

Barnított gördülőcsapágyak üzemi viselkedésének vizsgálata

Gépelemek és Géptervezés Intézet (IME), Rajna-Vesztfáliai Műszaki Főiskola,
Aacheni Egyetem

Rövid összefoglalás

A gördülőcsapágy technológiában egyre nagyobb teret hódít a fémbarnítási felületkezelés a csapágyak igényes üzemi feltételek közötti biztonságos működésének céljából. Egyes területeken szinte kizárólag ezek kerülnek felhasználásra. Ugyanakkor alig jelentek meg tudományos vizsgálatok a súrlódási viselkedésről és a gördülőcsapágy működésére gyakorolt hatásokról.

Ezért a golyó-a-tárcsán elrendezésű tribométer segítségével megvizsgáltuk a gördülőcsapágyak barnított fémfelületeinek súrlódási viselkedését. A vizsgálatok középpontjába a bejáratási és súrlódási viselkedést helyeztük.

1. Bevezetés és motiváció

Az aktuális tendencia egyértelműen az egyre nagyobb teljesítőképességű és nagyobb teljesítményspektrummal rendelkező berendezések gyártásának irányában halad. Ebből eredően a meghajtási lánc összes komponense magasabb terhelésnek van kitéve és minden alkatrész a terhelhetősége határán üzemel. Ezen határok egyre további kitolása a gördülőcsapágy technológiában többek között abban jelentkezik, hogy új károsodásfajták, mint pl. az úgynevezett White Etching Cracks (WEC), lépnek fel. De az ismert károsodásfajták, mint pl. a szürkefoltosság vagy az elkenődés, az alkalmazásra jellemző magas terhelés vagy fordulatszám-dinamika hatására az egyébként nem kritikus üzemi feltételek között is jelentkeznek.

Ez az általános tendencia például a szélerőműveknél látható. Éppen ezen a területen találkozunk az egyre nagyobb méretű berendezések és nagy dinamikájú üzemi feltételek kombinációjával. Ugyanakkor a csapágyak idő előtti kiesése ebben az iparágban átlagon felüli költségeket idéz elő, amelyek mind a berendezés leállításából, mind a megkárosodott csapágy nagy munkát igénylő cseréjéből erednek. A nagy karbantartási költségeket egyrészt a legtöbbször földrajzilag távoli helyekre, sőt a tengerre, való telepítés okozza. Ezen kívül a berendezések részben 120 méternél magasabb tornyokban helyezkednek el.

Elsősorban igényes alkalmazási területeken, mint pl. szélerőművekben, a gördülőcsapágy gyártók az elmúlt években átálltak a csapágyaik barnítására. A gépalkatrészek barnítása a szerszám- és gépiparban ismert és elterjedt kezelési eljárás. Az eredeti cél a másodlagos korrózióvédelmi tulajdonságok javítása vagy az alkatrész optikai feljavítása volt. A gördülőcsapágyak barnítását más szándékból végzik. A gördülőcsapágy gyártók termékismertetőiben a legkülönbözőbb tulajdonságokat írják a barnítás javára:

- induláskor fellépő csúszási károsodás csökkentése
- az elkenődés és a kopás veszélyének csökkentése kifejezetten a bejáratás alatt
- az élettartam növelése alacsony terhelésű és magas fordulatszámú alkalmazások esetén
- a megbízhatóság és a teljesítmény javítása bonyolult felhasználási körülmények között, különös tekintettel a rezgésekre és alacsony terhelésekre
- a korrózió elleni védelem javítása
- a kenőanyag tapadásának javítása
- a bejáratási viselkedés javítása
- a csúszási kenődés és a veszélyes felületi károsodás (White Etching Cracks) csökkentése .

A barnítás súrlódási tulajdonságairól és a gördülőcsapágyak működésére gyakorolt hatásáról nem jelentek meg tudományos munkák. Az egyes gördülőcsapágy gyártóknál a gördülőcsapágyak szinte kivétel nélküli barnítása viszont saját, a nyilvánosság számára nem közzétett, vizsgálatokra utal. A széles körű elterjedés másik oka az egyszerű, és ezáltal költségkímélő eljárás. Ez a tényező jól érzékelhető az alternatív eljárásokkal, mint pl. a PVD-bevonatokkal való összehasonlításnál. A PVD-bevonatok súrlódási tulajdonságai és a gördülőcsapágyakban való felhasználhatóságuk is tudományosan bizonyított. Ezek bevonatok viszont kisebb mértékben terjedtek el a gördülőcsapágy technológiában, mivel a magasabb költségek mellett hátrányok is lépnek fel a bevonatolásra kerülő alkatrészek nagyságára és geometriájára vonatkozóan. A vizsgálati sorozat felhasználók és kutatók számára szolgáltat a gördülőcsapágy gyártók termékismertetőiben szereplő inkább általános adatokat meghaladó megalapozott ismereteket a barnítás súrlódási tulajdonságairól és annak hatásáról a gördülőcsapágyak működésére. Itt arról van szó, hogy ismertessük a lényeges hatásokat és ahol lehet, adjunk magyarázatot rájuk, és rámutassunk a nyitott kérdésekre és a további lehetséges kutatási területekre.

