

Szálerősített hibrid kompozit száraz súrlódó kuplungbetétek felületi jellemzői és élettartam alatti terhelésintenzitása

Biczó Roland PhD hallgató, Dr Kalácska Gábor DSc professzor, Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet

A modern hibrid kompozit kuplung súrlódóanyagok jellemzői, terhelésre adott válaszai, élettartama során megfigyelhető viselkedése a mai napig vet fel megválaszolatlan kérdéseket, melyekre megfelelő modellek építésével keresünk választ. A súrlódó betét, mint rendszer élettartam alatti terhelésekre adott jellemző válasza a kopás (vastagságcsökkenés) és a felületi érdesség változása, melyekből következtethetünk az igénybevétel intenzitására és az élettartamra előírt megfelelőségi kritériumok teljesülése alapján a hátralévő szavatossági időre. Adott anyagi összetételű, különböző járműipari teszteknek alávetett súrlódó betétek felületén vizsgáltuk a tesztek okozta kopás és érdesség jellemzőit egy apriori igénybevételi skála felállításának érdekében, mely előkopottsági intenzitási bemenő paraméterként szolgál a betétek anyagán továbbiakban végzett tribológiai vizsgálatok alapján felállítandó súrlódási modellhez. A tervezett tribológiai vizsgálatok súrlódási és kopási eredményeit az itt meghatározott intenzitás függvényében ábrázolva lehetőség nyílik a betétek hátralévő élettartama alatti tribológiai jellemzőinek becslésére.

Tárgyszavak: szálerősítés; kompozit; kuplung; súrlódóbetét; felületi érdesség; kopás.

Szálerősített hibrid kompozit száraz súrlódó kuplungbetétek feladata, követelményei és anyagai

A járművekben a forgó mozgást és a nyomatékot, a kinetikus energiát a motortól, mint erőforrástól a hajtómű felé a tengelykapcsoló, azaz a kuplungszerkezet viszi át. [JACKO M. G. *et al.* 2000] A kuplung feladata az oldható kapcsolat mellett ennek a 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 kuplung a környezetébe.

A száraz súrlódó kuplung betétek igénybevételi állapota a súrlódó erő súrlódó felületen ébredő komponenseivel jellemezhető, amelyek az adhézió, valamint a rugalmas és képlékeny alakváltozás. A súrlódás következményei és a fellépő jelenségek [JACKO M. G. *et al.* 2000]: tapadás – tapadásmegszakadás jelensége, abrázió, repedés, súrlódó film nyíródása, érdességcsúcsok kapcsolódása. Ezek alapján a száraz súrlódó kuplungok súrlódó betéteinek követelményei a következőképpen foglalhatók össze: súrlódási tényező állandósága, kopásállóság, kopási jelenségek csökkentése a nyomólapon és lendkeréken egyaránt, 10000 rpm feletti üzemi fordulatszám (repedési fordulatszám-állóság), 300°C feletti hőmérsékleten való hibamentes működés, kis tömeg, komfortos indulás, környezetbarát anyagok alkalmazása.

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 súrlódó hibrid kompozitbetét összetevői funkciók szerint a következőképpen osztályozhatók [JACKO M. G. *et al.* 2000] [BIJWE J. 1997]:

- abrazív anyagok: a kapcsolódó felületek tisztaságának fenntartása, súrlódási film kialakítása (alumínium-oxid, vas-oxidok, kvarc, kvasav, cirkónium szilikát),
- súrlódási állapotot befolyásoló összetevők: létrehozzák a kenési állapotot, növelik a súrlódás mértékét, reakcióba lépnek a környezeti levegőben található oxigénnel a súrlódó felületek közti film alakításához (fémek, fénoxidok, fémszulfidok, fél- vagy átmenetifém-szulfidok: sárgaréz; vörösréz; ólom-oxid; alumínium; szilícium és vas vagy titánium-oxid; antimon-triszulfid; molibdén-diszulfid, szerves anyagok: szén; petrolkoksz; ásványi töltőanyagok),
- filler anyagok és erősítő anyagok: felelnek az átlag összetétel fenntartásáért, illetve az orientált erősítésért (szerves vegyületek: antioxidánsok; pamut, fémek: kálium-titanát, ásványi anyagok: azbeszt; bárium-szulfát; kalcium-karbonát; cink-oxid, egyéb polimerek: gumi, egyéb: kesudióhéj-olaj),
- kötőanyagok: biztosítják a komponensek felületei közti adhéziót, felelnek a szerkezet egybefüggőségéért (fenolgyanta, Cu-, Fe-, Ni-ötvözetek, módosított gyanták (olajokkal, elasztomerrel, foszforral, bórral stb.).

