követeli meg a különböző módszereket, próbatest-befogásokat és geometriákat, amiket a 3.5. ábra mutat be.



3.5. ábra: Bal: Zwick 10 kN-os kísérleti berendezés; középen: kétirányú nyúlásmérő berendezés; jobb oldal: Iosipescu nyíró vizsgálat.

A szakítóvizsgálattal általánosan az anyagra jellemző szakítószilárdság és rugalmassági modulus állapítható meg és lehetővé teszi a szakító-jelleggörbe pontonkénti digitalizálását, amit egy végeelem programba beolvasva biztosítja a készülő anyagmodell validálhatóságát.



3.6. ábra: A szakító próbatest méretei DIN 53455 szabvány alapján

A próbatest kontúrját a DIN 53455 szabvány alapján alakítottam ki. A szakító próbatest méreteit és a szakítógépbe történő próbatest-befogást a 3.6. ábra mutatja. A szakítóvizsgálat 724002 / 2015 szériaszámú Zwick 10 kN szakítógépen történik adott sebességen (5 mm/min) és terhelés (elért erőkülönbség 100 N) mellett. A rögzített adatok a kiinduló keresztmetszet (a befoglaló méretei által), a kiinduló hossz, annak változása, valamint a maximálisan mérhető erő. A rögzített adatokból az alábbi képletek segítségével számíthatók a rugalmassági modulus és a szakítószilárdság értékei:

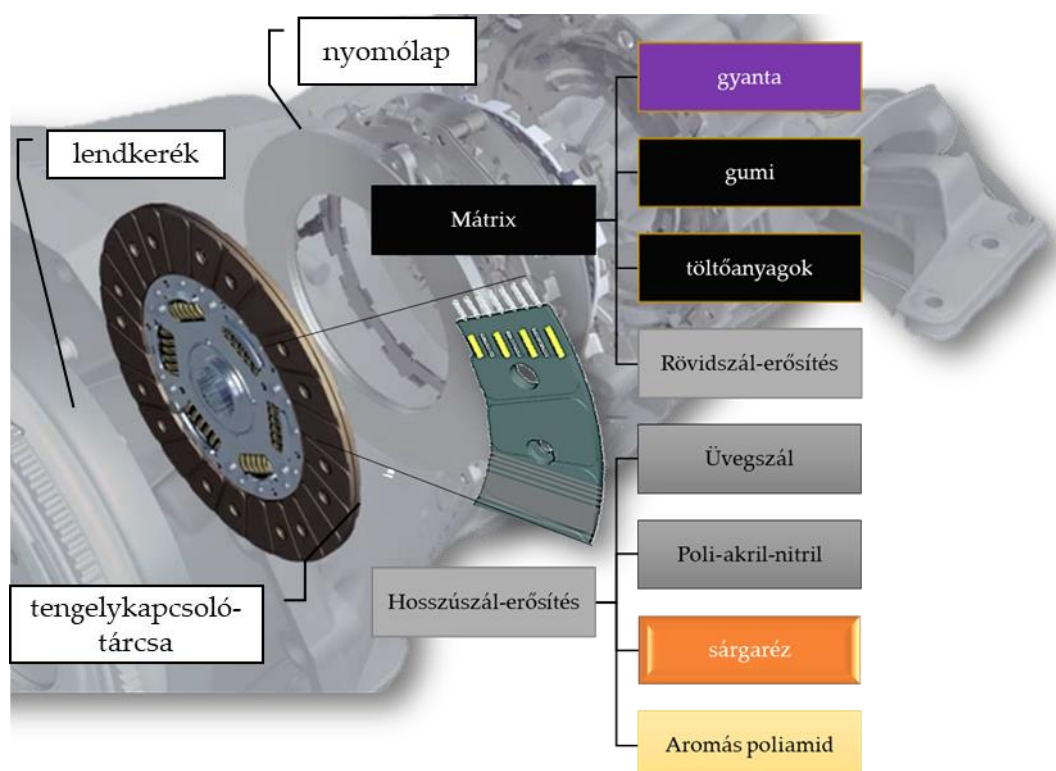
$$E = \frac{F_{\max} \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l}, \quad (3.1)$$

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}. \quad (3.2)$$

3.1.3 Mátrix és erősítőszálak szeparált mechanikai vizsgálata

Az átfogó szimulációs lehetőségek kialakításához ismerni szükséges az anyag különböző terhelésekre adott válaszát. Mechanikai szempontból tekintve szükség van egy merevségi mátrixra, mely kapcsolatot teremt a testre ható külső erők és a hatásukra létrejövő elmozdulások közt. Másrészt a szakító és hajlító vizsgálatokhoz a kész súrlódó betétekből kivágott próbatesteken elvégzett mérések esetén nem világos az anyag egyes komponenseinek a viselkedésre gyakorolt befolyása, nem különíthető el a szálorientáció vagy éppen az adhézió szerepe.

Nehézséget okoz azonban, hogy az általam vizsgált hibrid kompozit mátrixának pontos összetétele nem ismert, csak a struktúráért is felelős, hosszú erősítőszálak tulajdonságai. Ez a hiányosság azonban megkerülhető azzal az ötlettel, hogy külön csak mátrixból készült betétekből kivágott próbatesteket vizsgálunk.



3.7. ábra: A súrlódó betét kompozit anyagának két fő csoportja és komponenseik

A 3.7. ábra által vázolt módon a kompozit két fő egységre osztható, a hosszúszál-erősítést adó üvegszál, réz, aromás poliamid, valamint poli-akril-nitril fonatára és szálbevonatként jelen lévő mátrixra, mely feltételezhetően szintén egy kompozit, rövid szálerősítéssel, valamint filler anyagokkal, kénnel, fenol- és melamin gyantával az alkotók között. A két egység, vagy csoport mechanikai tulajdonságait meghatározva, majd bizonyos keverési szabályokat alkalmazva azokat újra egyesítve alkotható meg a súrlódó betétanyag merevségi mátrixa. (Biczó – Kalácska, 2019) A keverési szabályokkal alkotott mikromechanikai modellek közül a Halpin-Tsai (Halpin – Kardos, 1976) és a Chamis féle modell (Chamis, 1984) unidirekcionális kompozitok leírására használható, míg a Tsai-Pagano (Tsai – Pagano, 1968) modellel véletlen orientációjú erősítés vehető figyelembe. Khamlichi és társai nevéhez fűződik a koszorúfonással készült szálerősítéses kompozit erősítőszálai mozgáspályájának matematikai leírása. (Khamlichi et al., 2003)

A Tsai-Pagano egyenletek a következő formában írhatók fel:

$$E_{11}^* = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f, \quad (3.3)$$

$$E_{22}^* = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f - \sqrt{V_f}(E_f - E_m)}, \quad (3.4)$$

$$E = \frac{3}{8}E_{11}^* + \frac{5}{8}E_{22}^*, \quad (3.5)$$

$$G = \frac{1}{8}E_{11}^* + \frac{1}{4}E_{22}^*, \quad (3.6)$$

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.7)$$

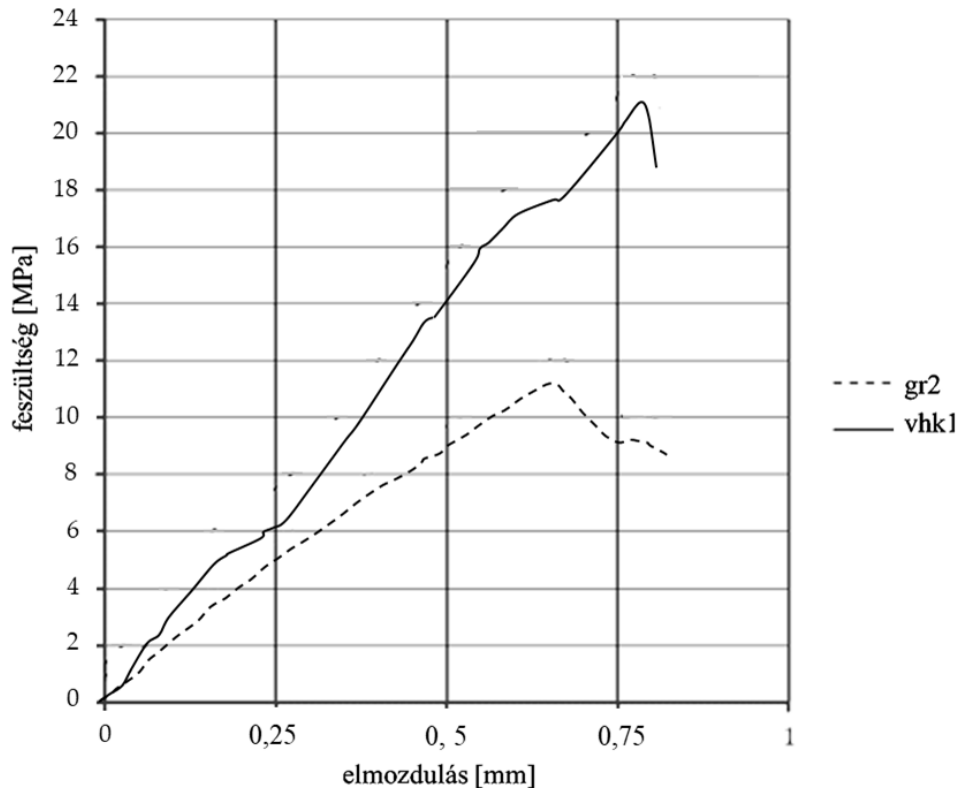
ahol:

- $E_m; V_m$ – a mátrix csoport rugalmassági modulusa és térfogata,
- $E_f; V_f$ – a szál erősítés csoport rugalmassági modulusa és térfogata,
- E_{11}^* – terheléssel egyirányú fiktív rugalmassági modulus,
- E_{22}^* – terhelés irányára merőleges fiktív rugalmassági modulus,
- E – effektív rugalmassági modulus,
- G – effektív csúsztató rugalmassági modulus,
- ν – effektív Poisson-tényező.

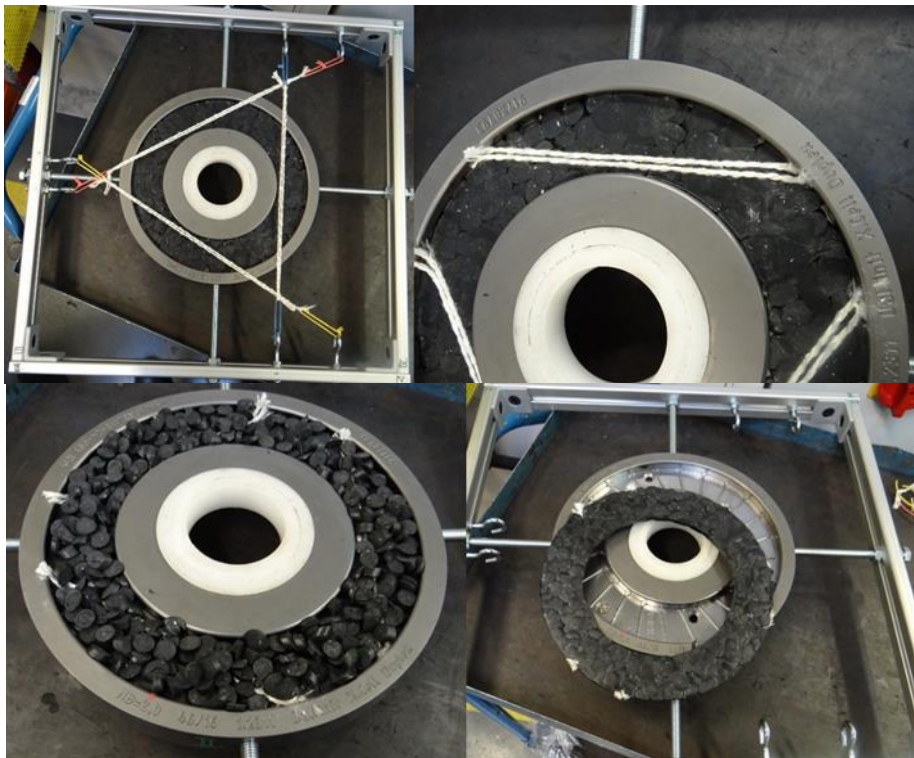
A betétgyártás során maga a mátrix granulátum formából kiindulva, extruderen keresztülvézetve kerül a különböző erősítőszálakból összefonott szál külső felületére, az így bevonatolt szálból koszorút fonnak, majd préseléssel történik meg egy köztes, félkész alakadás, elindítva a keresztkötések létrejöttét a mátrixban. Ha csak mátrixból készítünk betétet, vizsgálnunk kell az extrudálás okozta feltételezett mátrixanyagbeli átalakulások szerepét.

Ennek érdekében két különböző eljárással készültek a mátrix-betétek, melyekből a szakítóvizsgálathoz szükséges próbatesteket vágtam ki. Az egyik csoportba tartozók tehát pusztán szerszámfelekbe szórt granulátum összepréselésével készültek, míg a másik csoport extruderen keresztülvézetett granulátum, ún. virsli újbóli felaprításával és összepréselésével készült. (Biczó – Kalácska, 2018)

Ahogy a 3.8. ábra mutatja az extruderen keresztülvézetett mátrixanyagból készült betétből kivágott szakítópróbatestek (tréhalósítás extrúziót követően) (vhk1) szilárdsága jellemzően magasabb, mintegy kétszerese az azonos technológiával készült, extrudálás közbeni technikai lépés hatásait azonban nélkülöző próbatestek (tréhalósítás extrúzió nélkül) (gr2) szilárdságánál. Bár a mátrix anyaga nem ismert, kiinduló granulátum anyagának töretfelületén is jól látszik, hogy tartalmaz rövid szál erősítést, feltételezhetően több különböző szálanyagból. Az eredményből feltételezhető, hogy az extrudálás folyamata során ezek a rövid szálak bizonyos orientációt kapnak, ezáltal tovább erősítve a mátrix anyagát a vizsgált irányban



3.8. ábra: Extrudálás közben végbemenő folyamatok hatása a mátrix szilárdságára

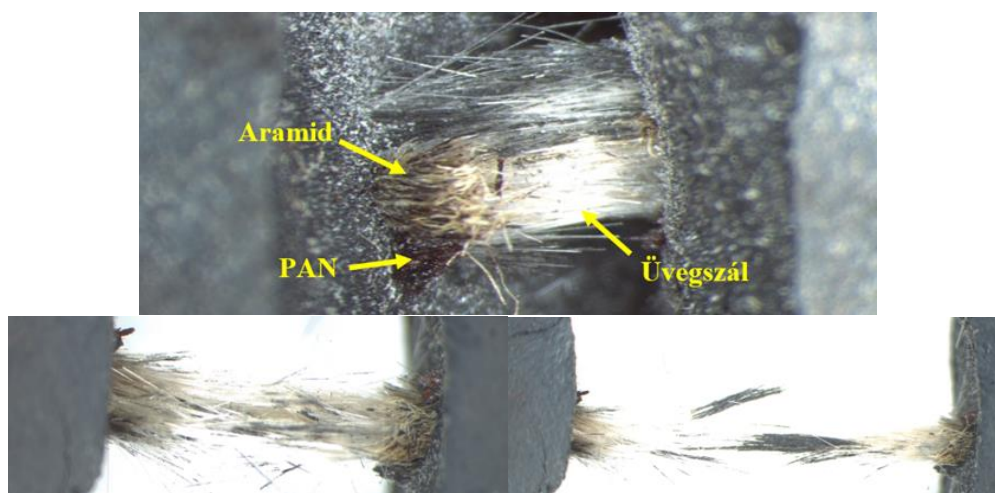


3.9. ábra: Egyedi, kötött technológiai folyamatba ágyazható, egyszál-erősítéses próbatestek létrehozására alkalmas módszer

A szál-mátrix adhézió meghatározásának egyik ismert és jól bevált módszere a csepplehúzás. Esetünkben azonban egyrészt nem hőre lágyuló mátrixszal van dolgunk, így az erősítőszálra történő cseppképzés nehézkes, másrészt a fent említett hőkezelések, mátrix-vulkanizáció hatása a

szálakra a szálak szakítószilárdságának akár 70%-os (aromás poliamid esetén) csökkenéséhez is vezethet, ha azok körül nincs mátrix, mely ilyen szempontból utóbbi védi is a szálakat a technológia által előírt, kötött hőkezelési ciklus alatt.

Megoldást egy egyedi módszer nyújthat: a technológia, azaz a gyártósor által előírt formákat és lépéseket megtartva kvázi egy hurkot generálva a gyártási folyamatba készítettem egyedileg mátrixba ágyazott hosszúszál-erősítésű próbatesteket a 3.9. ábra szerinti eljárással, majd ezeken elvégeztem a szakítóvizsgálatokat, ahol a tönkremenetel forrása a 3.10. ábra szerint az üvegszál szakadása. A szálak erősítő szerepének számszerűsítésére szálerősítés nélküli betéteket készítettem pusztán mátrix alapanyagból, melyeken húzó és nyomó vizsgálatok végezhetők a korábban felírt mátrix anyagjellemzők finomhangolásához. A fonattal erősített próbatestek szakítóvizsgálataiból kiindulva kijelenthető, hogy a tönkremenetel oka az üvegszálak egymáshoz képesti gyenge adhéziója.



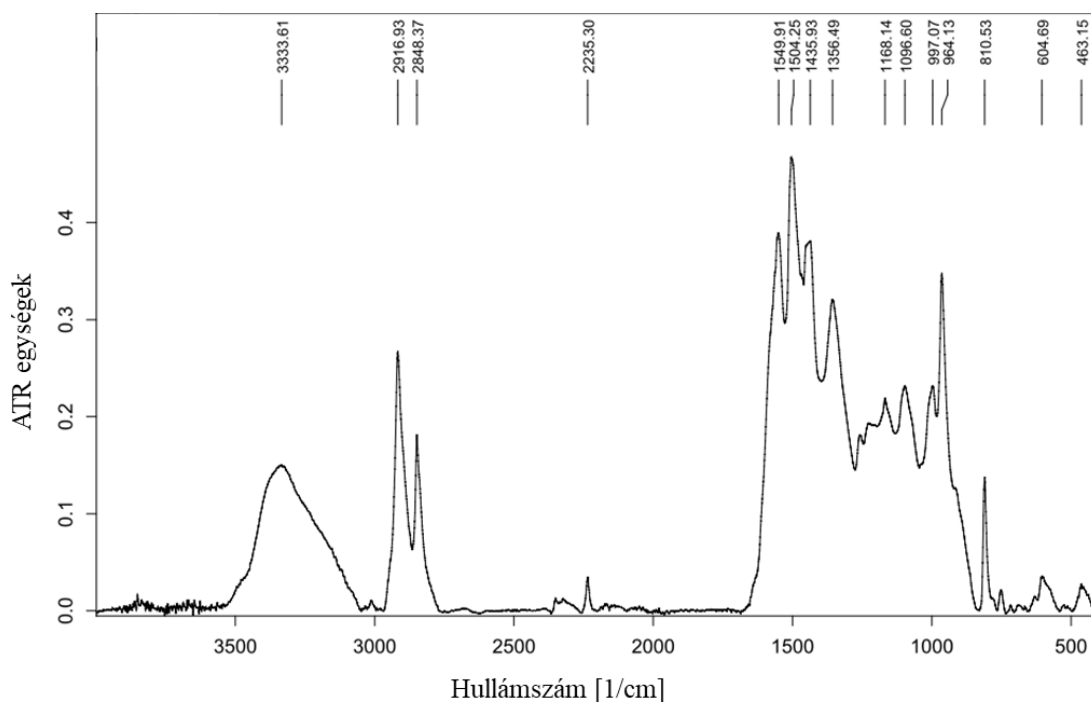
3.10. ábra: Több szálból képzett fonat-erősítésű próbatest tönkremenetele az üvegszál szakadásával

3.1.4 *Anyagösszetétel-vizsgálat a kompozit mátrixára*

A mátrix alapanyagául szolgáló, granulátum formátumú, ismeretlen összetételű, feltételezhetően rövidszál-erősítésű kompozit anyag összetételének meghatározására IR-spektrum elemzésre került sor. A 3.11. ábra segítségével megjelenített eredményekből a következők állapíthatók meg:

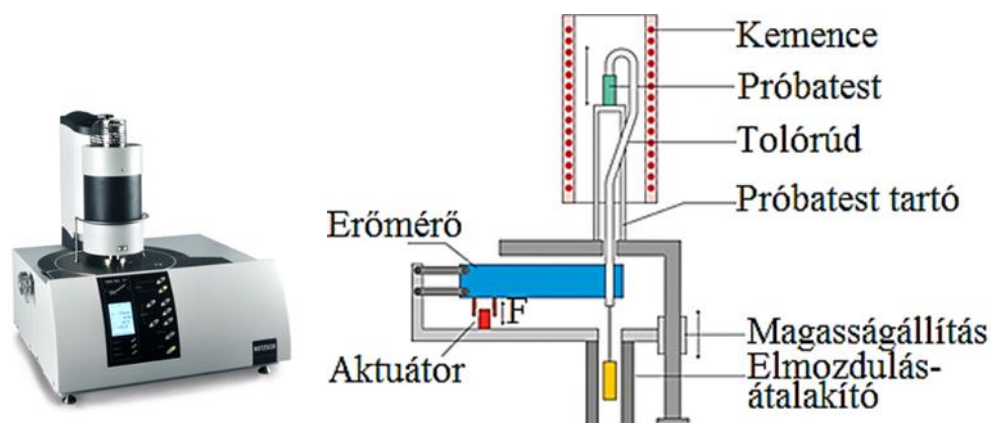
- 3000-3500 1/cm közötti széles csúcs -OH csoportra utal.
- A 3000 1/cm alatti csúcsok alifás C-H kötések jeleznek.
- Az 1550 1/cm körüli csúcs szintén ezt jelzi, illetve egyéb alifás kötések az ez alatti csúcsértékek.
- Karbonil, valamint aromás csoportokra jellemző csúcsok nem láthatók.

Ezek alapján poliészter alapú műgyanták nem valószínűsíthetők, hanem inkább főként epoxigyanták.



3.11. ábra: A mátrixanyag IR-spektróscópiai elemzésének eredménye

3.1.5 Hőtani tulajdonságok meghatározása

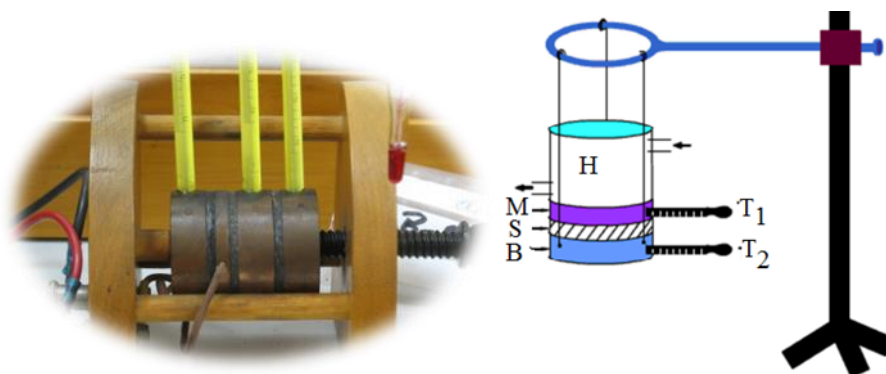


3.12. ábra: A NETZSCH TMA 402 F1 Hyperion® hőtágulási tényező mérésére is alkalmas berendezés és annak elemei

A hőtágulási tényező a geometria hőmérsékletváltozás hatására bekövetkező változásával (pl. hosszváltozás) számszerűsíthető. 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 3.12. ábra részletesen mutatja be a mérőeszköz elemeit, mellyel -150 °C és körülbelül 1000 °C közötti hőmérséklet-tartományban végezhető a mérések. A PC-vel és vezérlőelektronikával ellátott berendezés szoftverével kiértékelhető a hőtágulási tényező, a hőmérsékletcsúcsok, a sűrűség. A 7-11 mm hosszú próbadarabokat levegőn hevülnek 180 °C -ra 5 K/min sebességgel. A hőmérséklet függvényében ábrázolhatóvá válik a hőtágulás mértéke és a hőtágulási tényező értékének változása.

Egy rendszer hőkapacitása, azaz fajhője megadja, hogy mennyi hőt kell közölni a rendszerrel, hogy hőmérséklete egy kelvinnel emelkedjék. A fajhő kérdéses értékét a hőmérséklet függvényében a németországi morbach-i telephelyű Schaeffler Friction Products GmbH biztosította.

A hővezetési tényező azt a hőmennyiséget adja meg, amely az adott anyag egységnyi keresztmetszetén, egységnyi hőmérséklet-gradiens hatására időegység alatt áthalad. Az anyagra jellemző hővezetési tényező mérésére a németországi Schaeffler Friction Products GmbH morbach-i telephelyén került sor.



3.13. ábra: Lee-féle hővezetési mérőberendezés

A Lee –féle hővezetési mérőberendezés (3.13. ábra) állványán egy sárgaréz (B) tárcsa függ, melyen a vizsgált anyagból készült tárcsa (S) helyezkedik el, rajta pedig egy acél tárcsa (M) található. Felette egy hevítőkamra (H) van, melybe gőz vezethető be és ki. Állandósult állapotban T_1 és T_2 az acél és sárgaréz tárcsa hőmérséklete, így a vizsgált tárcsa két oldalán ezek a hőmérsékletek adottak, amiből a rajta átáramló hőmennyiség, ha a tárcsa vastagsága d , a keresztmetszet A :

$$Q_1 = \frac{\lambda \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{d}. \quad (3.8)$$

A sárgaréz hővesztesége a környezet felé, ha c a fajhője, dT/dt a hűlési ráta T_2 hőmérsékleten

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \left(\frac{dT}{dt}\right) \cdot T_2. \quad (3.9)$$

A hővezetési tényező így:

$$\lambda = \frac{m \cdot c \cdot \left(\frac{dT}{dt}\right) \cdot T_2}{A \cdot (T_1 - T_2)}. \quad (3.10)$$

3.2 Tribológiai modellezés

Kosteckij a tribológiai rendszereket olyan nyitott termodinamikai rendszereknek tekintette, amelyek képesek energiát és anyagot cserélni a környezetükkel. Két alapvető jelenséget tartott felelősnek a súrlódás esetén lejátszódó folyamatokért: az aktiválást (amikor a tribológiai rendszerekben lévő anyagok szabad energiája nő) és a passzíválást (amikor csökken). A tribológiai folyamatokat az aktivációs és passzívációs energia aránya és/vagy egyensúlya jellemzi. (Kosteckij, 1992)

Száraz súrlódású autóiipari tengelykapcsoló kapcsolása során, állandó súrlódást feltételezve, az ún. $p\nu$ -érték arányos a disszipált hőenergiával, amely a felületi aktiválási energia formájában átalakítja

a felületi mikrogeometriát, és a hőmérséklet-emelkedés és a felületi anyag átalakulásával összefüggő entrópiaváltozások mellett kopási jelenségekhez vezet (Ramalho és Miranda, 2006). A súrlódási teljesítményintenzitás fogalmát Matveesky (Matveesky, 1965) vezette be az egységnyi érintkezési felületre jutó disszipált energia formájában még az 1960-as években. Nem is olyan régen a súrlódási érintkezésekben fellépő határfelületi nyírási munkát Fouvry és társai vették figyelembe a bevonatok kopási sebességének és élettartamának számszerűsítésére transzponált helyi kopási energiaelemzéssel. (Fouvry et. al., 2003) A létrehozott újszerű jellemző, nevezetesen a kopási energia együttható, a kopás ésszerű számszerűsítéséhez vezetett, így lehetővé vált a vizsgált triborendszerek osztályozása. Ramalho és Miranda új, energetikai megközelítést vezetett be a kopási adatok analizálására, lehetővé téve a tribológiai anyagválasz jellemezhetőségét, és az élettartam előrejelzését (Ramalho és Miranda, 2006).

Vizsgálataimban arra törekedtem, hogy összehasonlítsam a felületi mikrogeometriai jellemzőket, a betétek vastagságvesztését (kopás, a súrlódó felület ellenállása stb.) és a szárazon súrlódó tengelykapcsoló betétjeinek tribológiai teljesítményét, amelyek különböző felületi aktivációs energiaértékekkel kerültek felhasználásra előzetes autóiipari tesztek során. A cél a tengelykapcsoló élettartama során a betétanyag tribológiai teljesítményének és viselkedésének előre jelezhetővé tétele.

3.2.1 Tesztpadi és valós beépítési környezetben történt vizsgálatok

A tengelykapcsolótárcsa és a súrlódó anyag követelményeknek való megfelelése különböző autóiipari tesztekkel igazolható. Ezeket a vizsgálatokat az autóiipari fejlesztési és tesztelési szokásjog szerint, különböző körülmények között végzik (lásd a 3.1. táblázatot). Az egyik ilyen vizsgálatot olyan próbapadon szokás végezni, amely laboratóriumi körülmények között olyan tribológiai körülményeket szimulál, mint amilyeneket a tengelykapcsoló egy autópályán közlekedő személygépkocsiban tapasztal: maximális gyorsítás utáni hosszú futás, hosszabb leállási idővel, hogy lehetővé váljon a lehülési szakaszok hatásainak vizsgálata. A teljes vizsgálati idő 60-70%-ában maximális gyorsítás történik; a teljes idő 30-40%-ában szimulálják az országúti vezetést, míg a teljes vizsgálati idő 1-2%-ában a tengelykapcsoló a hűtés érdekében üresjáratú körülmények közt van. A próbapadot úgy építik fel, hogy a tengelykapcsoló olyan lendkerékkel kapcsolódjon, amelynek tehetetlenségi nyomatéka megfelel az előírt úttípusokon való valós használat során alkalmazott energiaértékeknek. A többi vizsgálatot tesztjárművekkel végzik. Ezek közül kettő során átlagos vásárlók egy teljes éven keresztül vezetik az autókat utánfutóval vagy anélkül városban, gyakori váltásokkal magas futásteljesítmény-értékeket elérve. Egy másik vizsgálatot egy tesztpályán végzik hivatásos sofőrökkel, akik szándékosan teljes terhelés alatt, nagyszámú váltás mellett gyorsítanak, hogy hőcsúcsokat hozzanak létre. Két másik teszt célja, hogy utánfutóval vagy anélkül lejtőn való elindulás körülményeit rekonstruálja: a tengelykapcsoló sokszori ismételt kapcsolásával, csúsztatásával magas hőmérsékletet, például 300-400 °C-ot érnek el, miközben a jármű különböző szögű lejtőkön elindul felfelé. A 3.1. táblázat tartalmazza az egyik ilyen próbapad részletes leírását, valamint öt ilyen járművizsgálatot a száraz tengelykapcsoló betét minőségének biztosítására.

A szárazon súrlódó, szálerősítéses súrlódóbetétekkel ellátott egytárcsás kézi sebességváltó-tengelykapcsolókkal végzett előzetes vizsgálatok után a lendkerék felőli súrlódófelületekből mintákat vágtam ki, amelyeket tehát tribológiai szempontból vizsgáltam. Így változatos kezdeti maradó kopási körülményekkel rendelkeztek a mintadarabok, azaz tribológiaiailag különböző felületi viszonyokkal a változó, tesztekre jellemző élettartam-paraméterek függvényében. A vizsgálatok elnevezésére használt rövidítések a következők: T: próbapad, H: autópálya, V: jármű, C: város, VT: jármű + pótkocsi, R: tesztpálya, RS: tesztpálya + lejtőn elindulás).

3.1. táblázat Az autóiparban végzett vizsgálatok, amelyek a száraz tengelykapcsoló betét minőségét az élettartam során biztosítani hivatottak

Teszt	Eszköz	Helyszín	Gyorsítás	Hossz	Váltások	Körülmények	Sofőr
Tesztpad- Autópálya [TH]	Tesztpad	autópálya szimuláció labor	60–70% max. gyorsítás, 30–40% országúti, 1–2% állás				
Jármű városban [VC]	Jármű	város	átlagos	1 év	gyakori váltás	magas futás- teljesítmény	átlagos vásárló
Jármű+ pótkocsi- város [VTC]	Jármű+ pótkocsi	város	átlagos	1 év	gyakori váltás	magas futás- teljesítmény	átlagos vásárló
Jármű- tesztpálya [VR]	Jármű	tesztpálya	teljes terhelés alatti gyorsítás		gyakori váltás (2–6. sebesség)	max. fordulatszám, hőcsúcsok	hivatásos sofőr
Jármű+ pótkocsi- tesztpálya lejtővel [VTRS]	Jármű+ pótkocsi	tesztpálya + lejtőn elindulás	lejtőn való elindulás felmelegítési és hűlési szakasszal, pótkocsi, 1500–2800 1/perc			370 °C hőcsúcsok	
Jármű- tesztpálya lejtővel [VRS]	Jármű	tesztpálya+ lejtőn elindulás	lejtőn elindulás majd vízszintes haladás			300–400 °C	

A felületi aktivációs energia meghatározása ezekben a vizsgálatokban lehetőséget nyújt az intenzitás és a tribológiai hatások összehasonlítására és kiemelésére. A tengelykapcsoló pedál felengedésének ideje (t) alatt a hőmérséklet-emelkedéssel jelzett egyszeri bekapcsolás során disszipált energia az átadott tengelykapcsoló nyomaték (T_c , [Nm]) és a tengelykapcsoló felületek közötti forgási sebességkülönbség [ω_r , [rad/s]] függvénye, amint azt a (3.11) egyenlet (Cakmak és Kilic, 2017) mutatja:

$$E = \int_0^t T_c \cdot \omega_r(t) dt, \quad (3.11)$$

ahol a (3.12) egyenlet szerint az átvitt nyomaték a súrlódási felületek számának (z), a súrlódási együtthatónak (μ), a súrlódási sugárnak (R_m) és a szorítóerőnek (F_m) a függvénye:

$$T_c = z \cdot \mu \cdot F_m \cdot R_m. \quad (3.12)$$

A tengelykapcsoló hőterhelése a (3.13) egyenlet szerint számítható (Keck, 1982):

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{r_{\text{dyn}}}{i_{1\text{stgear}} \cdot i_{\text{diff}}} \right)^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{\text{eng}})^2 \cdot \frac{1}{1 - \frac{T_{\text{drag}}}{T_{\text{engmax}} \cdot \chi}}, \quad (3.13)$$

ahol r_{dyn} a dinamikus sűrűdési sugár, $i_{1\text{stgear}}$ az első sebességfokozati, i_{diff} a differenciál-áttétel, n_{eng} a motor fordulatszáma, T_{engmax} a motor maximális nyomatéka, χ a motortípustól függő nyomatéktényező és a T_{drag} ellenállási nyomaték a jármű tömegének függvénye.


Egy adott dízelmotoros személygépkocsi esetében, amelynek össztömege ~1300 kg, kézi sebességváltója 4,23-as első sebességfokozati és 3,46-os differenciál-áttételű, Ø228/Ø160 mm-es külső/belső átmérőjű tengelykapcsolót működtetve, a különböző körülmények között és az előírt járműipari tesztek úgymond építőelemeként a 3.2. táblázatban szereplő energiaértékeket kell alkalmazni. Ezek az energiaértékek arányosak a különböző kapcsolási profilokat leíró p_v -értékkel (Ramalho és Miranda, 2006).

3.2. táblázat Energia a különböző működtetési profilok során: számított átlagos alkalmazott energia sebességváltásonként

Eszköz	Kapcsolási profil	Város	Város+ lejtő	Országút	Autó- pálya	Közl. dugó	Indulás 12%-os lejtőn	Indulás 16% lejtőn	Indulás 20% lejtőn
Jármű	Indulás motor- fordulat- szám [1/perc]	1400	1400	1400	1400	2000	1500	1600	1900
	energia [kJ]	4,9	4,9	4,9	4,9	10,6	11,3	16,8	23,8
	Felváltás energia [kJ]	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–	–
	Leváltás energia [kJ]	0,8	0,8	0,8	0,8	–	–	–	–
Jármű + pót- kocsi	Indulás motor- fordulat- szám [1/perc]	1400	1400	1400	1400	2000	2000	–	–
	energia [kJ]	4,9	4,9	4,9	4,9	10,6	23,6	–	–
	Felváltás energia [kJ]	0,2	0,2	0,2	0,2	–	–	–	–
	Leváltás energia [kJ]	0,8	0,8	0,8	0,8	–	–	–	–

A fent leírt tesztek során azonban számos kapcsolás történt, és számos tesztet ismételt ciklusokban, a 3.2. táblázatban szereplőktől eltérő blokkokkal végeztek. Ezért más alapvető mennyiségi paraméterekre is szükség volt ahhoz, hogy a különböző használati profilokat kategorizálni lehessen. Az egyik ilyen alapvető paraméter a vizsgálat során kilométerenként alkalmazott váltások száma. Ez az érték egyenlő azzal, hogy hányszor következik be a lendkerék és a nyomólap közötti kapcsolás. Az autópályán végzett tesztek során ez a szám 0,7 volt kilométerenként, az országúti használat során 5-7 váltás történt kilométerenként, míg a városban volt a legmagasabb ez az érték: 18-27. A lejtőn való elindulást is tartalmazó tesztek során azonban több mint száz kapcsolás történt.

3.3. táblázat Az előzetes, járműipari vizsgálatok intenzitási skálája az átlagos felületi aktivációs energia alapján, felületegységenként és kilométerenként

Teszt kód	TH	VRS	VRTS	VC	VTC	VR
[J/km/cm ²]	6,6	25	55	120	152	170
Tesztintenzitás						

Ennek alapján az előzetes vizsgálatok intenzitási skálája a következő: TH-VRS-VRTS-VC-VTC-VR.

A futásteljesítményt, azaz a megtett kilométerek számát figyelembe véve kiszámítható a teljes közölt energia. A különböző méretű, szárazon súrlódó szálerősített tengelykapcsolóbetétek – amelyekből a laboratóriumi pin-on-disc tesztmintákat vágtam – előzetesen a 3.1. táblázatban bemutatott mátrix szerinti terheléseken estek át. Ez a mátrix tulajdonképpen egy koordináta-rendszer, amelynek tengelyei a meghatározott előzetes vizsgálati intenzitás és a futásteljesítmény. A próbatesteket a mátrixban elfoglalt terhelési helyzetük szerint kódoltam az alábbiak szerint: A futásteljesítmény-értékek 1000 km-nek felelnek meg (dupla 0 0,0x-nek értendő), a méretértékek pedig S: Ø228/Ø160 mm; M: Ø240/Ø160 mm; L: Ø240/Ø155 mm, mint külső és belső átmérő méretek. Ugyanazon a vizsgálati kategórián belül a nagyobb átmérőjű tengelykapcsoló betétek valamivel nagyobb szorítóerejű alkalmazásokban kerültek felhasználásra az előzetes járműipari tesztek során, ezért az átmérő sorrendjében ábrázoltam őket az intenzitás mentén.

3.4. táblázat Autóipari tesztek mátrixa: vizsgálati minták a kilométer- és a tesztintenzitás tengelyek mentén (a használt betéteket a Schaeffler biztosította)

Minták járműipari tesztekéből				Futásteljesítmény [1000 km]												
Teszt	Betétméret															
Kód	Teszt-intenzitás [J/km/cm ²]	Átmérők Külső/Belső [mm]	Vastagság [mm]	0,006	0,5	0,8	15	39	45	50	52	53	56	102,9	150	
VRS	6.6	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														
VTRS	25	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														
TH	55	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														
VC	120	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														
VTC	128	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														
VR	170	228/160	3,5													
		240/160	3,8													
		240/155														

A futásteljesítmény a járműalkatrészek élettartamának jelölésére szolgáló általános paraméter. Ezt megszorozva a tesztintenzitással és a felületi aktivációs energia értékével, a teljes felületi aktivációs energia (ΣE) kiszámítható minden vizsgált mintára.

3.2.2 Laboratóriumi tű-tárcsa vizsgálatok

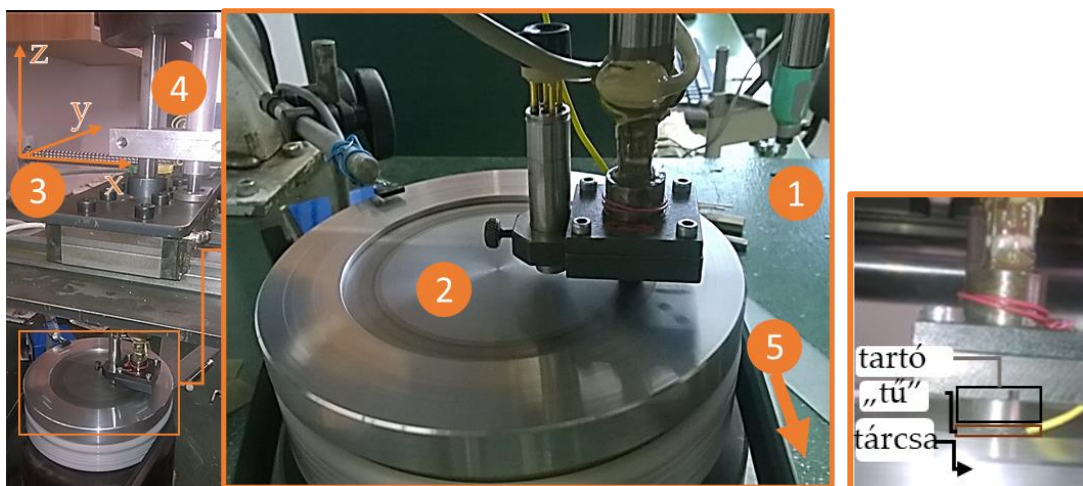
A tű-tárcsa rendszer jellemzője a folyamatos csúszósúrlódás amely az elfordulásmentesen rögzített $\varnothing 7$ mm átmérőjű korong alakú betét próbatest homlokfelülete és a GG25 öntöttvas ellentárcsa között jön létre. A kompozit/fém tribológiai rendszer kenés nélkül, adhéziós körülmények közt működik.

A tribológiai vizsgálatok célja *pin-on-disc* tesztek segítségével, hogy bizonyos *pv*-szinteknek a száraz súrlódású hibrid kompozit tengelykapcsolóbetét felületi mikrogeometriájára, kopására és súrlódási együtthatójára gyakorolt hatása értékelhető legyen. A referenciaértékek biztosítása érdekében úgynevezett tű próbatesteket vágtam ki azokból a betétekből, amelyek az előzetes, valós jármű és próbapadi vizsgálati körülményeknek megfelelő teszteken estek át, valamint a gyártásból frissen kikerült betétekből abrazív vízsugaras vágással. Amint a 3.14. ábra mutatja, ez a módszer lehetővé tette, hogy pontosan vágott $\varnothing 7$ mm átmérőjű mintákat használjak. Ezeket aztán univerzális pillanatragasztóval fém "tartócsapokra" ragasztottam, hogy a tribo készülékre rögzíthessem őket.



3.14. ábra: A betétből kivágott és a rögzítéshez fém tartócsapokra ragasztott minták

A 3.15. ábra a vizsgálati rendszer fő egységeit mutatja: (1) asztal; (2) tárcsa; (3) pozicionáló rendszer; (4) holt tömeg, mint normál irányú terhelés; (5) a tárcsát forgató, sebességbeállító villanymotor (csak a szíjhajtás látható).



3.15. ábra: A tű-tárcsa tesztrendszer fő egységei

A tribológia tesztek során a vizsgálati paraméterek a csúszási sebesség és időtartam, a normál terhelés, a súrlódási sugár, a tárcsa felületi érdessége, a környezeti hőmérséklet és a relatív páratartalom. A várt eredmények a dinamikai súrlódási együttható és a kopás a próbatesttartó függőleges elmozdulásaként, a próbatest deformációjának elhanyagolása mellett.

A GG25 tárcsa felületi érdességét Mitutoyo SJ-201P mérőműszerrel értékeltem ki. Az értékek az R_a 4-7 μm közötti tartományban kell lennie minden tesztfutás során, mivel ez a lendkerék súrlódó felületének gyártási értéke.

Az állandó sebességet különböző mérések összehasonlíthatósága céljából a különböző súrlódási sugarakhoz megfelelően választott fordulatszámmal érhetjük el. A fordulatszám meghatározása: Különböző súrlódási sugáron végzett mérések (jelölje 1-es és 2-es index) során a vizsgálati sebesség állandó, $v_1 = v_2 = \text{áll.}$ Egyenletes körmozgás esetén, ha r a súrlódási sugár, n a tárcsa fordulatszáma, akkor a kerületi sebesség:

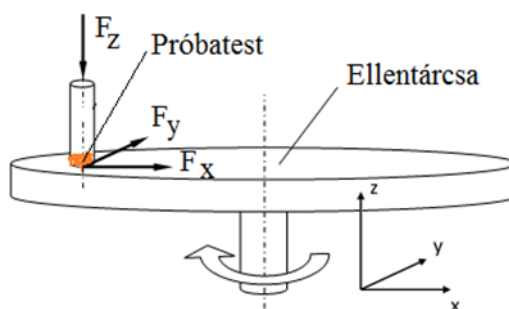
$$v = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n. \quad (3.14)$$

A két helyen a sebesség egyenlőségéből írható, hogy

$$n_2 = \frac{r_1}{r_2} \cdot n_1. \quad (3.15)$$

Tehát a fordulatszámot ezen összefüggés szerint kell változtatni. A forgási sebesség minimális értéke 120 1/min, maximális értéke 240 1/min. A súrlódási sugarak 20 mm és 40 mm voltak. Ezért a számított csúszási sebességértékek 0,5 vagy 1 m/s. A normál terhelést a készülékre erősített holtteher szolgáltatta, amely 31 és 68 N erőterhelést (F_n) eredményezett. A megadott paraméterekből három p_v -szintet állítottam be, nevezetesen a minimális, $\sim 0,4 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, a közepes, $\sim 0,9 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ és a maximális, $\sim 1,8 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ szintek.

Amint a 3.16. ábra mutatja, az F_s súrlódási erő a súrlódó felülettel párhuzamosan emelkedik, míg az $F_n = F_z$ normál erő hat. F_x és F_y a súrlódó felülettel párhuzamos erőkomponensek.