MIHAILIDIS a munkájában kéttárcsás vizsgálóberendezésen vizsgálta meg a Schaeffler cég barnítási technológiáját. Nagy kopást és elkenődést okozó feltételek között a következő kombinációkat vizsgálta meg: barnított golyó barnított golyón, barnított golyó bevonat nélküli golyón, és bevonat nélküli golyó bevonat nélküli golyón. A golyókon nagy bejáratási kopás volt észlelhető, amely a barnított/barnított kombinációban a további vizsgálatoknál szinte teljesen megszűnt. Egyidejűleg bizonyítja a súrlódás csökkenését, ha legalább az egyik érintkező felület barnított. Az elkenődéssel szembeni ellenállás vizsgálata is kimutatta a barnítás által elért javulást. Ezekkel a vizsgálatokkal ellentétben az itt bemutatott vizsgálati sorozat kereteiben gördülőcsapágyakat is megvizsgáltunk. MIHAILIDIS ezen kívül a kopásra és elkenődésre kritikus vizsgálati feltételekre korlátozódik, miközben a jelen munka teljes kenés alatt végzett vizsgálatokat is magába foglal.

2. Mi is a fémbarnítás?

A fémbarnítás a kémiai úton létrehozott konverziós bevonatozási eljárásokhoz tartozik. Ez azt jelenti, hogy a bevonat nem egy réteg felhordásával jön létre, hanem a felülethez közel lévő anyagterület és a konverziós oldat közötti reakció által.



1. ábra: Barnított hengergörgős csapágy NU206

A barnítóréteg lényegében vas (II,III)-oxidból (Fe_3O_4) áll. A kémiai oxidáció a munkadarabok 15-20 percig tartó, nátrium-hidroxidot, NaOH), nátrium-nitrátot (NaNO_3), nátrium-nitritet (NaNO_2) és dinátrium-hidrogén-foszfátot ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) tartalmazó vizes oldatba való bemeztése alatt, 135-145 °C hőmérsékleten, zajlik le. A DIN 50938 szabvány szerint a barnítás további vegyszerek hozzáadásával befolyásolható. Ezen kívül a közbülső öblítés után egyszer-kétszer meg lehet ismételni a merítést, de a fürdő forráspontját az előző menethez viszonyítva enyhén növelni kell. Ezt két-, ill. háromfürdős barnításnak nevezik. A külső képen kívül az így létrehozott rétegek a felületi tömegben is különböznek (4,5, 5,5 és 6,5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). Így az eljárástól függően kb. 1 μm vastag réteg keletkezik.

A barnítórétegek porózus, amorf szerkezettel rendelkeznek.

Az itt megvizsgált gördülőcsapágyak kétfürdős barnítással felületkezeltek. A csapágyak összes alkatrészét azonos folyamatban kezelték és a mérések előtt eltávolították az összes korrózióvédő anyagot.

3. Radiális csapágyak vizsgálata

A radiális hengergörgős csapágyakat széles körben alkalmazzák a kezdetben ismertetett igényes körülmények között és emiatt gyakran barnított kezelésben részesülnek. Ezért a vizsgálatok kezdetén egy vizsgálati sorozatot végeztünk hengeres gördülőcsapágyakkal viszonylag magas terhelési és mérsékelt kenési feltételek mellett.

3.1 Vizsgálópad és mérési feltételek

A radiális csapágyak fáradási tulajdonságainak vizsgálatára az IME intézetben a radiális csapágyak fáradásvizsgáló berendezései (RLP) állnak rendelkezésre. A vizsgálópad elvi felépítése a 2. ábra bal oldalán látható. A terhelést tányérrugók gyakorolják a közepén elhelyezett támcsapágyon keresztül a vizsgálópad tengelyére és az egyenlő arányban osztódik el a két vizsgálandó csapágyon. Egy rezgésérzékelő ellenőrzi a gördülőcsapágy üzemelése által okozott rezgéseket és leállítja a vizsgálatot, ha kipattogzás miatt az érték meghaladja az előzetesen meghatározott határértéket.