A felhasznált anyagok funkciói közti határvonal nem ilyen éles, például több kutatás is igazolta töltőanyagok és kötőanyagok súrlódási viselkedésre való befolyását. [BIJWE J. *et al.* 2008][GOPAL P. *et al.* 1996] [KUMAR M. – BIJWE J. 2010a] [KUMAR M. – BIJWE J. 2010b] [KUMAR M. – BIJWE J. 2011] A súrlódási és kopási jelenségeket befolyásolja a komponensek formája, eloszlása és részecskemérete. [BIJWE J. 1997]

A felületi jellemzők és az élettartam alatti terhelésintenzitás közti összefüggések meghatározásának céljából vizsgált szálerősítéses hibrid kompozit betét összetételét tekintve a következő komponensekből áll:

- hosszúszál-erősítés: aromás poliamid, üveg, PAN és rézszálak fonadéka
- mátrix (szintén magában is kompozit a rövidszálerősítésnek köszönhetően, emiatt hibrid kompozit a vizsgált anyag): ipari titoknak minősülő, valószínűsíthetően melaminnal módosított epoxi fenolgyantába ágyazott kompaundált gumi összetevők mellett: kén és egyéb térfogatkitöltő anyagok.

Jármű és próbapadi tesztek

A vizsgált súrlódó betétek megfelelőségének minőségbiztosítás céljából történő vizsgálatára az autóiparban jellemzően 6 különböző teszt áll rendelkezésre. Ezek különböző vizsgálati körülményekkel és paraméterekkel jellemezhetők. Az alapul vett tesztek közül a járművekkel futottak mind egytárcsás kuplungos kézi váltós alkalmazások voltak.

Tesztpadi mérések során a kuplungok hasonló igénybevételeknek vannak kitéve, mint egy autópályán közlekedő autóban. Jellemzően maximális gyorsulás mellett futtatják a rendszert hosszú ideig, állásokat beiktatva a visszahülés okozta hatások figyelembevételének lehetősége miatt.

Járművekben, utcai körülmények közt egy éven át végzett tesztek közben átlagos gyorsulás a jellemző átlagos vásárlói felhasználás mellett. A teszteknek létezik pótkocsival kiegészített terhelésű változata is.

Tesztpályán végzett vizsgálatok során profi sofőrökkel tesztelik a nyomatékátviteli rendszert folyamatosan teljes terhelés alatti gyorsulással gyakori váltás mellett. Lejtőn való elindulást is tartalmazó verzióknál pótkocsis és anélküli futás során 300–400 °C körüli hőmérsékletcsúcsok is jellemzően fellépnek a kuplungban, így a súrlódó betétek felületén. A tesztípusokat az 1. táblázat taglalja. A tesztek jelen elnevezése utal az alkalmazásra és a teszt helyszínére (T: *testbench* – tesztpad, V: *vehicle* – jármű, C: *city* – város, VT: *vehicle+trailer* – pótkocsis jármű, R: *test track* – tesztpálya, RS: *test track + hillclimb* – tesztpálya + lejtő)

A tesztek során három autótípusban háromféle méretű, de azonos anyagi összetételű súrlódó betétet tartalmazó kuplungszerkezet vizsgálatára került sor, a jellemző külső/belső súrlódó betét átmérők [mm]: Ø228/Ø160; Ø240/Ø160; Ø240/Ø155.