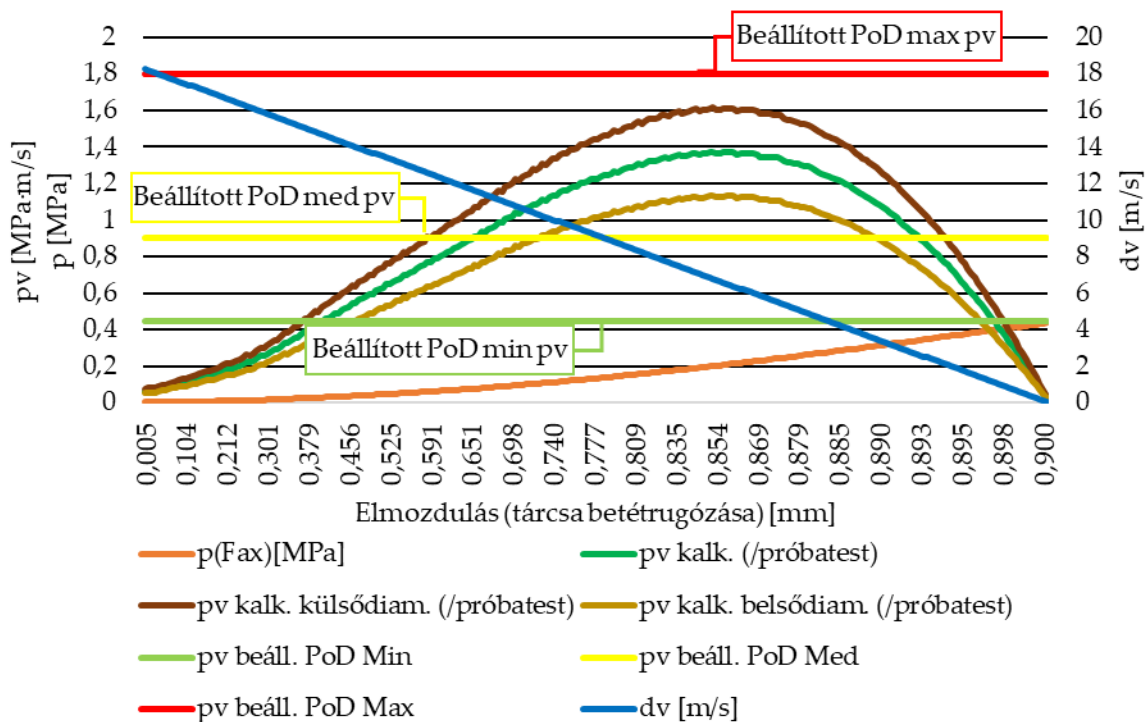
3.16. ábra: A tú-tárcsa rendszer vázlatja és a próbatestre ható erők

Ezért a dinamikus súrlódási együtthatókat a (3.16) egyenlet szerint határoztam meg:

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z}. \quad (3.16)$$

Mivel nyomatékátviteli rendszerről van szó, a működtetés során a tengelykapcsolónak el kell érnie egy bizonyos szinkronizált forgási sebességet, hogy a terhelést teljes mértékben át tudja adni a hajtóműtől az erőátvitel felé. E nyomatékfelépítési fázisban, amint azt a 3.17. ábra grafikonja szemlélteti, a tengelykapcsoló betétjének súrlódási sugarára ható terhelést leíró, számított p_v -szám az érintkező párok közötti csökkenő sebességkülönbség (dv) (a lendkerék motortengelysebessége a tengelykapcsoló betét növekvő sebességével szemben) és a betétre ható növekvő nyomóterhelés

(p) szorzata, a tárcsa betétrugózása, mint elmozdulás mentén. Az ábrázolt egyszerűsített helyzet azt feltételezi, hogy az erőátviteli tengely állandó gyorsulása esetén a tengelykapcsoló tárcsa egy olyan gépjármű-erőátviteli rendszerhez csatlakozik, amely Ø228/Ø160 mm (külső/belső) átmérőjű súrlódó betéttel és 1800 fordulat/perc motorfordulatszámmal rendelkezik a működtetés kezdetén. A p_v -értékek átmérőtől való függése is látható, valamint a pin-on-disc (PoD) berendezésen végzett mérésekhez kiválasztott minimális, közepes és maximális p_v -értékek is.



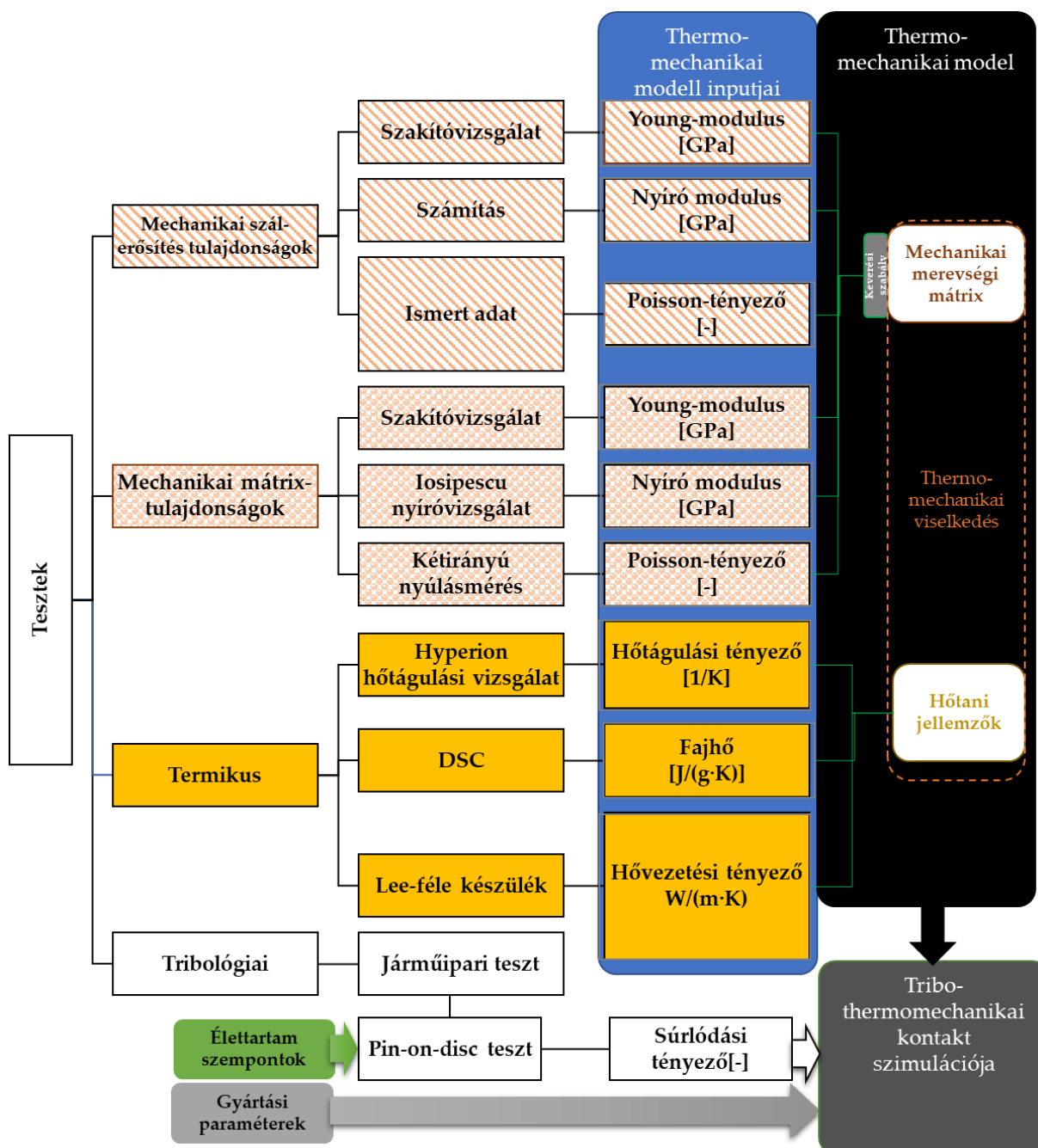
3.17. ábra: Példa a számított p_v -érték változására a tengelykapcsoló működtetése során a tengelykapcsolótárcsa betétrugózása mentén, valamint a három beállított p_v -érték a tú-tárcsa vizsgálathoz

Amint azt a 3.4. táblázat részletezi, a minták különböznek a betétgeometria (átmérő és vastagság), a konkrét átmérő, amelyből kivágásra kerültek, és a felületi aktivációs energiájuk szempontjából, ami a különböző tesztípusoknak (a működtetés intenzitása, a járművezető profilja stb.) és a járművek –, amelyekbe beépítették őket– által megtett kilométereknek köszönhető.

A betétátmérő mentén nemcsak a nyomás, hanem a hőmérséklet eloszlása is változik, amint arról Meng és Xi számítások és hőmérséklet-érzékelő technológia alkalmazása után beszámolt (Meng és Xi, 2021). Ez magyarázza a két különböző átmérőt – az ún. súrlódási és a belső átmérőt –, amelyekből a minták kivágásra kerültek. A tengelykapcsoló élettartama alatt a maradó deformációk és a kopás miatt a párhuzamos felületek ideális, kezdeti párhuzamos helyzete is megváltozik, és a belső átmérőnél nagyobb kopási értékek várhatók, miután jelentős mennyiségű aktivációs energia kerül bevitelre.

3.3 Az eredmények felhasználása a súrlódó tengelykapcsoló kontaktmodelljében

A dolgozat végső célja a vizsgálatok eredményei alapján felállított termomechanikai kontaktmodellje a szárazon súrlódó, szálerősített, jármű tengelykapcsolónak. A modell paramétereit és létrehozásához szükséges adatokat és tesztek a 3.18. ábra illusztrálja. Az eljárás, mint módszertan alkalmazható hasonló szálerősített hibrid kompozit anyagok hasonló modelljének megalkotására.



3.18. ábra: A tribo-thermomechanikai kontakmodellhez szükséges paraméterek és tesztek

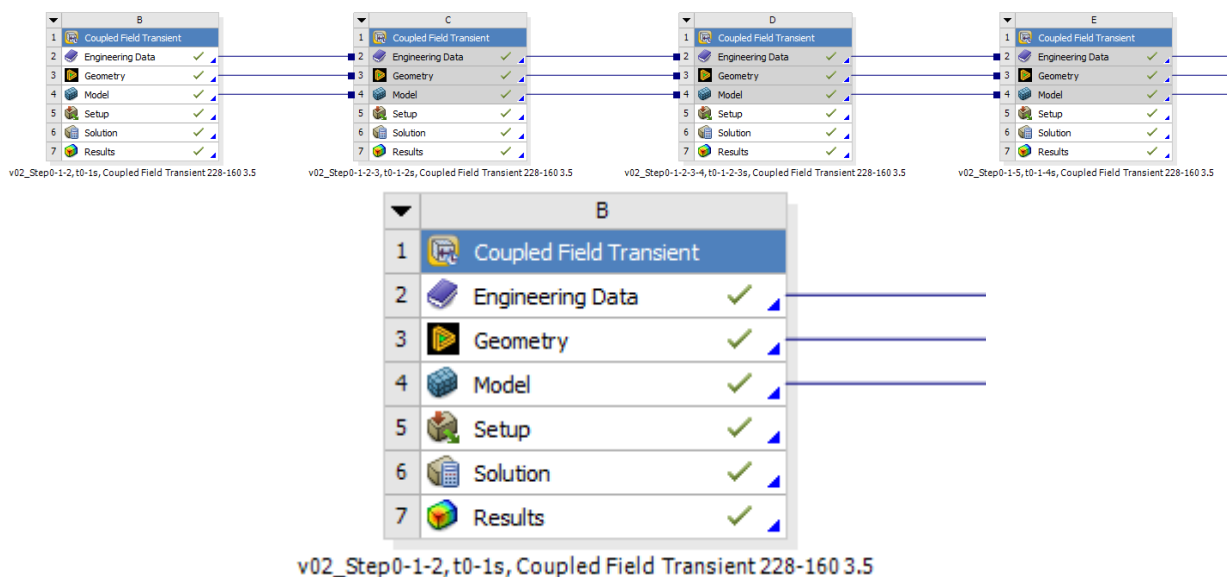
3.4 A modellezéshez használt szoftver és modellezési elvek ismertetése

3.4.1 Szoftverkörnyezet

A végeelemes modellezéshez az Ansys Workbench 18.2 illetve 2021 R2 verzióját használtam. Utóbbi által biztosított környezetben már kapcsolt elemzésekre is lehetőség van, ami azt jelenti, hogy különböző típusú (pl. hőtani és mechanikai) terhelések hatása egy modellen belül vizsgálható. A felhasznált anyagmodell a mechanikai és hőtani vizsgálataimból meghatározott thermo-mechanikai paraméterhalmaz. A pusztán mechanikai szimuláció eredménye a feszültség és deformációértékek, a kapcsolt elemzés hőeloszlást, hőterhelés hatására keletkező kontakt nyomást és erőt is számol, így a súrlódási tényező kiszámítható.

3.4.2 Tranziens folyamatok modellezése

A tengelykapcsoló kapcsolási folyamatának szimulálásakor figyelembe kell venni, hogy folyamatosan változó terhelés éri a súrlódó felületet a kapcsolat felépülésekor. A kapcsolt szimuláció időfüggősége azonban modellezhető egymásra épülő, másodpercenkénti terhelési pillanatok szimulálásával. Erre mutat példát a 3.19. ábra egy 9 s hosszúságú tengelykapcsoló-kapcsolás szimuláció Workbench-beli felépítésével.



3.19. ábra: Kapcsolt mechanikai-hőtani szimulációs modell felépítése Ansys Workbench-ben

3.5 Kiértékelési módszerek

A mérési adatok eredményeit táblázatok és diagramok segítségével mutatom be, a mért- és számított jellemzők a mellékletben is megtalálhatók.

A közölt mérési eredmények több ismétlés átlagértékeként értendők, így azokhoz mindig meghatároztam a szórást is a szórásnégyzetből a következő képlet alapján

$$s_k^2 = \frac{\sum_{j=1}^N s_j^2}{N}, \quad (3.17)$$

ahol

- s_j a j. adat eltérése a várható értéktől,
- N a megfigyelések száma.

Értéke a mért jellemzővel azonos dimenzióban kifejezve megmutatja, hogy a mérési eredmények mennyire szórnak az átlag (várható érték) körül.

A vizsgált tribológiai jellemzők aktivációs energiától való függését trendvonal-illesztéssel vizsgálom. Az adott közelítő függvénnyel leírható kapcsolat erősségét az ún. determinációs együttható (R^2), a korrelációs együttható négyzete jellemzi. $R^2=1$ esetén beszélünk tökéletes kapcsolatról.

4.1 Mechanikai tulajdonságok, a súrlódó kompozit betét merevségi mátrixa

Az összetevő-csoportosítási módszer alkalmazásának tehát kettős indoka van: az összetevők ipari titkok mivolta és a szükséges speciális orientáció által meghatározott gyártási eljárás (Biczó és Kalácska, 2019). A (3.3) – (3.7) egyenletek meghatározzák a fiktív rugalmassági modulust a terhelés irányában, valamint arra merőlegesen a mátrixkomponens és a szálerősítés komponenscsoportok külön-külön mért rugalmassági modulusából és térfogatából, így megkapjuk a kompozit effektív rugalmassági modulusát, effektív nyírási modulusát és effektív Poisson-tényezőjét.

A csoportosítás elvének felhasználása a komponensek összegyűjtött anyagtulajdonságainak egyesítése előtt a keverési szabályon keresztül a szálerősítésű polimer kompozit anyag tulajdonságainak meghatározására szolgáló általános módszer. Az anyagok szerkezetét tekintve azonban ezt a módszert általában laminátumokra alkalmazzák. Ebből kifolyólag a koszorúfonással készült szálerősített szerkezettel rendelkező hibrid, szárazon súrlódó kompozit tengelykapcsolóbetétekre történő felhasználása újszerű tudományos eljárásnak tekinthető. Továbbá, ez az újszerű felhasználás a következő esetekben alkalmazható:

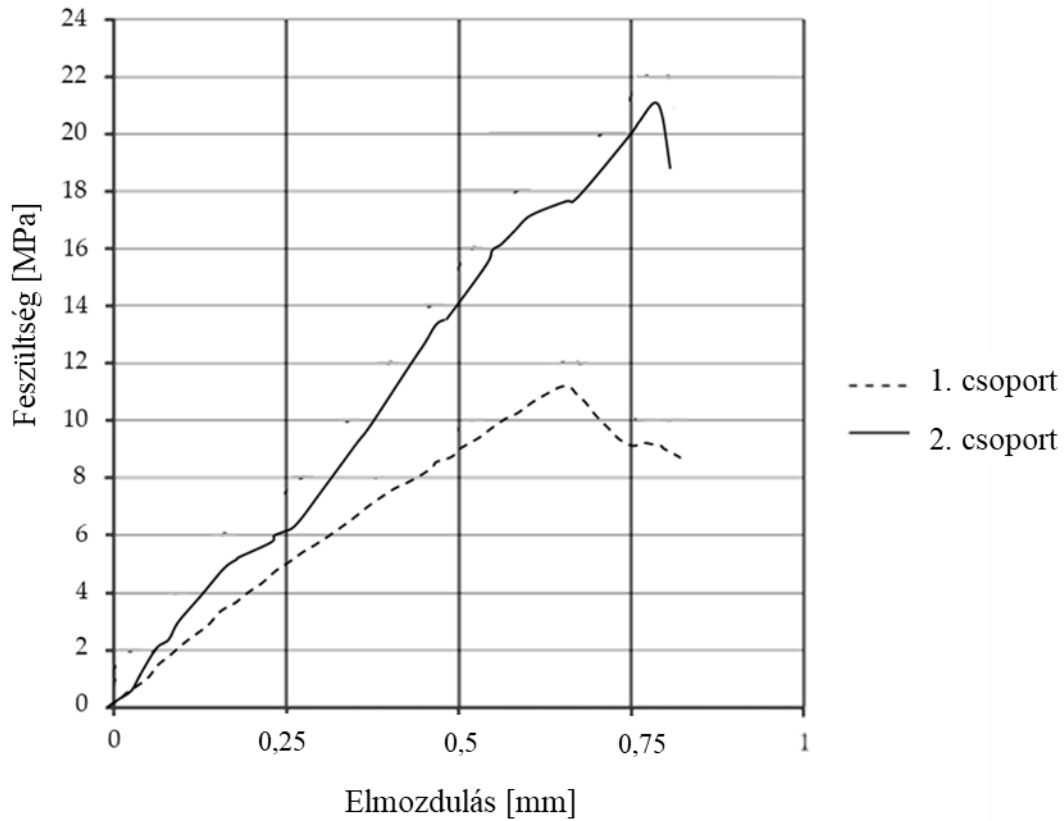
- amikor a gyártási módszer különleges orientációt ad az anyagnak,
- például tekercseléssel létrehozott kompozitok vagy speciálisan strukturált hosszú szálerősítésű komponenscsoporttal rendelkező kompozitok esetében,
- amikor a kompozitból kivágott mintákon végzett hagyományos vizsgálatok nem vezetnek releváns eredményekhez, mivel a terméken belüli mintakontúrok kiválasztása befolyásolja az eredményeket,
- amikor egyes összetevők ipari titkok,
- amikor információt kell szerezni a különböző összetevőknek a teljes szerkezet szilárdságához való hozzájárulásáról,
- például, ha egy komponens helyettesítésére van szükség, vagy ha azonnali gyártási támogatásra van szükség.

4.1.1 A mátrixkomponens-csoport tulajdonságai

A gyártási eljárásnál ismertetett módon a fonal bevonása előtt tehát a mátrix kezdetben granulátum összetevői extrudálási folyamaton mennek keresztül, hogy az adhézió érdekében állaguk megváltozzon. A hipotézisem szerint a kompozit mátrixa rövid szálerősítés miatt tulajdonképpen önmagában szintén szálerősített kompozit (rövidszál-erősítéses kompozit).

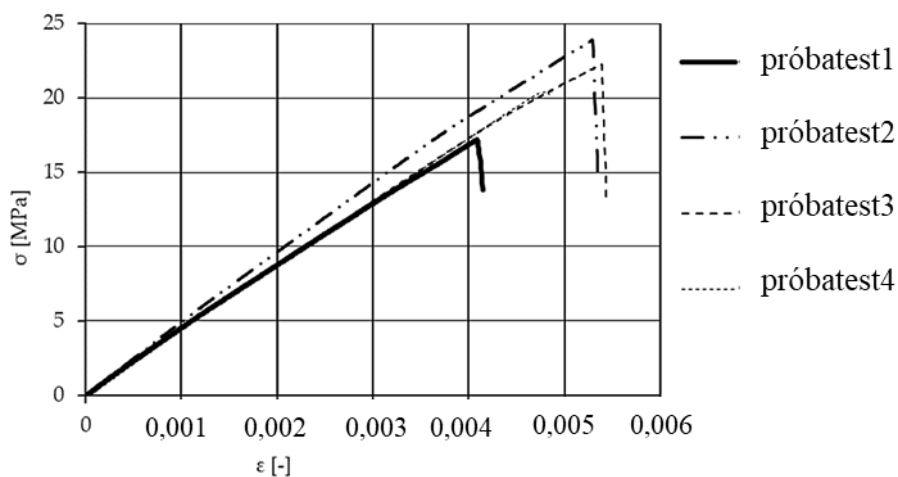
Ennek bizonyítására pusztán a mátrix anyagát felhasználva készítettem két különböző csoportba tartozó súrlódó betéteket. Az első csoportot (1. csoport) granulátumból készítettem, melegen préselve és extrudálás nélkül térhálósítva. A második csoport (2. csoport) betétjeinek előállítása megegyezett a teljes betétgyártási folyamattal, kivéve, hogy a betét nem tartalmazott hosszúszál-erősítést. A DIN 53455 szerinti szakítóvizsgálatot elvégezve kaptam összehasonlítható adatokat a mechanikai viselkedésről.

Amint az a feszültség-elmozdulás grafikonon (4.1. ábra) látható, az "extrudálással" létrehozott "mátrixbetétekből" vágott próbatestek (2. csoport) kétszer akkora szilárdsági értékeket mutattak, mint az extrudálás nélküli próbatestek (1. csoport). Ezen eredmények mellett a különböző rövid szálerősítések jelenléte a granulátum egy darabjának egyszerű elszakításával is kimutatható volt. Összefoglalva, a betétanyag-gyártás extrudálási lépése elengedhetetlen a rövid szálak mátrixban lévő szilárdságnövelő hatásának aktiválásához.

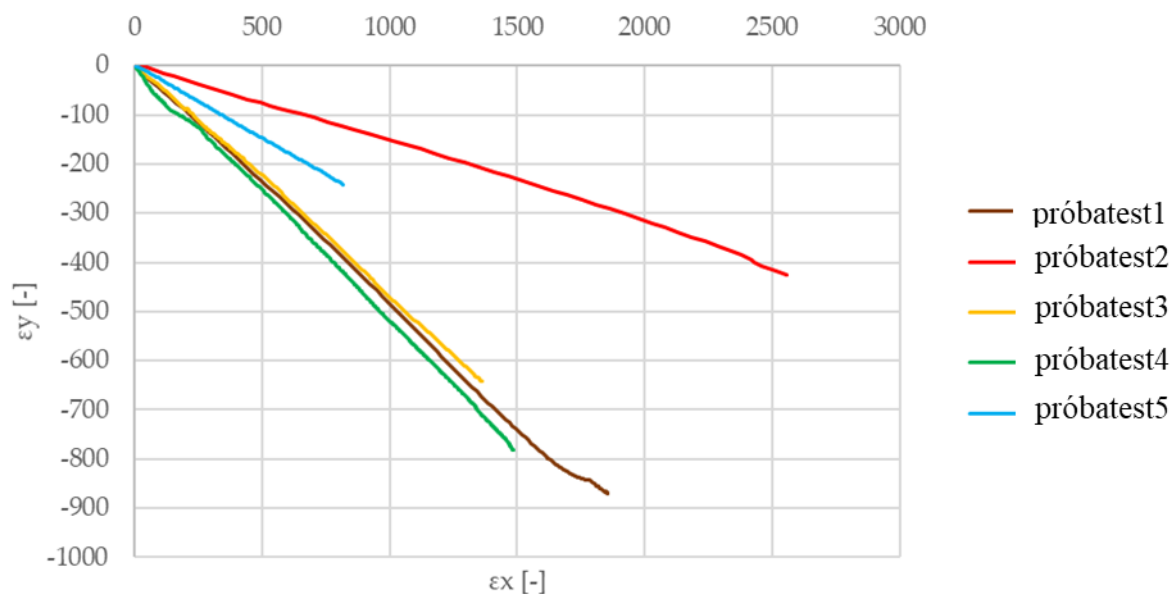


4.1. ábra: Az extrudálás hatása a mátrixkomponens-csoport vizsgálati mintáinak szilárdságára

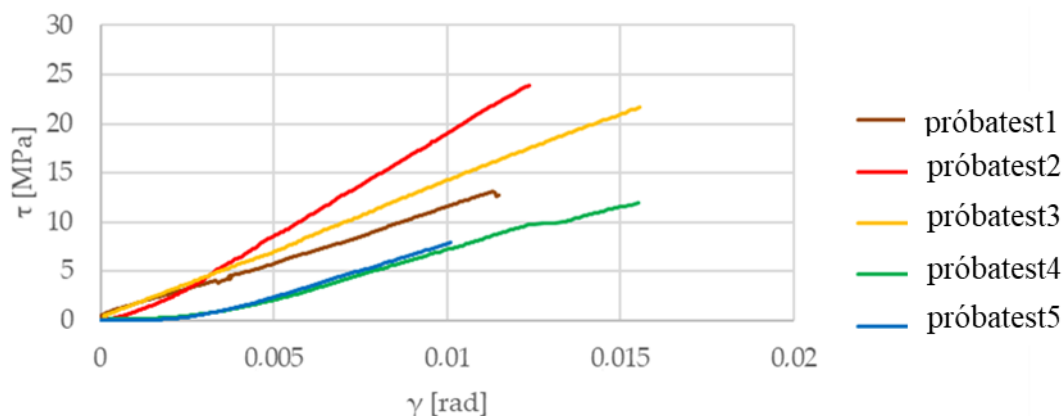
A 4.2. ábra a fentiekben ismertetett szakítóvizsgálat eredményeit mutatja be a mátrixanyagból készült próbatesten. A 4.3. ábra kétirányú nyúlásmérés eredményeit mutatja, míg a Iosipescu nyírási vizsgálat eredményeit a 4.4. ábra szemlélteti. A mátrixanyagból készült próbatestek rugalmassági modulusának, Poisson-számának és nyírási modulusának meghatározott értékeit a 4.1. táblázat tartalmazza.



4.2. ábra: Szakítóvizsgálati eredmények: a mátrixkomponens-csoport feszültség-nyúlás görbéje



4.3. ábra: Poisson-tényező mérése kétirányú nyúlásméréssel



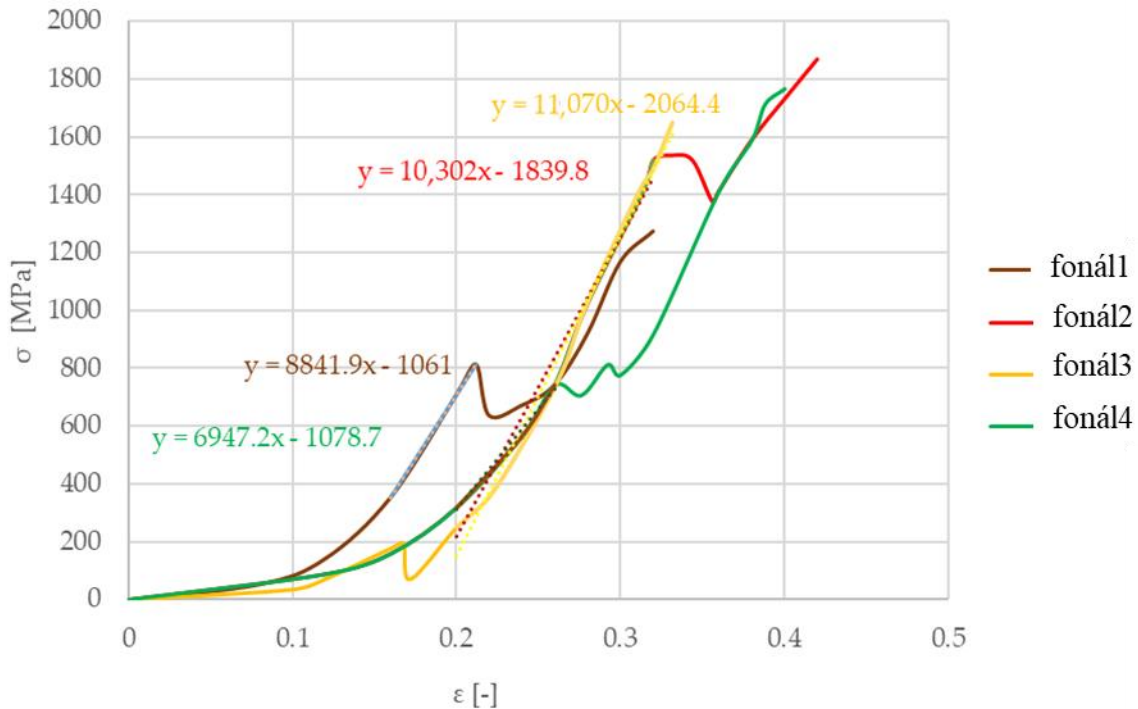
4.4. ábra: A próbatestek Iosipescu nyírási vizsgálatának eredményei

4.1. táblázat A mátrixkomponens-csoport tulajdonságai

Young modulus (MPa)	4290
Poisson tényező	0.38
Nyírási modulus (MPa)	1290

4.1.2 A hosszúszálerősítés-csoport tulajdonságai

A hosszúszálas erősítőfonalak mechanikai tulajdonságainak értékelésére a Schaeffler Savaria Kft. szabványos tesztjeit végeztem el, hosszú szálakból készült fonalakat létrehozva. Az eredményeket a 4.5. ábra szemlélteti. A legkisebb Poisson-számmal rendelkező szál figyelembevétele a biztonság felé való egyszerűsítés.



4.5. ábra: A hosszúszal-erősítés csoportból származó fonalak feszültség-nyúlás görbéi

A mérésekből a hosszúszal-erősítés komponenscsoport Young-modulusát 27300 MPa értékűnek találtam a Microsoft Excelben található meredekségfüggvény segítségével (a függőleges eltérés osztva a vízszintes eltéréssel az egyenes két pontja között, ami a regressziós egyenes mentén bekövetkező változás mértéke). A kezdeti alakváltozási szakaszt elhanyagoltam a vizsgálathoz a fonatot tartó speciális horogforma miatt. A horogra történő szorosabb tekerceselés az alacsonyabb nyúlásokhoz tartozó feszültségek növekedéséhez vezetett. Az 1. fonat (kék) példát mutat arra, hogy a fonat rögzítése a horgon hogyan manipulálhatja az eredményeket és a viselkedést, így a kiértékelést a különböző alakváltozási szakaszokhoz kell igazítani. Ennek a csoportnak a Poisson-tényezőjét egy komponens értéke határozza meg, azaz az üvegszal Poisson-tényezője 0,2 (Mallick, 2007). A nyírási modulust számítással 11380 MPa értékűnek határoztam meg.

4.1.3 A mechanikai anyagmodell létrehozása: a keverési szabály alkalmazása a szeparált anyagtulajdonságokra

Az anyagmodell létrehozásának, azaz a fentiekben kiszámoltak egyesítésének első lépése, hogy feltételezzük a terhelés és a szálerősítés párhuzamosságát: a módszer hipotetikusán úgy kezeli az anyagot, mintha a szálerősítés a terhelésekkel párhuzamos lenne, és a Tsai-Pagano egyenleteken keresztül merevségi mátrixelemeket hoz létre a véletlenszerűen orientált kompozitokra vonatkozó keverési szabály felhasználásával (lásd a (4.1)-(4.5) egyenleteket) a két hipotetikus, a kerületi irányhoz képest 90°-47°-os orientációjú kvázi laminátumra.

$$E_{11} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f = 14,3 \text{ GPa}, \quad (4.1)$$

$$E_{22} = \frac{E_f \cdot E_m}{E_m \cdot V_f + E_f \cdot V_m} = 6,78 \text{ GPa} \quad (4.2)$$

$$v_{12} = v_m \cdot V_m + v_f \cdot V_f = 0,3 \quad (4.3)$$

$$v_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \cdot v_{12} = 0,144 \quad (4.4)$$

$$G_{12} = \frac{G_f \cdot G_m}{G_m \cdot V_f + G_f \cdot V_m} = 2,1 \text{ GPa} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{v_{12}}{E_{11}} & 0 \\ -\frac{v_{21}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{14,3} & -\frac{0,3}{14,3} & 0 \\ -\frac{0,11}{6,78} & \frac{1}{6,78} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2,1} \end{bmatrix} \text{ GPa} \quad (4.6)$$

Ezután a hengerkoordinátarendszert és azt a tényt figyelembe véve, hogy a szálak a radiális koordinátairányhoz képest 47° és -47° ($\lambda = 47^\circ$) szögben helyezkednek el, a (4.7) egyenletben részletezett transzformációs mátrixot állítottam fel az eredményeknek a (4.8) egyenlet szerinti átalakítására, hogy a vizsgált anyagot kvázi-laminátumként kezeljük a $[r, \varphi, z]$ hengerkoordinátarendszerben. Az eredményeket a 4.2. táblázat tartalmazza.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos^2 \lambda & \sin^2 \lambda & 2 \sin \lambda \cos \lambda \\ \sin^2 \lambda & \cos^2 \lambda & -2 \sin \lambda \cos \lambda \\ -\sin \lambda \cos \lambda & \sin \lambda \cos \lambda & \cos^2 \lambda - \sin^2 \lambda \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

$$\mathbf{S}' = \mathbf{T}^t \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{T} \quad (4.8)$$

A két azonos kvázi laminátum egyesítéséhez a (4.9) egyenlet által szemléltetett nyúlási merevségi mátrixot hoztam létre, amely a 4.3. táblázatban felsorolt kvázi laminátum kompozit betétanyag-tulajdonságok meghatározásához vezetett.

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \mathbf{C}'_i \cdot h_i, \quad (4.9)$$

ahol \mathbf{C}'_i az i . lemez merevségi mátrixa, h_i az i . lemez vastagsága (esetünkben 1,8 mm), és n a lemezek száma.

4.2. táblázat. A szálerősítésű kompozit tulajdonságai henger-koordinátarendszerben.

E_{rr} (GPa)	6.06
$E_{\varphi\varphi}$ (GPa)	6.26
$\nu_{r\varphi}$	0.454
$\nu_{\varphi r}$	0.469
$G_{r\varphi}$ (GPa)	3.83

A modell alkalmazásának néhány korlátját meg kell jegyezni. Ez az anyagmodell nem veszi figyelembe a mechanikai tulajdonságoknak a hőmérséklet hatására bekövetkező változásait, míg a szál-szál és szál-mátrix adhézióknak a merevségtenzor elemeire gyakorolt hatását szintén elhanyagolja. Az előbbi a termikus szempontok segítségével vizsgálható, míg az adhézió számszerűsítése egy ilyen anyagrendszerben hagyományos módszerekkel nehézségekbe ütközik, mivel a vizsgált mátrix nem hőre lágyuló, és a szálak bevonat nélküli vulkanizálása 70%-os szilárdságvesztést eredményez (aromás poliamiddal mérve). Ezért az olyan vizsgálatok, mint a cseppelhúzás módszere egyetlen szál felhasználásával nem végezhető el. Az egyedi gyártósoros módszerrel létrehozott, egyszál-erősítésű mintákon végzett szakítóvizsgálataim azonban kimutatták, hogy a szál-szál és a szál-mátrix adhézió rendszerének gyenge láncszeme az üvegszál-üvegszál közti adhézió. A molekuláris kölcsönhatásokat a mátrix hőtágulása, a felületi érdesség, valamint a különböző belső és külső erők is befolyásolják, ami megnehezíti ezen elemek modellbe való integrálását. Továbbá a keverési szabály módszerben elhanyagolásra kerül a hőkezelés hatása a szálak tulajdonságaira, míg a hőkezelést is tartalmazó teljes gyártási eljárás után a betétekből kivágott próbatestek hőtani tulajdonságainak mérésekor figyelembe van véve.

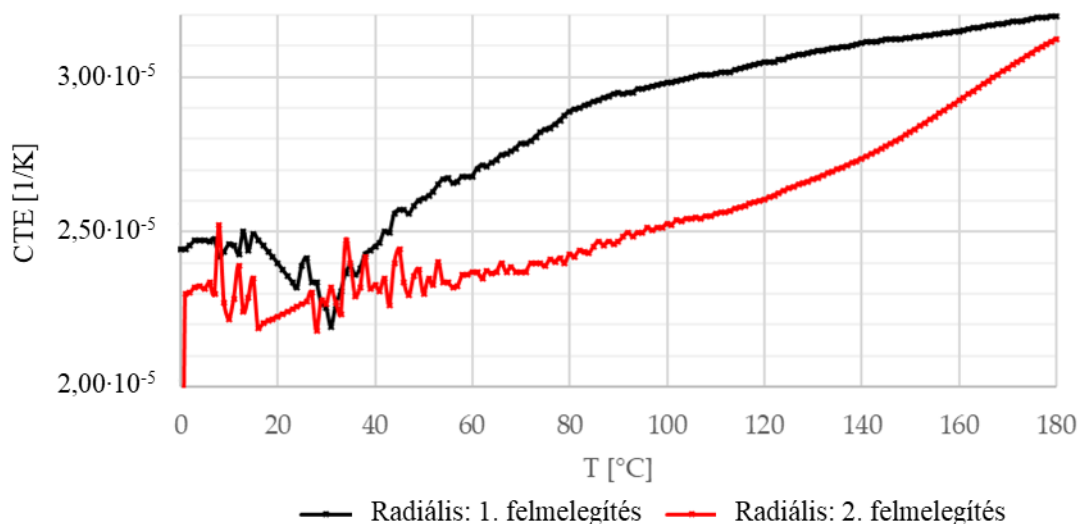
4.3. táblázat. A szálerősítésű kompozit, mint kvázi laminátum tulajdonságai

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

4.2 Hőtani jellemzők

4.2.1 A hőtágulási tényező

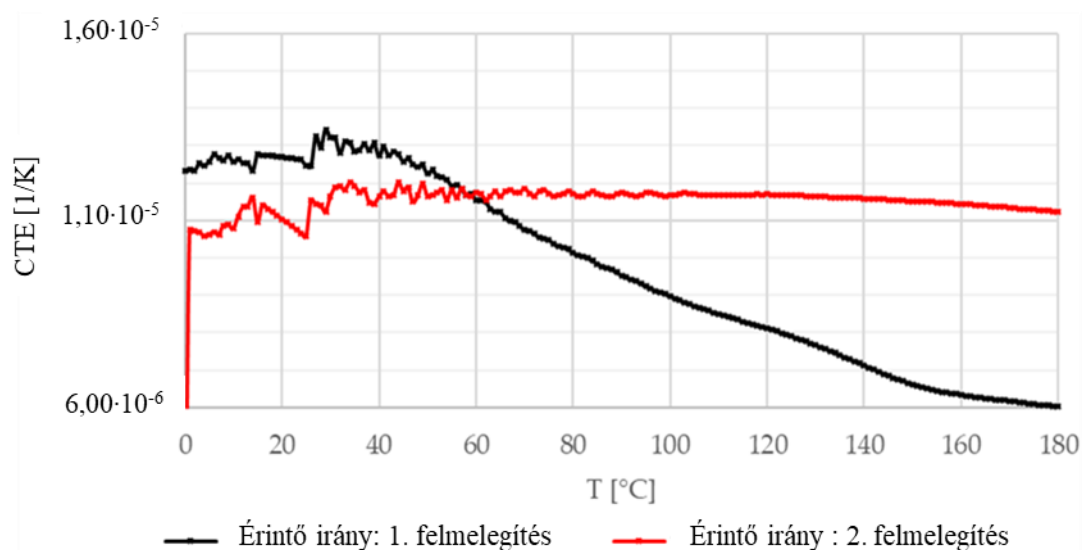
A 4.6. ábra – 4.8. ábra a hőtágulási tényező (CTE) kísérleti eredményeit mutatja a hőmérséklet függvényében a különböző irányokban (radiális, axiális és normál, azaz a vastagsággal párhuzamos) a vizsgálati minta geometriája tekintetében. A vizsgálatokra 0 °C-tól 180 °C-ig (5 K/perc fűtési sebességgel) levegő atmoszférában került sor 7-11 mm hosszú próbatesteken.



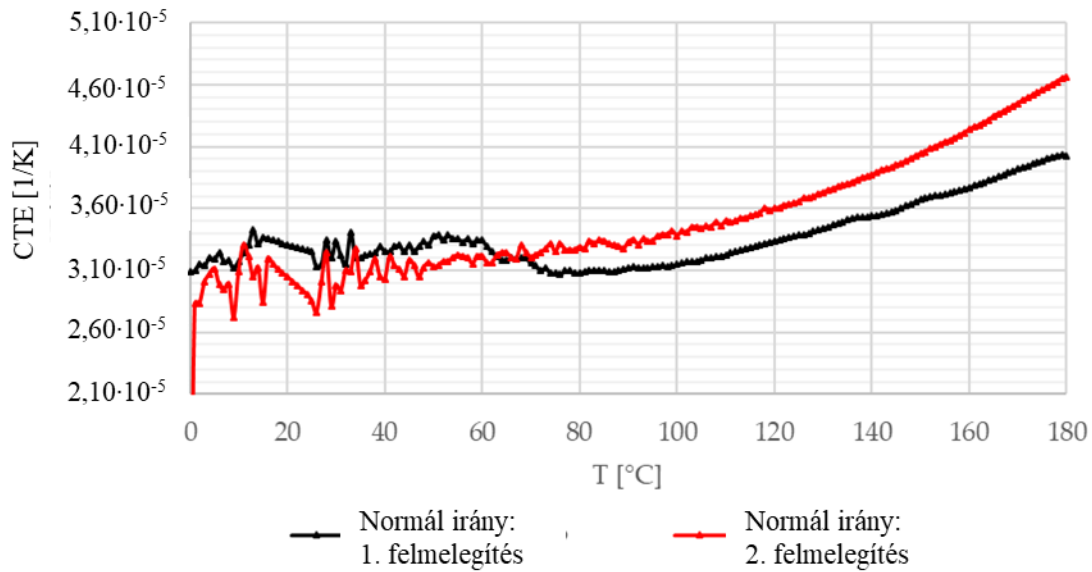
4.6. ábra: . Hőtágulási tényező - radiális irány, két felmelegítési ciklus (fekete, piros)

Működési körülmények között a hőmérséklet 300-500 °C-ra (Abdullah et. al., 2017) emelkedik a betét egyes érintkezési pontjain. Másrészt a teljes betétet figyelembe véve a súrlódó betét körülbelül 200 °C-ra melegszik fel. Ezért a mérések során a melegítés 180 °C-ig történt, két felmelegítési ciklussal.

A 16. ábra a CTE mérési eredményeket mutatja a radiális irányban. Mindkét felmelegedési görbe 50 °C-ig kezdeti tranziens jelenséget mutat, mielőtt növekvő tendencia mutatkozik. A kezdeti átmeneti szakasz hosszában és a 60 °C feletti meredekségben mutatkozó különbségek a fűtés és a magas hőmérséklet (az első felfűtési ciklus végén) különböző hatásaihoz kapcsolódnak a fonal különböző CTE-értékeire. A 4.7. ábra által szemléltetett érintőleges irányban a kezdeti szakasz után a kompozit súrlódó anyagban lassú csökkenés következik be, majd a minimális értékek elérése előtt gyors csökkenés következik be. A felmelegedési hurok után ez a csökkenés nincs jelen. A 18. ábra a normál irányú eredményeket mutatja. Ebben az irányban a viselkedést elsősorban a hibrid mátrix jellemzői határozzák meg; ezért a két felmelegedési görbe között nem mutatható ki jelentős különbség, ami arra utal, hogy a szálszerkezet érzékenyebb a maradó hő által kiváltott feszültségekre.



4.7. ábra: . Hőtágulási tényező - érintő irány, két felmelegítési ciklus (fekete, piros)



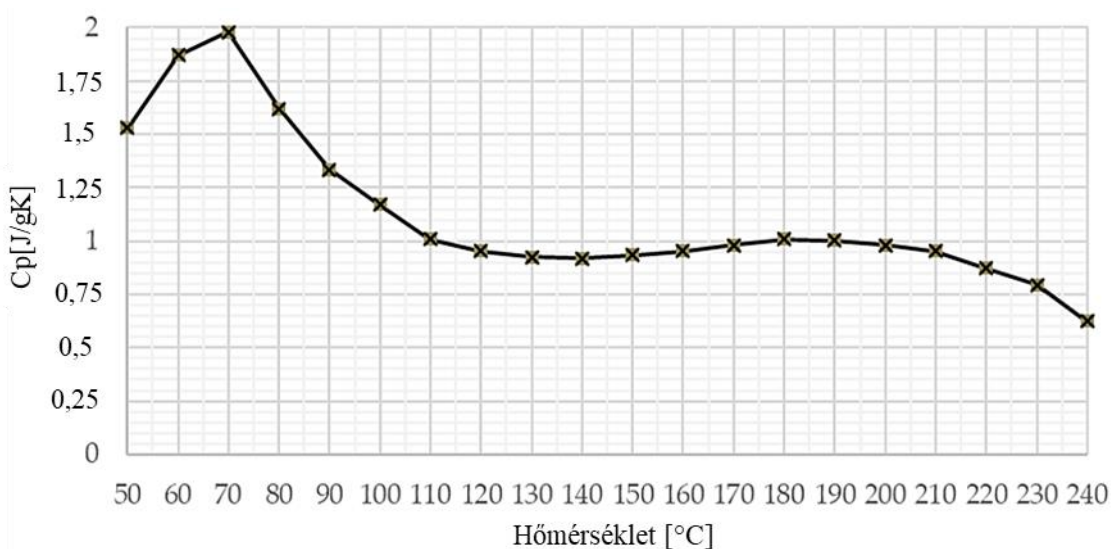
4.8. ábra: . Hőtágulási tényező - normál irány (vastagság), két felmelegítési ciklus (fekete, piros)

A radiális irányban mért átlagos hőtágulási tényező mellett a minta hosszának visszafordíthatatlan 0,09%-os csökkenését is mértem (itt nem látható) az első és a második melegítés között, amint azt a két másik irányban is rögzítettem. A legmagasabb értékeket a normál irányban mértem.

4.2.2 Fajlagos hőkapacitás

A fent említett üzemi hőmérsékleti viszonyokat figyelembe véve a fajhő és a hőmérséklet grafikonja stabil viselkedést mutatott.

A 4.9. ábra a vizsgált betétanyag fajlagos hőkapacitását mutatja a hőmérséklet függvényében.



4.9. ábra: . A vizsgált betétanyag fajlagos hőkapacitása a hőmérséklet függvényében

4.2.3 Hővezetési tényező

A hővezetési mérések eredményeit egy Lee-féle készülék szolgáltatta. Az 4.4. táblázatban részletezett mérési eredmények szerint a vizsgált tengelykapcsolóbetét hővezetési tényezője 0,398 W/(m·K) volt.

4.4. táblázat. Hővezetési tényező vizsgálati eredményei

Feszültség U	6.3	6.36	6.37	6.4	6.53
Áramerősség I	0.296	0.296	0.296	0.298	0.296
t_0 szobahőmérséklet	25.1	20.8	22	22.8	25.4
t_A'	40.8	38.7	38.4	39	41.8
$t_A (t_A - t_0)$	15.7	17.9	16.4	16.2	16.4
t_B'	44.6	42.4	42.2	42.8	45.4
$t_B (t_B - t_0)$	19.5	21.6	20.2	20	20
t_C'	45.9	43.5	43.4	44.2	45.8
$t_C (t_C - t_0)$	20.8	22.7	21.4	21.4	20.4
$t_B - t_A$	3.8	3.7	3.8	3.8	3.6
e	0.0013	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013
λ [W/(m·K)]	0.38	0.43	0.387	0.39	0.428

4.3 Tribológiai vizsgálatok eredményei

4.3.1 Autóipari jármű és próbapadi tesztek eredményei

Kopási értékek

A tesztintenzitási sorrend hipotézisének vizsgálatához vagy bizonyításához, amellyel a szárazon súrlódó egytárcsás tengelykapcsolók élettartam alatti tribológiai terhelési következményeit tartalmazó és élettartammal kapcsolatos előrejelzésekre alkalmas térképét (tribotérkép) igyekszem felállítani, először a tengelykapcsolótárcsák betéteinek kopási értékeit vizsgáltam a járműipari tesztek követően. A 4.5. táblázat szemlélteti a különböző vizsgálatokból származó betétek vastagságvesztésének mérési eredményeit. A kopást a betétek belső (d_i) és az úgynevezett súrlódási (d_w) – kezdeti súrlódási – átmérője mentén vizsgáltam. A hiba a 10 ismételt mérés alapján számított sigma (σ).

4.5. táblázat. A betétek kopási értékei a különböző járműipari tesztek után

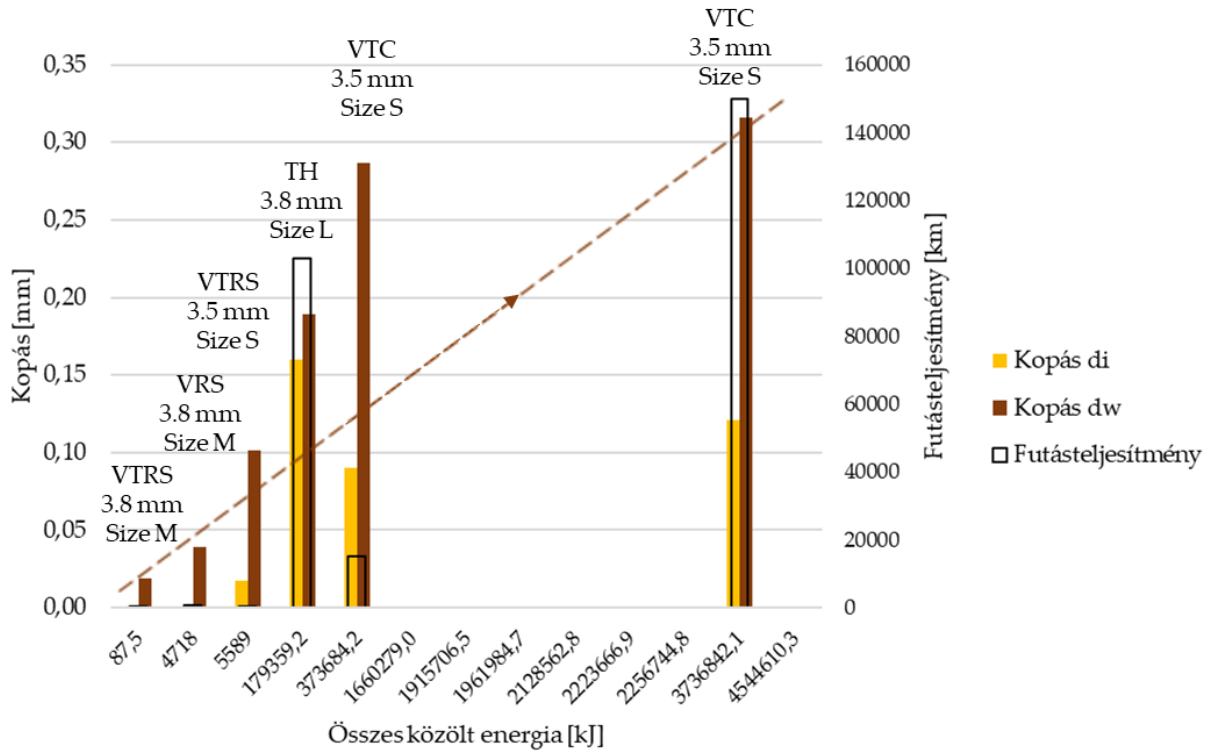
Teszt	Próbatest	Futás- teljesít- mény	Összes közölt energia	Kopás, di	Szórás, σ	Kopás, dw	Szórás, σ
		[km]	[kJ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	0	0	0,02	0,018
VRS	VRS-0008M	793	4718	0	0	0,04	0,029
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	0,02	0,017	0,10	0,060
TH	TH-103L	102900	179359,2	0,16	0,12	0,19	0,087
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	0,09	0,048	0,29	0,057
VR	VR-039M	39000	1660279,0	0	0	0,02	0,019
VR	VR-045M	45000	1915706,5	0	0	0,05	0,042
VR	VR-056S	56000	1961984,7	0	0	0,05	0,044
VR	VR-050M	50000	2128562,8	0	0	0,03	0,020
VR	VR-052M	52000	2223666,9	0,02	0,01	0,05	0,018
VR	VR-053M	53000	2256744,8	0,01	0,0053	0,06	0,018
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	0,12	0,045	0,32	0,097
VC	VC-150M	150000	4544610,3	0,04	0,015	0,17	0,071

Az M3.1.1. táblázat ugyanezeket a kopási eredményeket részletezi, de a 3.4. táblázatban bemutatott súrlódó betétek kezdeti névleges vastagsági értékeivel összehasonlítva.

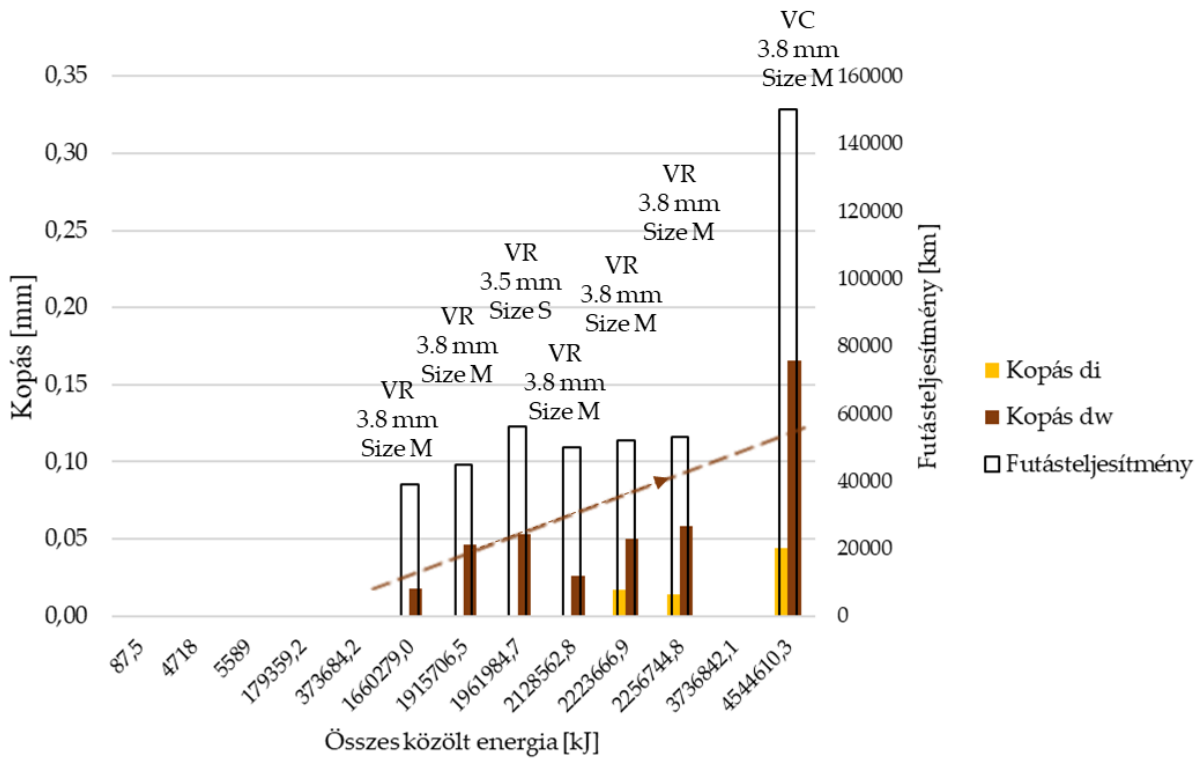
A nemlineáris Joule-skála mentén két tendencia figyelhető meg, amelyek a különböző vizsgálati típusok utáni kopási eredményeket irányítják, ezért a mért adatokat ennek megfelelően különítettük el: kíméletlen és normál használatú csoportokra. A 4.10. ábra (kíméletlen), a 4.11. ábra (normál) és az Melléklet M3.1.1 ábrája ezeket a kopási értékeket szemlélteti a 6. táblázatból és az M3.1.1. táblázatból vett belső átmérős és súrlódási átmérős metszetek mentén. A száraz tengelykapcsoló súrlódási felületei általában kúposak a betétrugózásért felelős rugószegmensek és – tárcsatípustól függően – a tárcsa oldallemezei vagy agykarimája közötti szegecselt illesztések miatt. Ezért az érintkezés során a súrlódó felület nem tekinthető síknak; különböző átmérőknél eltérő kopási értékek fordulnak elő, és ez a jelenség a súrlódó felületek élettartama alatt is folytatódik. Ezenkívül az ún. kúposodási jelenség az érintkezés párhuzamosságát is befolyásolja: nemcsak a betét, hanem a lendkerék és a nyomólap is maradó deformációt szenved, különösen gyors, ismétlődő, nagy energiájú terhelések esetén. Ez az illeszkedő felületek relatív kúposágának megváltozásához vezethet, így a belső átmérőknél bezárulhat az érintkezés. Mindezeket figyelembe véve a kopásvastagság-veszteség értékeit külön-külön két különböző átmérőnél (az úgynevezett súrlódási-, d_w , és a belső, d_i) mértem. Ez az a két átmérő, amelyről a későbbi vizsgálatokban a pin-on-disc „tű” mintáit is kivágtam.

Az eredmények összehasonlításából megállapítható, hogy minél nagyobb az összes közölt energia, amely a rendszerre jut, annál nagyobb a kopás, néhány kivételtől eltekintve, amelyek ugyanakkor rávilágítanak a rendszer és a körülmények egyéb paramétereinek hatásaira. Az eredmények a nem lineáris felületi aktivációs energiaskála mentén kerülnek ábrázolásra.

A 4.10. ábra a "kíméletlen" terhelési eseteknek nevezett vizsgálatok kopási eredményeit mutatja: amikor a járműhöz pótkocsit csatoltak (VTRS, VTC), vagy szándékos lejtőn felfelé való elindulással terheltek a nyomatékátviteli rendszert (VTRS, VRS), vagy hasonló terhelési esetet szimuláltak egy próbapadon (TH). A jármű lejtőn felfelé és/vagy pótkocsival történő indítása a hosszabb csúszási idők miatt nagy energiaterhelést eredményez, ami az említett gyors kúposodás alapvető oka, amely jelentős kopást okoz a belső átmérőknél. Ez látható, ha összehasonlítjuk a 4.10. ábra belső átmérő kopási értékeit a 4.11. ábra "di" eredményeivel, amelyeket "normál" terhelési eseteknek neveztem. Ezeknél a leírt jelenség nem tapasztalható.



4.10. 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



4.11. ábra: A belső és a súrlódási átmérő kopási értékei a futásteljesítmény függvényében a Joule-skála mentén: Második trend növekvő, normál terhelési esetek: VR, VC (nagy futásteljesítmény)

Az eredményeket vizsgálva a következő következtetéseket vontam le:

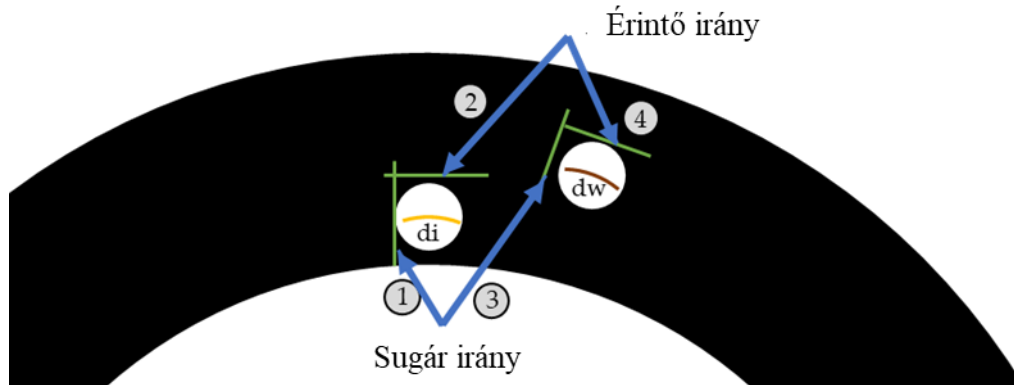
- a kéméletlen tengelykapcsoló használatú vizsgálatok a belső átmérőknél lényegesen magasabb kopási értékeket eredményeztek;
- a TH próbatest kopási eredménye azt mutatja, hogy a futásteljesítmény a közölt energia mellett erősen befolyásolja a kopást, és az olyan vizsgálati körülmények, mint a próbapad (azaz a valósághoz képest gyakoribb kapcsolás, vagy kevesebb idő a rendszer lehűtésére, zárt próbakamra használata imitált hőáramlással és légszívással, gyorsan változó kúposodással) a valósághoz képest nagyobb hőterhelést okoznak;
- másrészt a TH próbapadi körülmények kisebb különbséget eredményeztek a belső és a súrlódási átmérő kopási értékei között;
- a VTC kopási értékek elemzése azt mutatja, hogy a kopási értékek még a kisebb futásteljesítményű tesztek után is viszonylag magasabbak voltak, és még a nagy futásteljesítményű futásoknál is intenzívebb maradt a kopás: A pótkocsival végzett VTC-tesztek nem optimális érintkezési helyzetekben hoztak létre érintkezést a tengelykapcsoló súrlódási felületét illetően, mivel a súrlódási átmérőhöz tartozó kopás körülbelül háromszor nagyobb volt, mint a belső átmérős kopás, függetlenül az energiától vagy a futásteljesítménytől;
- ugyanez a jelenség jelentkezett a VTRS-vizsgálat során is, amely alacsonyabb futásteljesítmény mellett, de kisebb átmérőjű betétekkel magasabb kopási arányt okozott;
- a városi forgalmi körülmények között ("C") végzett vizsgálatok a próbapadi körülményekhez hasonlóan többletenergiát jelentettek a rendszer számára, mivel rövidebb lehülési lehetőségek voltak adottak egy-egy kapcsolási ciklus között.
- A 4.11. ábra vizsgálatából a normál használat kopási eredményei rávilágítanak a teszt pályán végzett tesztek – ahol a járműveket képzett sofőr vezette (VR) – és a nagy futásteljesítményű városi tesztek – ahol az átlagos vásárló vezetési stílusa határozta meg a hosszú távú kopási értékeket (VC) – hatásaira:
- a normál használatú tesztek jelentősen alacsonyabb kopási értékeket eredményeztek a belső átmérőknél;
- a hivatásos sofőrök által vezetett, feltehetően rövidebb váltási periódusokkal (rövidebb csúszással) működtetett tengelykapcsolók autókban végzett VR-tesztjei alacsonyabb kopási értékeket eredményeztek;
- többé-kevésbé azonos futásteljesítménnyel a kisebb átmérőjű, VR-tesztelt betétek (S méret) magasabb kopási értékeket mutattak, mint a nagyobb átmérőjű betétek.
- a VC eredmények arra utalnak, hogy ha a rendszert nem hivatásos járművezetők által vezérelt terheléssel, de hosszabb ideig (kilométeróra-állás) alkalmazzák, a kopási értékek hasonlóan mérsékeltek lennének, mint a hivatásos járművezetők által okozott értékek.

Összességében megállapítható, hogy:

- a d_i és d_w átmérőnél a kopási értékek többé-kevésbé azonos tendencia szerint változtak, bár a relatív értékeket tekintve a súrlódási átmérőnél (d_w) nagyobb volt az anyagvesztés;
- a belső és a súrlódási sugárhoz tartozó kopási értékeket összehasonlítva a belső sugárnál mért alacsonyabb kopási értékekből egyértelműen kiderült, hogy a bejáratási szakasz elején a betét kúpos helyzetű volt: a d_i kopás mindig kisebb volt, mint a d_w kopás;
- ugyanazon a vizsgálati típuskategórián belül minél nagyobb volt a felületi aktivációs energia, annál magasabbak voltak a kopási értékek;
- bár minél nagyobb volt a felületi aktivációs energia, annál nagyobbak voltak a kopási veszteségek, a pontos mértéket nagymértékben befolyásolta a vezetési stílus és a jármű indításakor az energiaterhelés felhalmozódásának gyorsasága.

A felületi érdesség

A súrlódó felület érdességértékeinek vizsgálata a különböző járműipari után és az eredmények összehasonlítása a használatnak még ki nem tett, szűz súrlódó betétek felületét leíró jellemzőkkel egy másik lehetőséget ad a hipotetikus tesztintenzitási skála megítélésére. Ezért az 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. A 4.12. ábra szemlélteti a vizsgálatához választott átmérőket és irányokat.

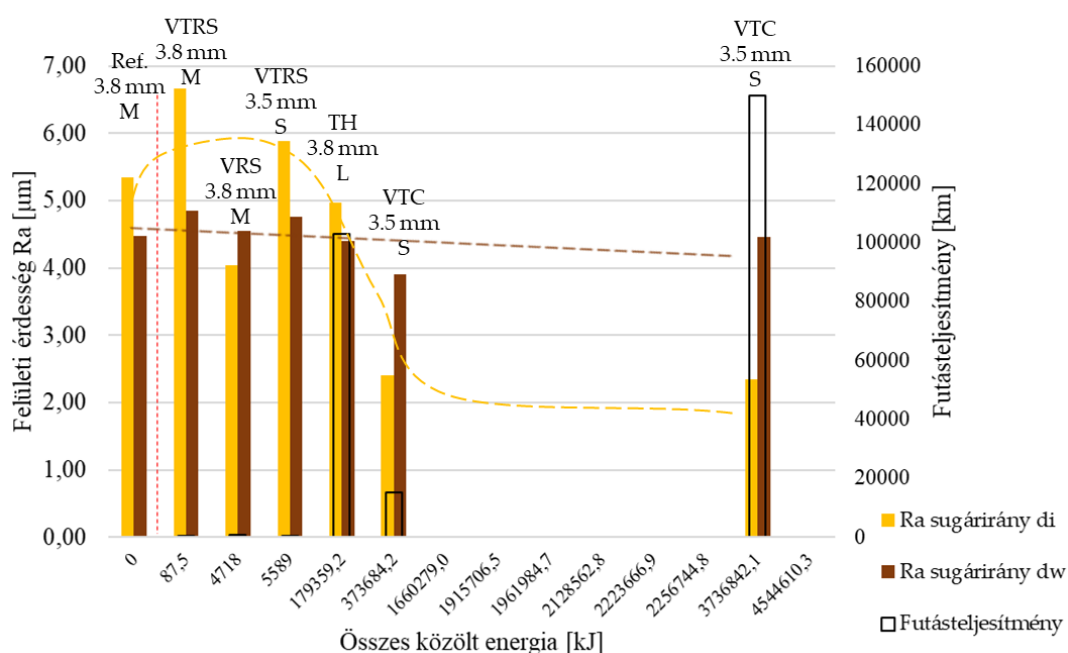


4.12. ábra: A felületi érdesség mérési irányai és átmérői

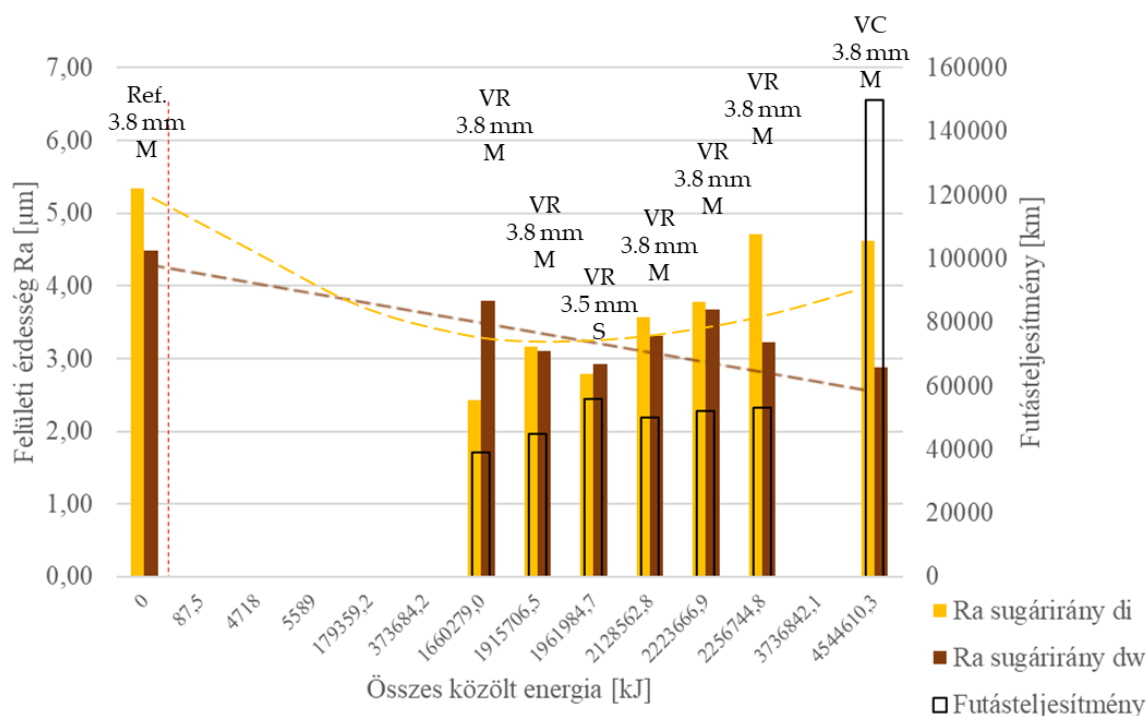
A Melléklet M3.2.1. – M3.2.4. táblázata összefoglalja a felületi érdességmérések eredményeit. Az értékek a mért adatok átlagát mutatják. A szórás a 8 ismételt mérés alapján számított sigma (σ). A referenciaérték a gyártásból frissen kikerült felületen mért érték.

Az M3.2.1. táblázat a belső átmérőnél radiális irányban mért értékeket tartalmazza (a 4.12. ábra 1. nyila kiemeli), míg az M3.2.2. táblázat ugyanannál az átmérőnél, de érintő irányban mért eredményeket mutatja, amint azt a 4.12. ábra 2. nyila szemlélteti. Az M3.2.3. és M3.2.4. táblázatok ugyanezen elv alapján felosztott súrlódási átmérőről származó érdességértékeket tartalmaznak radiális, illetve érintő irányban, amint azt a 4.12. ábra 3. és 4. nyílvevesszője kiemeli. A Melléklet M3.2.5. táblázata tartalmazza a relatív felületi érdességi értékeket a referenciaeredményekkel összehasonlítva.

A R_a felületi érdesség értékeit a belső (d_i) és a külső (d_w) átmérőnél sugárirányban a 4.13. ábra és a 4.14. ábra szemléltetik, folytatva a kopási eredmények által bevezetett trendek elkülönítését. A referenciaértékek a piros szaggatott vonal bal oldalán láthatók. Az első trend eredményei azt sugallják, hogy azok a tesztek, ahol a terhelési esetet nem folyamatos energiaeloszlás, hanem hirtelen, nagy energiájú impulzusok jellemzik, kevésbé sima felületeket eredményeznek. A referenciaértékek feletti első trend eredményei arra utalnak, hogy a felületek minden egyes alkalommal, amikor kapcsolat hatására a kontakt létrejött a súrlódó felületek közt, felszakadtak, ami durvább felületeket eredményezett. Megjegyzendő, hogy a radiális irányú mérések különböző átmérők mentén keresztezik a felületet. Ezen irány mentén a terhelés jelentősen változhat.

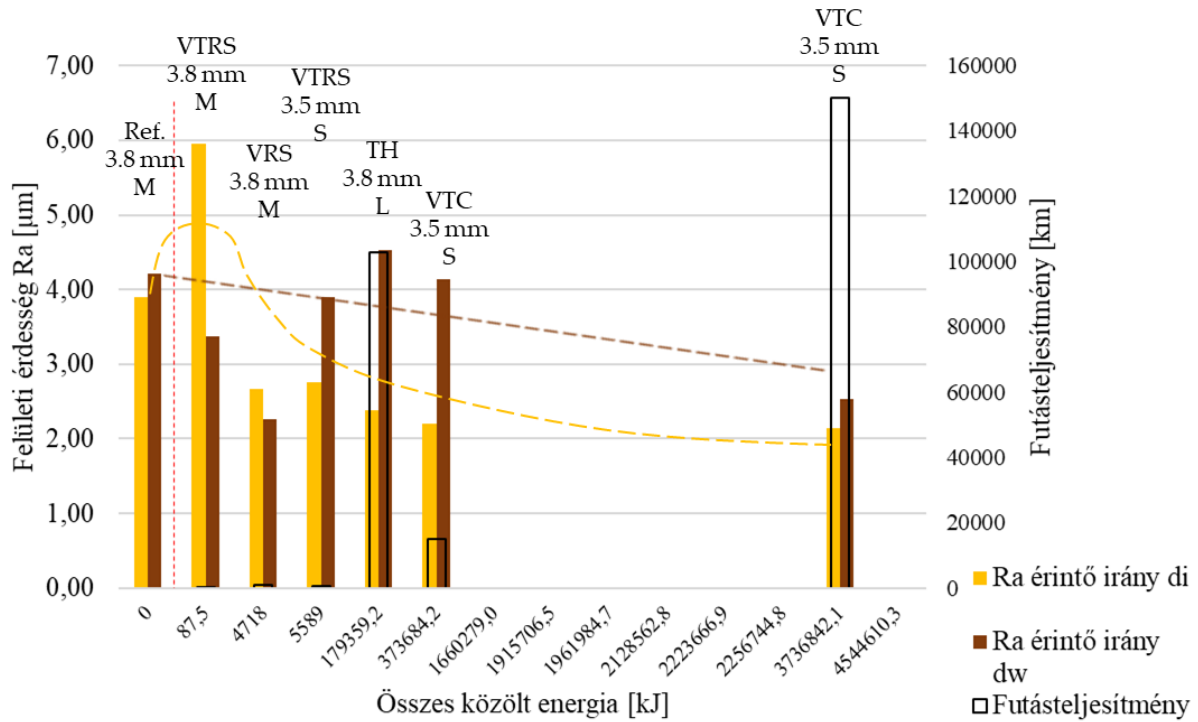


4.13. ábra: Ra felületi érdesség értékek, radiális irány - első trend: kíméletlen tesztek

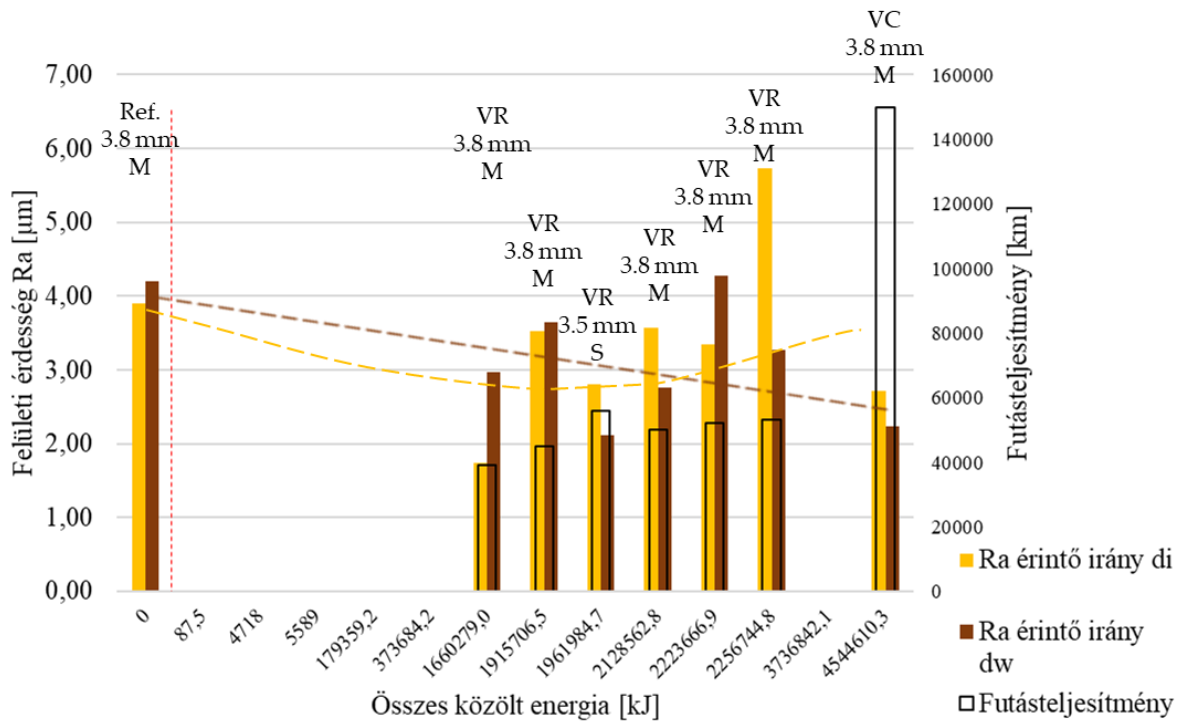


4.14. ábra: Ra felületi érdesség értékek, radiális irányú második trend: normál tesztek

A 4.15. ábra és a 4.16. ábra az érintő irányú Ra felületi érdességeloszlást mutatja, a trendsztévváltoztatás megtartásával. Az ábrákat összehasonlítva a trendek közötti különbség nem volt olyan jelentős, mint a radiális irányú eredményeknél.

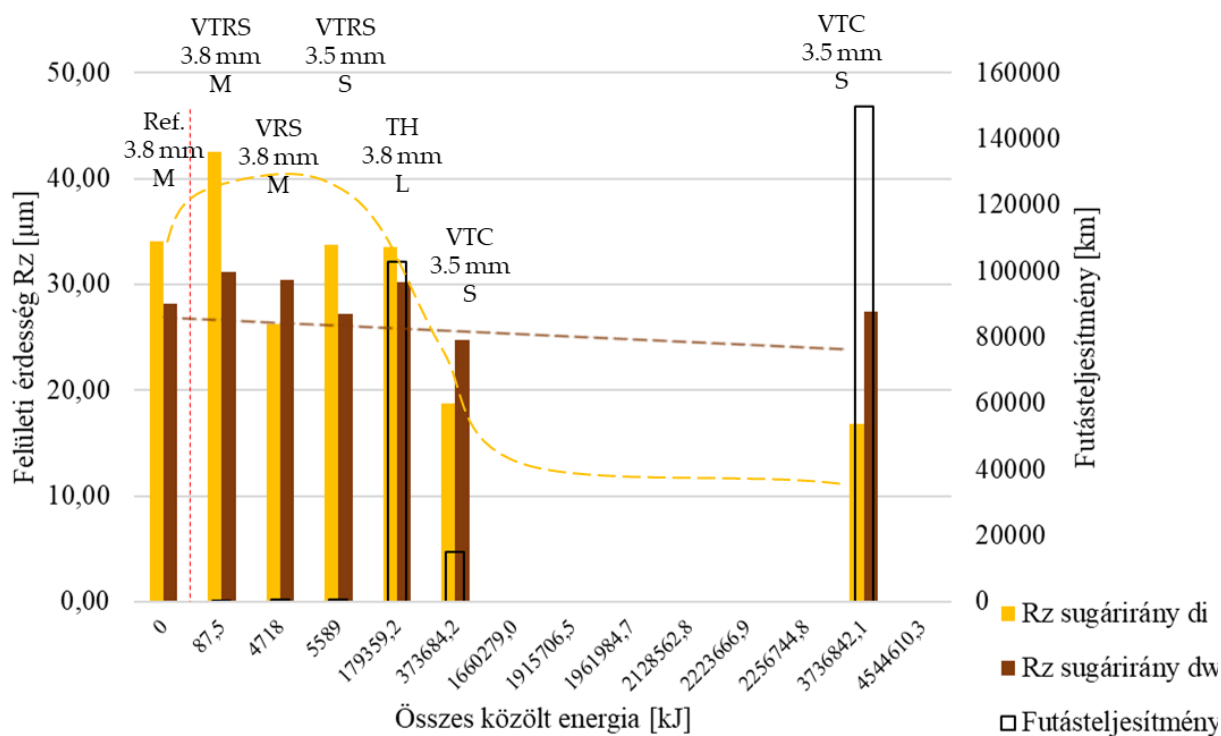


4.15. ábra: Érintő irányú Ra felületi érdesség értékek, első trend: kíméletlen tesztek

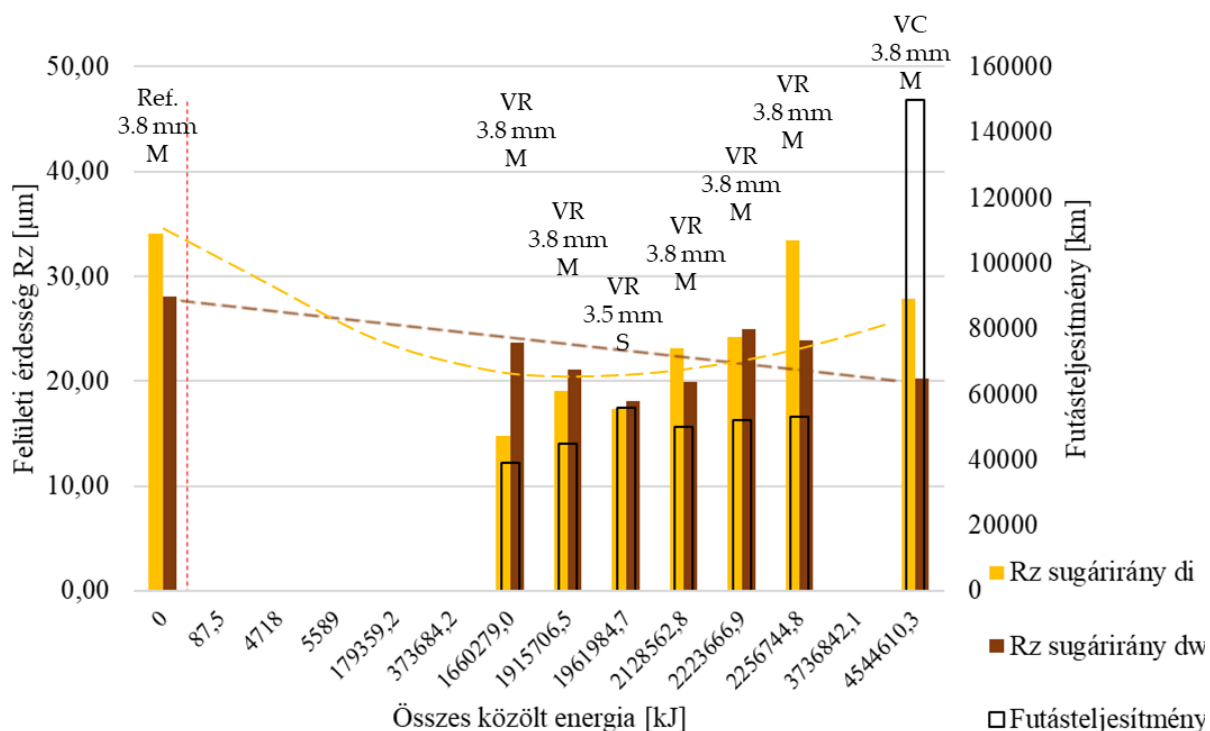


4.16. ábra: Érintő irányú Ra felületi érdesség értékek, második trend: normál tesztek

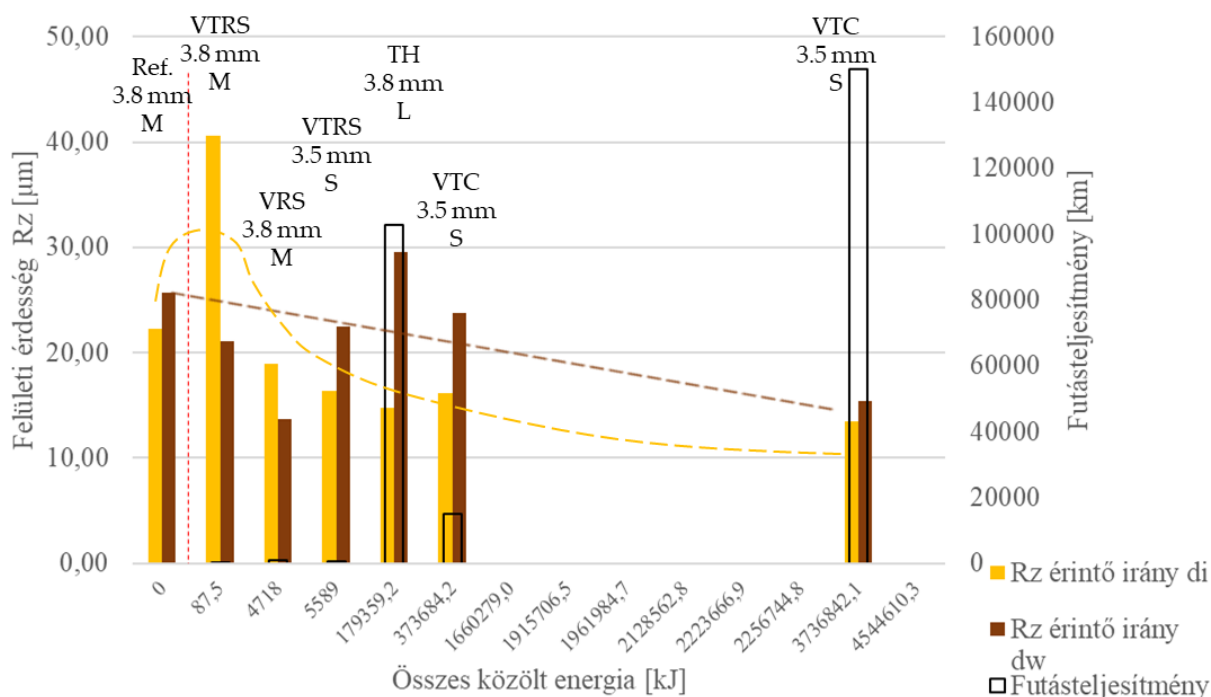
A mért, majd elkülönített R_z felületi érdesség értékeket a 4.17. ábra – 4.20. ábra szemlélteti radiális, illetve érintő irányban. A trendek és a relatív értékek nem sokban tértek el a R_a mérési eredményektől.



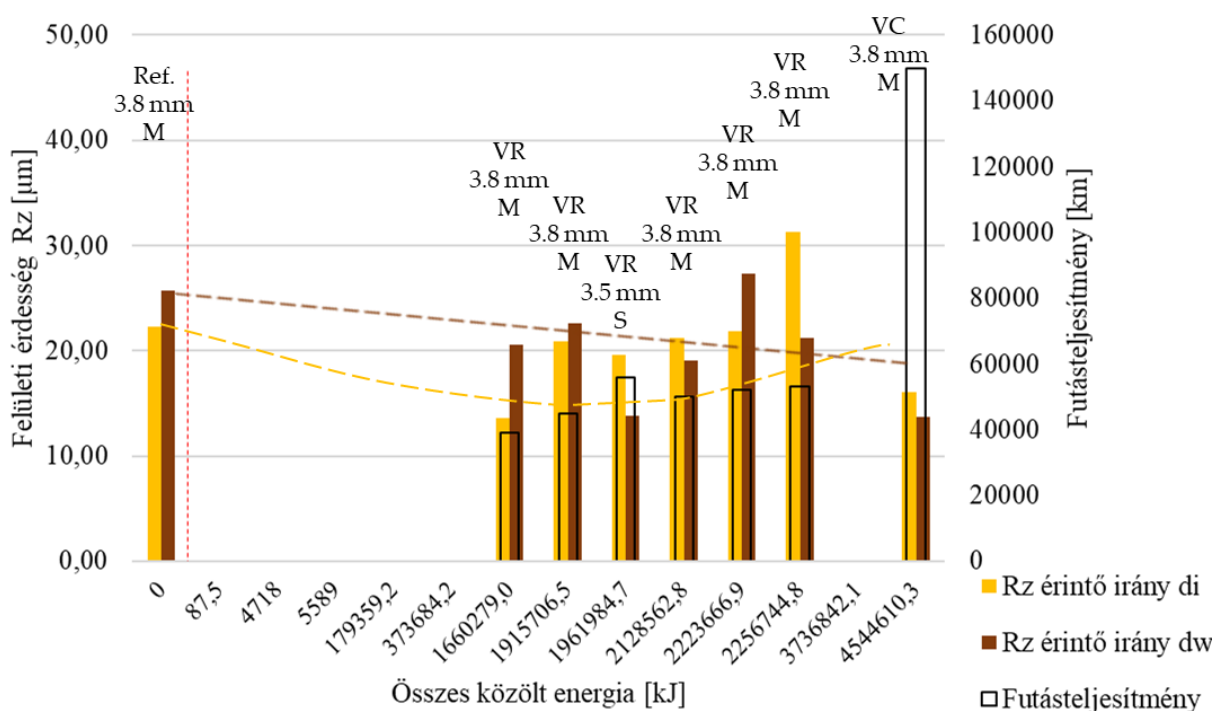
4.17. ábra: R_z felületi érdesség értékek, radiális irány – első trend: kíméletlen tesztek



4.18. ábra: R_z felületi érdesség értékek, radiális irány – második trend: normál tesztek

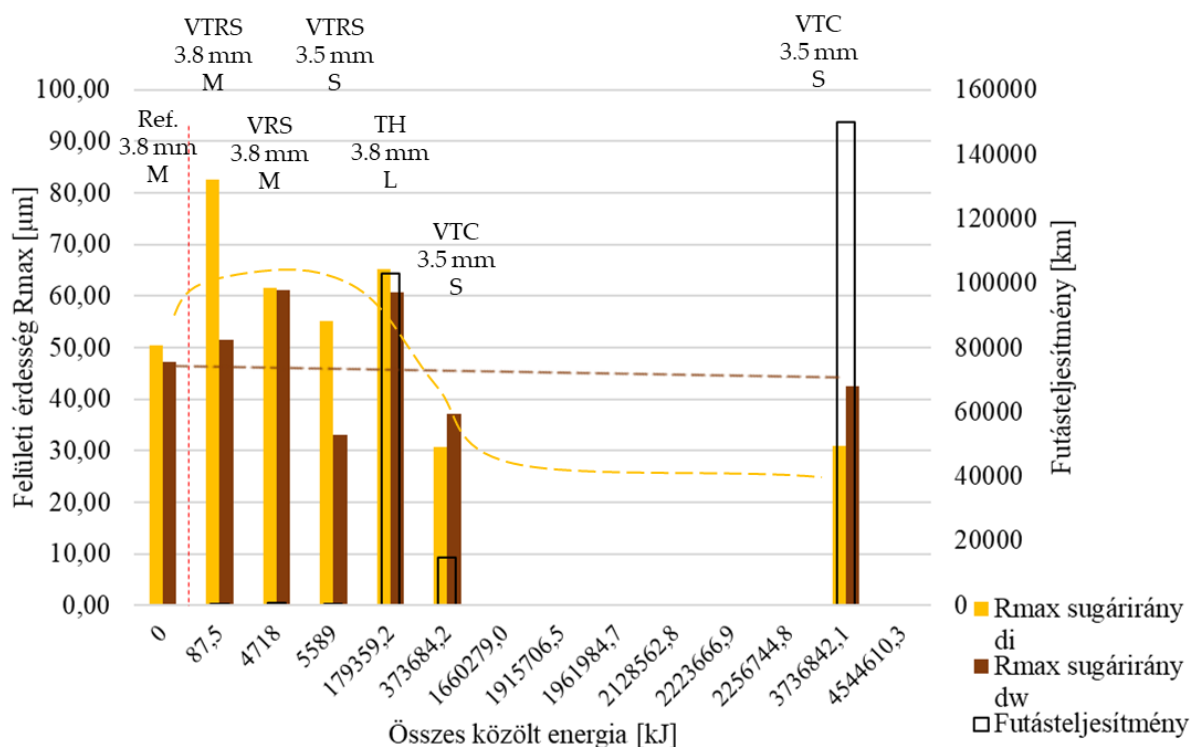


4.19. ábra: R_z felületi érdesség értékek, érintő irány – első trend: kíméletlen tesztek

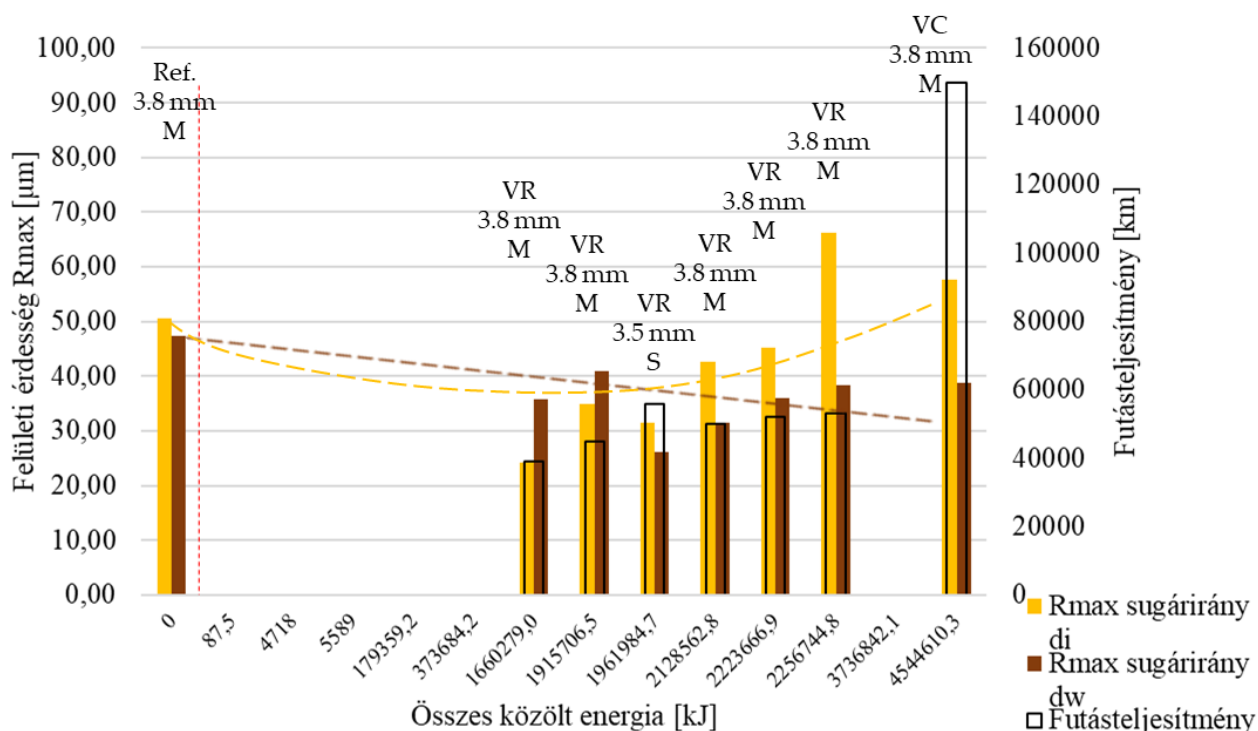


4.20. ábra: R_z felületi érdesség értékek, érintő irány – második trend: normál tesztek

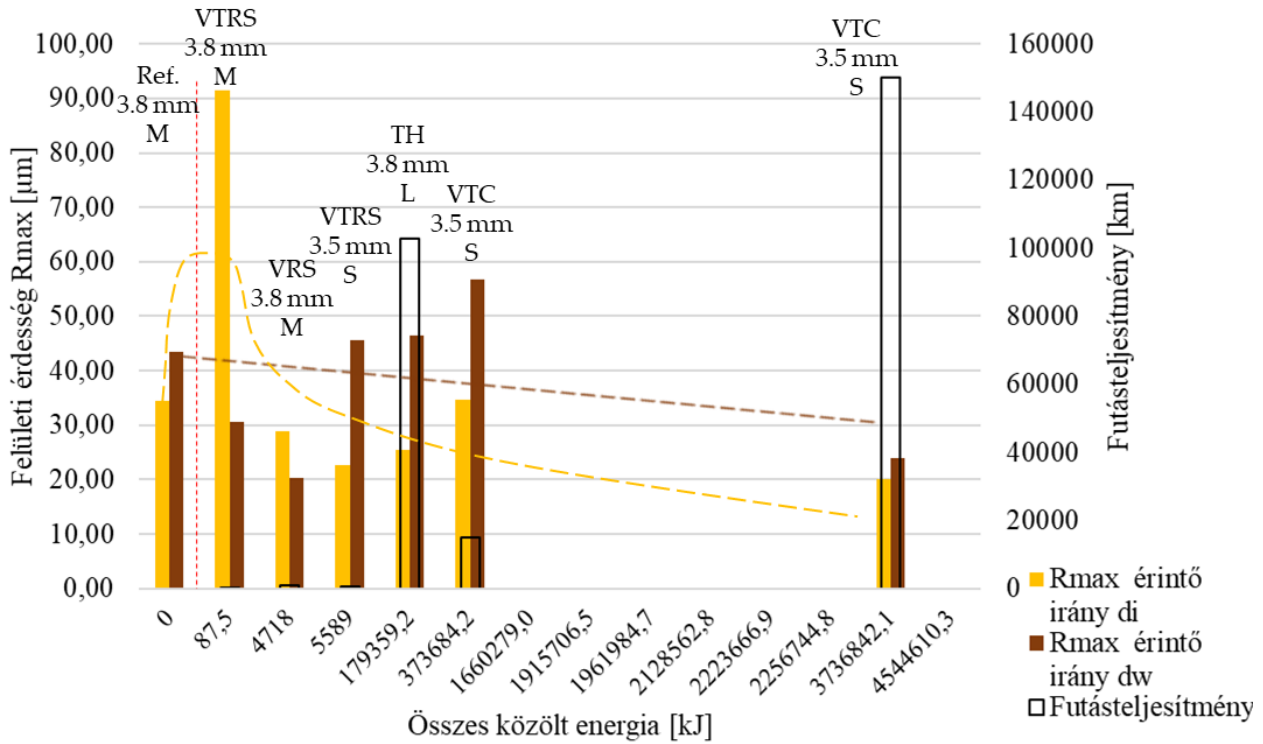
Az R_{max} eredményeket a 4.21. ábra – 4.24. ábra szemlélteti a kopási értékekből származó trendek eddigi sorrendjében. Az eredmények radiális és érintő irányú mérési adatokat mutatnak. A referenciaértékkel összehasonlított első trend eredmények egyértelműen rávilágítanak, hogy a nagy energiájú, hosszan tartó csúszás felszakítja a súrlódó felület felszínét, amelyet az R_a és R_z első trend érdességmérései alapján sejtettem.