1. táblázat

Járműipari száraz súrlódó kuplungbetét tesztek és jellemzőik

Teszt	Alkalmazás	Pálya	Gyorsulás	Futás, km	Időtartam	Váltásgyakoriság	Futásjellemző	Sofőr
TH	tesztpad	mint autópálya	60–70% max. gyorsulás, 30–40% országúti jelleg, 1–2% állás					
VC	jármű	utcai	átlagos	150 000	1 év	gyakori váltás	magas futásteljesítmény	átlagos vásárló
VTC	jármű + pótkocsi	utcai	átlagos	150 000	1 év	gyakori váltás	magas futásteljesítmény	átlagos vásárló
VR	jármű	tesztpálya	gyorsulás teljes terhelés alatt			gyakori váltás (2–6. seb. fok.)	max. fordulatszám, hőcsúcsok	sportos (sofőrök, folyamatos műszak)
VTSR	jármű + pótkocsi	tesztpálya + lejtőn elindulás	lejtő: –bejárás –indulás – állás, hűlés – pótkocsi húzása, 1500–2800 rpm				15 MJ/ciklus, 370 °C	
VRS	jármű	tesztpálya + lejtőn elindulás	lejtő + sík				300–400 °C	

Tesztintenzitás-skála felállítása – váltások száma és közölt energia

A vizsgálatok célja meghatározni egy intenzitási sorrendet a különböző tesztek közt. Az intenzitásskála segítségével becslést adhatunk a vizsgált anyag különböző terhelések és alkalmazások okozta várható élettartambeli változásaira súrlódási viselkedés (pl. súrlódási tényező állandósága) és funkcionális tönkremenetel (pl. repedési fordulatszám) szempontjából. A tesztek két jellemző paramétere a váltásgyakoriság és a kuplungrendszerrel a teszt egésze során közölt összes energia. Figyelembe véve a futást és a súrlódó betétek méretét, mely az alkalmazásoktól függ, felállíthatjuk a 2. és 3. táblázat szerint az összes váltás és az összes

közölt energia mátrixát. A becsült tesztintenzitás a tesztoszlopban felülről lefelé haladva növekvő terhelésként értendő.

2. táblázat

Összes váltás mátrixa

összes váltás			Futás[km]						
Teszt	Méret	Alkalmazás	0-1e	5-10e	10-20e	20-50e	50-60e	100-150e	150e+
VRS	225/160								
	240/160		VRS000M1						
	240/155								
VTRS	225/160		VTRS000SI						
	240/160			VTRS005M1					
	240/155								
VR	225/160						VR050S1		
	240/160					VR020M1 VR020M2	VR050M2 VR050M1 VR050M3		
	240/155								
TH	225/160								
	240/160								
	240/155							TH100L1	
VC	225/160								
	240/160								VC150M1
	240/155								
VTC	225/160					VTC010SI			
	240/160								VTC150S1
	240/155								
			<200000	200e-1M	1000000<				[-]

3. táblázat

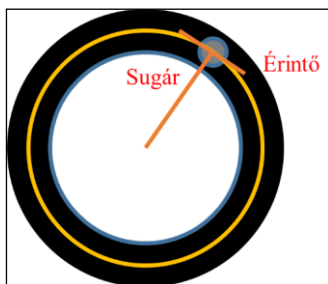
Összes közölt energia mátrixa

Összes közölt energia			Futás [km]						
Teszt	Méret	Alkalmazás	0-1e	5-10e	10-20e	20-50e	50-60e	100-150e	150e+
VRS	225/160								
	240/160		VRS000M1						
	240/155								
VTRS	225/160		VTRS000SI						
	240/160			VTRS005M1					
	240/155								
VR	225/160						VR050S1		
	240/160					VR020M1 VR020M2	VR050M2 VR050M1 VR050M3		
	240/155								
TH	225/160								
	240/160								
	240/155							TH100L1	
VC	225/160								
	240/160								VC150M1
	240/155								
VTC	225/160					VTC010SI			
	240/160								VTC150S1
	240/155								
			<750000	750e-2M	2000000<				[kJ]

Felületi jellemzők a tesztek után

A tesztek után kialakult (további, pl. tribológiai vizsgálatokhoz kezdeti, kiinduló értékeként szolgáló) felületi jellemzők vizsgálata és összehasonlítása módszerként szolgálhat a becsült tesztintenzitási skála helyességének igazolására.