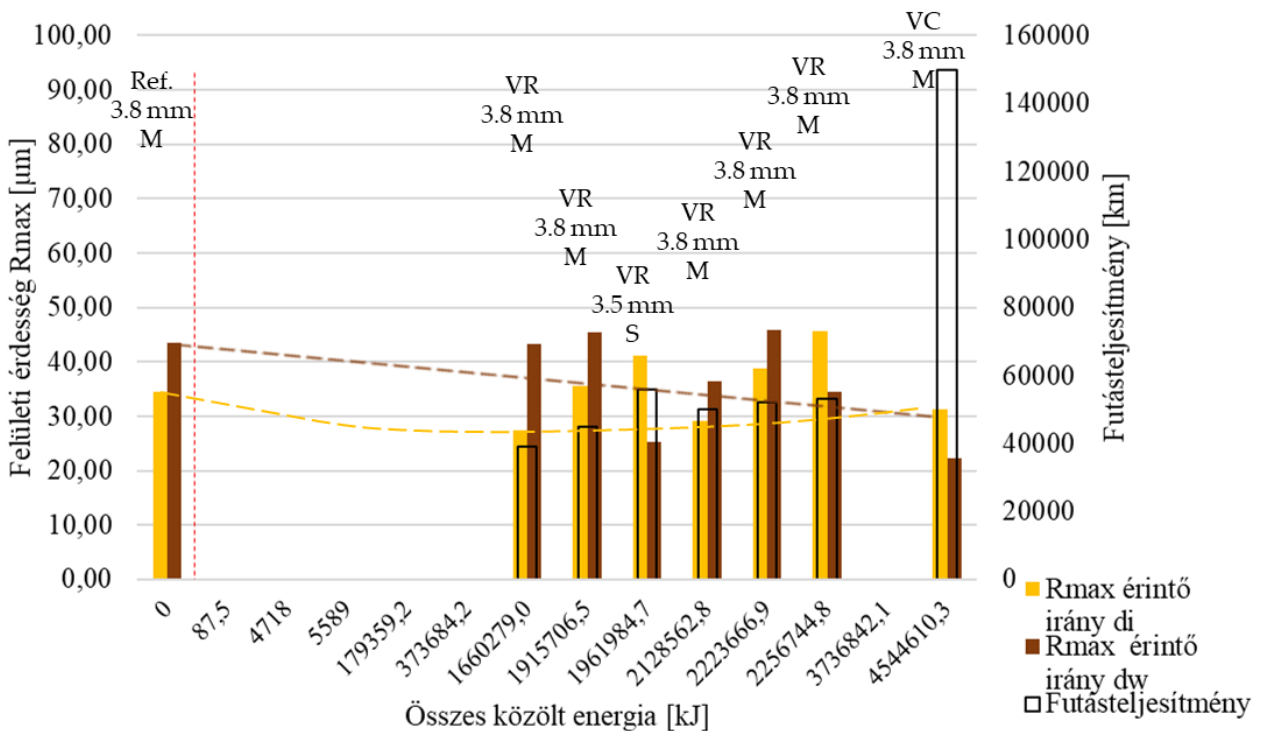
4.21. ábra: R_{max} felületi érdesség értékek, radiális irány első trend: kíméletlen tesztek



4.22. ábra: R_{max} felületi érdesség értékek, radiális irány második trend: normál tesztek



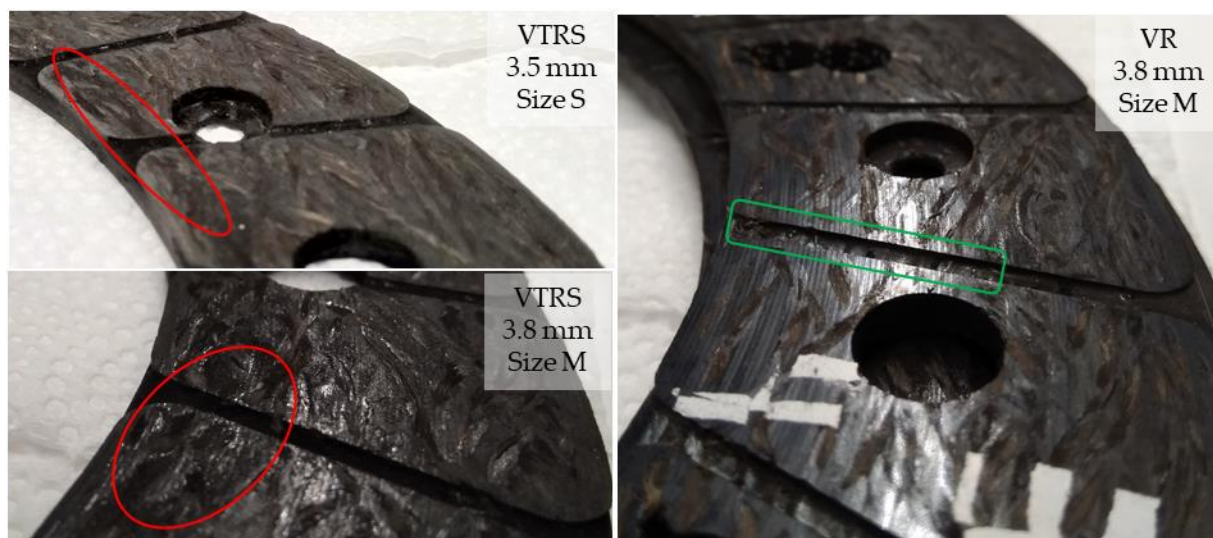
4.23. ábra: R_{max} felületi érdesség értékek, érintő irány első trend: kíméletlen tesztek



4.24. ábra: R_{max} felületi érdesség értékek, érintő irány második trend: normál tesztek

A felületeket szemrevételezéssel vizsgálva egyértelműek voltak a különbségek a belső átmérőnél. A 4.25. ábra összehasonlítja a VTRS-vizsgálatot követő felületeti jellemzőt a VR-vizsgálat következményeivel. Mint látható, a VTRS-felületek mélyebb barázdákat mutatnak sötétebb színnel, ami a szálak termikus károsodására utal a felületen. Ez a nehéz járműben gyorsan

alkalmazott energiaterhelés és/vagy a hosszú csúszási idő következménye lehet, míg a VR-vizsgálat egyenletesebben kopott, szabályos barázdákkal rendelkező felületet eredményezett.



4.25. ábra: A felületek vizuális vizsgálata az első trend (VTRS) és a második trend (VR) tesztjei után

A sugárirányú és érintő irányú felületi érdesség értékei a súrlódási átmérőn csökkentek a felületi aktivációs energia skála mentén, néhány kivételtől eltekintve, köszönhetően az eltérő használati körülményeknek. A kopási eredményekből megfigyelt trendek felismerhetők az eredmények között, főleg az R_{max} értékek esetében az R_a vagy R_z trendekhez viszonyítva: a kíméletlen alacsony energiájú és futásteljesítményű tesztek hatása még jelentősebb volt a belső és a súrlódó átmérőn radiális és axiális irányban egyaránt növekvő R_{max} értékekkel, ami igazolja a felületek feltépődésére vonatkozó sejtést.

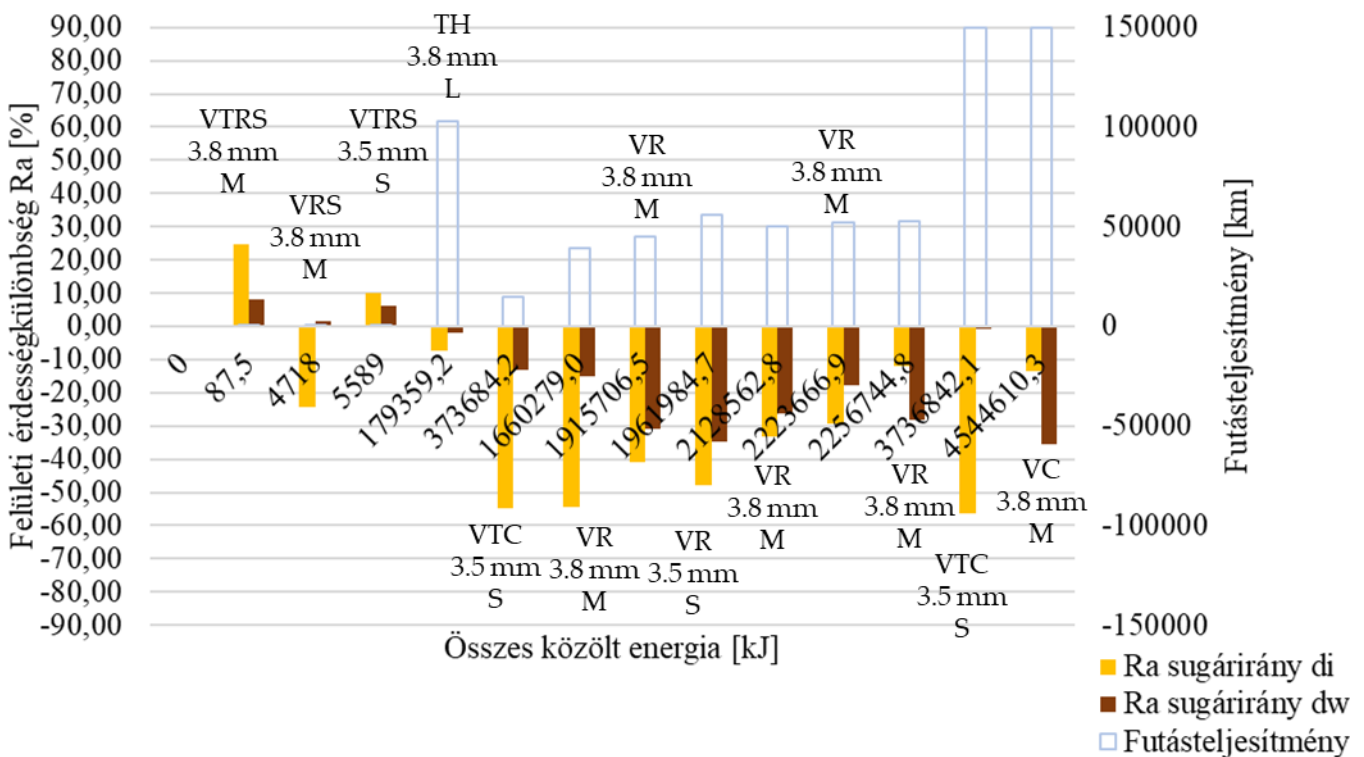
A radiális és az érintő irányú R_a eredmények között különbség mutatkozott a felületi energia azon értékénél, amelytől kezdve az érdesség a Joule-skála mentén csökkenni kezdett. Ez annak a ténynek lehet az eredménye, hogy a radiális mérés kissé eltérő terhelésű és kopási körülményekkel rendelkező átmérőkön halad át.

A mérési eredményekből továbbá a következők szűrhetők le:

- a belső átmérőhöz tartozó eredmények rávilágítanak az illeszkedő felületek kúposodás okán feltehetően nem párhuzamos helyzetére: a pótkocsival végzett vizsgálatok eredményei a belső átmérőn magasabb érdességi értékeket mutatnak, mint a külső átmérőn az alacsony energiájú és futásteljesítményű vizsgálatok (VTRS) során, míg a kezdeti bejáratási szakasz után ennek ellenkezője igaz (ld. a VTC-eredményeket 10000 km és 150000 km után);
- a belső átmérőn mért eredmények több trendtől való eltérést mutatnak, amit a többszöri ismétlődő váltás során bekövetkező kúposodás okozhatott, amely során a deformáció befolyásolta a valós érintkezési felületeket, így drasztikusan eltérő kopást eredményezett a különböző átmérőknél;
- a VR-vizsgálat eredményei mutatják a legalacsonyabb érdességi értékeket;
- a VR-eredményeken belül a kis betétméretre (S) vonatkozó érdességi értékek jelzik a legsimább felületeket;
- a VR-vizsgálatok után, ahol hivatásos járművezetők működtették a tengelykapcsolót, a d_i és d_w -eredmények nem különböztek annyira, ami rávilágít a hőterhelés okozta kisebb csúszás és deformáció (megmaradt kúposág) lehetőségére;

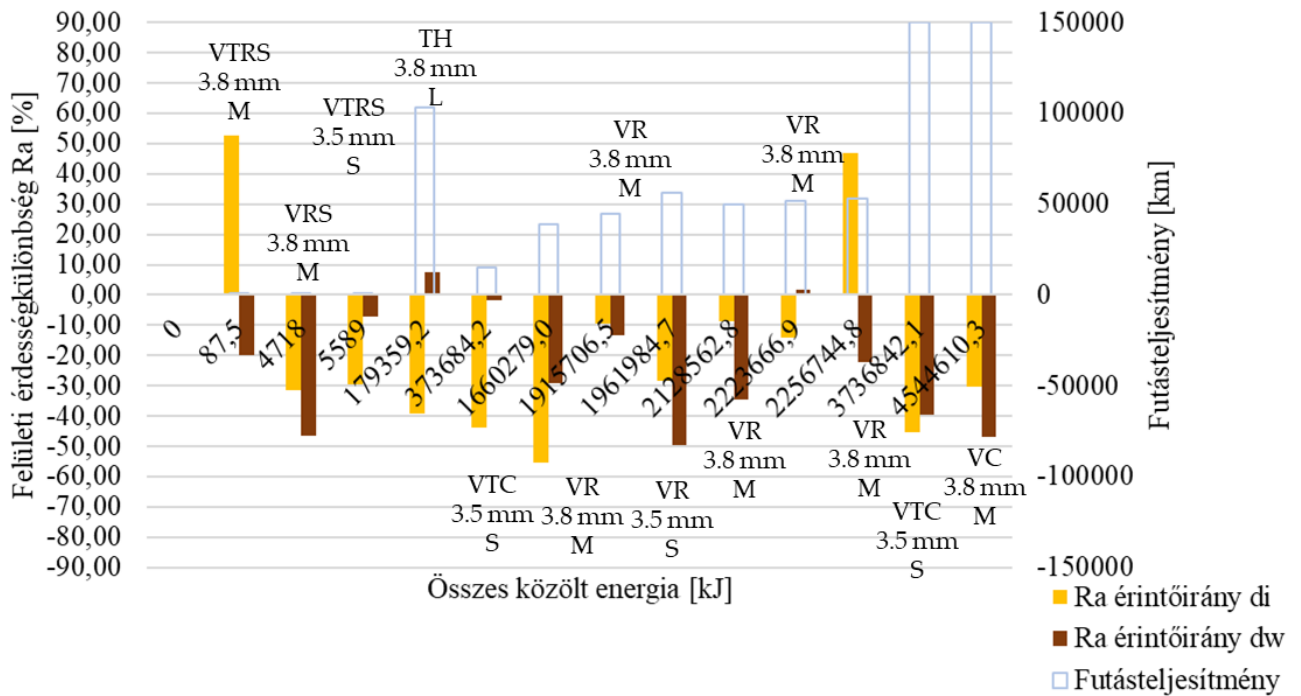
- az R_a érdességi értékek azonban nem lineárisan csökkennek a Joule-skála mentén: az alacsony futásteljesítményű és energiájú teszteknel a tendencia csökkenő, így a közel azonos futásteljesítményű vizsgálatok hasonló R_a értékeket eredményeznek, és az azonos energiájú és futásteljesítményű tesztek után a kisebb méretű betéteket alacsonyabb érdességi értékek jellemzik, mint a nagyobb méretű betéteket,
- a radiális irányú R_z felületi érdességi értékek enyhén csökkenő tendenciát mutatnak a súrlódási átmérőn a növekvő felületi aktivációs energia skála mentén;
- a belső átmérő R_z értékei az R_a értékekre jellemző tendenciát követik;
- a tangenciális irányú R_z felületi érdesség értékei a súrlódási átmérőnél is enyhén csökkennek a növekvő felületi aktivációs energia skála mentén;
- A súrlódási átmérő radiális irányú R_{max} értékei többé-kevésbé követik a többi d_w felületi érdesség jellemzőt, míg a belső átmérő értékei nem mutatnak akkora eltérést a d_w értékektől, mint a többi jellemző;
- Ugyanezek a következtetések vonhatók le az érintőirányú R_{max} értékekből is.

Az M3.2.5. táblázat és a 4.26. ábra – 4.31. ábra azt mutatják, hogy a vizsgálatok hogyan alakították át a súrlódó betétek felületi jellemzőit a különböző átmérőjű és irányú vizsgálatok után. Mivel az összehasonlítás alapja mindig a nem használt betét felületi érdességi értéke volt, az eredmények tendenciája hasonlít az abszolút értékeknél látható tendenciához.

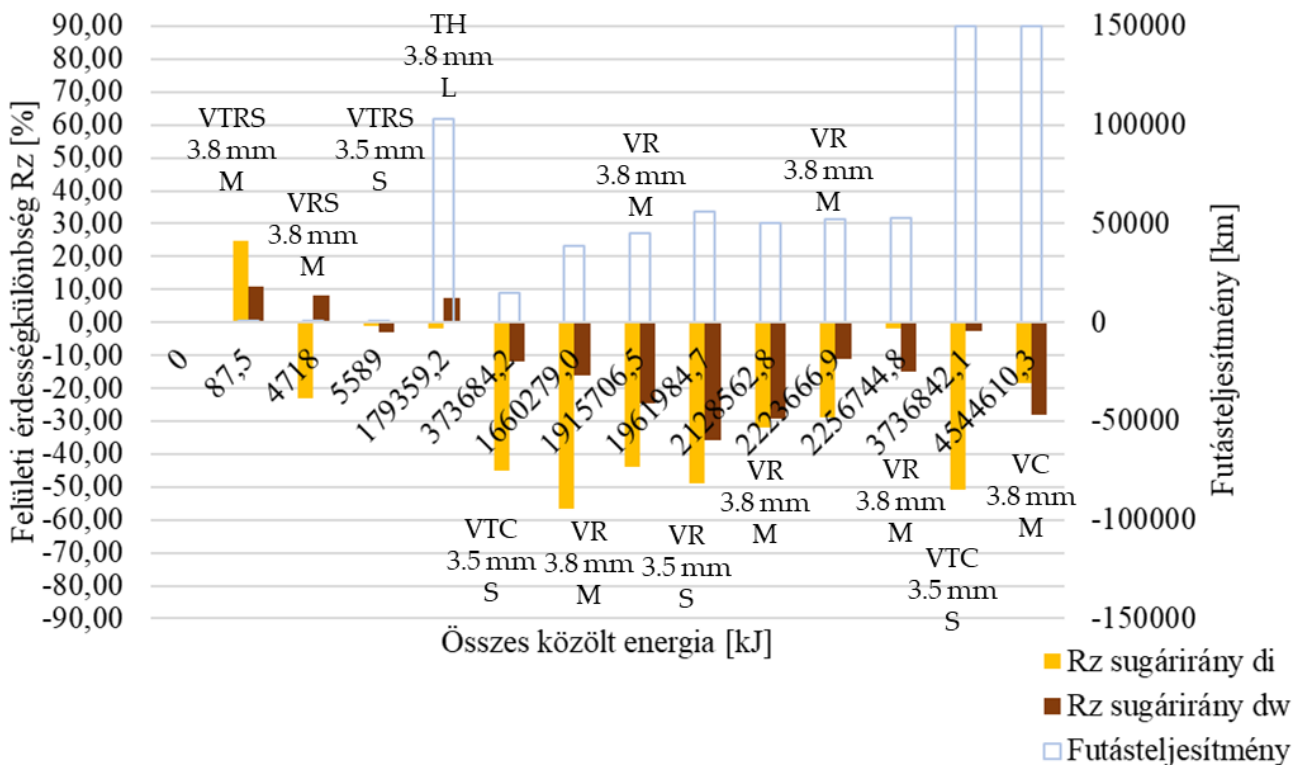


4.26. ábra: A R_a felületi érdesség értékeinek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, radiális irányban

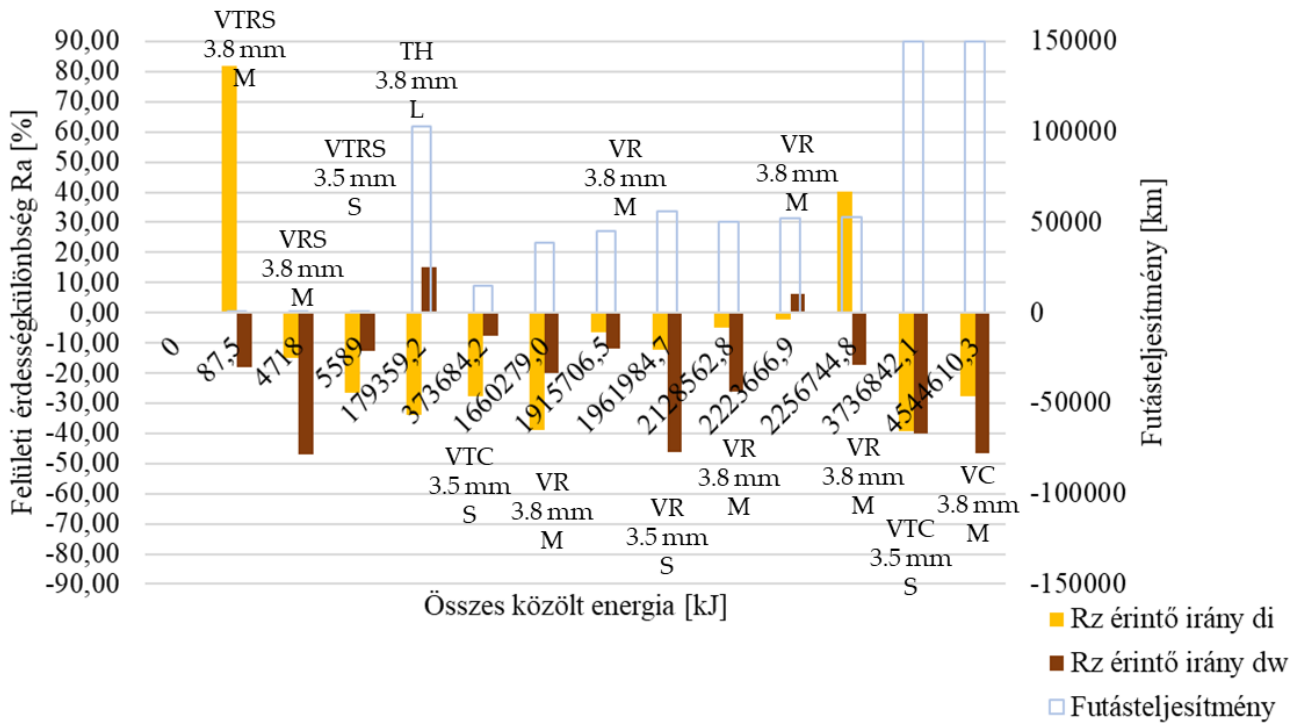
Eredmények



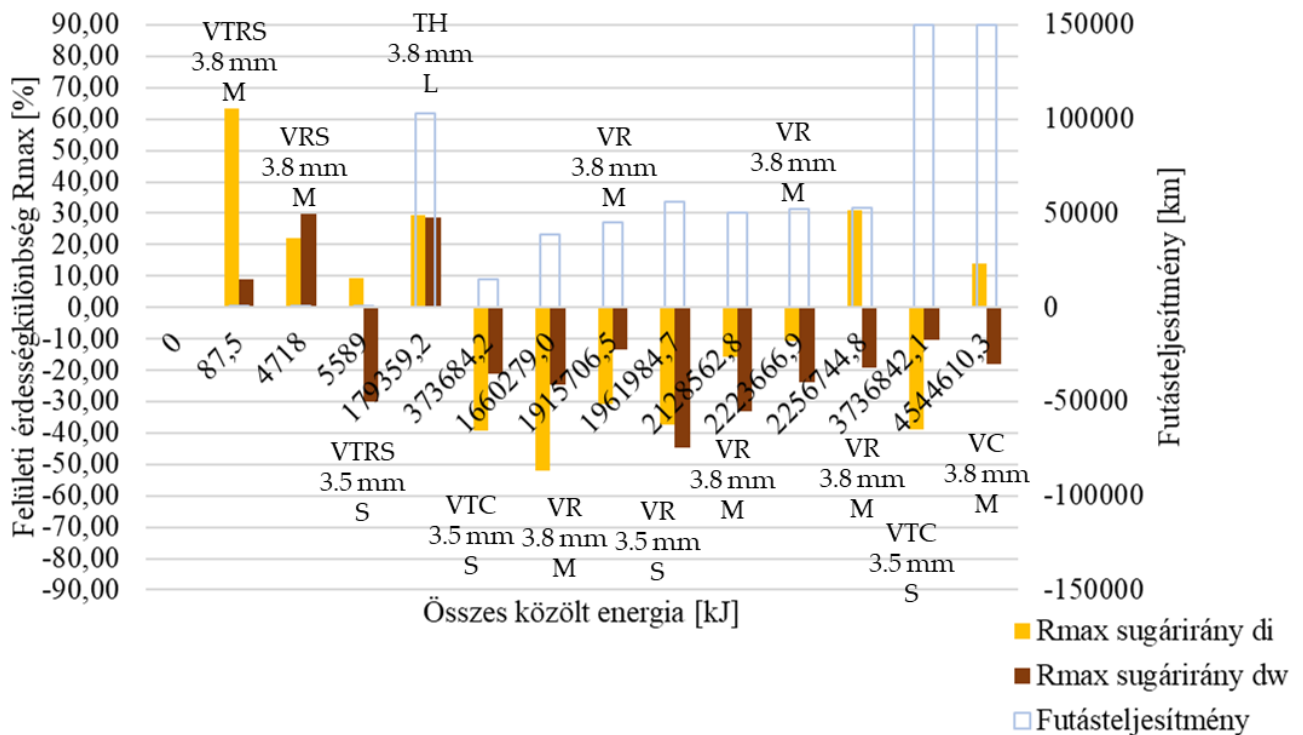
4.27. ábra: A R_a felületi érdesség értékeinek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, érintő irányban



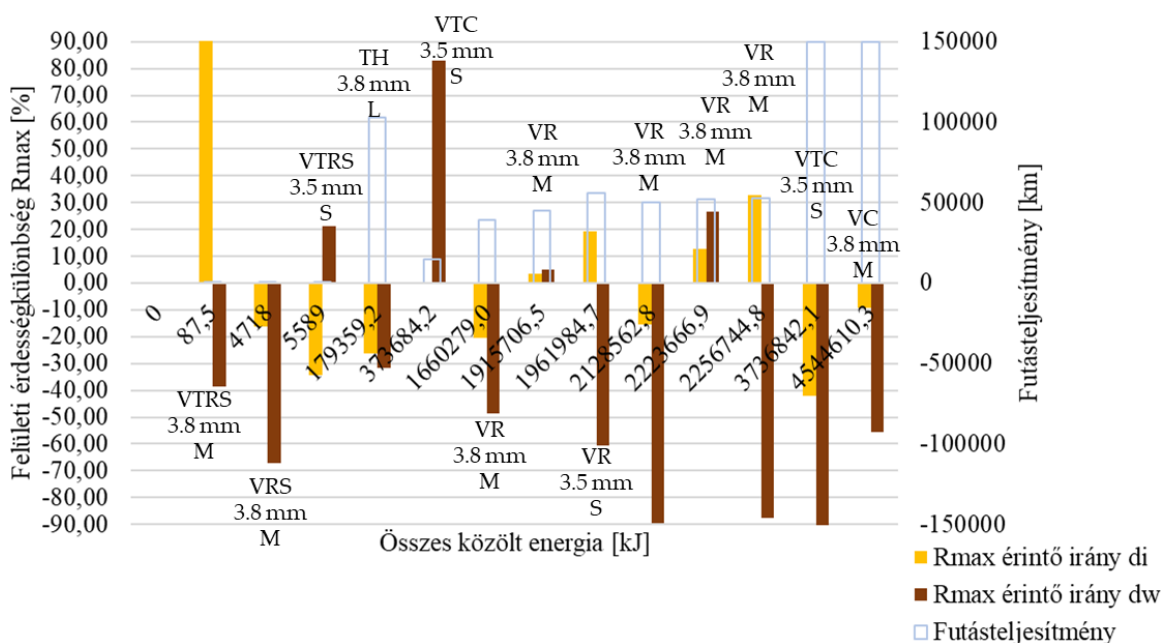
4.28. ábra: Az R_z felületi érdesség értékeinek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, radiális irányban



4.29. ábra: Az R_z felületi érdesség értékeinek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, érintő irányban



4.30. ábra: Az R_{max} felületi érdesség értékek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, radiális irányban



4.31. ábra: Az R_{max} felületi érdesség értékek eltérése a szűz felületek jellemzőitől, érintő irányban

A felületi érdesség százalékos eltérését részletezve a R_a , R_z és R_{max} eredményekből a következő látható:

- az a tény, hogy a kúposodás és a deformáció okozta nagyobb eltérés a belső átmérőnél drasztikusan eltérő kopást eredményez a különböző átmérőknél, egyértelműen látszik az eredményekből;
- az R_a különbségértékek radiális irányú összehasonlítása rávilágít a belső átmérő súrlódási átmérőhöz képesti intenzívebb felületi érdességérték-változására;
- trendtől való eltéréseket tangenciális irányban az alacsony felületi aktivációs energia vagy a futott kilométerek okozhatnak a Joule-skála mentén;
- az R_z értékek szűz felületi jellemzőktől való eltérései hasonló eredményeket mutatnak az R_a trendekhez mind a kíméletlen, mind a normál használatú vizsgálatok esetén a belső és a súrlódási átmérőnél, mind a radiális, mind az érintő irányokat figyelembe véve, még a százalékos értékek figyelembevételével is, bár az érintő irányú eltérések a belső átmérőnél viszonylag kisebbek;
- az alacsony energia- és futásteljesítmény is vezethet megnövekedett R_{max} -értékekhez a belső átmérőn mind radiális, mind érintő irányban, ahogyan azt a VTRS-eredmények is sugallják;
- csak a próbapadi TH-vizsgálat növelte meg jelentősen a súrlódási átmérő érintő irányú R_{max} -értékét, kiemelve azt a tényt, hogy a próbapadi körülmények nem feltétlenül reprodukálják a valós körülmények által kiváltott eredményeket.

Mivel a kíméletlen vizsgálatok a Joule-skála mentén növelték a kopást súrlódási átmérőn, így a felületek az R_a tekintetében radiális és érintő irányban is simábbak lettek. Ahogy azonban a TH eredményei rávilágítanak, a nagy futásteljesítmény vagy a megfelelő hűtés (próbapad) hiánya az érintő irányú R_a felületi érdesség növekedéséhez vezethet a súrlódási átmérőn, valószínűleg a gyors termikus túlterhelés miatt bizonyos forró pontokban, felszakítva ott a felületet maradó makroszkopikus deformációkat okozva. Emellett a meredekebb kopási trend kevésbé csökkenő R_a -értékekkel párosul radiális irányban.

A normál használatú tesztek a súrlódási átmérőn kisebb kopásához vezettek, ami mindkét mérési irányban az aktiválási energiaskála mentén csökkenő R_a felületi érdességgel párosult, bár eltérések megfigyelhetők, amikor jelentős belső átmérős kopás van jelen, ami szintén a belső átmérő R_a felületi érdességének növekedéséhez vezetett mind sugárirányban, mind érintő irányban. A vizsgálati feltételek eredményei közül a kisebb méretű betétek nagyobb kopást szenvedtek el, ami alacsonyabb érintő és sugárirányú R_a felületi érdességgel párosult.

A kíméletlen tesztek után kapott belső átmérős eredmények rávilágítanak az érintkező felületek kúposodás miatti, feltehetően meglévő nem párhuzamos helyzetére: a pótkocsival végzett tesztek eredményei a belső átmérőn magasabb radiális R_a -érdességi értékeket mutattak, mint a súrlódási átmérőn az alacsony energiájú és futásteljesítményű tesztek során (VTRS), míg a kezdeti bejáratási fázis után ennek ellenkezője állapítható meg (VTC 10 000 km után, szemben a 150 000 km-rel).

A normál használatú tesztek kisebb kopást okoztak a belső átmérőnél, ezért az R_a -értékek mindkét irányban alig változtak. Ha azonban volt kopás, az R_a a referenciaszint fölé emelkedhet.

4.3.2 Tű-tárcsa vizsgálatok eredményei

A tribológiai vizsgálat célja az volt, hogy összehasonlítsa az azonos, előző fejezetekben tárgyalt, anyagi összetételű, ám különböző korú, szárazon súrlódó tengelykapcsoló betétfelületek tribológiai teljesítményét, kopási és felületi mikrogeometriai jellemzőit a pin-on-disc (PoD), azaz tű-tárcsa berendezéssel létrehozott laboratóriumi körülmények között. A különböző kor a különböző felületi aktivációs energiaértékeket jelenti, amelyeket a betétek az említett járműipari vizsgálatok során elszenvedtek – akárcsak a közvetlenül a járműipari tesztek követően történt vizsgálatoknál.

A cél az volt, hogy meghatározzam azokat a tényezőket, amelyek befolyásolják a tengelykapcsoló élettartama alatt a betétanyag tribológiai teljesítményét és viselkedési érzékenységét. A relatív eredményértékek összehasonlítása segít kiemelni a különböző paraméterektől való függést. Ezért az olyan eredményeket, mint a kopást és a felületi érdesség változását (az előzetes járműipari tesztek utáni eredményekhez viszonyítva) az aktivációs energiára normalizáltam. A normalizáláshoz használt felületi aktivációs energia-érték egyenlő a járműipari tesztek alatt közöltefelületi aktivációs energia-értékkel.

A súrlódási együttható értékei

A tű-tárcsa vizsgálatok során a próbatestre ható erők nagyságát mérő nyúlásmérők online jelei folyamatosan rögzítésre kerülnek. A súrlódási tényező (CoF) értékeit ezekből az erőkből számítottam ki, amint azt a (3.16) egyenlet mutatja. A 4.32. ábra egy példát mutat be az online mérésből származó súrlódási együtthatóra.



4.32. ábra: Példa a súrlódási együttható grafikonjára

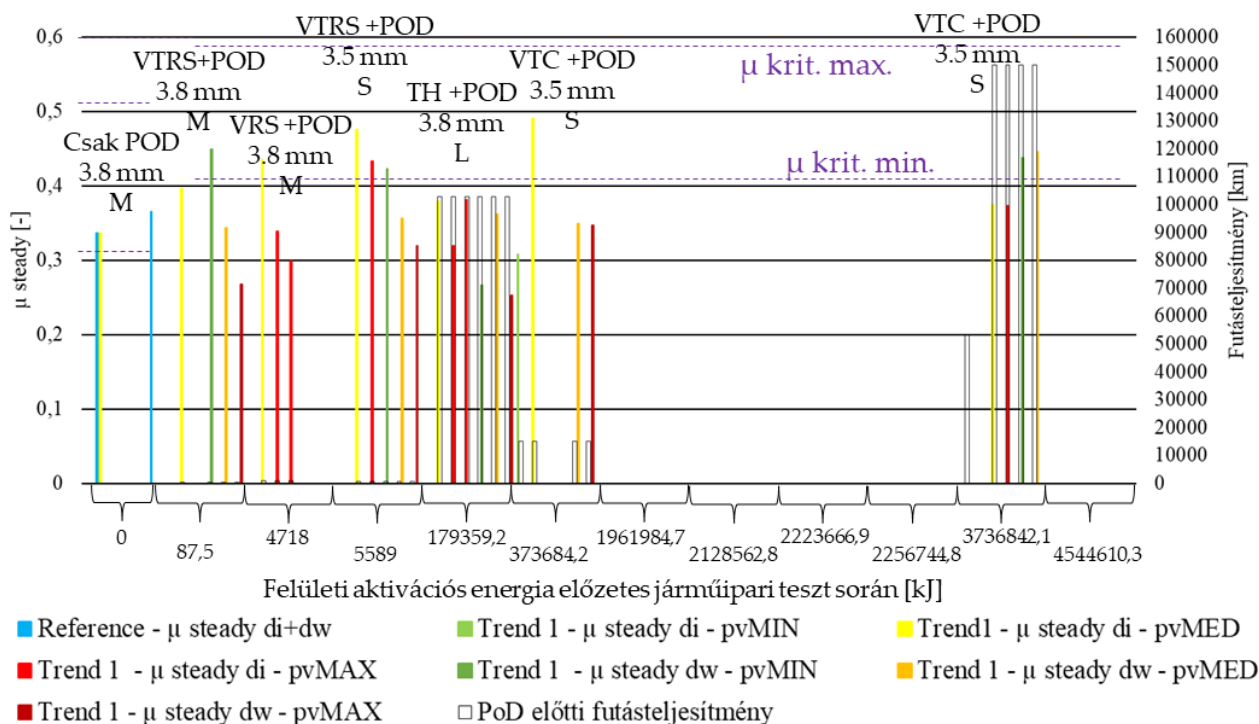
Két paramétert határoztam meg minden egyes betétminta p_v -szint mérésénél: a maximális súrlódási tényező és az ún. „steady state”, azaz állandósult állapotú súrlódási tényező. Az egyes mérésekből az előbbi a legnagyobb súrlódási együttható az ún. „running-in”, azaz tranzienst bejáratási fázisban, az utóbbi pedig az összes számított súrlódási együttható értékének módusza. Állandósult súrlódási fázisnak azt a pontot tekintem, amikor a számított állandósult állapotú és a mért súrlódási együttható értékek közötti különbség kisebb, mint 0,001.

Az egyik legfontosabb kritérium a gépjárművek tengelykapcsolóbetéjeivel kapcsolatban a tribológiai viselkedésük az alatt az idő alatt, amíg a vezető a tengelykapcsolót csúsztatja. A leghosszabb periódus akkor fordulhat elő, amikor az autó nehéz, lassú forgalomban van, vagy emelkedőn felfelé indul. Ezt az állapotot a súrlódási együttható értékeknél számításba vettem úgy, hogy a mérés első 10 másodpercének eredményeit vettem figyelembe a kiértékelésnél.

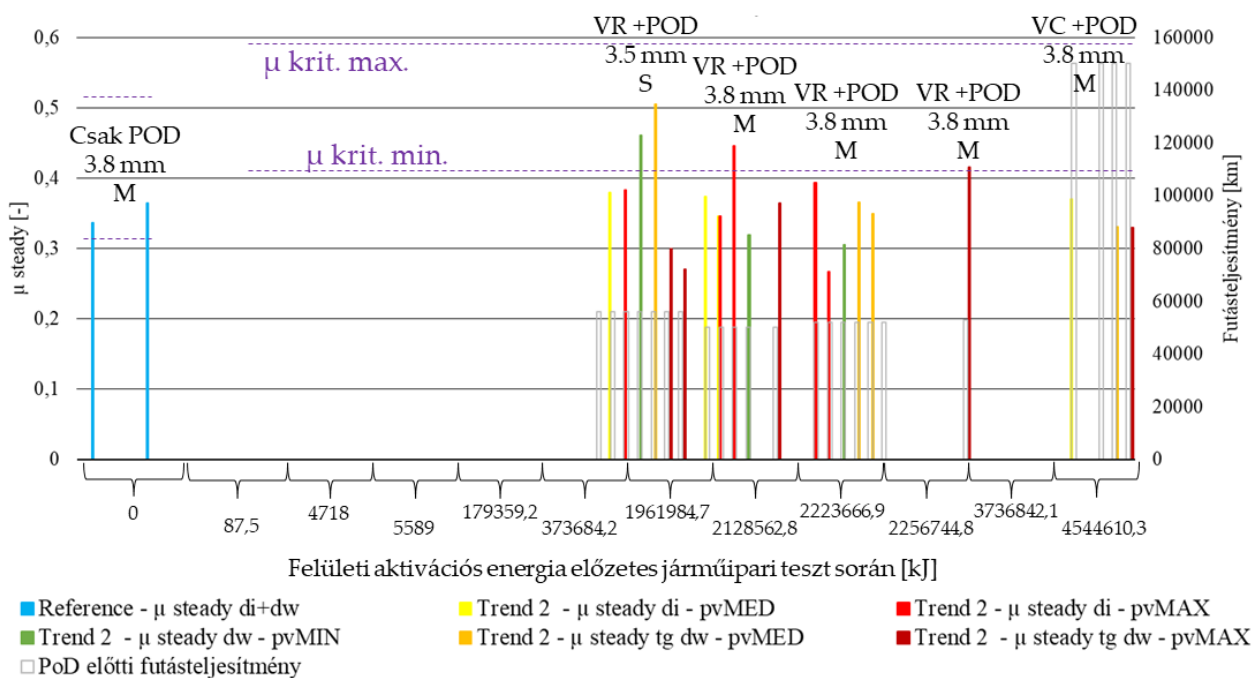
A súrlódási tényező kritériumait a kapcsolási szám alapján határozzák meg a próbapadi tesztek során az autópárházban bevált gyakorlat alapján. Ha ezeket felületi energiaértékekké alakítjuk át akkor a súrlódási együttható kritériumértékei legalább 0,41 és legfeljebb 0,58 értéket kapnak. Az ezen a tartományon kívüli együtthatókkal működő betétek már nem tekinthetők megfelelő nyomtatékvitelre alkalmasnak. A gyártás utáni betéteknek azonban a súrlódási együtthatójukat tekintve a 0,31-0,51 közötti tartományban kell működniük.

A 4.33. ábra részletesen bemutatja az állandósult súrlódási együttható értékének tú-tárcsa vizsgálati adatokból történő értékelésének eredményeit az előző fejezetben a járműipari tesztek követő kopásméréseknél felismert úgynevezett "kíméletlen" trend szerint, míg a 4.34. ábra a "normál használatú" trend szerinti „tú” minták eredményeit szemlélteti. Mindkét csoport mintái a járműipari tesztek során elszenvedett felületi aktivációs energiaskála (nemlineáris Joule-skála) mentén kerülnek ábrázolásra. A különböző p_v -értékek (min, med, max) eredményeit színnel, míg a különböző átmérők (di: belső átmérő, dw: munkaátmérő) eredményeit, amelyekről a próbateszteket kivágtam, színárnyalatokkal különböztetem meg. Az eredmények három ismétlésen alapulnak.

Eredmények



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



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

A 4.33. ábra és a 4.34. ábra összehasonlításából a következőket állapítottam meg:

- A kíméletlen használatú minták súrlódási együttható értékei főként a belső átmérőjű próbadaraboknál csak a minimális és közepes p_v -terhelés esetén esnek a 0,41-0,58

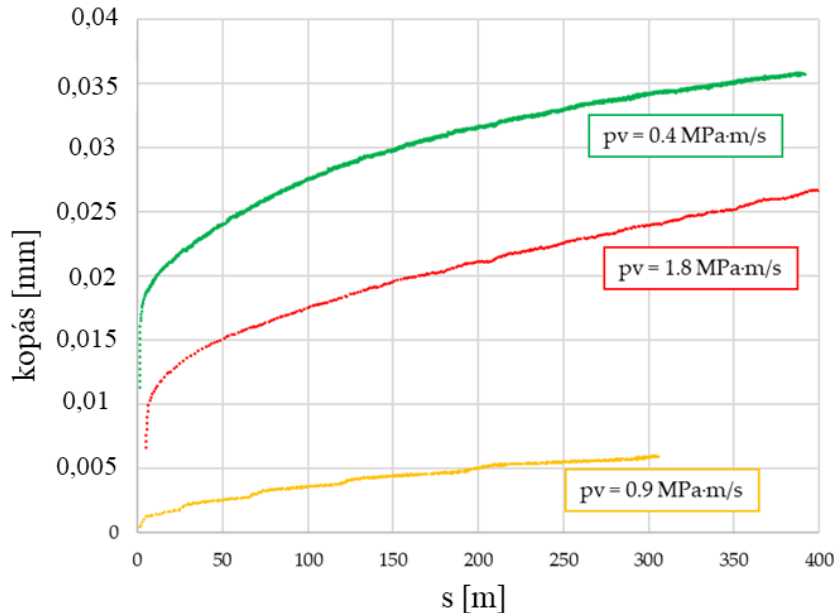
kritériumtartományba, míg a közepes és a maximális p_v esetén a normál használatú betétek mintáinak értékei az elfogadható tartományban teljesítenek.

- Ettől függetlenül a súrlódási átmérőről származó "kíméletlen" minta eredményei nagy p_v alatt kívül esnek az elfogadható, 0,41-0,58 súrlódási együttható tartományon.
- A p_v 0,4 MPa·m/s-ról 1,8 MPa·m/s-ra történő növekedése a "kíméletlen" (azonos d_i vagy d_w átmérőhöz tartozó) súrlódási tényező értékek 0,11-0,19-dal való csökkenését okozza alacsony felületi energiájú vizsgálatoknál, míg ez a különbség már nincs jelen, amint az energiaértékek elérik a 179 MJ-t.
- A p_v 0,4-ről MPa·m/s-ról 1,8 MPa·m/s-ra történő növekedése a normál használatú (azonos d_i vagy d_w átmérőhöz tartozó) súrlódási tényező értékek $\sim 0,05$ -dal való növekedését okozza, kivéve a kis méretű (S) betétek próbatestei esetében.
- Különösen a VTRS eredmények emelik ki, hogy a súrlódási együttható a belső átmérőtől a súrlódási átmérő felé haladva csökken, ami azt a tényt tükrözi, hogy minél idősebb egy betét, annál magasabbak az előírt kritériumértékek - lásd a 8. és 9. ábrán látható változást: a minimális érték 0,31-ről 0,41-ra; a maximális érték 0,51-ről 0,58-ra változik; és a súrlódási átmérőt alacsonyabb felületi energiánál valószínűleg nagyobb kopás és alacsonyabb súrlódási együttható jellemzi.
- Magasabb felületi aktivációs energiaértékeknél a "kíméletlen" belső átmérő mintájának együtthatója $\sim 0,07$ -dal alacsonyabb, mint a munkadarab átmérőjének együtthatója, ami azt a jelenséget tükrözi, hogy a betét élettartamának vége felé a tengelykapcsolóban bekövetkező deformációk miatt a belső átmérő nagyobb hőterhelést kap, ami rosszabb tribológiai teljesítményhez vezet.