A száraz hibrid szálerősített kuplung-súrlódóbetétek felületi érdességének meghatározásával foglalkozó irodalom viszonylag szegényes, az ilyen anyagokat érintő értekezések jobbára csak az ellenfelület felületi érdességéről számolnak be. Magának a súrlódó betétnek az érdességét pl. Abdullah [ABDULLAH O.I. *et al* 2015] közli, méréseihez stylus felvevőfejes *MarSurf UD 120/LD 120* érdességmérőt használ. A sugár mentén 35–80 mm-ig mért eredmények jellemzően $R_a = 11,78 \mu\text{m}$, $R_z = 106,43 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 135,31 \mu\text{m}$ (legnagyobb érdességmélység), $R_t = 171,24 \mu\text{m}$ (legnagyobb távolság érdességmaximum és -minimum között) értékek körül mozognak érintetlen, nem használt száraz kuplung súrlódó betét esetén.



1. ábra: A felületi érdesség mérési irányai a súrlódó betéteken

Vizsgálatainkhoz PHT 350 tapintójú, *MarSurf PS 10* előtolójú *MarTalk* érdességmérő készüléket használtunk R_a , R_z és R_{max} értékeket meghatározva. A tribológiai pin-on-disc vizsgálatokhoz kivágott próbatestek méreteihez és a kivágás átmérőjének figyelembevételét szem előtt tartva a szabványokban előírtnál nagyobb, $L_t=4,8$ mm hosszon történt a mintavételezés. A felületi érdesség a próbatestek kivágásának helyéről a súrlódó betét globális koordináta-rendszerét alapul véve az 1. ábra szerinti módon két irányban történt; sugár és érintő irányban. Mivel a terheléshez, azaz a nyomatókátvitelhez elengedhetetlen a forgás, így az élettartam során fellépő igénybevételek intenzitási skálájának meghatározásához az érintő irányú felületi érdességváltozás lesz a mérvadó.

A mérések alapján kiinduló felületi érdesség egy legyártott súrlódó betét esetén: érintő irányban $R_a = 5,26 \mu\text{m}$, $R_z = 31,06 \mu\text{m}$; sugár irányban $R_a = 5,18 \mu\text{m}$, $R_z = 29,13 \mu\text{m}$.

A különböző teszteknek alávetett súrlódó betétek R_a érdességi értékeinek érintetlen felülethez képesti változását (különbségét) a 4. táblázat mutatja. A tesztek során az ellenfelület minden esetben GG25 anyagú öntöttvas lendkerék R_a 4-7 μm jellemző kezdeti érdességgel.

Kopásintenzitás meghatározása

A becsült tesztintenzitási skála helyességének igazolására használható másik módszer a tesztek után keletkezett felületek kopásának vizsgálata. A kopás intenzitásának meghatározása egyszerű vastagságméréssel történik. Ismerve a kiinduló vastagságot az egyes betétméreték esetén a tesztek után előállt vastagságokból meghatározható a kopás mértéke, így az igénybevétel kopásban jelentkező intenzitása. A tesztek utáni vastagságcsökkenést az 5. táblázat foglalja össze.

Az egyes betétméretkekhez tartozó kiinduló vastagságok külső/belső súrlódó betét átmérők [mm] szerint: Ø228/Ø160: 3,5 mm; Ø240/Ø160: 3,8 mm; Ø240/Ø155: 3,8 mm.