Az eredmények másrészt egyértelműen azt mutatják, hogy a súrlódási együtthatónak a felületi aktivációs energiától való függését az élettartam során több tényező is befolyásolja. A futásteljesítményhez képest a felhasználói profil, a geometria és a valós súrlódási átmérő kritikusabb szerepet játszik.

Kopási értékek

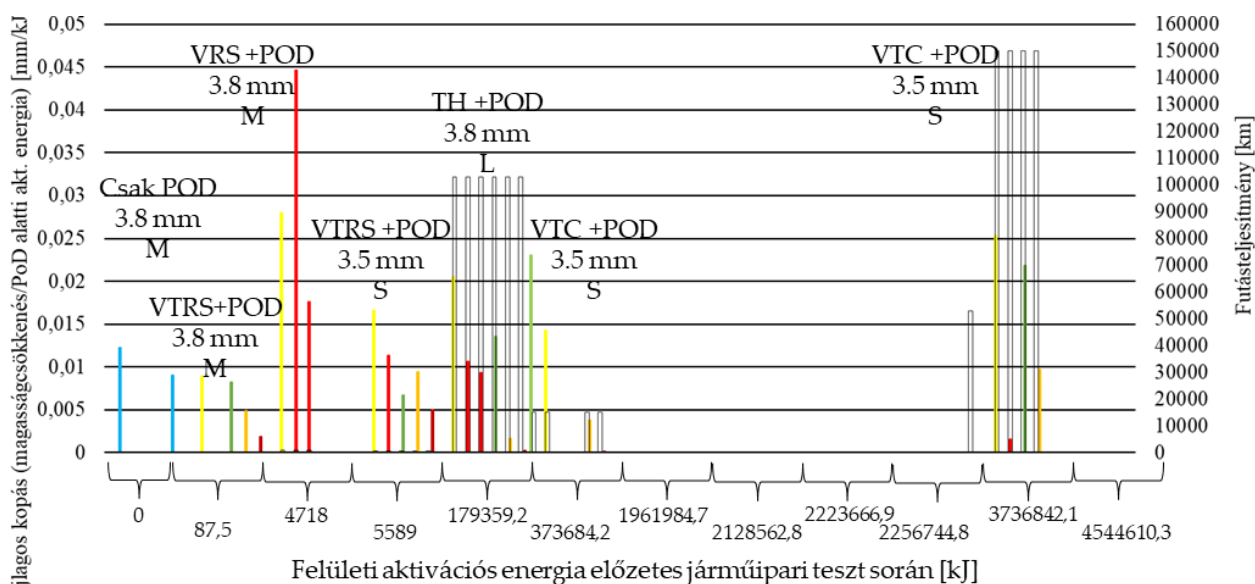
A kopási értékeket a tű-tárcsa tesztek során is nyomon követtem, és a kalibrált magasságérzékelő jeléből értékeltem ki, amely a tű tartójának függőleges elmozdulását mérte. Bár ilyen módon a deformációs értékeket együtt mértem a kopásként kezelt elmozdulással, a vizsgálati minta kis mérete miatt előbbieket elhanyagoltam. A 4.35. ábra egy példát mutat a kopásérzékelés (a vastagság lineáris csökkenése (mm)) eredményeire különböző p_v -értékek esetén ugyanazon mintakategória esetében a súrlódva megtett út (s) mentén.



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

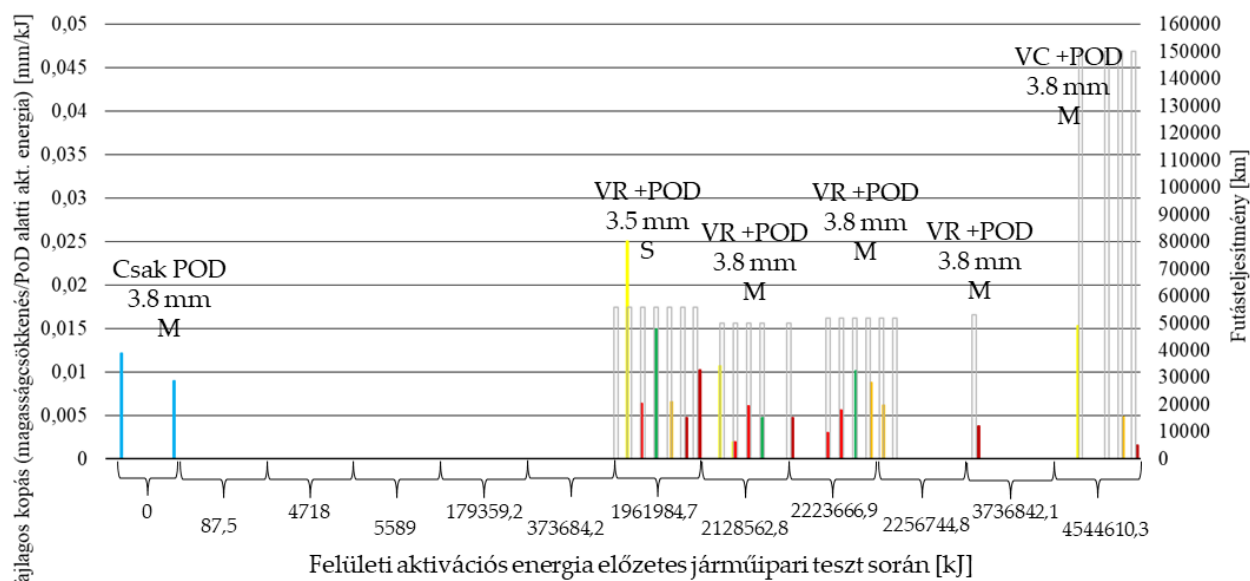
A különböző felületi aktivációs energiaszintek miatt, amelyek a járműipari tesztekben származnak, a vizsgálati paramétereket és a mérési hossz kopási értékeit a tű-tárcsa vizsgálat során alkalmazott felületi aktivációs energiára normalizáltam. Ily módon az anyag élettartamának bizonyos szakaszaiban az 1 kJ aktivációs energiához tartozó fajlagos kopási értékek összehasonlíthatók. Az eredményeket a 4.36. ábra és a 4.37. ábra szemlélteti a két különböző használati trendre vonatkozóan. A különböző p_v -értékek (min, med, max) eredményeit színnel, míg a különböző átmérők (di: belső átmérő, dw: munkaátmérő) eredményeit, amelyekből a próbatesteket kivágtam, színárnyalatokkal különböztettem meg. Az eredmények három ismétlésen alapulnak.

Eredmények



- Referencia - fajlagos kopás di+dw
- Trend 1 - fajlagos kopás di - pvMIN
- Trend 1 - fajlagos kopás di - pvMED
- Trend 1 - fajlagos kopás di - pvMAX
- Trend 1 - fajlagos kopás dw - pvMIN
- Trend 1 - fajlagos kopás dw - pvMED

4.36. ábra: Fajlagos kopási értékek minimális, közepes és maximális pv-szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek felületi aktivációs energiája által meghatározott Joule-skálája mentén – első trend: kíméletlen terhelési esetek: VTRS, VRS, TH, VTC



- Referencia - fajlagos kopás di+dw
- Trend 2 - fajlagos kopás di - pvMAX
- Trend 2 - fajlagos kopás di - pvMED
- Trend 2 - fajlagos kopás tg dw - pvMED
- Trend 2 - fajlagos kopás dw - pvMIN
- Trend 2 - fajlagos kopás tg dw - pvMAX

4.37. ábra: Fajlagos kopási értékek minimális, közepes és maximális pv-szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek felületi aktivációs energiája által meghatározott Joule-skálája mentén – első trend: normál használatú terhelési esetek: VTRS, VRS, TH, VTC.: VR, VC

A korábbi járműipari tesztek követően a tű-tárcsa fajlagos kopásméréseinek eredményeit vizsgálva a következő következtetések vonhatók le:

- A belső átmérőnél kezdetben magasabb kopási értékek miatt az anyag érzékenyebb a magas pv-értékekre, amint azt a VRS-eredmények is sugallják: a 0,03 mm/kJ kopási értéket közepes és maximális pv mellett elérték, sőt meghaladják.

- A futásteljesítmény szintén hatással van a *p_v*-érzékenységre, amint azt a 0,02 mm/kJ-nál magasabb TH eredmények is sugallják, bár ez nem olyan erős, mint a belső átmérőnél jellemző feltételezett intenzív öregedési hatás, amint azt a VRS eredmények is kiemelik.
- Az azonos *p_v*-értékkel rendelkező eredményeket összehasonlítva ugyanazon próbatest-kategórián belül, a belső átmérőnél intenzívebb kopás nem csak a kíméletlen mintáknál mutatható ki (0,005 -0,007 mm/kJ különbség alacsony futásteljesítmény és energia mellett, 0,015 mm/kJ több mint 100 000 km futásteljesítményű járműipari tesztek esetén vagy a felületi aktivációs energiaskála végén), hanem normál használatú eredményeknél is (0,02 mm/kJ a 60 000 km-nél alacsonyabb futásteljesítményű vizsgálatot követő tű-tárcsa mintáknál, 0,01 mm/kJ a 150 000+ km-es vizsgálatot követő tű-tárcsa mintáknál).
- A VTC-eredmények alapján az említett összefüggések annak a következményei is lehetnek, hogy a betéteket pótkocsis járművön tesztelték, ami a jármű megnövekedett súlyát és a tengelykapcsoló nem optimális érintkezési helyzetekben történő kapcsolását jelenti a tengelykapcsoló súrlódó felületét illetően.
- A VTRS tű-tárcsa vizsgálati eredmények az eredeti betétek kisebb átmérőjének következményei is lehetnek. Az alacsonyabb futásteljesítmény mellett tapasztalt többi betéthez képesti magasabb kopási arányt már a járműipari vizsgálatból megállapítottam.
- A városi vezetési körülmények (ld. a tesztnev rövidítések között a C betűt) a gyakori váltás és a rövidebb lehülési lehetőségek miatti többletenergiaterhelésükkel hasonló tű-tárcsa eredményeket hoztak, mint a próbapadi (T) körülmények utáni tű-tárcsa vizsgálatok.

A 4.37. ábra alapján a normál használatú betétek pin-on-disc kopási eredményei rávilágítanak a tesztpályán, a profik (VR) által vezetett járműveken végzett tesztek és a nagy futásteljesítményű városi tesztek hatásaira, ahol a vásárló vezetési stílusa meghatározta a hosszú távú kopási értékeket (VC), és a következőket láthatjuk:

- A kíméletlen eredményekkel (0,01-0,03 mm/kJ) összehasonlítva a normál használatú fajlagos kopási értékek a belső átmérőnél (0,01 mm/kJ) jelentősen alacsonyabbak, kivéve a kisméretű (S) betétet.
- A vezetőprofil hatása azonban nem tűnik olyan jelentősnek e fajlagos értékek között.
- Többé-kevésbé azonos futásteljesítménynél (50 000-60 000 km) a kisebb átmérőjű, VR-tesztelt betét (S méret) 0,01-0,015 mm/kJ értékkel magasabb fajlagos kopási értékeket mutatott, mint a nagyobb átmérőjű betétek.
- A VC fajlagos kopási eredmények azt sugallják, hogy ha a rendszert nem hivatásos járművezetők által kifejtett terheléssel, de hosszú ideig (futásteljesítmény) működtetnék, a fajlagos kopási értékek hasonlóan mérsékeltek (0,015 mm/kJ alatt) lennének, mint a hivatásos járművezetők által okozottak.

Összességében a fajlagos kopási eredményekből a következő következtetések vonhatók le:

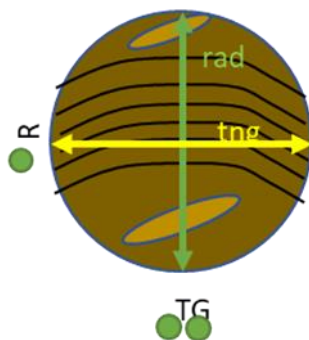
- Bár minél magasabb a felületi aktivációs energia, annál magasabbak a fajlagos kopási értékek, a pontos értéket nagymértékben befolyásolja a vezetési stílus és a jármű indításakor az energiaterhelés felgyorsulása, ami rávilágít az öregedés jelentőségére és hatásaira.
- A magasabb *p_v*-értékek alacsonyabb fajlagos kopást eredményeztek feltételezhetően a megfelelő körülmények közt fellépő harmadiktest-áram kenő hatásának köszönhetően.
- A fajlagos kopás átmérőtől való függése az alacsony *p_v*-szintek vagy magas futásteljesítmények esetén szembetűnőbb.
- Minél intenzívebb az előzetes járműipari teszt, annál homogénebb a fajlagos kopási spektrum, függetlenül a *p_v*-értékektől is. Ez abból adódhat, hogy az élettartam során a

súrlódó felület minden egyes érintkezés után átalakul, és az ellenfelülettel való ismételt érintkezés után más felület jön létre, amely az utóbbit is módosítja.

A fajlagos értékektől függetlenül a paraméterek továbbra is befolyásolják a vizsgált szárazon súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolóbetét kopását.

A felületi érdesség-mérés eredményei

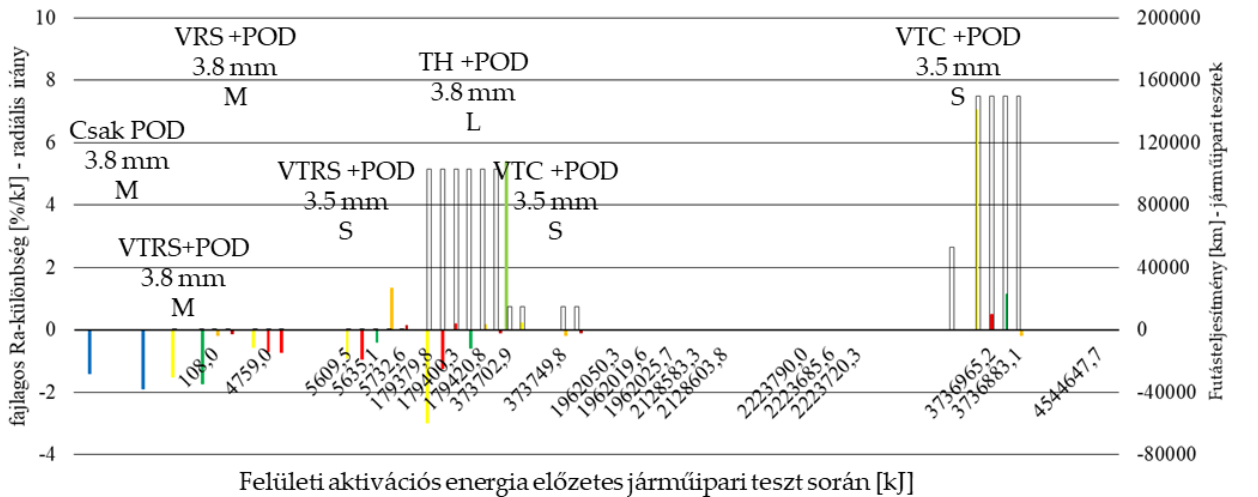
A súrlódó betétek felületi érdességi értékeinek vizsgálata a tű-tárcsa vizsgálatok után egy referencia, szűz felületű betét és a különböző előzetes járműipari teszteken átesett betétek próbatestjein újabb lehetőséget ad arra, hogy a vizsgált szárazon súrlódó hibrid kompozit tengelykapcsolóbetét anyagának az élettartam különböző pontjaihoz tartozó tribológiai viselkedési jegyeit – a nem lineáris Joule-skála mentén – összehasonlíthassam. Ezért felületi érdességméréseket végeztem a PHT 350 tapintóval felszerelt MarSurf felületi érdességmérő készülék felhasználásával. E mérések során a mérési hossz $L_t = 4,8$ mm volt, és a JIS B0601-1994 szabvány szerinti aritmetikus átlagos érdesség, R_a , a tízpontos átlagos érdesség, R_z , és a maximális magasság, R_{max} - mindhárom a JIS B0601-1994 szabvány szerint - került kiértékelésre. A 13. ábra szemlélteti, hogy milyen irányban végeztem a vizsgálatokat a tű próbatestek felületén.



4.38. ábra: Az érdességmérés iránya a pin-on-disc tű próbatesteken

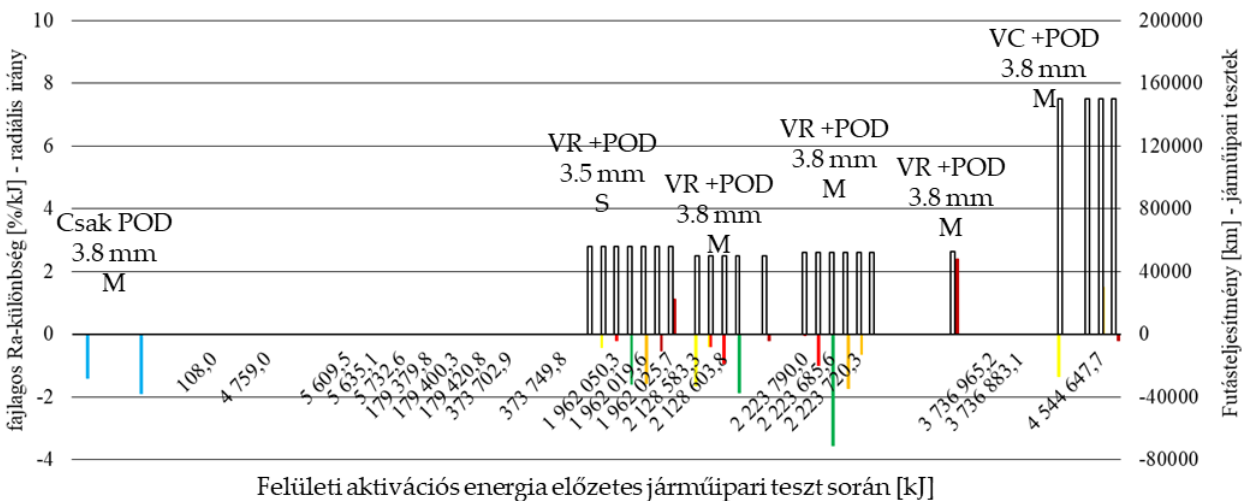
Az eredményül kapott értékeket ezután összehasonlítottam a tű-tárcsa vizsgálat előtti felületi érdességi értékekkel, és a felületi érdességi különbségek R_a , R_z és R_{max} értékeit minden próbatestre kiszámítottam. A kopási eredményeknél alkalmazott módszer szerint, a különböző aktiválási energiaszintek, vizsgálati paraméterek és tű-tárcsa mérési időtartam miatt, a felületi érdességkülönbség értékeit a tű-tárcsa vizsgálat során közölt aktivációs energiára normalizáltam. Ily módon az anyag élettartamának bizonyos szakaszaiban az 1 kJ aktiválási energiára vonatkozó fajlagos felületi érdességváltozás (fajlagos dR) értékeket hasonlítottam össze. Az eredményeket a 4.39. ábra – 4.42. ábra illusztrálja a két különböző trendre vonatkozóan. A különböző p_v -értékek (min, med, max) eredményeit színnel, míg a különböző átmérők (d_i : belső átmérő, d_w : súrlódási átmérő) eredményeit, amelyekből a próbatesteket kivágtam, színárnyalatokkal különböztettem meg. Az eredmények három ismétlésen alapulnak.

Eredmények



■ Referencia - Ra rad di + dw
 ■ Trend 1 - Ra rad di - pvMIN
 ■ Trend 1 - Ra rad di - pvMED
 ■ Trend 1 - Ra rad di - pvMAX
■ Trend 1 - Ra rad dw - pvMIN
 ■ Trend 1 - Ra rad dw - pvMED
 ■ Trend 1 - Ra rad dw - pvMAX
 □ Futásteljesítmény PoD előtt

4.39. ábra: Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatesztek radiális irányú fajlagos R_a különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén - első trend: kíméletlen terhelési esetek: VTRS, VRS, TH, VTC



■ Referencia - Ra rad di + dw
 ■ Trend 2 - Ra rad di - pvMIN
 ■ Trend 2 - Ra rad di - pvMED
 ■ Trend 2 - Ra rad di - pvMAX
■ Trend 2 - Ra rad dw - pvMIN
 ■ Trend 2 - Ra rad dw - pvMED
 ■ Trend 2 - Ra rad dw - pvMAX
 □ Futásteljesítmény PoD előtt

4.40. ábra: Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatesztek radiális irányú fajlagos R_a különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – második trend: normál használatú terhelési esetek: VR, VC

A sugárirányú fajlagos R_a -változás értékeket vizsgálva a következőket állapítom meg:

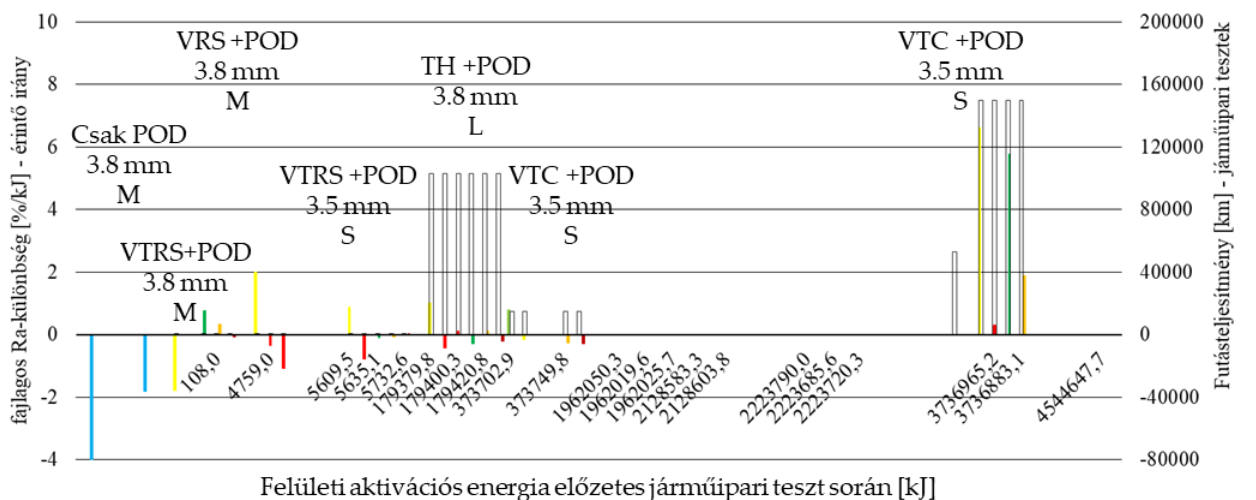
- A referencia-mérés a tű-tárcsa teszt által kiváltott érdességcsökkenést mutatja az aktivációs energiaskála mentén, kissé magasabb (0,4%/kJ) csökkenéssel a súrlódási átmérőn.
- Ez a viszony az előzetes járműipari tesztek utáni belső és a súrlódási átmérős minták eredményei között szinte minden mintánál ellentétes irányba változik, kivéve az S méretű súrlódó betétek próbatestjeit.
- A legtöbb R_a -érték csökkent, kivéve a VTC belső átmérőjű minta eredményeit a minimális pv szintű teszt után és a VTC belső átmérőjű minta eredményeit a közepes pv -jű teszt után: nagy futásteljesítmény és energia pozitív, több mint 5%/kJ dR_a értékeket eredményezett.

Ezek azt tükrözik, hogy a felület felszakadt, mivel az ellenállás alacsony a járműipari teszt következményei miatt.

- Érdekes módon, közepes p_v mellett csak a VTRS-vizsgálatnál történt növekedés a súrlódási átmérős próbatest esetén – ami a pótkocsival végzett vizsgálatok hatásait tükrözi.
- Az első trend eredményei a referencia minták belső és súrlódási átmérős felületi érdességkülönbség viszonyával ellentétben a belső átmérőjű minták szolgáltatnak erőteljesebben csökkenő felületi érdességi adatokat, míg a második 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.
- Maximális p_v mellett R_a -növekedés csak az S méretű és a magas előzetes aktivációs energiájú felületről származó mintáknál fordult elő a második trend eredményei között.
- Egyébként az érdességkülönbség abszolút értéke a p_v növekedésével csökken a $\sim 0,5-1\%/kJ$ -al.

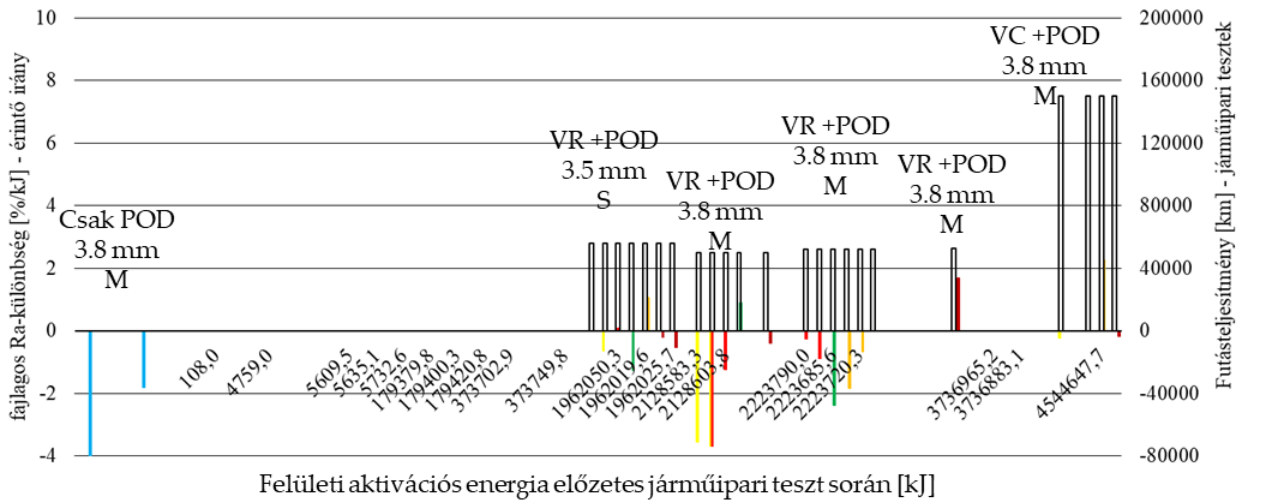
Az első trend (Trend 1) próbatesteire jellemző radiális irányú felületi érdességváltozás ugyanúgy változik a nemlineáris Joule-skála mentén az R_z és R_{max} értékek esetén. Ugyanez figyelhető meg a második trend (Trend 2) eredményeiből is. Ezért a radiális irányú Trend 1 és Trend 2 R_z és R_{max} eredményeket a Melléklet M3.3.1.- M3.3.4. ábrái szemléltetik. Az eredmények három ismétlésen alapulnak.

Tangenciális irányban mindhárom érdességkülönbség érték ugyanúgy viselkedik a Joule-skála mentén. Ezért a 4.41. ábra és a 4.42. ábra csak az R_a deltaértékeket mutatja a nemlineáris Joule-skála mentén a Trend 1 és Trend 2 próbatestek esetében, míg a Trend 1 és Trend 2 R_z és R_{max} eredményeket a Melléklet M3.3.5.- M3.3.8. ábrái szemléltetik.



4.41. ábra: Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatestek érintő irányú fajlagos R_a különbség értékei a minimális, közepes és maximális p_v -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – első trend: kíméletlen terhelési esetek: VTRS, VRS, TH, VTC

Eredmények



■ Referencia - Ra tng di + dw ■ Trend 2 - Ra tng di - pvMIN ■ Trend 2 - Ra tng di - pvMED ■ Trend 2 - Ra tng di - pvMAX

■ Trend 2 - Ra tng dw - pvMIN ■ Trend 2 - Ra tng dw - pvMED ■ Trend 2 - Ra tng dw - pvMAX □ Futásteljesítmény PoD előtt

4.42. ábra: Belső és súrlódási átmérőről kivágott tú-tárcsa próbatesztek érintő irányú fajlagos R_a különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tú-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – második trend: normál használatú terhelési esetek: VR, VC

A három ismétlésen alapuló eredményekből az alábbi következtetéseket vonom le:

- Az érintő irányban a referenciamérés a PoD után 2-4%/kJ értékű csökkenő fajlagos érdességértékeket mutat. Az átmérő hatása kitűnik: a belső átmérős minta érdessége jelentősebben csökken, ~2%/kJ különbséggel.
- Ez a viszony megváltozik az érintő irányú mérések első trendű próbatesteinek eredményeinél is a Joule-skála mentén, de a Trend 2 értékek tekintetében többé-kevésbé igaz marad.
- A kis méretű (S) betétekből kivágott Trend 1 előterhelésű próbatesztek, amelyek eredeti betétjein utánfutóval (rövidítésben VT) végezték a teszteket, 1-7%/kJ R_a -növekedést mutatnak minimális és közepes pv -értékeknél - lásd VTC. A magasabb, 3700 MJ feletti felületi energiájú minták különösen a belső és a súrlódási átmérőjű mintáknál 6-7%/kJ növekedést produkálnak.
- A Trend 1 minták közül a minimális és közepes pv általában növekvő érdességhez vezet, míg a maximális pv az R_a csökkenésével simább felületeket hoz létre.
- A második trend szerinti érdességváltozások a PoD után egyenletesebbek az irányukat tekintve. Főként csökkenő értékeket mértem.

A súrlódási együttható és a kopási értékekhez hasonlóan a felületi érdesség vizsgálata is rávilágít a szárazon súrlódó, szálerősítéses hibrid kompozit tengelykapcsolóbetétek tribológiai viselkedését szabályozó paraméterek hatásaira. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen betét alkalmazhatóságát nem lehet egyszerűen a futásteljesítmény alapján megítélni, ahogy azt az autóiipari bevett gyakorlat javasolja.

4.4 Modellezés

A gépjárművek száraz tengelykapcsolóinak jelenlegi szimulációs módszerei általában 2D tengelyszimmetrikus geometriájú modelleket használnak, nemcsak azért, hogy csökkentsék a számítási időt egy kapcsolt termomechanikai végelelemes modellben, hanem azért is, mert a tengelykapcsoló betétjeinek 3D-s viselkedése csak axiális terhelések esetén írható le jól. A jelenlegi modellekből általában hiányzik az érintkezési viszonyokért felelős mechanikai, termikus vagy tribológiai paraméterek terhelések vagy élettartam okozta változásának hasznosítása. Az ilyen eltérések 2D-ben történő modellezése szinte lehetetlen. Annak ellenére, hogy a repedési fordulatszám a tengelykapcsoló betét egyik legveszélyesebb terhelési esete, a 2D-s vizsgálatok nem rendelkeznek az ilyen terhelések figyelembevételének lehetőségével, illetve azzal, hogy az alkatrészeire hogyan hat ez a szempont. Egy autóiipari tengelykapcsoló erőátviteli rendszerének 2D és 3D kapcsolt termomechanikai modelljeit összehasonlítva, a probléma egy síkból 3D-re történő kivezetésével a megoldási idő megnövekedhet, de a modell felállítása jelentősen csökken, mivel a helyes eredményekhez nem kell a 2D és 3D merevségeket és azok kapcsolatát a különböző alkatrészek geometriai egyszerűsítései után validálni. Egy 3D modell fejlesztéséhez azonban célszerű mégis 2D-ben elvégezni az első validációs vizsgálatokat.

A szükséges paraméterek, amelyeket mérések elvégzésével kell meghatározni egy szárazon csúszó hibrid polimer kompozit anyag teljes mechanikai és termikus leírásához, bemutatásra kerültek.

A keverési szabály felhasználásával és szakítóvizsgálatok, Iosipescu nyíróvizsgálatok és kétirányú nyíróvizsgálatok elvégzésével olyan paramétereket kaptam, amelyek egy merevségi mátrixon keresztül írják le az anyag mechanikai viselkedését. Hőtágulási vizsgálat és differenciális pásztázó kalorimetria elvégzésével, valamint a Lee-féle készülék felhasználásával a termikus szempontok jellemzése valósult meg.

A vizsgált és meghatározott paramétereket egy szárazon súrlódó gépjármű-tengelykapcsoló végelelemes termomechanikai érintkezési modelljéhez használhatók fel, amint azt a 3.18. ábra szemlélteti. A dolgozatomban ismertetett módszerrel új kompozit-összetevők vagy teljesen új anyagok hatása is figyelembe vehető. A végelelemes szoftver (18.2., illetve 2021 R2 verzió, Ansys, Inc., Canonsburg, Washington, USA) kiterjed az ortotóp és hőmérsékletfüggő anyagi viselkedés figyelembevételére a felhasználó által meghatározott anyagmodellekkel és a terhelési esetek összekapcsolásával.

E modell célja a jövőben a szimulációs lehetőségek bővítése tribológiai szempontok révén (például a súrlódási és kopási viszonyok megkülönböztetése különböző terhelések vagy futásteljesítmény mellett), a költségcsökkentést célzó mechanikai, termikus és tribológiai teljesítményellenőrzési vizsgálatok tekintetében a súrlódó betét költségcsökkentést célzó ellenőrzése, míg az identifikálási vizsgálatok egyfajta módszertant szolgáltatnak az újonnan létrehozott anyagok paraméterezéshez.

4.4.1 Mechanikai terhelési modell – 3D

Mechanikai végelelemes modellt építettem fel annak érdekében, hogy a betétanyag viselkedését a számított mechanikai tulajdonságokkal a repedési fordulatszám terhelés alatt szemléltessem. A számítások szimulációs környezetként az ANYS Workbench (18.2 verzió, Ansys, Inc., Canonsburg, Washington, USA) szolgált. A 4.43. ábra az anyagtulajdonságok bemeneti paramétereit szemlélteti. A számítás beállításait és eredményeit a Melléklet részletezi.

Properties of Outline Row 4: Composite_facing			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,68	g cm ⁻³
4	Orthotropic Elasticity		
5	Young's Modulus X direction	12300	MPa
6	Young's Modulus Y direction	12300	MPa
7	Young's Modulus Z direction	4293	MPa
8	Poisson's Ratio XY	0,46	
9	Poisson's Ratio YZ	0,38	
10	Poisson's Ratio XZ	0,38	
11	Shear Modulus XY	7600	MPa
12	Shear Modulus YZ	1291	MPa
13	Shear Modulus XZ	1291	MPa

4.43. ábra: Az ANSYS környezetbe bevitt mechanikai anyagtulajdonságok paraméterei

A végelem szimuláció alapján közel 46 MPa feszültség ébred 11000 1/perc hatására a betét belső átmérőjéhez tartozó felszínén. A repedési fordulatszám hatására ébredő érintő irányú feszültség analitikusan a következőképpen számolható, ha a betétet körgyűrűnek tekintjük 120 mm külső, 77,5 mm belső sugárral, 1,68 g/cm³ sűrűséggel:

$$\sigma_{\varphi}(z) = \frac{\rho \cdot \omega^2}{4} \cdot [(3 + \nu) \cdot R_A^2 + (1 - \nu) \cdot R_I^2], \quad (4.10)$$

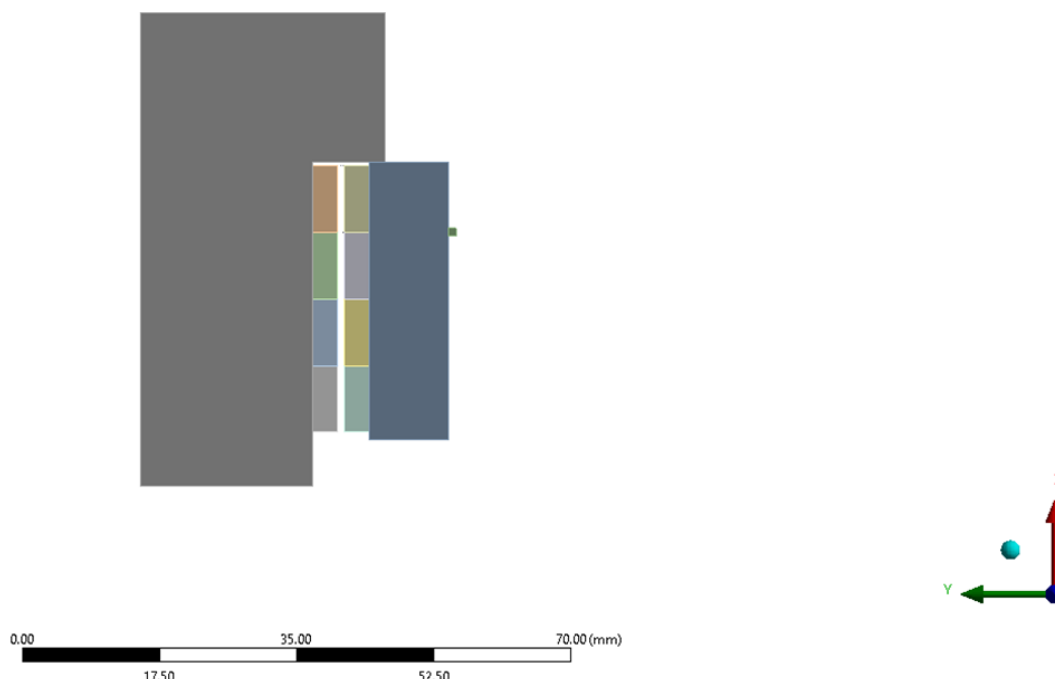
ahol:

- R_A : betét külső sugara,
- R_I : a betét belső sugara,
- ρ : a sűrűség,
- ν : a Poisson-tényező
- ω : a szögsebesség.

Az egyenletből 30 MPa adódik. Összevetve a modellel, amely a szegecsfuratokat is tartalmazza, amik gyengítik a struktúrát és növelik a feszültséget (ld Melléklet feszültségábrájának feszültségeloszlása a furatok átmérőjén és ennél kisebb átmérőn a furatok környezetében), a végeelemes modellt validnak tekintem.

4.4.2 Tribo-thermomechanikai modellezés – 2D

Az ANSYS Workbench (2021 R2 verzió, Ansys, Inc., Canonsburg, Washington, USA) lehetőséget teremt kapcsolt hőtani és mechanikai szimulációk létrehozására, melyekből tribológiai eredményeket is kinyerhetünk. Ehhez a súrlódó betét thermomechanikai anyagmodelljét a súrlódó betét beépítési környezetét szimuláló modellben használtam fel: lendkerék és nyomólap közti kapcsolást szimuláltam egy a járműipari tesztekkel egyező terheléssel operáló 2D-s tengelyszimmetrikus modellben, mely a jármű elindításának körülményeit szimulálja. A vizsgált kimenet a súrlódási tényező a kopás függvényében. A geometriai modellt a 4.44. ábra szemlélteti



4.44. ábra: A kapcsolt thermomechanikai végeleemes modell egyszerűsített geometriája: balról jobbra: lendkerék, súrlódó betétpár, nyomólap

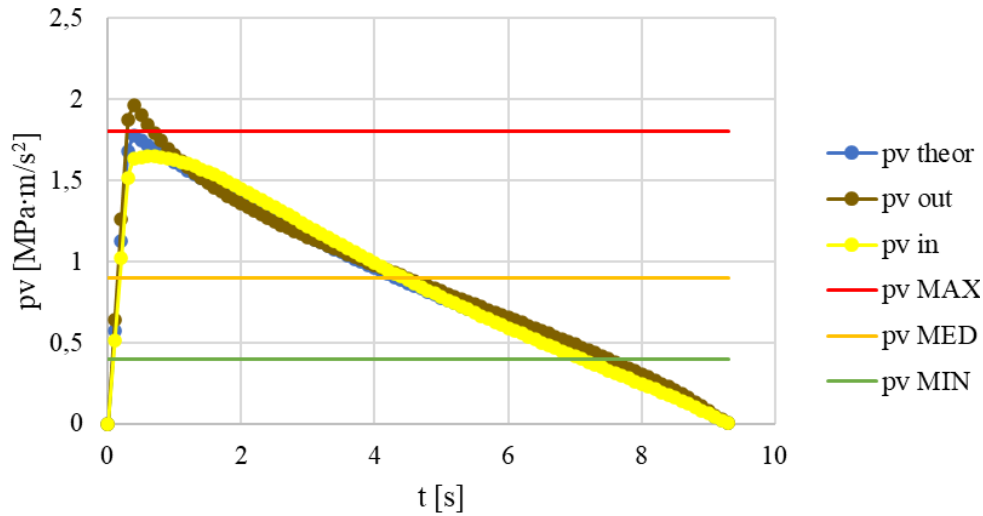
A modell felépítését és a terheléseket a Melléklet taglalja. A súrlódó betétek vastagsága változik modellenként, ez jelképezi a kopást. Az így létrehozott modellek a következő kopásszinteknek felelnek meg: 0 mm, 0,02 mm, 0,04 mm, 0,12 mm, 0,17 mm, 0,19 mm, 0,29 mm és 0,32 mm. A 4.6. táblázat segít ezeknek a kopásértékeknek a próbatestekhez való párosításában.

4.6. táblázat. A kapcsolt thermomechanikai végeleemes szimulációban használt kopásértékek valós próbatesteken való előfordulása

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény	Összes felületi akt. energia	Kopás (di)	Kopás (dw)
		[km]	[kJ]	[mm]	[mm]
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	0	0,02
VRS	VRS-0008M	793	4718	0	0,04
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	0,02	0,1
TH	TH-103L	102,9	179,359.2	0,16	0,19
VTC	VTC-015S	15	373,684.2	0,09	0,29
VR	VR-039M	39	1,660,279.0	0	0,02
VR	VR-045M	45	1,915,706.5	0	0,05
VR	VR-056S	56	1,961,984.7	0	0,05
VR	VR-050M	50	2,128,562.8	0	0,03
VR	VR-052M	52	2,223,666.9	0,02	0,05
VR	VR-053M	53	2,256,744.8	0,01	0,06
VTC	VTC-150S	150	3,736,842.1	0,12	0,32
VC	VC-150M	150	4,544,610.3	0,04	0,17

A tű-tárcsa vizsgálatok eredményével való összehasonlíthatóság érdekében a p_v -értékek valósággal való egyezésének időpillanatában értékeltem ki a modelleket, az 1. terhelési másodperc kezdetén, azaz 0,3 mp-nél, ahogy a 4.45. ábra is mutatja. Az ábráról az is jól látható, hogy ha

elhanyagoljuk a felületek kezdeti relatív kúposágát, akkor a pv-szint tulajdonképpen átmérőfüggetlen lesz.



4.45. ábra: pv-szintek a szimulációs modell működtetése alatt belső (pv in), külső (pv out) és közepes (pv theor) átmérőn és a tú-tárcsa méréseknél használt MAX-MED-MIN pv-értékek

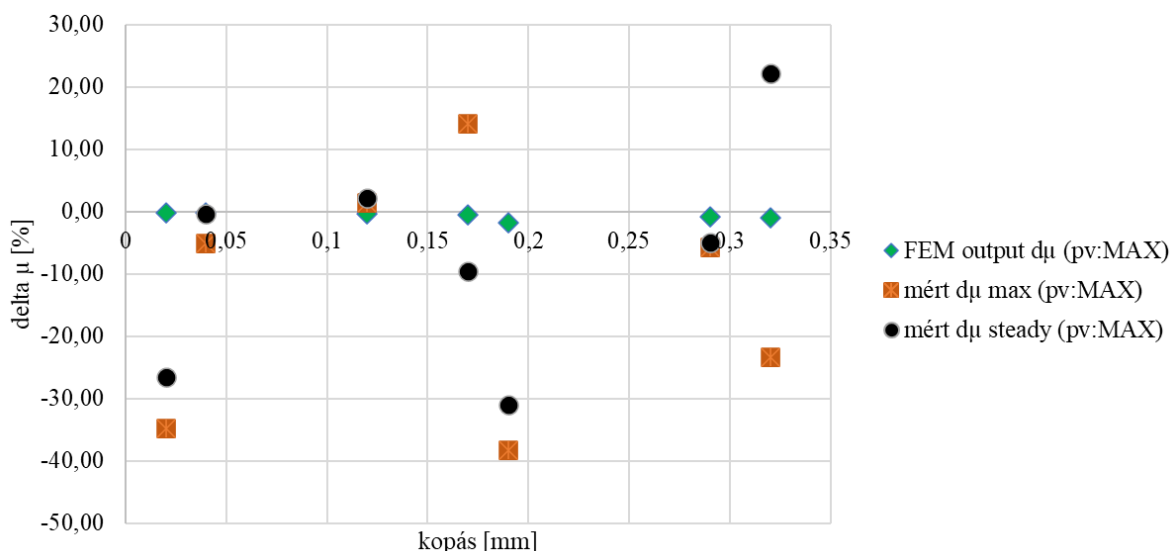
4.7. táblázat. Súrlódási tényezők különböző kopásszinteken valós és szimulációs körülmények között

kopás	Trend	Model	FEM output μ (pv:MAX)	FEM output $\Delta\mu$ (pv:MAX)	mért μ max (pv:MAX)	mért $\Delta\mu$ max (pv:MAX)	mért μ steady (pv:MAX)	mért $\Delta\mu$ steady (pv:MAX)
[mm]	[-]		[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
0	Referencia	Fricfacing	0,422	-	0,368	-	0,365	-
0,02	kíméletlen	w0.02/Fricfacing	0,422	-0,13	0,240	-34,78	0,268	-26,58
0,04	normál	mod_VC-150M_di_0.04	0,422	-0,13	0,349	-5,16	0,364	-0,27
0,12	kíméletlen	kill_VTC-150S_di_0.12	0,421	-0,40	0,373	1,36	0,373	2,19
0,17	normál	mod_VC-150M_dw_0.17	0,420	-0,53	0,420	14,13	0,33	-9,59
0,19	kíméletlen	w0.19/Fricfacing	0,414	-1,85	0,227	-38,32	0,252	-30,96
0,29	kíméletlen	w0.29/Fricfacing	0,419	-0,82	0,347	-5,71	0,347	-4,93
0,32	kíméletlen	kill_VTC-150S_dw_0.32	0,418	-1,01	0,282	-23,37	0,446	22,19

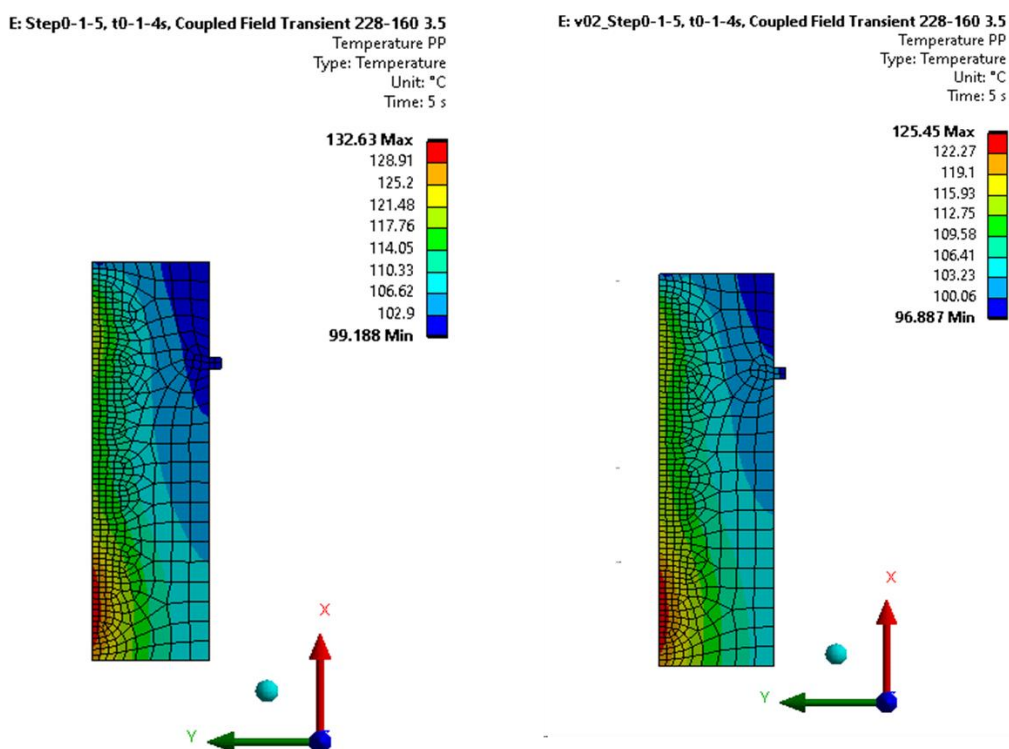
A kopás függvényében ábrázolva a számított és mért súrlódási tényezőket a 4.46. ábra mutatja. Jól látható, hogy az optimális felfekvési körülményeket szimuláló modellben a referencia súrlódási tényezőhöz képesti változás a kopás növekedésével enyhén nő, csökkentve a tényező értékét. A mért értékek eredményei (tú-tárcsa „running-in” szakaszi μ max és állandósult állapotú szakaszi μ steady) ezt a trendet csak normál használatú betétekből származó próbatetek esetén követik. A kíméletlen használati stílus hatása szembeutó trendtől való eltérést okoz bizonyítva, hogy a súrlódó betétek élettartama alatti viselkedést nem csupán a futásteljesítmény, de használatból adódó felületi aktivációs energia értéke és annak kapcsolásonkénti felépülése, azaz a tengelykapcsolóhasználat is meghatározza.