4. táblázat

A tesztek utáni R_a érdességkülönbségek mátrixa

Kezdeti érintő érdességkülönbségi mátrix			Futás [km]						
Teszt	Méret	Alkalmazás	0-1e	5-10e	10-20e	20-50e	50-60e	100-150e	150e+
VRS	225/160								
	240/160		VRS000M1						
	240/155								
VTRS	225/160		VTRS000S1						
	240/160			VTRS005M1					
	240/155								
VR	225/160						VR050S1		
	240/160					VR020M1 VR020M2	VR050M2 VR050M1 VR050M3		
	240/155								
TH	225/160								
	240/160								
	240/155							TH100L1	
VC	225/160								
	240/160								VC150M1
	240/155								
VTC	225/160				VTC010S1				VTC150S1
	240/160								
	240/155								
			<2	2-2,6	2,6-3	3<	[µm]		

5. táblázat

A tesztek utáni kopottsági értékek mátrixa

Kiinduló kopottsági mátrix			Futás [km]						
Teszt	Méret	Alkalmazás	0-1e	5-10e	10-20e	20-50e	50-60e	100-150e	150e+
VRS	225/160								
	240/160		VRS000M1						
	240/155								
VTRS	225/160		VTRS000S1						
	240/160			VTRS005M1					
	240/155								
VR	225/160						VR050S1		
	240/160					VR020M1 VR020M2	VR050M2 VR050M1 VR050M3		
	240/155								
TH	225/160								
	240/160								
	240/155							TH100L1	
VC	225/160								
	240/160								VC150M1
	240/155								
VTC	225/160				VTC010S1				VTC150S1
	240/160								
	240/155								
			=<0,1	0,1-0,15	0,15-0,3	0,3=<	[mm]		

Kopás és felületi érdesség változásának kapcsolata, tesztintenzitási spektrum (skála) felállítása

A mért felületi érdességváltozás és vastagságsökkenés, azaz kopási eredmények alapján felállítható tesztintenzitási skálák jól fedik egymást, az egyes eltérések oka a különböző átmérőjű betétek sajátos viselkedése adott terhelések alatt. Az eredményeket összevetve a következő intenzitási, igénybevételi skála állítható fel: **VRS – VRTS – VR – TH – VC – VTC** az igénybevétel intenzitása szerint növekvő sorrendben.

Tehát TH és VC kevesebb váltás és közölt energia mellett is intenzívebb kopást idézett elő, így az igénybevételi skálát helyesen állítottuk fel.

Alkalmazási célok

A kapott eredmények után a következő lépés a tribológiai vizsgálatok elvégzése: Pin-on-disc kísérlet a kuplung kontakt létrejöttének modellezésére (pillanatnyi), ahol a kiegyenlítetlenség feltételezhetően olyan terheléskülönbségekhez vezet, melyek miatt ún. „hot spotok” és tönkremenetelt gyorsító jelenségek jönnek létre. A súrlódás alatti viselkedést összevetve az apriori, jelen cikkben leírt tesztek alatt tapasztaltakkal becsülhetővé válik adott élettartamú és kihasználtsági profilú kuplungbetétek várható súrlódási viselkedése, stabilitása és hátralévő élettartama.

Irodalomjegyzék

- Abdullah O.I. *et al* (2015): Effect of Surface Roughness on the Thermoelastic Behaviour of Friction Clutches, *FME Transactions* 43, 241-248.o.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gopal P. *et al.* (1996): Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar® pulp Part II—wear surface characteristics, *Wear* 193/2, 180-185.o.
- Jacko M. G. *et al.* (2000): Brake Linings and Clutch Facings, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Online ISBN: 9780471238966, DOI: 10.1002/0471238961
- Kumar M. – Bijwe J. (2010a): Role of different metallic fillers in non-asbestos organic (NAO) friction composites for controlling sensitivity of coefficient of friction to load and speed, *Tribology International* 43/5–6, 965–974.o.
- 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.
- Kumar M. – Bijwe J. (2011): Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount, *Wear* 270/3–4, 269–280.o.