A felépített szimulációs modell képes tehát a kopás hatásait figyelembe venni. Egyik továbbfejlesztési iránya a kopás parametrizált automatizálása lehet, tetszőleges kopásintenzitású szimulációk létrehozásával.

A modell egy kissé módosított alkalmazása rávilágít a jelenleg használt jármű tengelykapcsolók túlméretezettségére, azaz költségcsökkentési potenciáljukra. A jelenleg használatos méretezési eljárások a súrlódási tényezőt ugyanis konstans értéknek tekintik egy bizonyos hőmérséklet szintig, nem véve figyelembe a pv-függést.



4.46. ábra: Súrlódási tényezők referenciaértéktől való %-os eltérése különböző kopásszinteken valós és szimulációs körülmények között



4.47. ábra: Hőmérsékleteloszlás a nyomólapon: jobb oldal: konstans COF, bal oldal: pv -függő COF

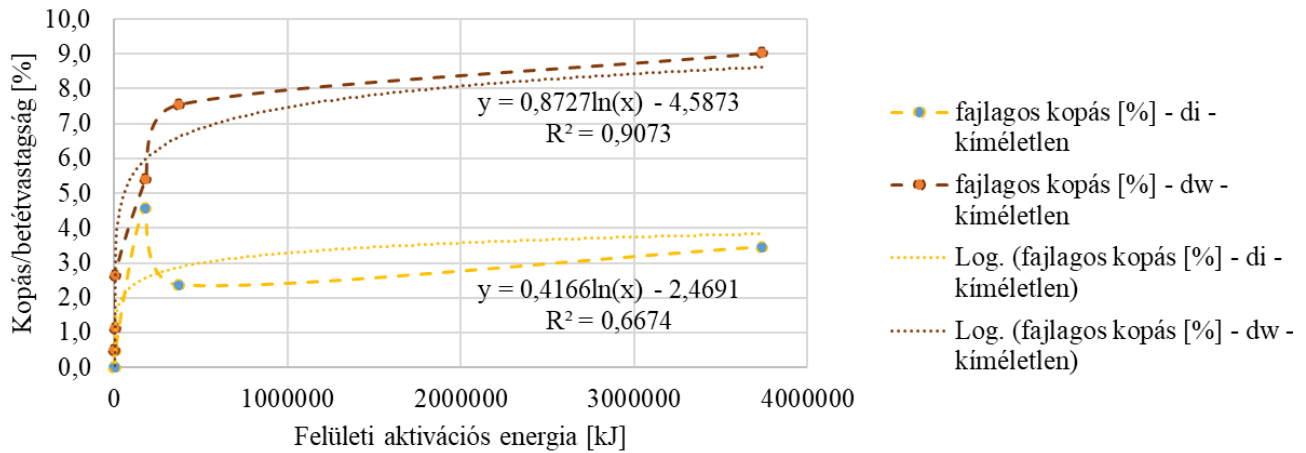
A 4.47. ábra jól illusztrálja, hogy a valós, pv -függő COF értékekkel számolt hőterhelés kisebb hőmérsékletet eredményez, így a jelenleg használt számítási módszerek túlméretezik például a nyomólapot.

4.5 Tribológiai jellemzők közti összefüggések keresése statisztikai úton

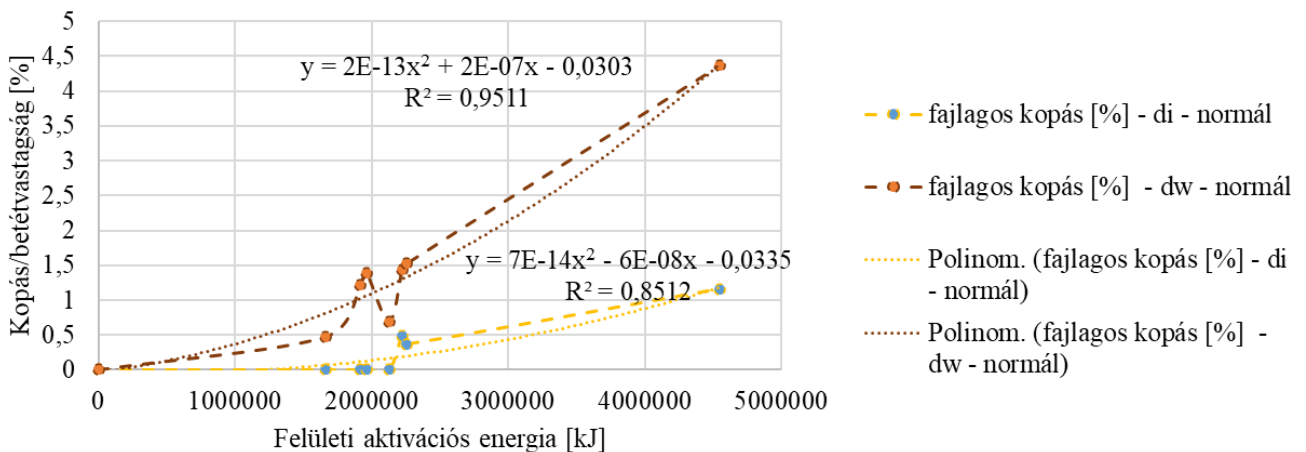
A mért jellemzőket, mint a kopást és a felületi érdesség értékeit a felületi aktivációs energiaskála mentén ábrázoltam. Trendvonal-illesztést alkalmazva kerestem összefüggéseket a járműipari tesztek követően mért és a tú-tárcsa vizsgálatokból nyert eredmények közt a mérések alapján megállapított két használati trend eredményeire külön-külön.

4.5.1 Kopásértékek elemzése

A vizsgált betétek vastagsága 3,5 mm vagy 3,8 mm volt. A járműipari tesztek után mért kopásértékeket a betétek vastagságához viszonyítva 100%-os formában hasonlítom össze. Az eredményeket a 4.48. ábra és a 4.49. ábra mutatja.



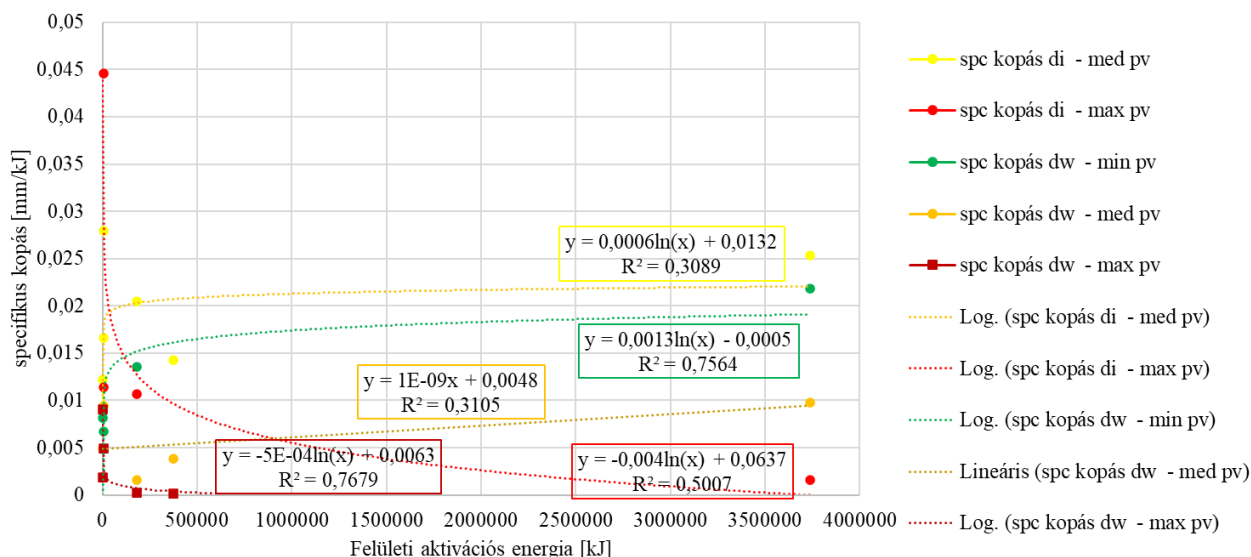
4.48. ábra: Betétvastagsághoz viszonyított %-os kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek



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

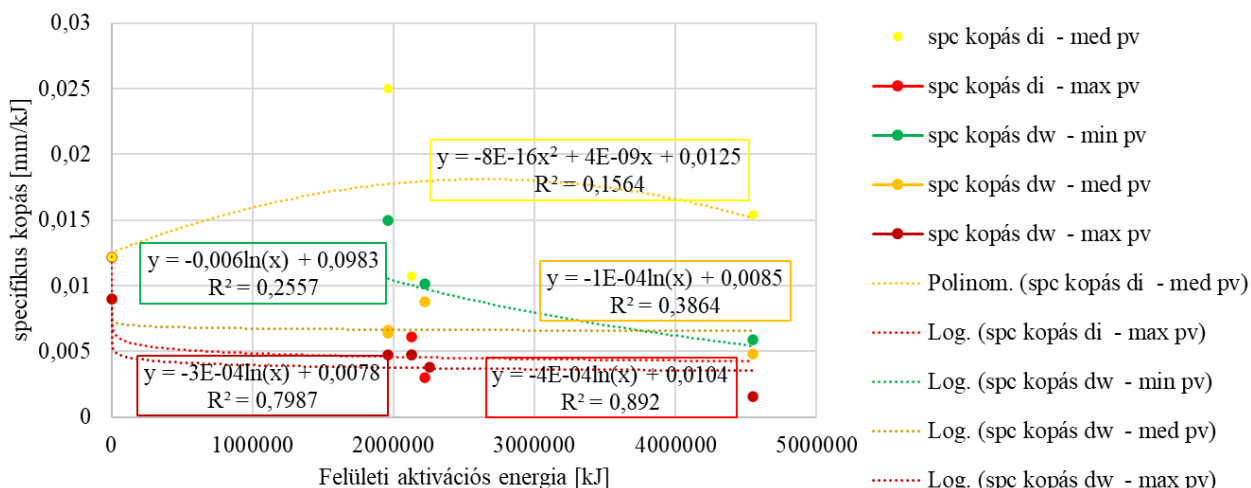
Látható, hogy a normál használatú betétek négyzetes hatványfüggvény szerint növekvő kopást produkálnak, míg a kíméletlen használat értékeire logaritmikus trendvonal illeszthető: már alacsony aktivációs energiaszinteknél is jelentős kopás lép fel. Mindkét esetben a súrlódási átmérőn mért relatív kopásértékek a magasabbak, de normál használat esetén az átmérők kopásértékei közti különbség kisebb, ami a súrlódó felületek használat alatti csekélyebb mértékű kúposodásával magyarázható.

Tű-tárcsa tesztek után vizsgálva a fajlagos, közölt felületi energiaegységre normalizált kopásértékeket használati trendtől függően a 4.50. ábra vagy a 4.51. ábra szerinti képet kapjuk.



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

A logaritmikus összefüggés megfigyelhető, maximális pv -terhelés esetén kivágási átmérőtől függetlenül azonban negatív tényezővel, azaz ahogy nő a felületi energia, úgy csökken a kopás maximális pv alatt. Ez feltételezhetően a harmadiktest-áramnak köszönhető, ami megfelelően magas terhelés esetén csökkenti a kopadékképződés intenzitását a súrlódó felületen.

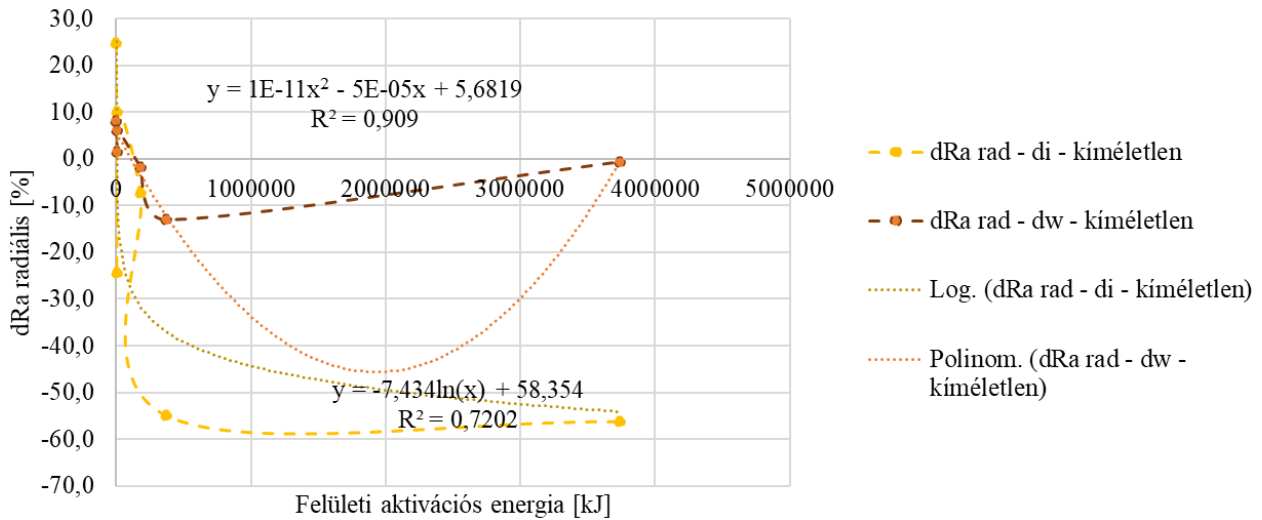


4.51. ábra: Fajlagos kopásértékek a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

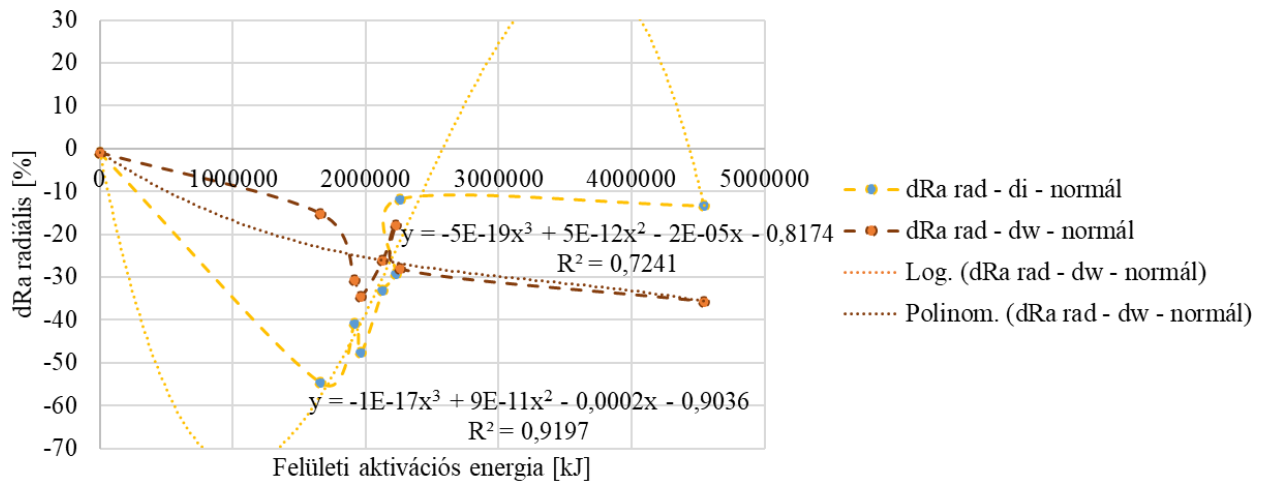
A normál használatú betétek esetén mindkét kivágási átmérő (di: belső, dw: súrlódási) esetén szinte mindegyik pv terhelési szint alatt a kíméletlen tengelykapcsoló-használati trend maximális pv alatti trendje a jellemző. Megfordítva: a kíméletlen használat megfelelően magas pv alatt normál használathoz hasonló eredményeket ad. Ez feltételezhetően, az előzőekkel összhangban, a harmadiktest jelenség kopáscsökkentő hatását jelzi.

4.5.2 R_a felületi érdesség értékek elemzése radiális irányban

A járműipari tesztek után mért felületi érdességékeket a szűz felületű betétek érdességéhez viszonyítva 100%-os formában hasonlítom össze. Az eredményeket a 4.52. ábra és a 4.53. ábra grafikonjai illusztrálják.



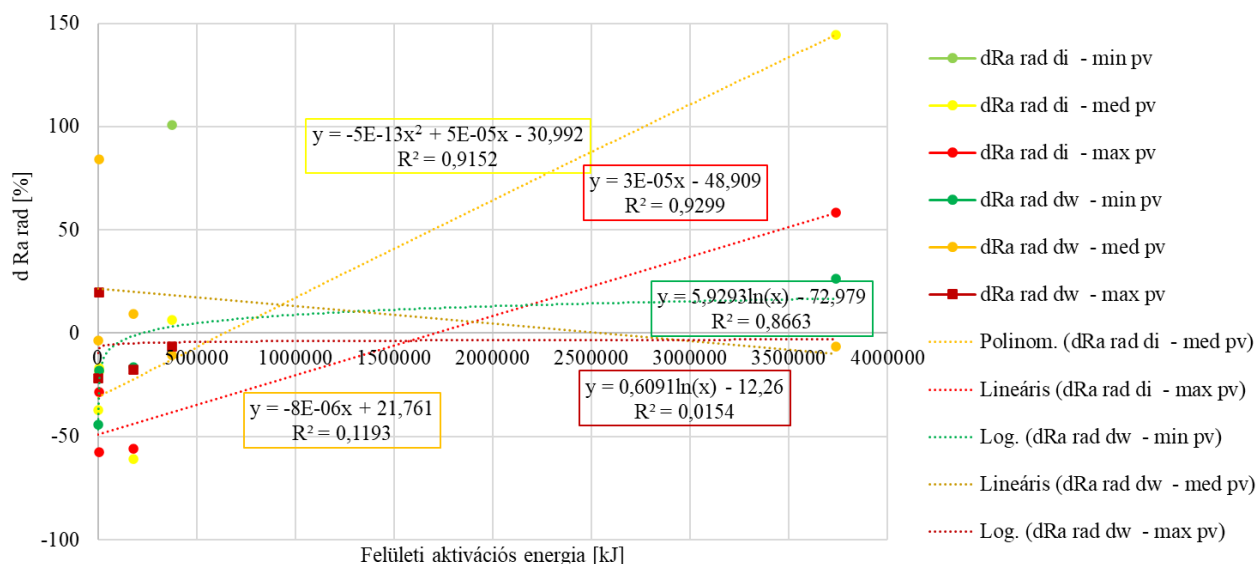
4.52. ábra: Radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek



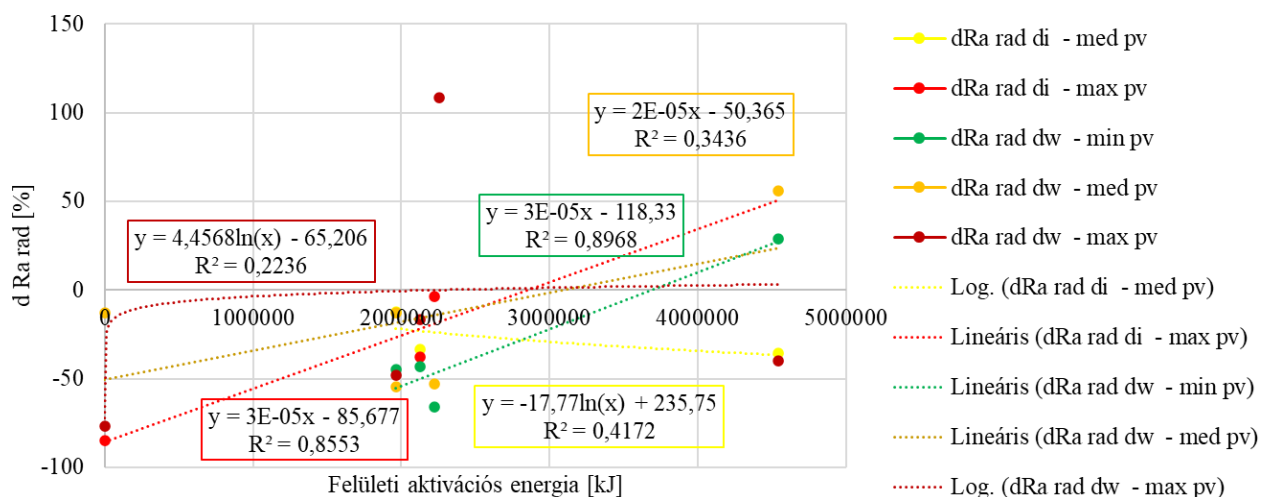
4.53. ábra: Radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

Az elemzésből látható, hogy a radiális irányban mért felületi érdességváltozás szempontjából a normál használatú betétek értékei mindkét kivágási átmérőn harmadfokú trendet. Kíméletlen használat esetén a kopástrendeknél tapasztalt logaritmikus összefüggés csak a belső átmérőn jelenik meg, a súrlódási átmérő értékei a normál használatú betétek kopástrendjeinél tapasztalt másodfokú trendet követik. Használati módtól függetlenül az R_a értékek csökkenése a súrlódási átmérőn abszolút értékben kisebb, mint a belső átmérőn.

A *pin-on-disc* kísérletek utáni eredményeket a 4.54. ábra és a 4.55. ábra ábrázolja.



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

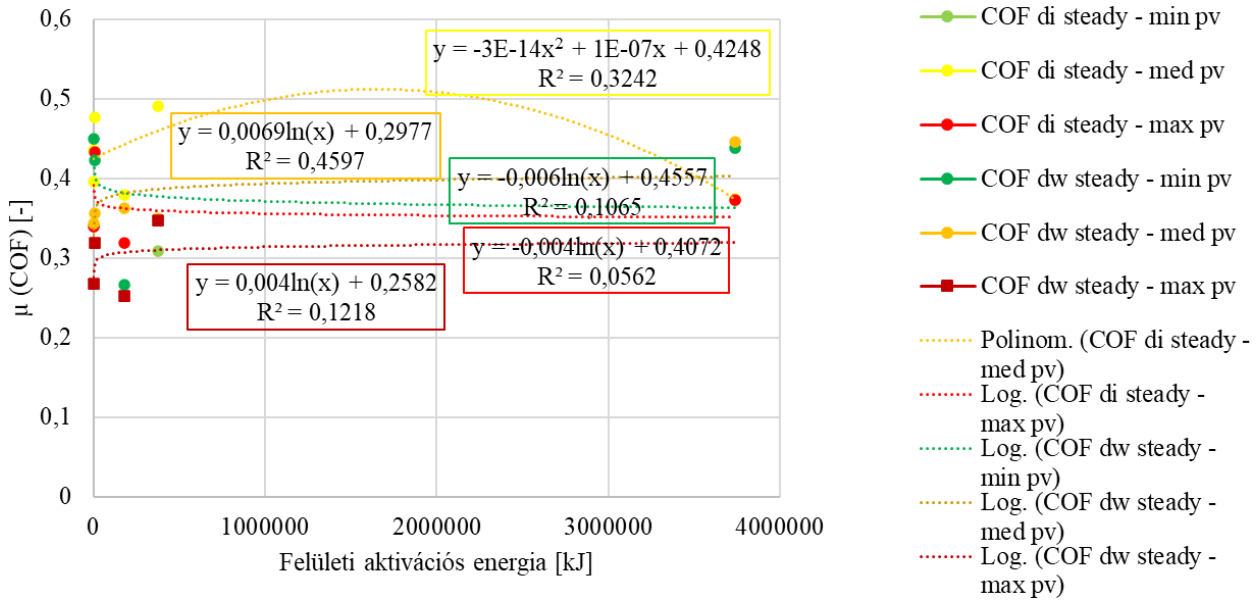


4.55. ábra: Pin-on-disc utáni radiális R_a értékek változása a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

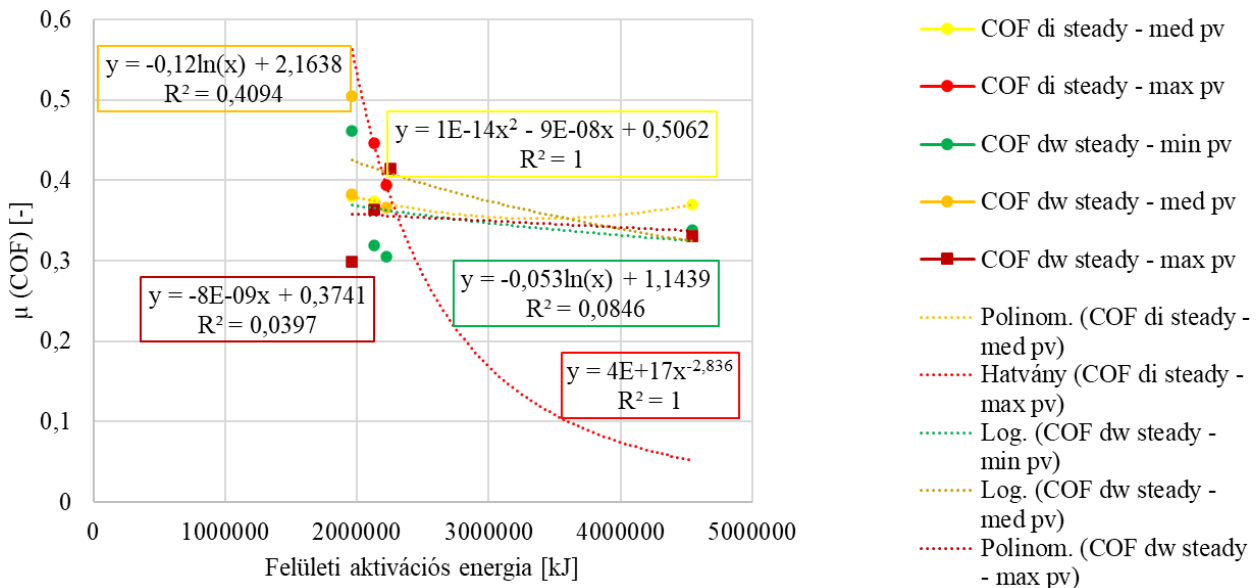
Kíméletlen használatú betéteken a különböző pv-szintek hatására bekövetkező érdességváltozási trendek 3 különböző függvénytípust is követnek: a belső átmérős próbatetek eredményei lineáris és négyzetes, a súrlódó átmérőről kivágott próbatetek *pin-on-disc* utáni értékei lineáris és logaritmusos egyenlettel jellemezhetők. Normál használatú betétek esetén is erős *pv*-függést mutatnak az eredmények lineáris és logaritmusos trendeket követve.

4.5.3 Állandósult állapotbeli súrlódási tényezők elemzése

A mért súrlódási tényezőkre is görbét illesztettem és elemeztem őket a két felhasználási kategóriában, ahogy a 4.56. ábra és a 4.57. ábra mutatja.



4.56. ábra: Pin-on-disc állandósult állapot súrlódási tényezői a felületi aktivációs energia függvényében – kíméletlen használatú betétek

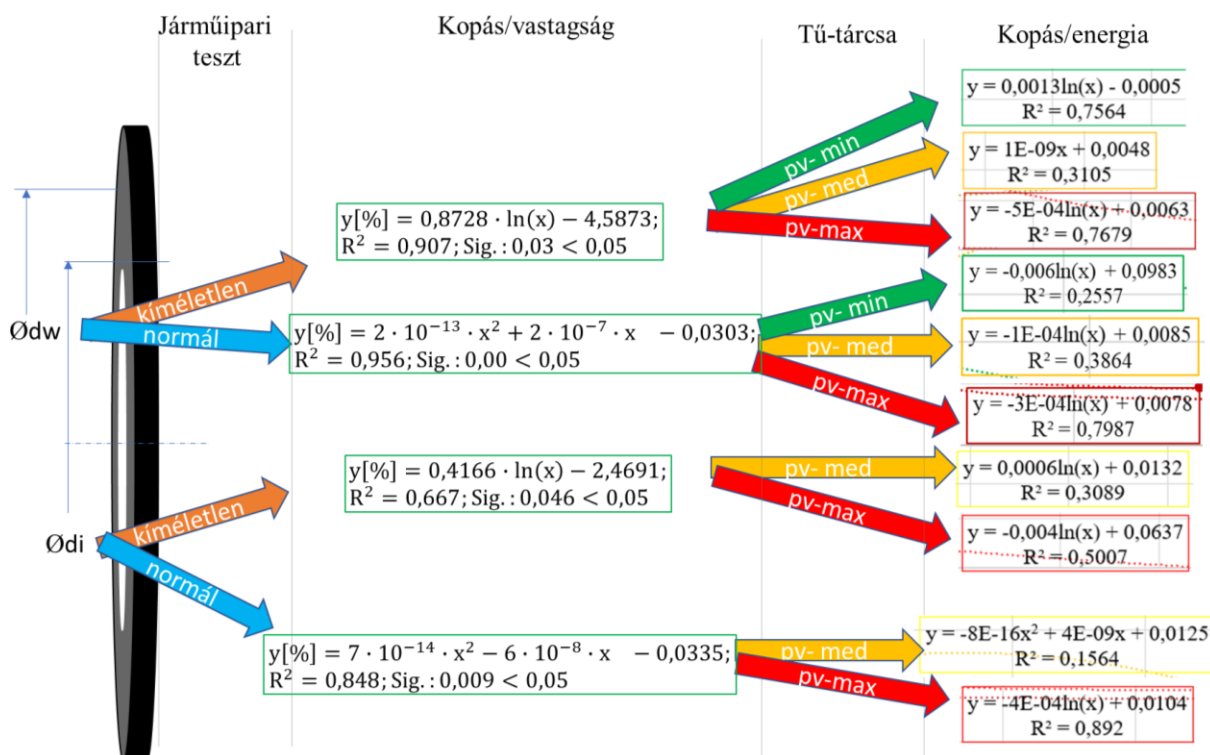


4.57. ábra: Pin-on-disc állandósult állapot súrlódási tényezői a felületi aktivációs energia függvényében – normál használatú betétek

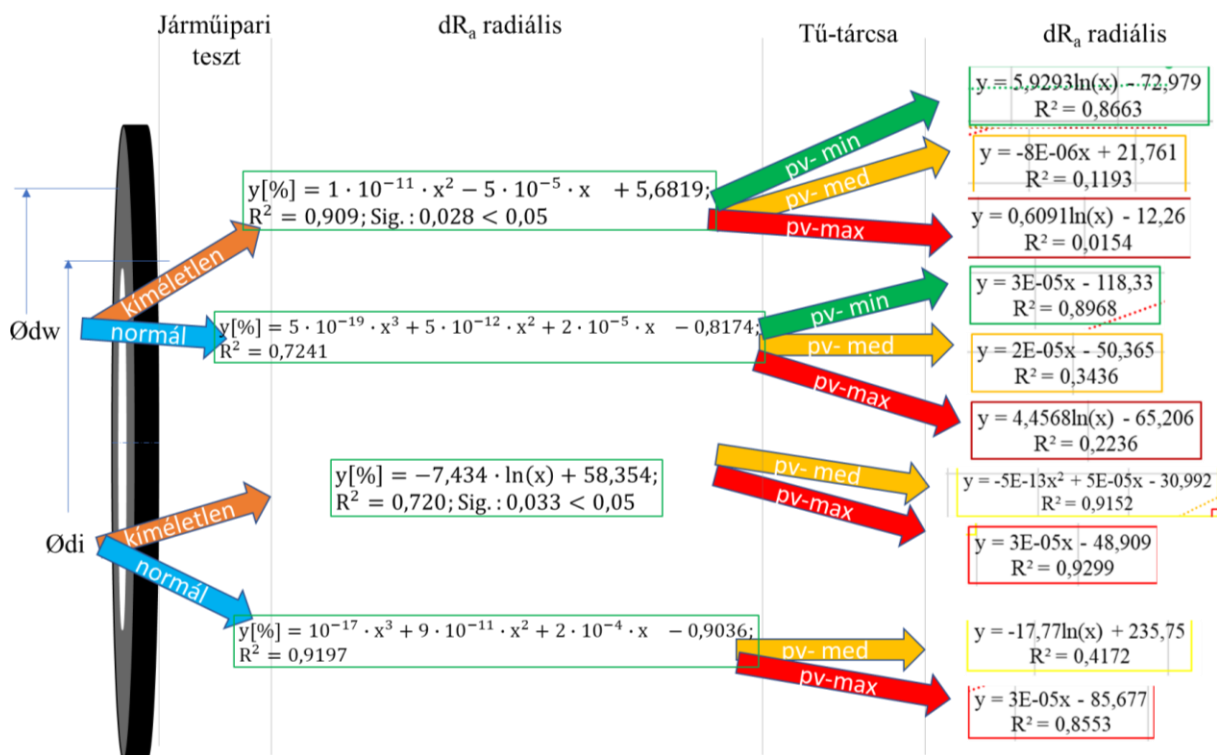
A kíméletlen eredményekre kétféle függvénytípusú trend a jellemző, míg a normál előterhelésűek három különböző függvénytípussal jellemezhetők a vizsgált felületi aktivációs energiatartományban.

4.5.4 A tribológiai jellemzők tapasztalt trendjeinek összefoglalása

A kopás- és az érdességmérésre tehát az előzetes járműipari tesztek és a kapcsolási szakaszt leíró három *pv*-szinten végzett tű-tárcsa kísérletek után is sor került. A következő ábrák az eredmények trendjében történt változások nyomonkövetését hivatottak segíteni. A 4.58. ábra a fajlagos kopási, a 4.59. ábra a sugárirányú R_a felületi érdességváltozási trendeket foglalja össze.



4.58. ábra: Járműipari tesztek és tű-tárcsa vizsgálatok utáni fajlagos kopási trendek



4.59. ábra: Járműipari tesztek és tű-tárcsa vizsgálatok utáni R_a radiális irányú érdességváltozási trendek

4.6 Új tudományos eredmények

1. Az elvégzett anyagvizsgálatok és matematikai elemzések alapján a szimulációs vizsgálataimhoz kifejlesztett numerikus modellekkel kapcsolatban a következő megállapításokat teszem:
 - A laminátumokra használatos, első lépésben komponens-csoportosítást, majd 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.
 - 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-thermomechanikai érintkezése az általam alkalmazott ortotróp anyagmodellel, kapcsolt thermomechanikai szimulációval modellezhető. Az általam létrehozott modell figyelembe veszi a kopás, valamint a p_v -függő súrlódási tényező hatását és továbbfejleszthető automatikus és paraméterezett kopásszimulációs modellé.
2. 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 (3.13.) egyenlet és a 3.4. táblázat 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. 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. Állandósult súrlódási állapotban, a tengelykapcsoló kapcsolási szakaszára jellemző 3 különböző p_v -szinten végzett tű-tárcsa vizsgálataim állandósult állapotbeli súrlódási tényező eredményeiből (4.33. ábra és 4.34. ábra) megállapítom:
 - hogy az élettartam során előzetesen alacsony felületi aktivációs energiával, de kíméletlen módon terhelt betétek súrlódási tényezőjének p_v -érzékenysége magasabb, mint a nagyobb energiával, de normál módon használt betéteké,
 - normál módon, de különböző előzetes aktivációs energiával használt betétek egyenletesebb teljesítményt mutatnak a p_v -szintek függvényében,
 - az előzetesen kíméletlen módú energiaterhelésnek kitett betéteknél a súrlódási tényező csökkenése minimumról maximum tű-tárcsa p_v -terhelésre váltva az 50%-ot is elérheti.
5. A járműipari tesztek követően, a tesztekre jellemző összes kapcsolódás után kiértékelt kopás- és felületi érdesség vizsgálati eredményeinek statisztikai elemzéséből (4.58. ábra és 4.59. ábra) 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. A járműipari tesztvizsgálatok során elkopott betétekből kivágott minták állandósult súrlódási állapotban, a tengelykapcsoló kapcsolási szakaszára jellemző 3 különböző $p\upsilon$ -szinten végzett tű-tárcsa tribológiai modellvizsgálati eredményeinek statisztikai elemzéséből (4.58. ábra és 4.59. ábra) 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 kapcsolás során, azaz a $p\upsilon$ 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 $p\upsilon$ -tól, 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, kiemelve és megértetve az ezen speciális kompozit anyagok létrehozásához vezető mérföldköveket és erőfeszítéseket, melyek a mai fejlesztési irányokat is meghatározzák. 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 hosszúszál-erősítését üvegszál, aromás poliamid, réz és poliakril-nitril (PAN) szálak fonata képezi. Az ilyen kompozit anyagrendszerek teljeskörű jellemzéséhez a bennük használt komponensek változatossága miatt, gyakran elkerülhetetlen az anyagidentifikáció, mint első vizsgálati lépés. 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 hőtani jellemzőit.

A kapott eredményeket bemeneti paraméterekként használtam egy általam fejlesztett végeleemes termomechanikai szimulációs kontakt modellhez, mely $p\nu$ -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 $p\nu$ (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 SUMMARY

At the beginning of my research, I conducted a literature search on several sub-areas related to my topic on fibre-reinforced hybrid composites, the most commonly used automotive dry friction materials. I have provided an overview of the parallel development history of coupling structures and friction materials, highlighting and understanding the milestones and efforts leading to the creation of these special composite materials, which also define the development directions today. In the light of the complex tribo-thermomechanical contact characteristic of clutches, I have highlighted the current state of the art and hiatus in the mechanical, thermal and tribological literature.

My investigations focused on a dry friction clutch liner material with a long fiber reinforcement consisting of a braid of glass fibre, aromatic polyamide, copper and polyacrylonitrile (PAN) fibres. For a complete characterisation of such composite material systems, material identification is often unavoidable as a first investigative step due to the diversity of components used in them. Facing the challenges of identification and investigating test specimen design methods that take into account the failure modes specific to the material, I have been able to develop a materials testing methodology that provides an effective reference and novel guidance for the testing of similar composite materials. I then created a mechanical material model of the tested composite and determined its thermal properties.

The results obtained were used as input parameters for a coupled finite element thermomechanical simulation contact model I developed, which was able to explore the potential cost reduction possibilities of torque transmission elements via a p - v -dependent friction coefficient.

The wear and surface characteristics of the clutch linings were investigated in a novel way: after various real automotive tests, at a point corresponding to a wear level over their lifetime. I then performed "pin-on-disc" tests on samples cut from the facings.

The wear values increased along an increasing surface activation energy scale according to two different trends, and the automotive tests were thus classified into two main groups, namely the "clutch-killer" and the "normal use" groups. The wear results also highlighted the influence of mileage and test conditions. In the pin-on-disc tests, the values of the coefficient of friction, wear and surface roughness differences were investigated under three p v (surface pressure multiplied by velocity) loads, also dividing the samples into "clutch-killer" and "normal use" groups.

Finally, I characterised the tribological behaviour in terms of the relationships between surface roughness variation, specific wear values and friction coefficients and their interrelationships and dependence on other parameters. The results were analysed to reveal the influence of surface activation energy, mileage and driver profile, as well as the effect of facing size and friction diameter.

7 MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Abdullah O. I.; Schlattmann J. (2013): Contact analysis of dry friction clutch system, ISRN Mechanical Engineering 2013, Cikk azonosító 495918
2. Abdullah, O.I.; Schlattmann, J.; Lytkin, M. Effect of surface roughness on the thermoelastic behaviour of friction clutches. FME Trans. 2015, 43, 241–248, doi:10.5937/fmet1503241A
3. Abdullah, O.I.; Schlattmann, J.; Majeed, M.H.; Sabri, L.A. The temperatures distributions of a single-disc clutches using heat partitioning and total heat generated approaches. Case Stud. Therm. Eng. 2018, 11, 43–54, doi:10.1016/j.csite.2017.12.003.
4. Ahn, S.; Jang, Y.H. Frictionally excited thermo-elastoplastic instability. Tribol. Int. 2010, 43, 779–784, doi:10.1016/j.triboint.2009.11.002
5. Alotaibi, J.G.; Eid Alajmi, A.; Mehoub, G.A.; Yousif, B.F. Epoxy and Polyester Composites' Characteristics under Tribological Loading Conditions. Polymers 2021, 13, 2230. <https://doi.org/10.3390/polym13142230>
6. Bajpai, A.; Saxena, P.; Kunze, K. Tribo-Mechanical Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Cyanate Ester Resins Modified With Fillers. Polymers 2020, 12, 1725, doi:10.3390/polym12081725.
7. Bakry, M.; Mousa, M.O.; Ali, W.Y. Friction and wear of friction composites reinforced by natural fibres. Mat.-Wiss. U. Werkstofftech. 2013, 44, 21–28, doi:10.1002/mawe.201300962,
8. Basavarajappa, S.; Ellangovan, S. Dry sliding wear characteristics of glass–epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles. Wear 2012, 296, 491–496, doi:10.1016/j.wear.2012.08.001
9. Bezzazi, M.; Khamlichi, A.; Jabbouri, A.; Reis, P.; Davim, J.P. Experimental characterization of frictional behaviour of clutch facings using Pin-on-disk machine. Mater. Des. 2007, 28, 2148–2153. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.001>.
10. Bijwe J. et al. (2008): Optimization of brass contents for best combination of tribo-performance and thermal conductivity of non-asbestos organic (NAO) friction composites, Wear 265/5–6, 699–712.o.
11. Biczó, R.; Kalácska, G.; Szakál, Z.; Fledrich, G. Composite Friction Materials for Brakes and Clutches. Sci. Bull. Ser. C Fasc. Mech. Tribol. Mach. Manuf. Technol. 2016, 30, 21–26.)
12. Biczó, R.; Kalácska, G. Composite friction materials of couplings. In Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, Debrecen, Hungary, 13–15 October 2016; pp. 40–45. ISBN 978-963-473-944-9.)
13. Biczó R., Kalácska G.; Andó, M.; Keresztes, R.: Pin-on-disc tribology test of dry sliding frictional hybrid woven composite material samples cut with abrasive water jet machining, 2017, Proceedings of the V. Synergy International Conference
14. Biczó, R.; Kalácska, G. Micromechanical model of dry friction hybrid polymer composite clutch facing. Int. J. Eng. Manag. Sci. 2019, 4, 335–340, doi:10.21791/IJEMS.2019.1.41.
15. Biczó, R.; Kalácska, G.; Mankovits, T. Micromechanical Model and Thermal Properties of Dry-Friction Hybrid Polymer Composite Clutch Facings. *Materials* 2020, 13, 4508. <https://doi.org/10.3390/ma13204508>
16. 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>

17. 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>
18. Bigaud, D.; Dréano, L.; Hamelin, P. Models of interactions between process, microstructure and mechanical properties of composite materials—a study of the interlock layer-to-layer braiding technique. *Compos. Struct.* 2005, 67, 99–114, doi:10.1016/j.compstruct.2004.01.009.
19. Bijwe J. (1997): Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials—a review, *Polymer Composites* 18/3, 378–396.o.
20. Chaikittiratana A. et al. (2012): Static/kinetic Friction behaviour of a Clutch Facing Material: Effects of Temperature and Pressure, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* 6/6.
21. Chang, L.; Zhang, Z.; Ye, L.; Friedrich, K. Tribological properties of high temperature resistant polymer composites with fine particles. *Tribol. Int.* 2007, 40, 1170–1178.
22. Cristol-Bulthé A. L. et al. (2008): Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact, *Wear* 264/9–10, 815–825.o.
23. Chu, H.; Tang, N.; Gao, B. Friction Coefficient Identification of Dry clutch in Automated Manual Transmissions. *Int. Conf. Mechatron. Control (ICMC)* 2014, doi:10.1109/ICMC.2014.7231726.
24. Czvikovszky T. - Gaál J. - Nagy P. (2003): *A polimertechnika alapjai*, Műegyetemi Kiadó, ISBN 963-420-621-2
25. Daniel, I.M.; Luo, J.-J.; Schubel, P.M.; McCormick, R.R. Three-dimensional characterization of textile composites. *Compos. Part B Eng.* 2008, 39, 13–19, doi:10.1016/j.compositesb.2007.02.002.
26. De Lange, P.J.; Mäder, E.; Mai, K.; Young, R.J.; Ahmad, I. Characterization and micromechanical testing of the interphase of aramid-reinforced epoxy composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2001, 32, 331–342, doi:10.1016/S1359-835X(00)00059-2
27. Duque, E.L.; Barreto, M.A.; Fleury, A.T. Use of different friction models on the automotive clutch energy simulation during vehicle launch. *ABCM Symp. Ser. Mechatron.* 2012, 5, 1376.
28. Fernandes, G.P.; Haertel, W.; Zanotto, P.S.; Sinatora, A. Influence of mild and severe wear condition in the formation and stability of friction film in clutch system. *Wear* 2013, 302, doi:10.1016/j.wear.2013.02.003.
29. Fernandes, G.P.; Zanotto, P.S.; Sinatora, A. Contribution on understanding the friction film development in the performance of a dry automotive clutch system. *Wear* 2015, 342, 364–376.
30. Fernandes, G.P.; Zanotto, P.S.; Sinatora, A. The Role of Counter-Face Roughness on the Tribological Performance of a Clutch System Tested with a Pin-On-Disc Tribometer. *Lubricants* 2016, 4, 18, doi:10.3390/lubricants4020018.
31. Fidlin, A.; Bäuerle, S.; Boy, F. Modelling of the gas induced fading of organic linings in dry clutches. *Tribol. Int.* 2015 92, 559–566
32. Fouvry, S.; Liskiewicz, T.; Kasper, P.H.; Hannel, S.; Sauger, E. An energy description of wear mechanisms and its applications to oscillating sliding contacts. *Wear* 2003, 255, 287–298, doi:10.1016/S0043-164800117-0.
33. Gopal P. et al. (1996): Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar® pulp Part 1. Enhancement of friction and wear performance, *Wear* 193/2, 199-206.o.

34. Gopal P. et al. (1996): Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar® pulp Part II—wear surface characteristics, *Wear* 193/2, 180-185.o.
35. Greisel, M.; Jäger, J.; Moosburger-Will, J.; Sause, M.G.R.; Mueller, W.M.; Horn, S. Influence of residual thermal stress in carbon fibre-reinforced thermoplastic composites on interfacial fracture toughness evaluated by cyclic single-fibre push-out tests. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2014, 66, 117–127, doi:10.1016/j.compositesa.2014.07.010.
36. Grzelczyk, D.; Awrejcewicz, J. Wear Processes in a Mechanical Friction Clutch: Theoretical, Numerical, and Experimental Studies. *Math. Probl. Eng.* 2015, doi:10.1155/2015/725685.
37. Gurunath, P.V.; Bijwe, J. Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin. *Wear* 2006, 263, 1212–1219, doi:10.1016/j.wear.2006.12.050, 1212–1219.
38. Hoić, M.; Hrgetić, M.; Deur, J. Design of a pin-on-disc-type CNC tribometer including an automotive dry clutch application. *Mechatronics* 2016, 40, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.10.016>.
39. Hoić, M.; Miklik, A.; Kostelac, M.; Deur, J.; Tissot, A. Analysis of the Accuracy of Mass Difference-Based Measurement of Dry Clutch Friction Material Wear. *Materials* 2021, 14, 5356. <https://doi.org/10.3390/ma14185356>.
40. Humphrey, E.; Gkinis, T.; Morris, N.; Leighton, M.; Rahmani, R.; Rahnejat, H. Clutch lining frictional characteristics under thermal tribodynamic conditions. In *Proceedings of the 3rd Biennial International Conference on Powertrain Modelling and Control, Testing, Mapping and Calibration, Loughborough, UK, 7–9 September 2016*. Available online: <https://hdl.handle.net/2134/22656> (accessed on 12 March 2022).
41. Halpin, J.C.; Kardos, J.L. The Halpin-Tsai equations: A review. *Polym. Eng. Sci.* 1976, 16, 344–352, doi:10.1002/pen.760160512.
42. Hoogstrate A. M. et al. (1997): Opportunities in abrasive water-jet machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46(2), pp. 697-714.
43. Jacko, M.G.; Rhee, S.K. Brake Linings and Clutch Facings. *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.* 2000, 144–154, doi:10.1002/0471238961.0218011110010311.a01.
44. Jubsilp, C.; Jantaramaha, J.; Mora, P.; Rimdusit, S. Tribological Performance and Thermal Stability of Nanorubber-Modified Polybenzoxazine Composites for Non-Asbestos Friction Materials. *Polymers* 2021, 13, 2435, doi:10.3390/polym13152435.
45. Keck, K. Arbeitsvermögen und Lebensdauer von Kfz-Kupplungen. *LuK Kolloqu.* 1982. Available online: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/symposia_1/downloads_11/LuK_Kolloquium_1982_02_Arbeitsvermoegen_Lebensdauer.pdf (accessed on 10 October 2021)
46. Keshavamurthy, R.; Tambrallimath, V.; Rajhi, A.A.; M, S.A.R.; Patil, A.Y.; Yunus Khan, T.M.; Makannavar, R. Influence of Solid Lubricant Addition on Friction and Wear Response of 3D Printed Polymer Composites. *Polymers* 2021, 13, 2905. <https://doi.org/10.3390/polym13172905>.
47. Khamlichi, A.; Bezzazi, M.; Parrón, V.M.A. Optimizing the thermal properties of clutch facings. *J. Mater. Process. Technol.* 2003, 142, 634–642, doi:10.1016/S0924-0136(03)00683-6.
48. Khamlichi A. et al. (2008): Optimizing friction behavior of clutch facings using pin-on-disk test, *International Journal of Physical Sciences* 3/2, 65-70.o.

49. Kosteckij, B.I. The structural-energetic concept in the theory of friction and wear (synergism and self-organization). *Wear* 1992, 159, 1–15, doi:10.1016/0043-164890280-L.
50. Kozma M. *Tribológia, Műegyetemi kiadó*
51. Kravchenko, O.G.; Li, C.; Strachan, A.; Kravchenko, S.G.; Pipes, R.B. Prediction of the chemical and thermal shrinkage in a thermoset polymer. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2014, 66, 35–43, doi:10.1016/j.compositesa.2014.07.002.
52. Kubiak, K.J.; Mathia, T.G.; Fouvry, S. Interface roughness effect on friction map under fretting contact conditions. *Tribol. Int.* 2010, 43, 1500–1507
53. Kumar, M.; Bijwe, J. (2010a) Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient—Temperature sensitivity in brake materials. *Frict. Fluct.* 2010 269, 838–846.)
54. Kumar M. – Bijwe J. (2010b): Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient – Temperature sensitivity in brake materials, *Friction fluctuations* 269/11–12, 838–846.o.
55. Kumar, M.; Bijwe, J.; Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount. *Wear* 2011, 270, 269–280, doi:10.1016/j.wear.2010.10.068.
56. Li, M.; Khonsari, M.M.; McCarthy, D.M.C.; Lundin, J. On the wear prediction of the paper-based friction material in a wet clutch. *Wear* 2015, 334, 56–66, doi:10.1016/j.wear.2015.04.005.
57. LuK symposia 1986 – 2006
58. Majcherczak, D.; Dufrenoy, P.; Berthier, Y. Tribological, thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact, *Tribol. Int.* 2007, 40, 834–843, doi:10.1016/j.triboint.2006.08.004.
59. Mallick, P.K. *Fiber Reinforced Composites—Materials, Manufacturing and Design*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2007; Volume 52. ISBN 9780849342059.
60. Matveesky, R.M. The critical temperature of oil with point and line contact machines. *Trans. ASME* 1965, 87, 754.
61. Menday, M.; Rahnajet, H. Friction lining characteristics and the clutch take-up judder phenomenon with manual transmission. *Tribol. Dyn. Engine Powertrain Fundam. Appl. Future Trends* 2010, 680–702, doi:10.1533/9781845699932.2.680
62. Meng, F.; Xi, J. Numerical and Experimental Investigation of Temperature Distribution for Dry-Clutches. *Machines* 2021, 9, 185. <https://doi.org/10.3390/machines9090185>.
63. Mrówka, M.; Woźniak, A.; Prężyna, S.; Sławski, S. The Influence of Zinc Waste Filler on the Tribological and Mechanical Properties of Silicone-Based Composites. *Polymers* 2021, 13, 585. <https://doi.org/10.3390/polym13040585>.
64. Nawab, Y.; Tardif, X.; Boyard, N.; Sobotka, V.; Casari, P.; Jacquemin, F. Determination and modelling of the cure shrinkage of epoxy vinylester resin and associated composites by considering thermal gradients. *Compos. Sci. Technol.* 2012, 73, 81–87, doi:10.1016/j.compscitech.2012.09.018.
65. Nirmal, U. Friction Performance of Aged T-BFRP Composite for Bearing Applications. *Polymers* 2018, 10, 1066. <https://doi.org/10.3390/polym10101066>.
66. Olifirov, L.K.; Stepashkin, A.A.; Sherif, G.; Tcherdyntsev, V.V. Tribological, Mechanical and Thermal Properties of Fluorinated Ethylene Propylene Filled with Al-Cu-Cr Quasicrystals, Polytetrafluoroethylene, Synthetic Graphite and Carbon Black. *Polymers* 2021, 13, 781, doi:10.3390/polym13050781.

67. Poser, K.; Zum Gahr, K.-H.; Schneider, J. Development of Al₂O₃ based ceramics for dry friction systems. *Wear* 2005, 259, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.007>.
68. Ramalho, A.; Miranda, J.C. The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems. *Wear* 2006, 260, 361–367.
69. Rangaswamy, H.; Harsha, H.M.; Chandrashekarappa, M.P.G.; Pimenov, D.Y.; Giasine, K.; Wojciechowski, Sz. Experimental investigation and optimization of compression moulding parameters for MWCNT/glass/kevlar/epoxy composites on mechanical and tribological properties. *J. Mater. Res. Technol.* 2021, 15, 327–341, doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.037.
70. Relekar K. M. et al. (2015): Abrasive water jet machining, *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology* 2/10
71. Saha, A.; Wiercigroch, M.; Jankowski, K.; Wahi, P.; Stefanski, A. Investigation of two different friction models from the perspective of friction-induced vibrations. *Tribol. Int.* 2015, 90, 185–197.
72. Senatore, A.; D'Agostino, V.; Di Giuda, R.; Petrone, V. Experimental investigation and neural network prediction of brakes and clutch material frictional behaviour considering the sliding acceleration influence. *Tribol. Int.* 2011, 44, 1199–1207. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.05.022>.
73. Sfarni, S.; Bellenger, E.; Fortin, J.; Malley, M. Numerical and experimental study of automotive riveted clutch discs with contact pressure analysis for the prediction of facing wear. *Finite Elem. Anal. Des.* 2011, 47, 129–141, doi:10.1016/j.finel.2010.08.007.
74. Tamayo, A.; Rubio, F.; Pérez-Aparicio, R.; Saiz-Rodríguez, L.; Rubio, J. Preparation and Properties of Sustainable Brake Pads with Recycled End-of-Life Tire Rubber Particles. *Polymers* 2021, 13, 3371, doi:10.3390/polym13193371.
75. Tsai, S.W.; Pagano, N.J. Invariant properties of composite materials. In *Composite Materials Workshop*; Tsai, S.W., Halpin, J.C., Pagano, N.J., Eds.; Technomic Publishing Company: Lancaster, PA, USA, 1968; pp. 233–53.
76. Xie, Y.; Hill, C.A.S.; Xiao, Z.; Militz, H.; Mai, C. Silane coupling agents used for natural fibre/polymer composites: A review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2010, 41, 806–819, doi:10.1016/j.compositesa.2010.03.005
77. Xiong, J.J.; Shenoi, R.A.; Gao, J. An analytical model to predict residual thermal stress in 2D orthogonal plain weave fabric composites. *Int. J. Solids Struct.* 2009, 46, 1872–1883, doi:10.1016/j.ijsolstr.2008.12.026.
78. Wongpayakyotin, A.; Jubsilp, C.; Tiptipakorn, S.; Mora, P.; Bielawski, C.W.; Rimdusit, S. Effects of Alkyl-Substituted Polybenzoxazines on Tribological Properties of Non-Asbestos Composite Friction Materials. *Polymers* 2021, 13, 567.
79. Zagrodzki, P.; Trunccone, S.A. Generation of hot spots in a wet multidisk clutch during short-term engagement. *Wear* 2003, 254, 474–491, doi:10.1016/S0043-1648(03)00019-X.
80. Zarrelli, M.; Partridge, I.K.; D'Amore, A. Warpage induced in bi-material specimens: Coefficient of thermal expansion, chemical shrinkage and viscoelastic modulus evolution during cure. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2006, 37, 565–570, doi:10.1016/j.compositesa.2005.05.012.
81. Zhang, X.; Li, K.-Z.; Li, H.-J.; Fu, Y.-W.; Fei, J. Tribological and mechanical properties of glass fiber reinforced paper-based composite friction material. *Tribol. Int.* 2014, 69, 156–167, doi:10.1016/j.triboint.2013.08.003.

82. Zhao, L.G.; Warrior, N.A.; Long, A.C. A thermo-viscoelastic analysis of process-induced residual stress in fibre-reinforced polymer–matrix composites. *Mater. Sci. Eng. A* 2007, 452, 483–498, doi:10.1016/j.msea.2006.10.060.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk*Lektorált cikk idegen nyelven*

1. Biczó R., Kalácska G., Szakál Z., Fledrich G. (2016): Composite Friction Materials for Brakes and Clutches, The international conference of the carpathian euro-region's specialists in industrial systems- 11th edition-, pp. 32-37, ISBN 978-606-737-166-6.
2. Biczó R., Kalácska G. (2016): Composite friction materials of couplings, Proceedings of the 4th international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2016), pp. 40-45, ISBN 978-963-473-944-9
3. Biczó R. et al. (2017): Pin-on-disc tribology test of dry sliding frictional hybrid woven composite material samples cut with abrasive water jet machining, Proceedings of the V. Synergy International Conference
4. Biczó R., G. Kalácska (2019): Micromechanical model of dry friction hybrid polymer composite clutch facing, International Journal of Engineering and Management Sciences, Vol 4. (2019), No 1. <http://ijems.lib.unideb.hu/cikk/cikk/5c8013aa68f00>
5. 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>
6. 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: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing 2021: 35 pp. 13-16., 4 p.
7. 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>
8. 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

9. Biczó R., Kalácska G. (2018): Szálerősített hibrid kompozit súrlódó tengelykapcsolóbetétek fejlődése, Műanyagipari Szemle (2018/5), pp 89-95., HU ISSN 1785-7856
10. 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>
11. Biczó R., Kalácska G. (2021): Mezőgazdasági nehézgépjárművek száraz súrlódó tengelykapcsolóbetétjének mechanikai és termikus tulajdonságai, Mezőgazdasági technika, 2021 – augusztus, <http://technika.gmgi.hu/mezogazdasagi-technika/archivum/2021-augusztus>

Idegen nyelvű konferencia abstract

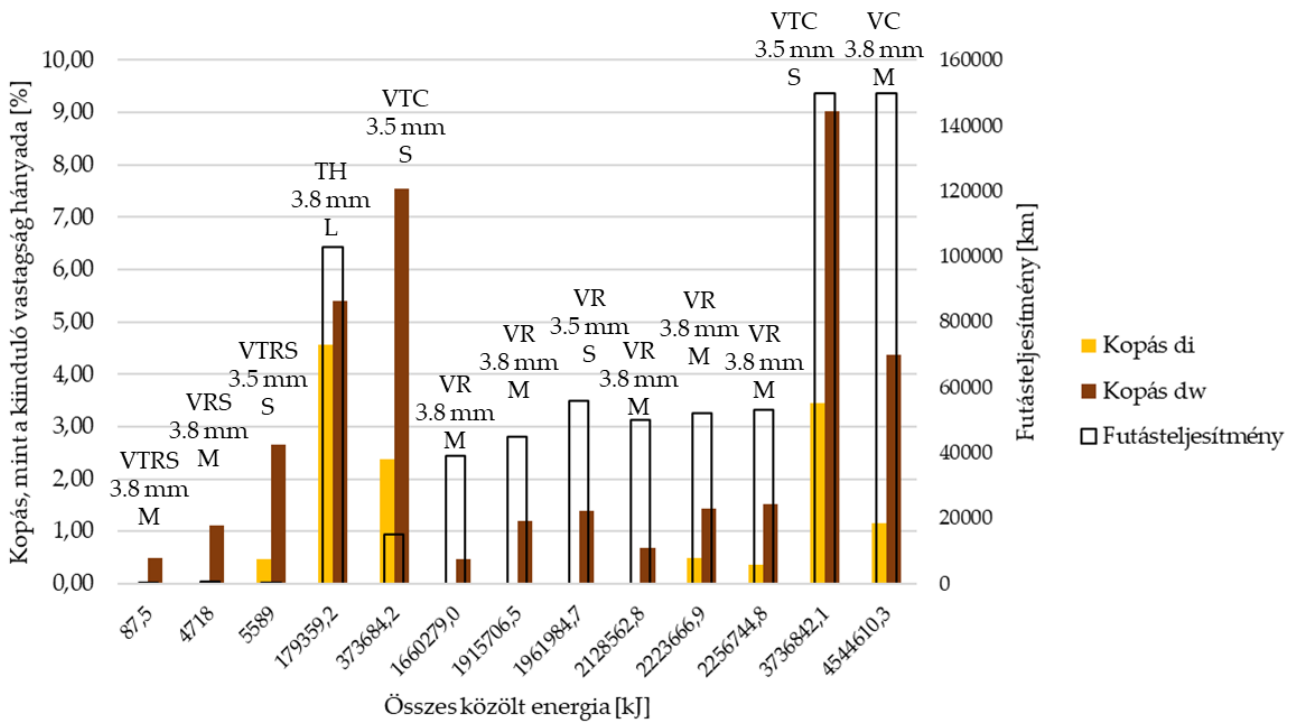
12. Biczó R., Kalácska G., Andó M., Keresztes R. (2017): Pin-on-disc tribology test of dry sliding frictional hybrid woven composite material samples cut with abrasive water jet machining, Proceedings of the V. Synergy International Conference

M3. Mérési adatok

M3.1 Betétek relatív kopási értékei a járműipari tesztekben

M3.1.1. táblázat. A betétek relatív kopási értékei a különböző járműipari tesztekben (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény	Összes közölt energia	Kopás di	Kopás dw
		[km]	[kJ]	[%]	[%]
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	0,00	0,50
VRS	VRS-0008M	793	4718	0,00	1,11
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	0,46	2,66
TH	TH-103L	102900	179359,2	4,57	5,40
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	2,37	7,55
VR	VR-039M	39000	1660279,0	0,00	0,47
VR	VR-045M	45000	1915706,5	0,00	1,21
VR	VR-056S	56000	1961984,7	0,00	1,39
VR	VR-050M	50000	2128562,8	0,00	0,68
VR	VR-052M	52000	2223666,9	0,49	1,43
VR	VR-053M	53000	2256744,8	0,37	1,53
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	3,46	9,03
VC	VC-150M	150000	4544610,3	1,16	4,36



M3.1.1. ábra. A belső (di) és a sűrűdési átmérő (dw) relatív kopási értékei a Joule-skála mentén mért futásteljesítménnyel (Biczó et. al., 2021)

M3.2 Betétek felületi érdességi értékei a járműipari tesztekben

M3.2.1. táblázat. A felületi érdesség értékeinek összefoglalása a különböző vizsgálatok előtt (referencia) és után: belső átmérő, radiális irány (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény [km]	mintavétel		belső átmérő, di				
			Összes közölt energia [kJ]	R _a Rad	szórás, σ	R _z Rad	szórás, σ	R _{Max} Rad	szórás, σ
				[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Ref.	X-000L	0	0	5,35	0,51	34,06	4,45	50,49	10,17
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	6,67	0,28	42,56	2,69	82,49	3,11
VRS	VRS-0008M	793	4718	4,04	0,58	26,23	4	61,61	25,06
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	5,89	0,61	33,74	2,49	55,23	6,1
TH	TH-103L	102900	179359,2	4,96	0,03	33,50	4,45	65,25	32,2
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	2,41	0,19	18,75	4	30,61	9,99
VR	VR-039M	39000	1660279,0	2,43	0,33	14,83	3,1	24,24	5,91
VR	VR-045M	45000	1915706,5	3,17	0,83	19,11	7,03	34,95	10,4
VR	VR-056S	56000	1961984,7	2,80	0,56	17,41	2,23	31,56	3,72
VR	VR-050M	50000	2128562,8	3,57	0,68	23,12	3,51	42,60	8,31
VR	VR-052M	52000	2223666,9	3,79	0,41	24,25	5,87	45,12	19,89
VR	VR-053M	53000	2256744,8	4,72	0,48	33,44	6,26	66,20	21,51
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	2,34	0,2	16,80	0,65	30,85	0,02
VC	VC-150M	150000	4544610,3	4,63	1,33	27,82	9,27	57,58	29,56

M3.2.2. táblázat. A felületi érdesség értékeinek összefoglalása a különböző vizsgálatok előtt (referencia) és után: belső átmérő, tangenciális irány (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény	mintavétel		belső átmérő, di						
			Összes közölt energia	Ra Tng	szórás, σ		Rz Tng	szórás, σ		RMax Tng	szórás, σ
					[kJ]	[μm]		[μm]	[μm]		
Ref.	X-000L	0	0		3,90	1,44	22,29	7,46	34,46	15,85	
VTRS	VTRS-000M	6	87,5		5,96	0	40,58	0	91,55	0	
VRS	VRS-0008M	793	4718		2,67	0,63	18,99	4,57	28,88	3,9	
VTRS	VTRS-0005S	496	5589		2,76	0,25	16,35	1,55	22,60	4,39	
TH	TH-103L	102900	179359,2		2,37	0,55	14,71	1,98	25,38	9,69	
VTC	VTC-015S	15000	373684,2		2,20	1,12	16,13	7,36	34,59	15,13	
VR	VR-039M	39000	1660279,0		1,75	1,06	13,59	6,36	27,35	15,87	
VR	VR-045M	45000	1915706,5		3,53	0,14	20,85	0,89	35,68	9,21	
VR	VR-056S	56000	1961984,7		2,80	0,78	19,56	8,51	41,15	18,97	
VR	VR-050M	50000	2128562,8		3,57	1	21,19	5,39	29,12	7,85	
VR	VR-052M	52000	2223666,9		3,35	0,41	21,82	2,45	38,90	10,96	
VR	VR-053M	53000	2256744,8		5,73	1,46	31,27	11,45	45,70	5,8	
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1		2,14	0,75	13,50	1,04	20,00	0,56	
VC	VC-150M	150000	4544610,3		2,71	1,62	16,09	10,04	31,20	21,38	

M3.2.3. táblázat. A felületi érdesség értékeinek összefoglalása a különböző vizsgálatok előtt (referencia) és után: külső átmérő, radiális irány (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény	mintavétel		Súrlódási átmérő, dw				
			Összes közölt energia	R_a rad	szórás, σ	R_z rad	szórás, σ	R_{Max} rad	szórás, σ
			[kJ]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Ref.	X-000L	0	0	4,48	1,42	28,13	9,34	47,26	20,42
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	4,84	1,39	31,20	11,04	51,51	11,75
VRS	VRS-0008M	793	4718	4,55	0,20	30,40	3,17	61,26	4,01
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	4,76	0,49	27,26	5,44	33,17	5,18
TH	TH-103L	102900	179359,2	4,40	1,03	30,21	8,41	60,72	15,01
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	3,90	0,02	24,75	0,62	37,20	1,19
VR	VR-039M	3000	1660279,0	3,80	0,08	23,64	0,29	35,69	0,96
VR	VR-045M	45000	1915706,5	3,10	0,58	21,15	3,45	40,85	0,48
VR	VR-056S	56000	1961984,7	2,93	0,68	18,10	4,12	26,14	4,13
VR	VR-050M	50000	2128562,8	3,31	0,50	19,93	2,67	31,57	6,20
VR	VR-052M	52000	2223666,9	3,68	0,20	24,96	3,13	36,07	5,41
VR	VR-053M	53000	2256744,8	3,22	0,00	23,93	0,00	38,25	0,00
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	4,45	1,18	27,37	7,00	42,45	18,57
VC	VC-150M	150000	4544610,3	2,88	0,69	20,26	5,16	38,71	18,38

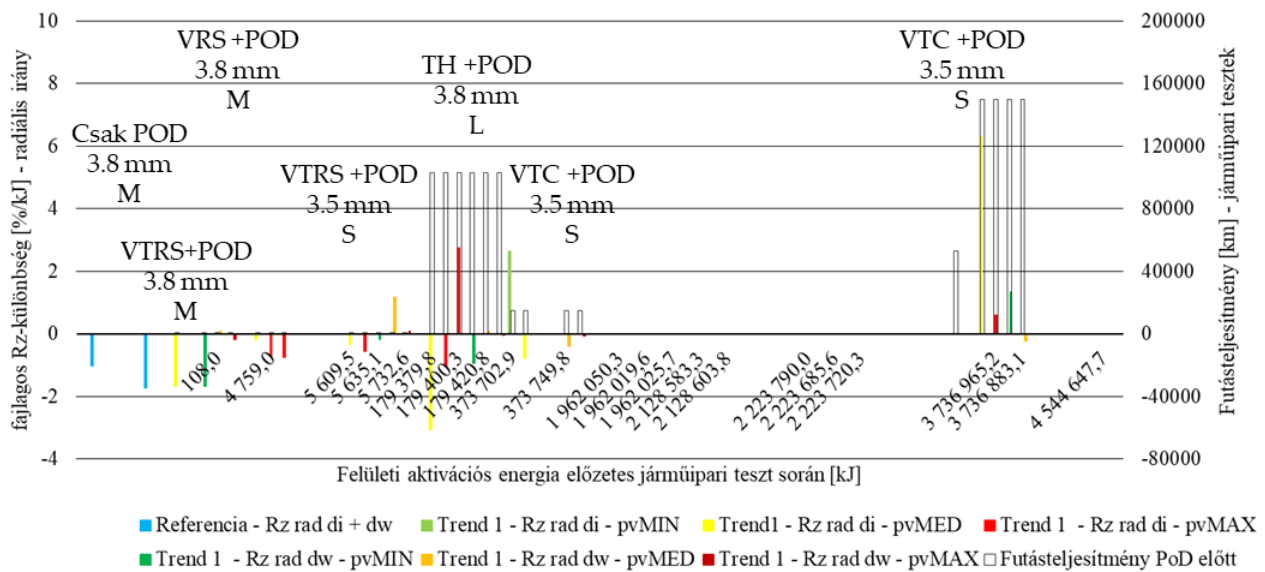
M3.2.4. táblázat. A felületi érdesség értékeinek összefoglalása a különböző vizsgálatok előtt (referencia) és után: külső átmérő, tangenciális irány (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesítmény	mintavétel		Súrlódási átmérő, dw						
			Összes közölt energia	R _a Tng	szórás, σ		R _z Tng	szórás, σ		R _{Max} Tng	szórás, σ
					[km]	[kJ]		[μm]	[μm]		
Ref.	X-000L	0	0	4,21	1,27	25,70	7,15	43,55	17,41		
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	3,37	1,58	21,09	8,15	30,67	10,72		
VRS	VRS-0008M	793	4718	2,25	0,21	13,67	2,53	20,21	5,72		
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	3,90	1,2	22,48	3,6	45,58	21,14		
TH	TH-103L	102900	179359,2	4,53	0,85	29,58	10,5	46,53	11,91		
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	4,13	0,98	23,79	1,79	56,84	31,88		
VR	VR-039M	39000	1660279,0	2,97	0,17	20,54	3,6	43,27	8,92		
VR	VR-045M	45000	1915706,5	3,64	1,81	22,64	5,15	45,41	18,26		
VR	VR-056S	56000	1961984,7	2,12	0,74	13,81	0,93	25,20	6,83		
VR	VR-050M	50000	2128562,8	2,76	0,45	19,03	4,6	36,36	1,82		
VR	VR-052M	52,000	2223666,9	4,28	0,45	27,28	5,11	45,85	22,06		
VR	VR-053M	53000	2256744,8	3,27	1,3	21,24	3,79	34,51	2,18		
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	2,54	0,33	15,42	3,25	23,99	0,72		
VC	VC-150M	150000	4544610,3	2,23	1,05	13,73	6,18	22,28	7,72		

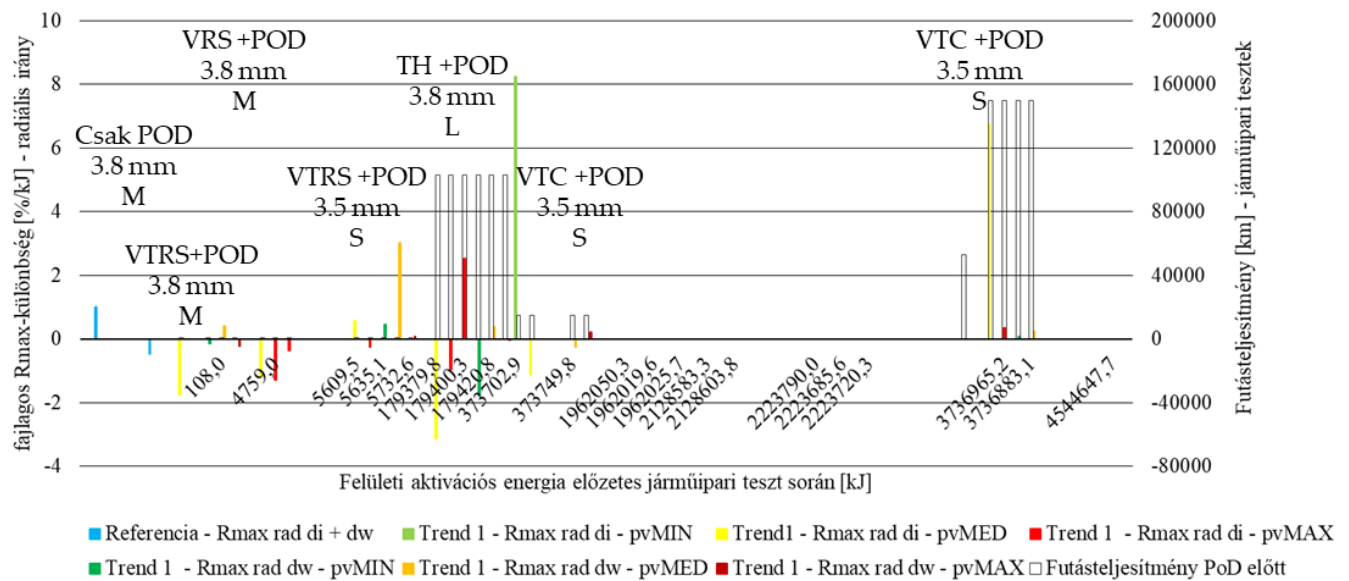
M3.2.5.táblázat. A felületi érdesség vizsgált értékeinek eltérése a kezdeti felületi érdességi jellemzőktől (Biczó et. al., 2021)

Teszt	Próbatest	Futás- teljesít- mény	minta- vétél Összes közölt energia	Belső átmérő			Súrlódási átmérő								
				dR _a Rad	dR _z Rad	dR _{Max} Rad	dR _a Tng	dR _z Tng	dR _{Max} Tng	dR _a rad	dR _z Rad	dR _{Max} Rad	dR _a Tng	dR _z Tng	dR _{Max} Tng
				%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	μm	μm
Referen- cia	X-000M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VTRS	VTRS-000M	6	87,5	24,74	24,95	63,4	52,59	82,05	165,66	8,08	10,93	9	-19,80	-17,93	-38,45
VRS	VRS-0008M	793	4718	-24,37	-23,00	22,02	-31,62	-14,78	-16,19	1,43	8,08	29,62	-46,41	-46,83	-67,13
VTRS	VTRS-0005S	496	5589	10,16	-0,92	9,39	-29,35	-26,66	-34,43	6,16	-3,08	-29,82	-7,23	-12,53	21,40
TH	TH-103L	102900	179359,2	-7,19	-1,65	29,24	-39,18	-34,01	-26,34	-1,85	7,43	28,48	7,58	15,09	-31,60
VTC	VTC-015S	15000	373684,2	-54,99	-44,94	-39,37	-43,67	-27,63	0,37	-13,03	-12,00	-21,29	-1,79	-7,45	83,07
VR	VR-039M	39000	1660279,0	-54,58	-56,46	-51,99	-55,23	-39,03	-20,65	-15,20	-15,93	-24,47	-29,31	-20,10	-48,76
VR	VR-045M	45000	1915706,5	-40,79	-43,90	-30,77	-9,63	-6,45	3,52	-30,76	-24,80	-13,57	-13,46	-11,91	4,86
VR	VR-056S	56000	1961984,7	-47,69	-48,87	-37,49	-28,20	-12,23	19,42	-34,56	-35,65	-44,69	-49,73	-46,26	-60,78
VR	VR-050M	50000	2128562,8	-33,15	-32,12	-15,63	-8,50	-4,93	-15,5	-26,09	-29,13	-33,21	-34,41	-25,97	-89,55
VR	VR-052M	52000	2223666,9	-29,19	-28,80	-10,64	-14,13	-2,10	12,89	-17,83	-11,24	-23,68	1,73	6,15	26,7
VR	VR-053M	53000	2256744,8	-11,80	-1,82	31,12	46,77	40,32	32,6	-28,09	-14,92	-19,07	-22,24	-17,36	-87,47
VTC	VTC-150S	150000	3736842,1	-56,30	-50,69	-38,9	-45,18	-39,43	-42	-0,59	-2,67	-10,17	-39,67	-39,99	-95,88
VC	VC-150M	150000	4544610,3	-13,44	-18,31	14,06	-30,48	-27,79	-9,46	-35,69	-27,96	-18,1	-47,01	-46,57	-55,66

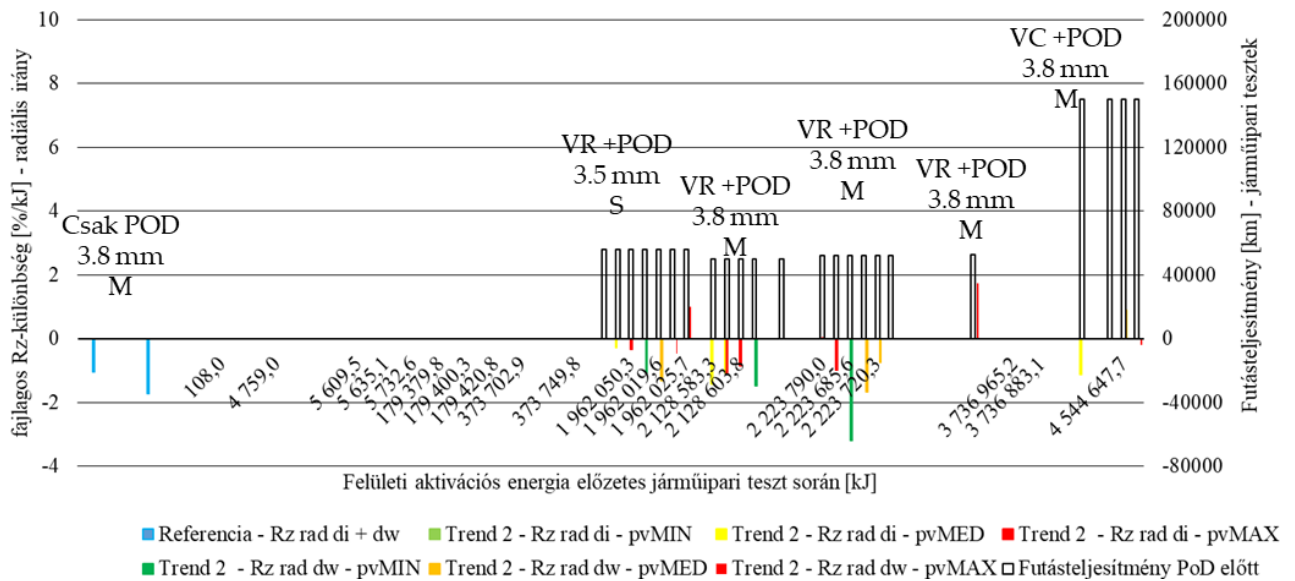
M3.3 Próbatestek felületi érdeségi értékei a pin-on-disc tesztekől



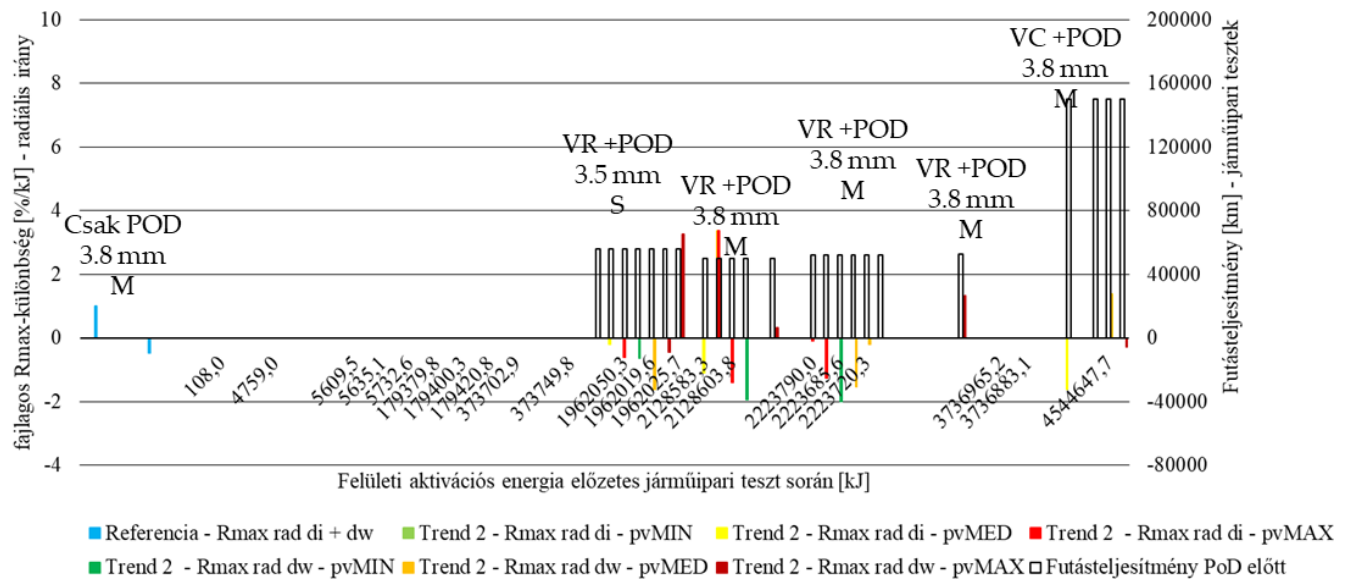
M3.3.1. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatestek radiális irányú fajlagos R_z különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – első trend: kíméletlen terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



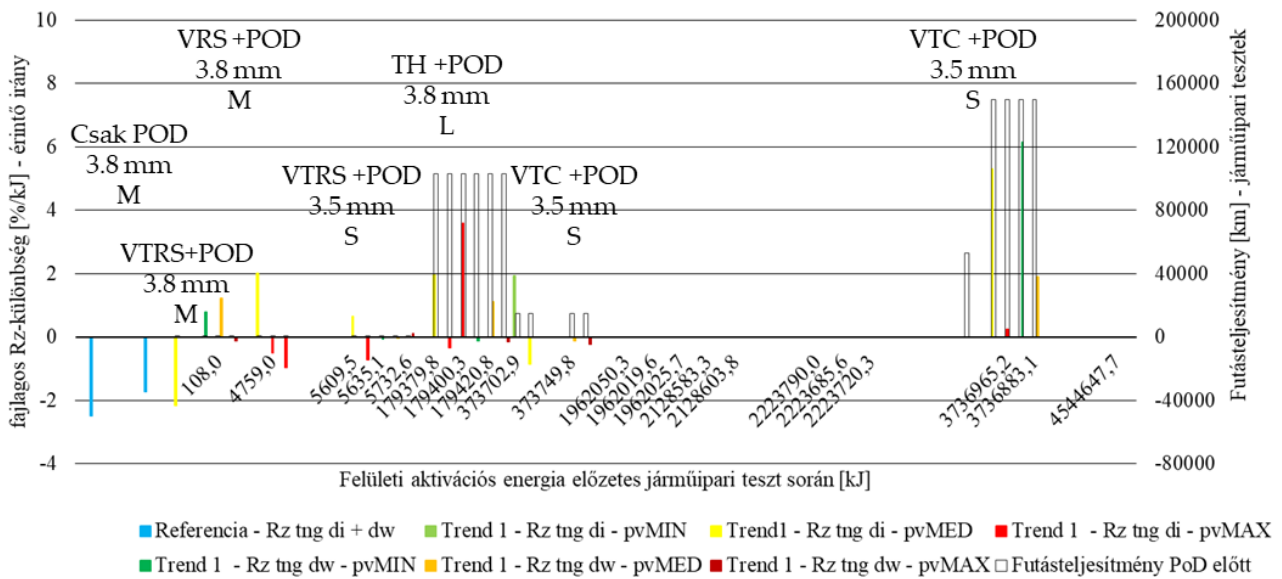
M3.3.2. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatestek radiális irányú fajlagos R_{max} különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 1. trend: kíméletlen terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



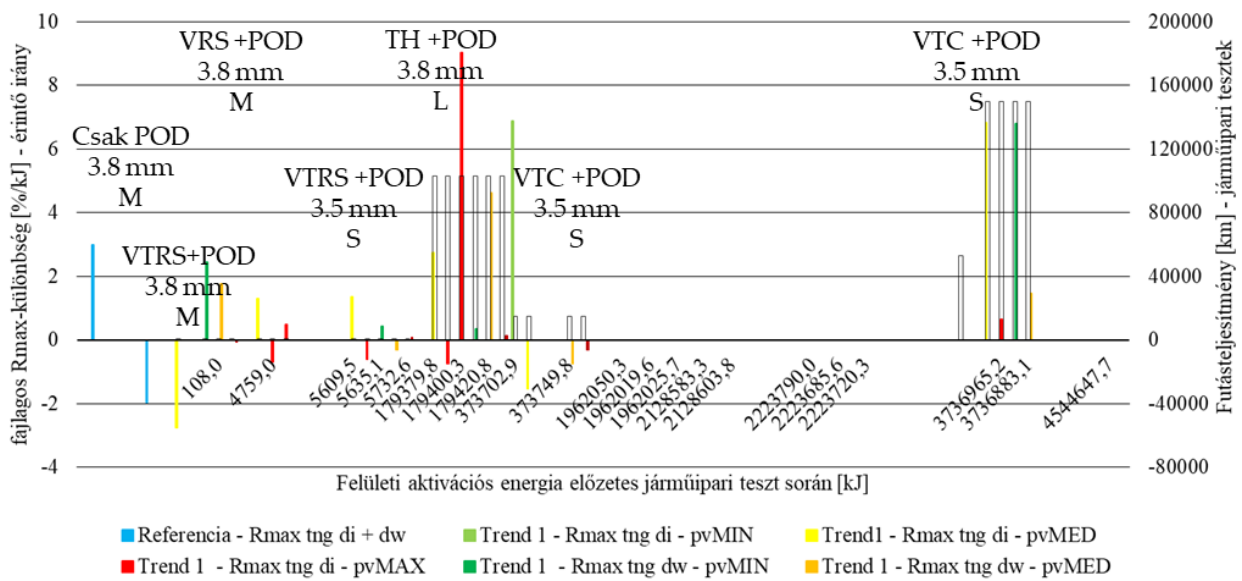
M3.3.3. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatesztek radiális irányú fajlagos R_z különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 2. trend: normál terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



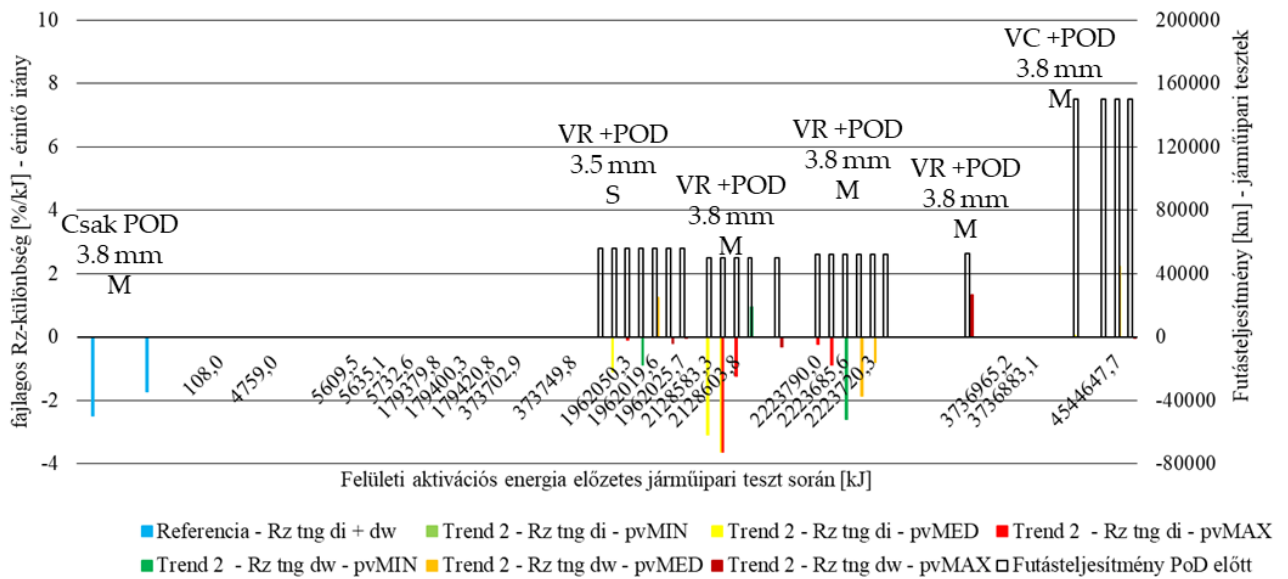
M3.3.4. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatesztek radiális irányú fajlagos R_{max} különbség értékei a minimális, közepes és maximális pv -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 2. trend: normál terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



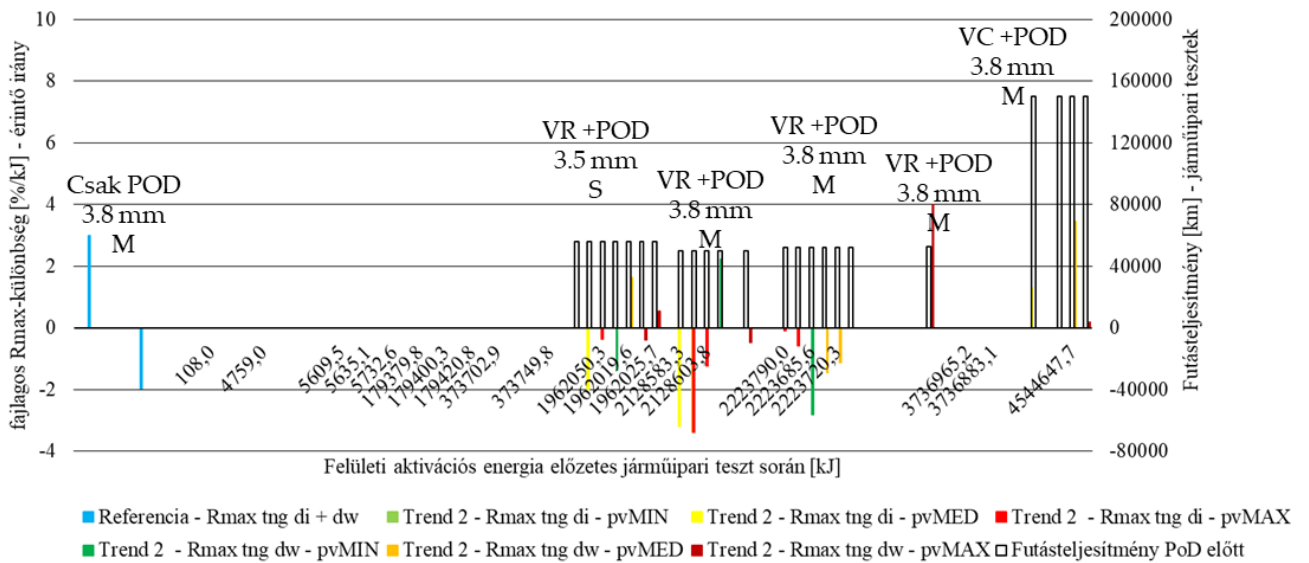
M3.3.5. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatetek érintő irányú fajlagos R_z különbség értékei a minimális, közepes és maximális p_v -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 1. trend: kíméletlen terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



M3.3.6. ábra. Belső és súrlódási átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatetek érintő irányú fajlagos R_{max} különbség értékei a minimális, közepes és maximális p_v -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 1. trend: kíméletlen terhelési esetek (Biczó és Kalácska, 2022)



M3.3.7. ábra. Belső és sűrűdési átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatetek érintő irányú fajlagos R_z különbség értékei a minimális, közepes és maximális p_v -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 2. trend: mérsékelt terheléses esetek (Biczó és Kalácska, 2022)

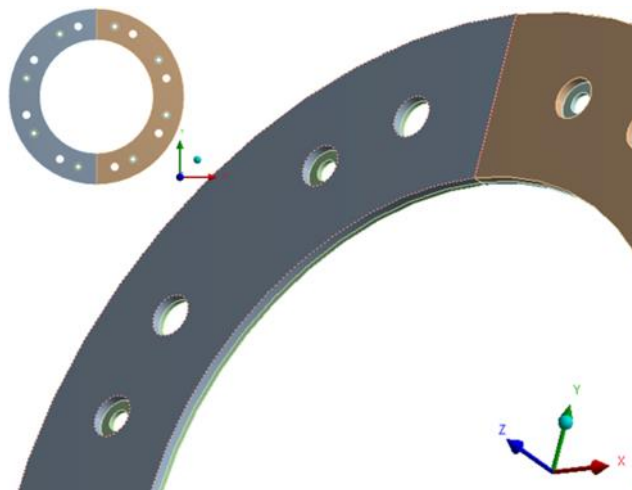


M3.3.8. ábra. Belső és sűrűdési átmérőről kivágott tű-tárcsa próbatetek érintő irányú fajlagos R_{max} különbség értékei a minimális, közepes és maximális p_v -szintű tű-tárcsa tesztek után az előzetes járműipari tesztek alapján felállított Joule-skála mentén – 2. trend: mérsékelt terheléses esetek (Biczó és Kalácska, 2022)

M3.5. Szimuláció

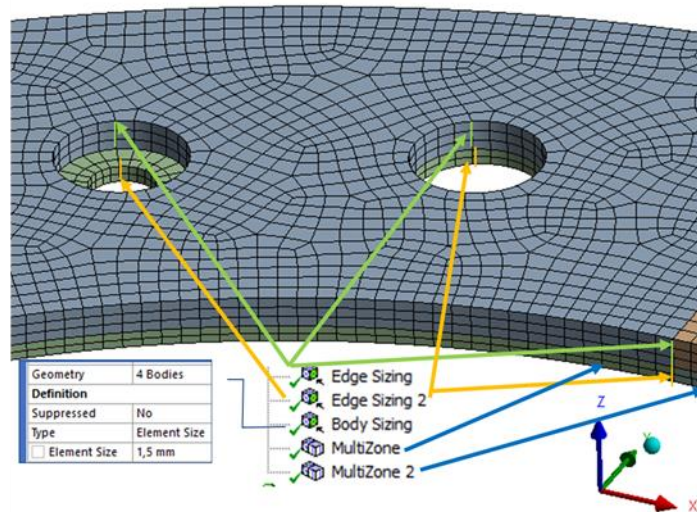
M3.5.1. Mechanikai szimulációs modell

Az Ansys 18.2 végeleemes szoftverkörnyezetben egy repedési fordulatszám terhelésű mechanikai szimulációt végeztem (Biczó et. al., 2020) a számított mechanikai anyagtulajdonságok bemutatására. A felhasznált betétgeometria méretei a következők voltak: külső átmérő, $\varnothing 240$ mm; belső átmérő, $\varnothing 155$ mm; vastagság, 3,8 mm. Amint az A1. ábrán látható, a geometria felosztására a „split body” parancsot a megfelelő hálózás és a számítási idő csökkentésének szem előtt tartásával alkalmazták.

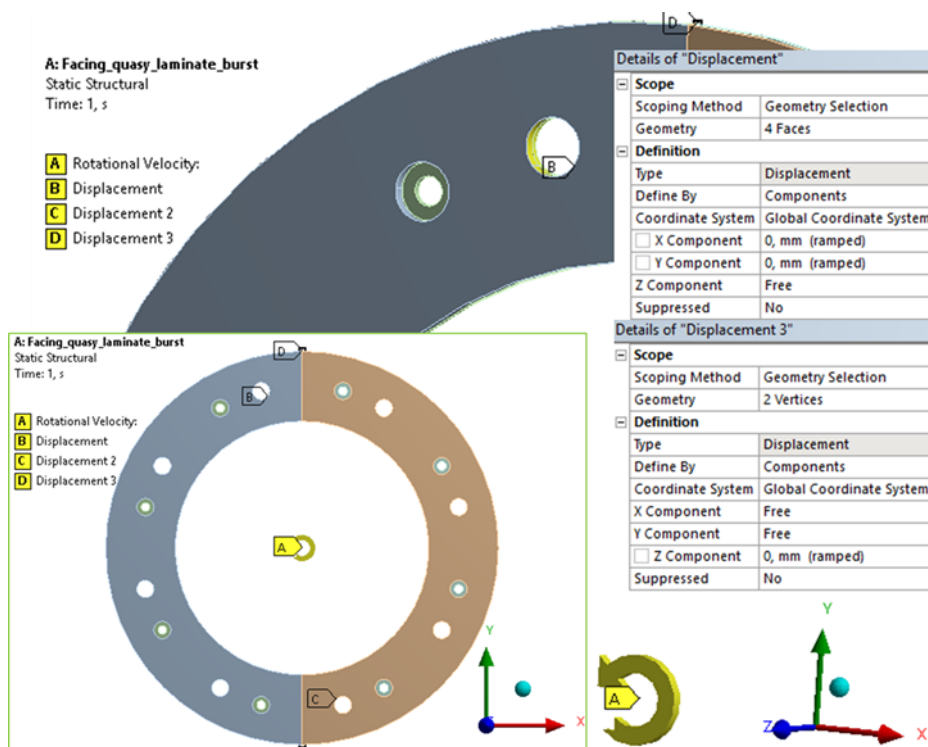


M3.5.1. ábra. A súrlódó betét felosztott geometriája

Az M3.5.2. ábra az alkalmazott hálófínomítási módszereket mutatja. Az elemek számát 56 000 körül tartottam. Az A3. ábra a terheléseket és a peremfeltételeket mutatja be. Itt 11 000 fordulat/perc fordulatszámú forgási sebességet alkalmaztam, míg az elmozdulások a repedési fordulatszámra jellemző vizsgálat közbeni megfogásokat modellezték. Az ilyen vizsgálatok során a termék általában a Z tengellyel szemben elhelyezett két csapon helyezkedik el, míg a termék elmozdulását ezekről a csapokról csak a forgató karima betét hátlapjára felütköző felülete akadályozza. Az előbbi megfogást az X- és Y-irányú elmozdulás blokkolásával (Displacement 1 és Displacement 2), míg az utóbbit a Z-irányú mozgástól blokkolt két csomópont (Displacement 3) modellezi.

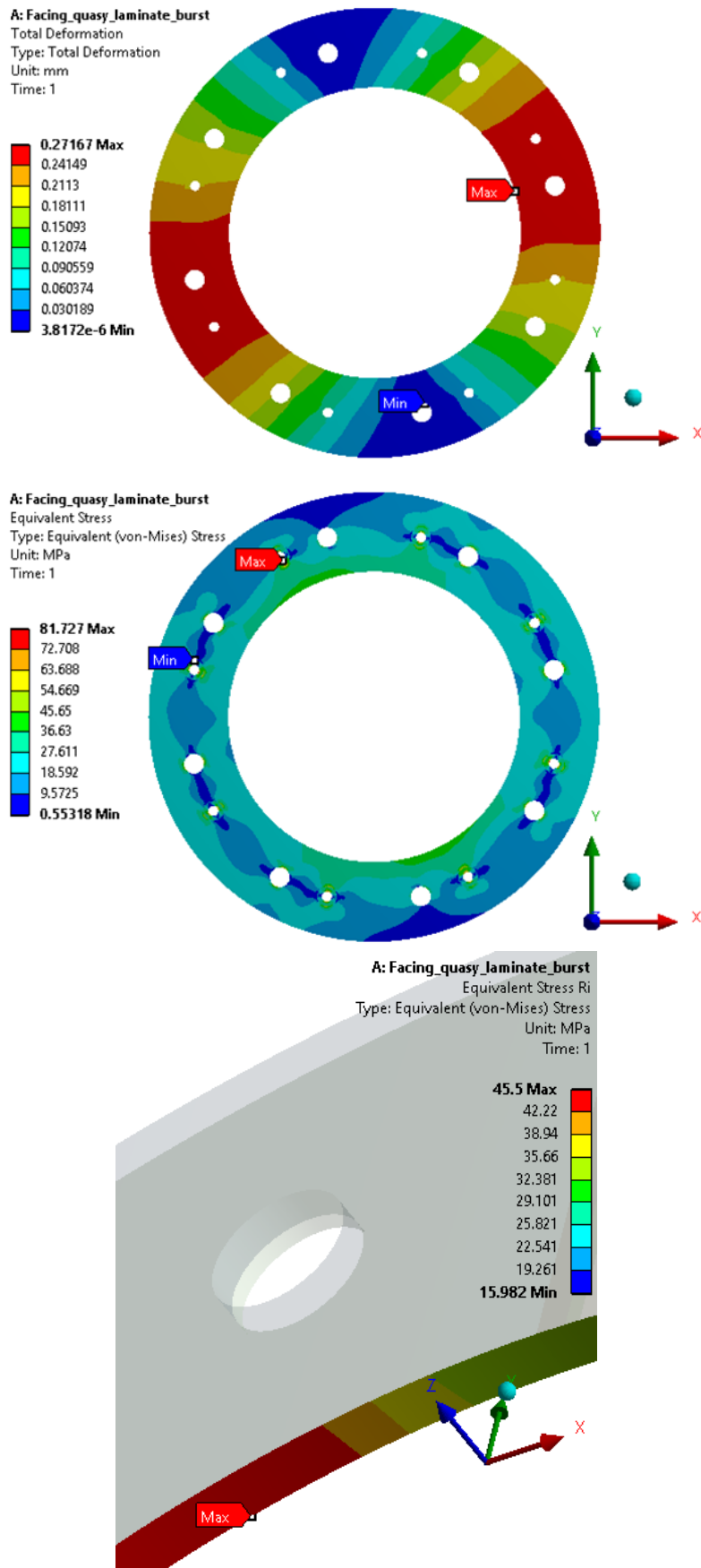


M3.5.2. ábra. Alkalmazott háló hexa elemekkel.



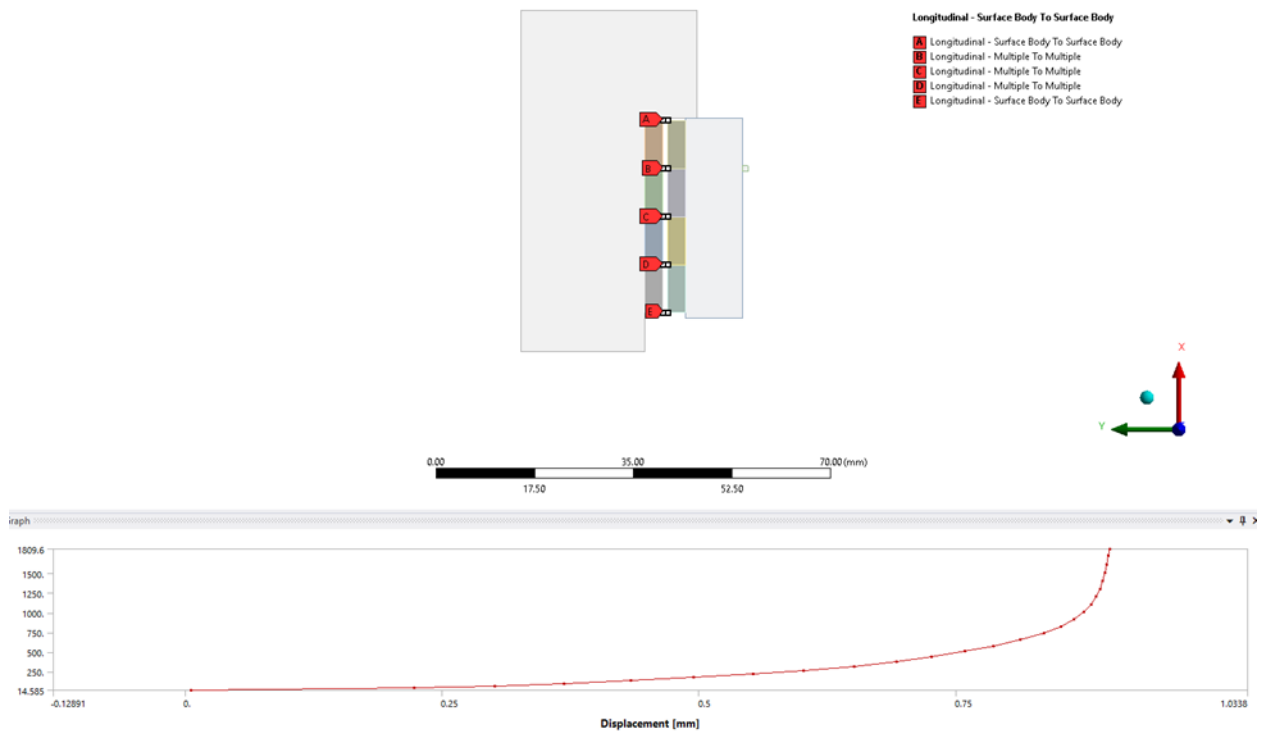
M3.5.3. ábra. Alkalmazott terhelés (forgási sebesség, A) és peremfeltételek (elmozdulások, B-D)

A teljes deformáció és az egyenértékű feszültség eredményei az A4. ábrán láthatók. A szegecselőnyílás, mint diszkontinuitás, gyűjti a feszültséget, míg a fordulatszám alatti repedéshez a belső sugár feszültségeit kell figyelembe venni.

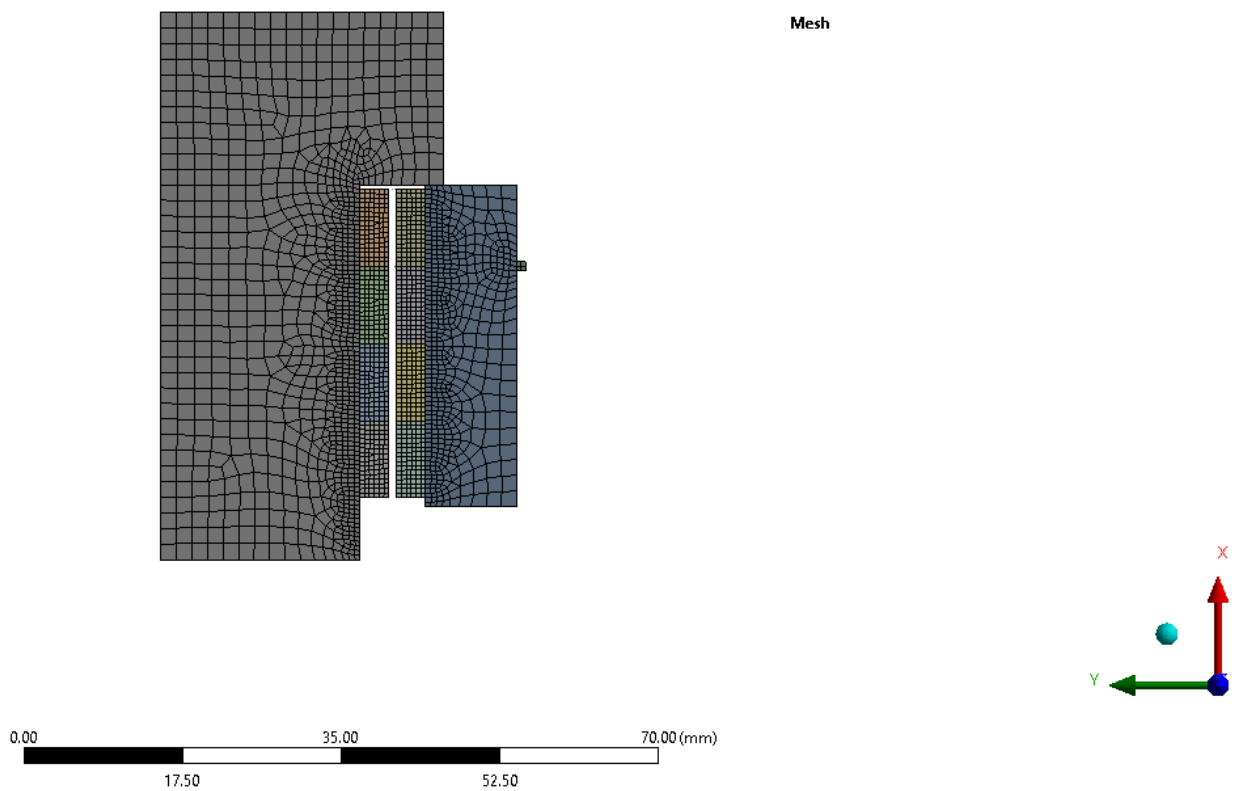


M3.5.4. ábra. A kompozit betét teljes alakváltozása és egyenértékű von-Mises feszültség eloszlása

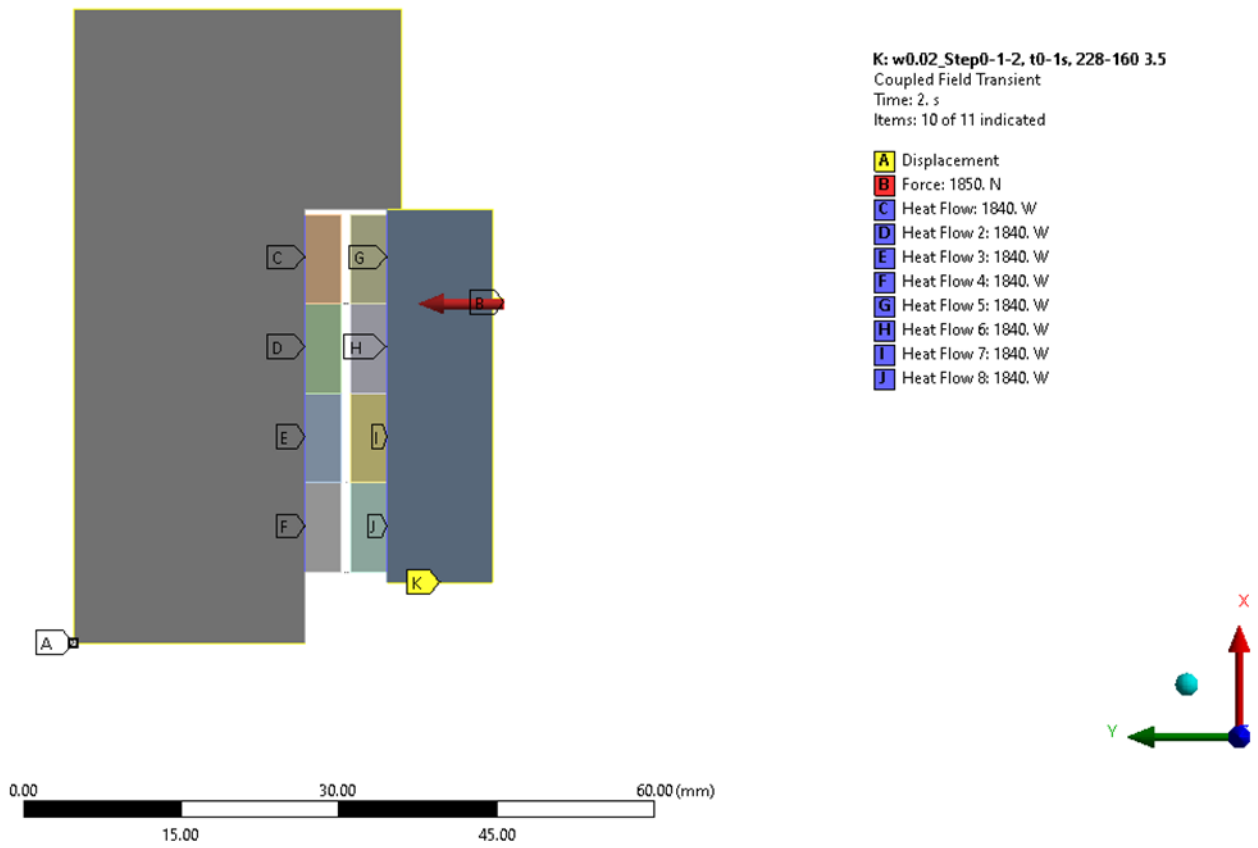
M.3.5.2. Kapcsolt termomechanikai szimuláció



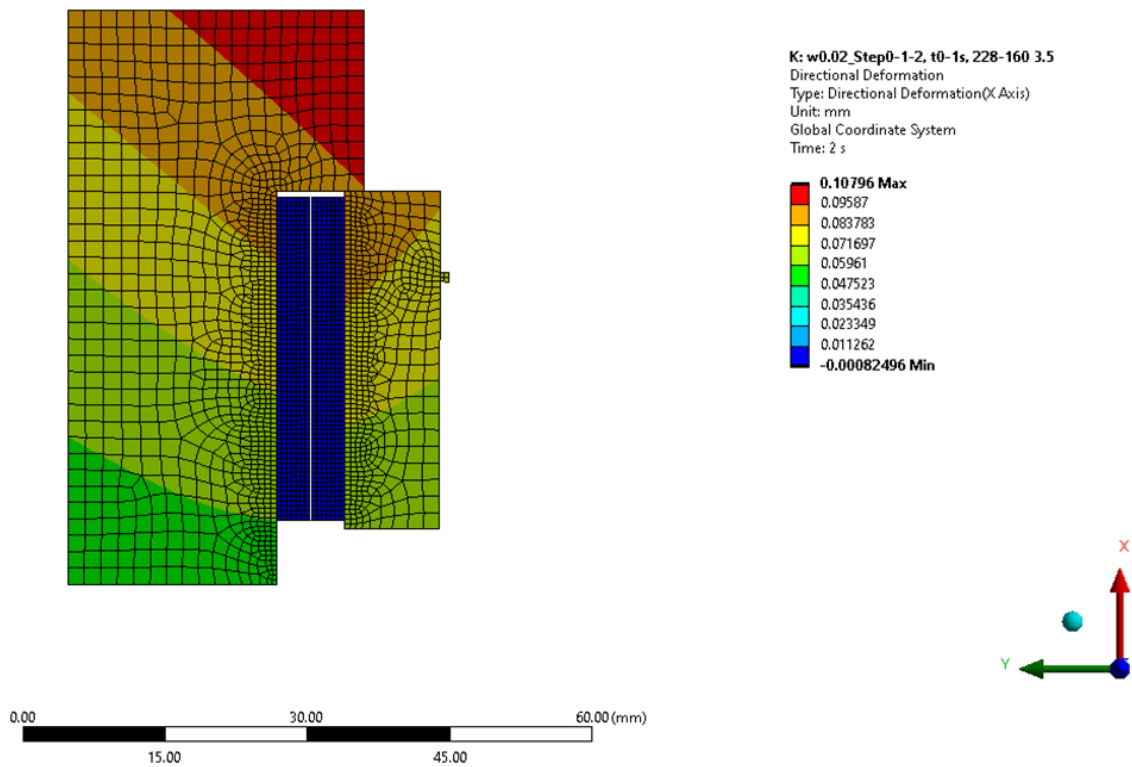
M3.5.5. ábra: A betérugózás modellezése rugó elemekkel a tárcsára jellemző karakterisztika alapján.



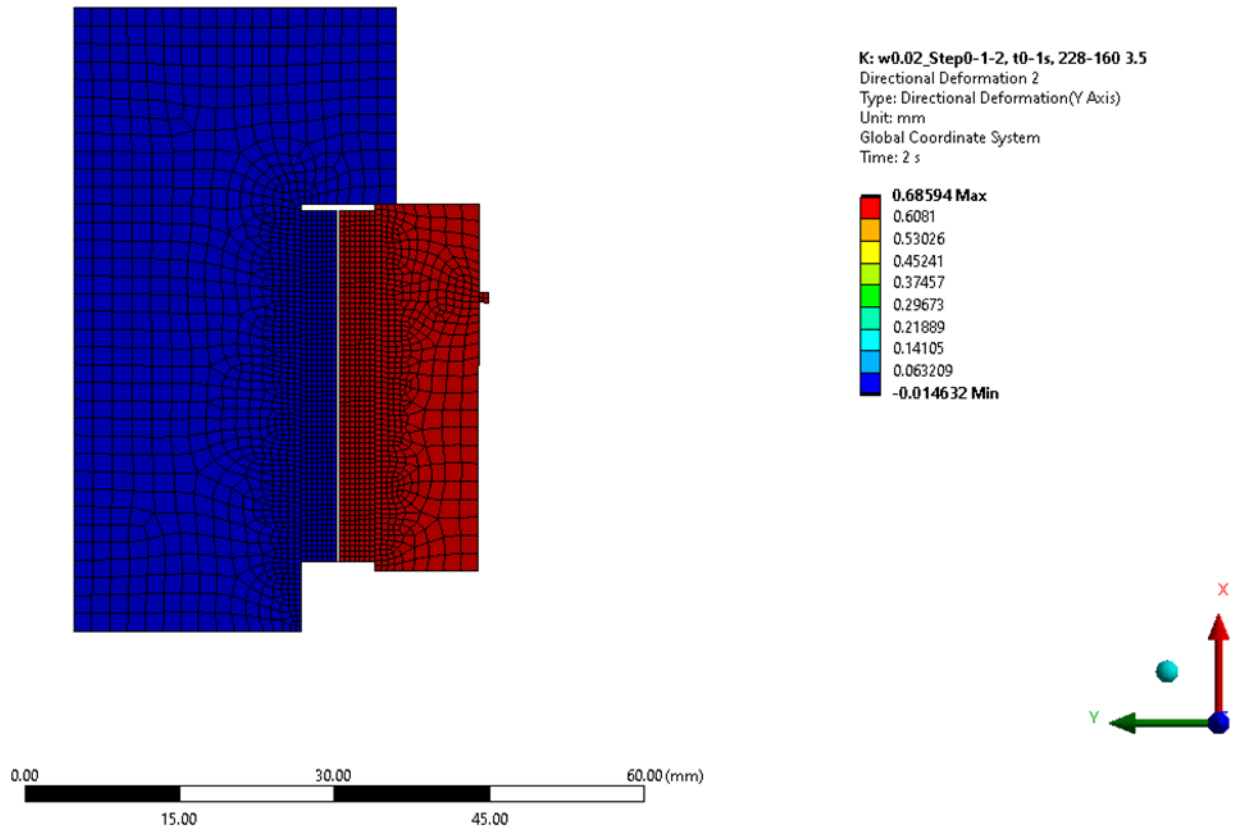
M3.5.6.A másodrendű elemekkel hálózott végeelem modell



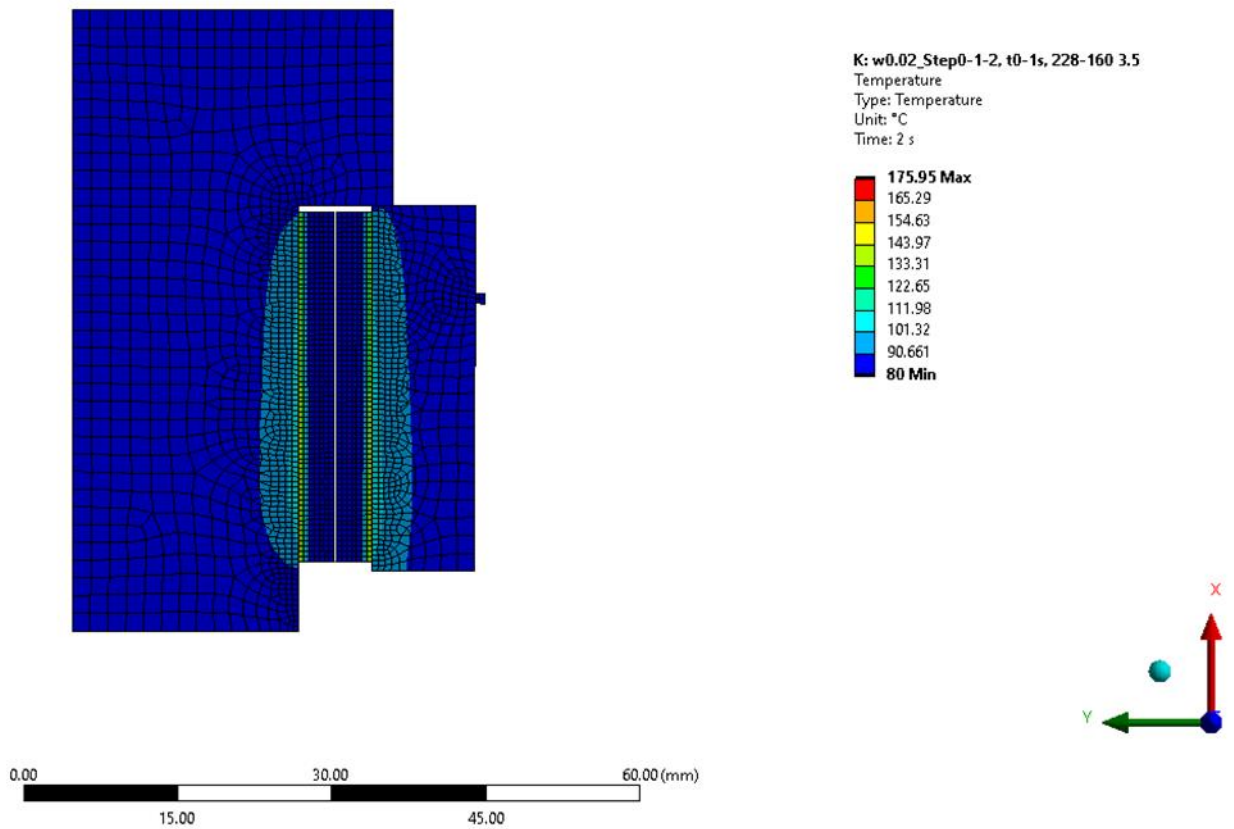
M3.5.7. ábra: Terhelések és peremfeltételek



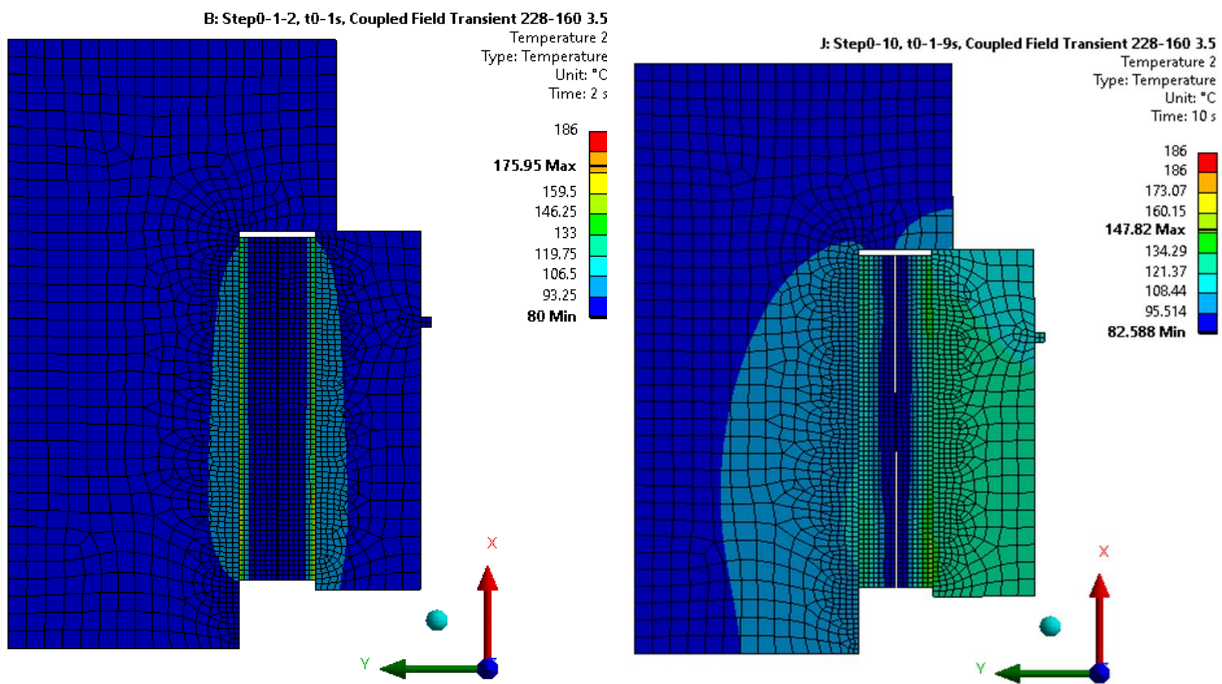
M3.5.8. ábra: Radiális deformáció 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell



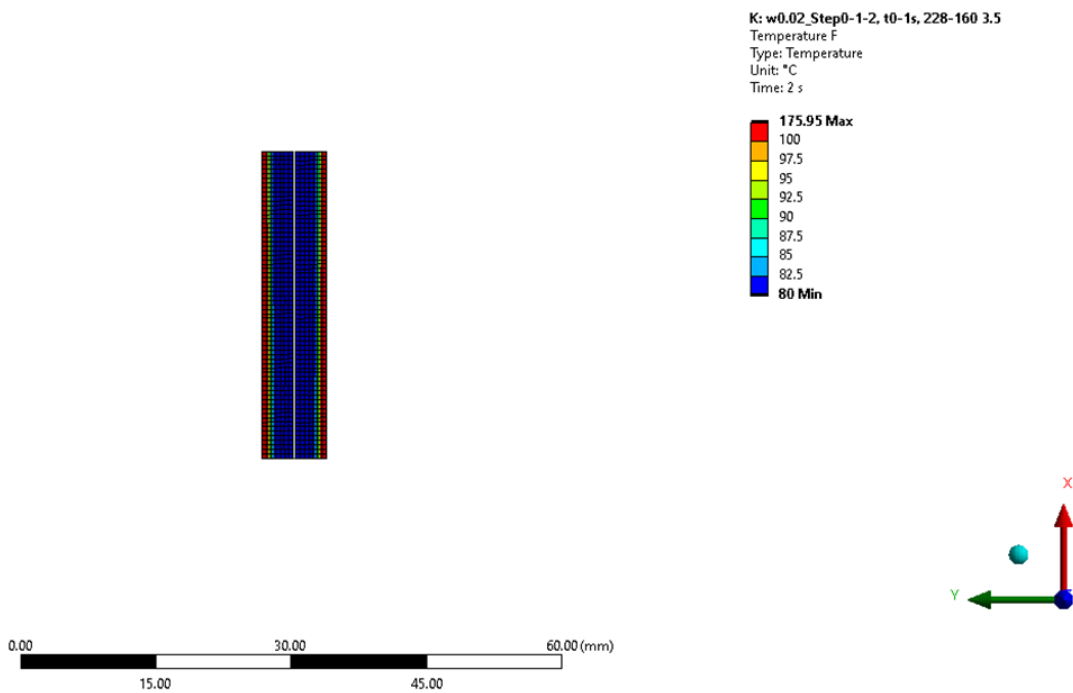
M3.5.9. ábra: Axiális deformáció 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell



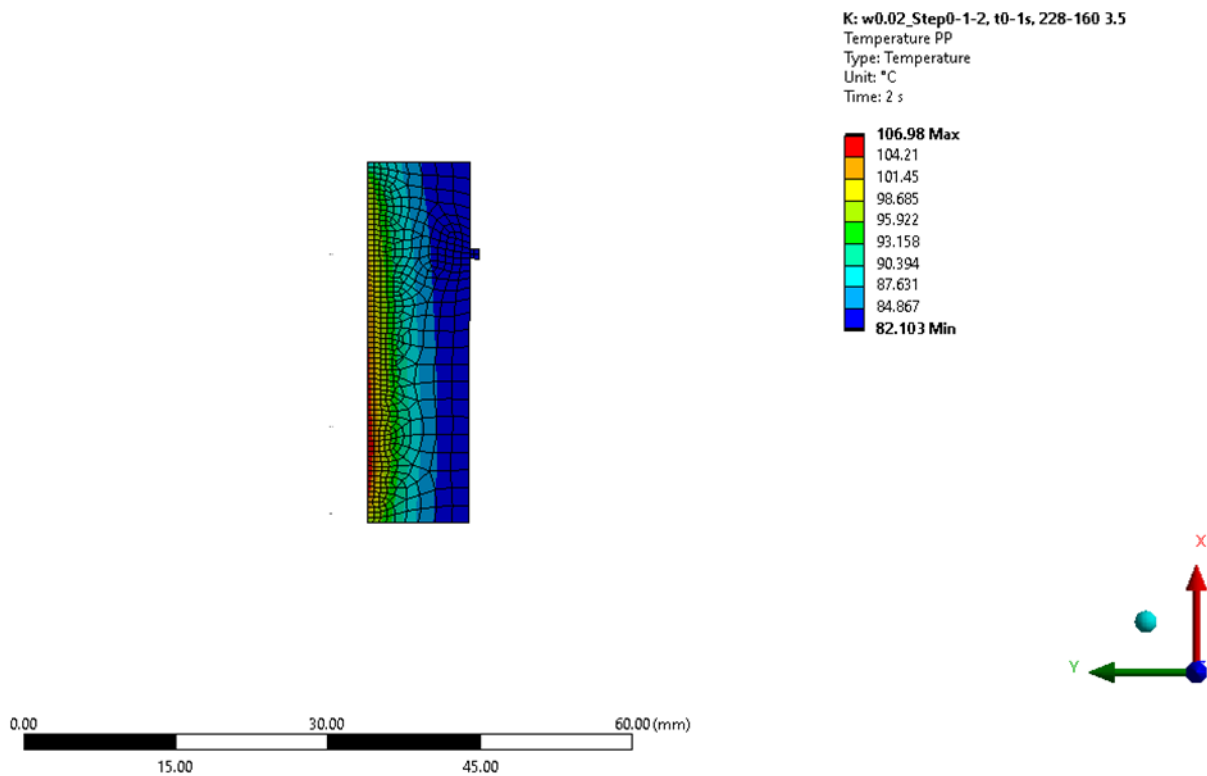
M3.5.10. ábra: Hőmérsékleteloszlás 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell



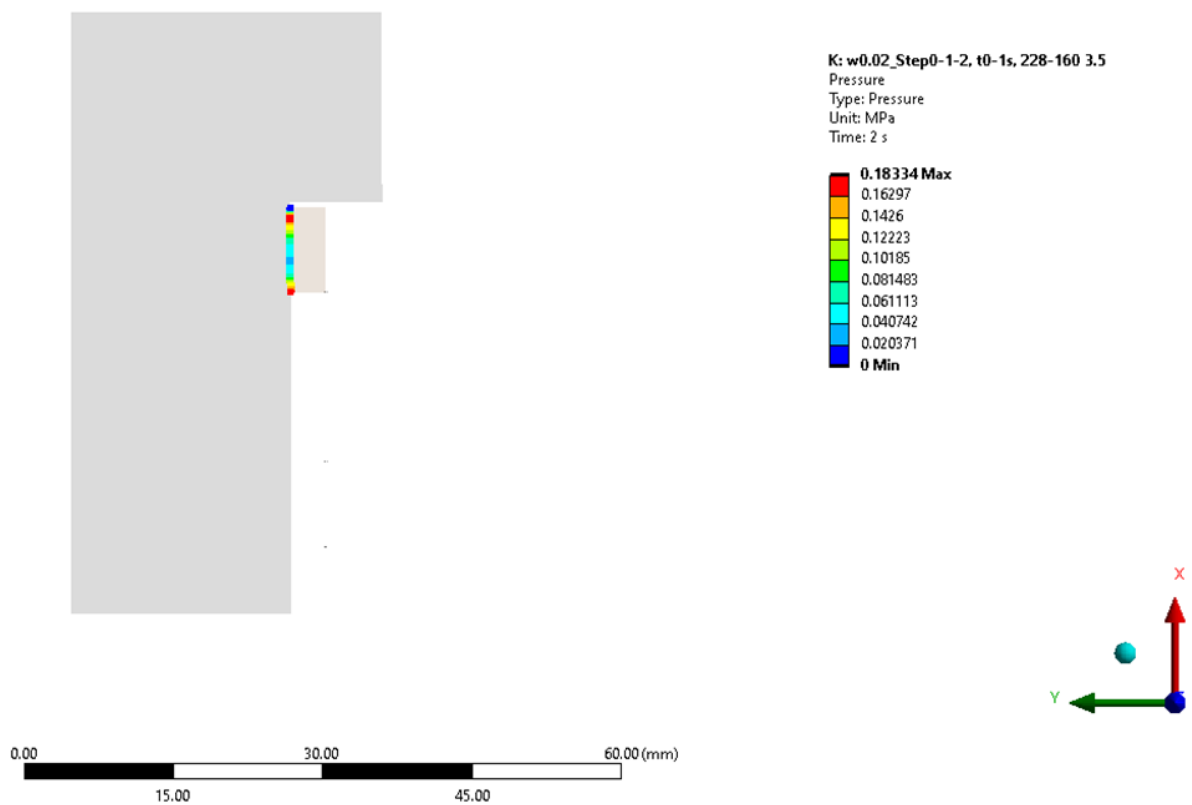
M3.5.11. ábra: Hőmérsékleteloszlás 1 és 9 mp után, 0 mm kopottságú modell



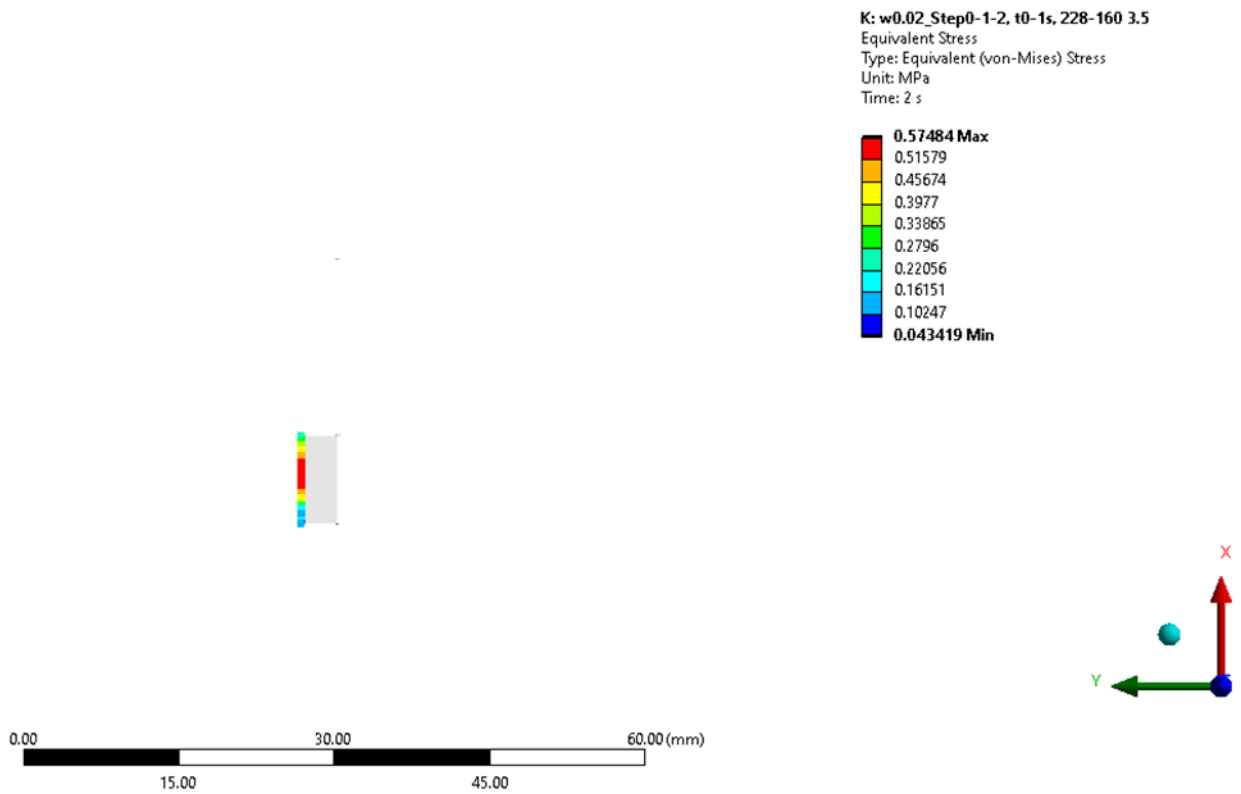
M3.5.12. ábra: Hőmérsékleteloszlás 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell, súrlódó betétek



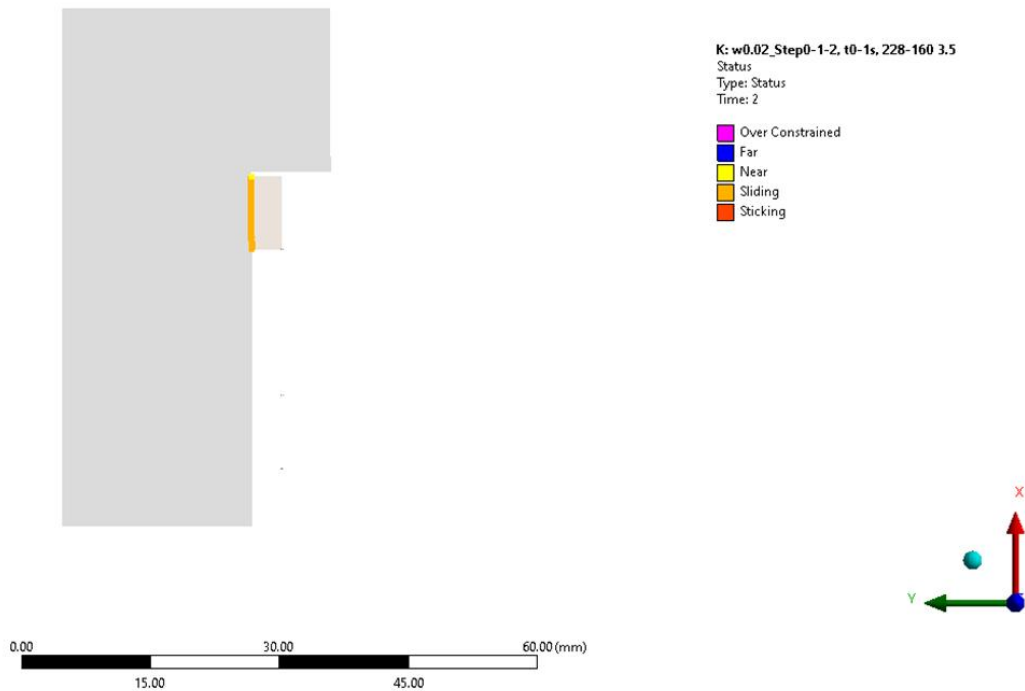
M3.5.13. ábra: Hőmérsékleteloszlás 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell, nyomólap



M3.5.14. ábra: Nyomáseloszlás 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell, súrlódó betét külső átmérő



M3.5.15. ábra: Nyomáseloszlás 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell, súrlódó betét belső átmérő



M3.5.16. ábra: Kontakt státusz 1 mp után, 0,02 mm kopottságú modell, súrlódó betét külső átmérő

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni Dr. Kalácska Gábor témavezetőmnek az éveken át nyújtott felbecsülhetetlen mértékű szakmai, szervezési és adminisztratív segítséget és motivációt a munkához.

Hálámat fejezem ki továbbá szeretteim felé: szüleimnek, akik egész eddigi életemben mindig mindenben támogatva mögöttem álltak, még ha ez nekik rengeteg lemondással is járt, és páromnak a megértésért és lelki vigaszért.

Köszönetemet fejezem ki a MATE (korábban Szent István Egyetem) a BME és az ELTE Savaria Egyetemek részére.

Köszönetemet fejezem ki továbbá a Schaeffler Savaria (korábban LuK Savaria) Kft. felé, akik lehetővé tették, hogy a céges keretek közti nem vezető beosztású munkavállalók levelezős PhD úttörőjévé váljak a vállalatnál. Köszönet illeti a morbachi Schaeffler Friction GmbH-t is.

Köszönet továbbá annak a számtalan személynek, akik, ha csak egy jó szóval, bátorítással vagy segítséggel, konzultációval hozzájárultak e dolgozat létrejöttéhez.