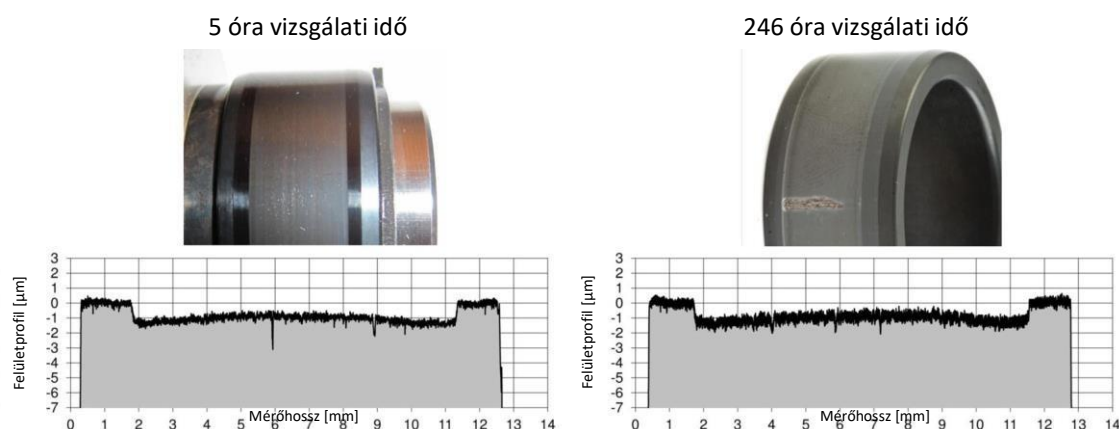


2. ábra: Az IME intézet radiális csapágy-vizsgálópadja és a vizsgálati feltételek

A vizsgálatokhoz az NU206 hengergörgős csapágyat választottuk. A radiális hengergörgős csapágyak kinematikája nem mutat lényegesebb csúszást és ezért állandó üzemelés közben alig várható adhéziós vagy súrlódásos kopás. A vizsgálatoktól első adatokat vártunk a barnított csapágyak elkenődési tulajdonságairól a nem barnított csapágyakhoz viszonyítva.

3.2 Kiértékelés

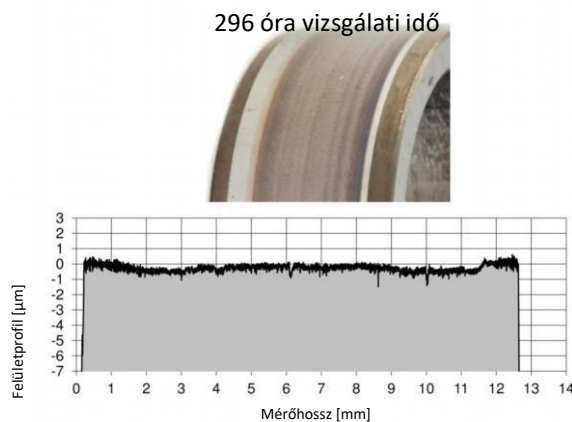
Összesen öt vizsgálatot végeztünk. Ebből két referencia vizsgálatot nem barnított szabványos csapágyakon, és három vizsgálatot teljesen barnított csapágyakon (belső gyűrű, külső gyűrű és gördülőelemek). A barnított csapágyakon végzett vizsgálatot röviddel az indítás után egyszer megszakítottuk az elkenődési viselkedés dokumentálása céljából. Az első vizsgálatot 8 óra, a másodikat 5 és a harmadikat 1 óra elteltével szakítottuk meg.



3. ábra: Barnított belső gyűrű kontúrjának mérése 5 óra és 246 óra futamidő után

Mindhárom vizsgálatban, ill. mind a hat bevizsgált barnított csapágynál azonos képet kaptunk. A 3. ábrán egy belső csapágygyűrű példáján meg lehetett állapítani, hogy az összes csapágy esetében kb. 1 μm mély anyaglemunkálás észlelhető már röviddel a vizsgálat megkezdése után. A csapágyakat addig üzemeltettük, amíg a vizsgálandó csapágyak egyikén fáradásos károsodás lépett fel. Az összes csapágyon kimutatható, hogy a futópálya területén további anyaglemunkálás nem történt. Így egy jellegzetes, de mégis nagyon gyors bejáratásról beszélhetünk.

A radiális hengergörgős csapágyakon végzett vizsgálatok a csapágyak gyors bejáratását tanúsítják.



4. ábra: Kontúrmérés nem barnított belső gyűrűn 296 óra futamidő után

Belépés a terhelési tartományba
Fémes színezés, fényes



Terhelési tartomány
Színezés a belső gyűrűhöz hasonlóan

5. ábra: Barnított külső gyűrű 246 óra futamidő után

4. Axiális csapágyak vizsgálata

A kenési állapot hatását a bejáratási viselkedésre axiális hengergörgős csapágyakon vizsgáltuk meg. Az előnyük abban rejlik, hogy pontosabban leírható kinematikával rendelkeznek, mint a kizárólag radiális terhelés alatt álló gördülőcsapágyak, mert itt nem képződik jellegzetes terhelési tartomány és az összes gördülőelem állandóan ugyan annak a terhelésnek van kitéve. Továbbá az axiális hengergörgős csapágyaknál a kinematikából eredő csúszás jelentkezik, így egyrészt meg lehet vizsgálni a csúszás hatását a bejáratási viselkedésre, másrészt a felületek lényegesen nagyobb kopási körülményeknek vannak kitéve.

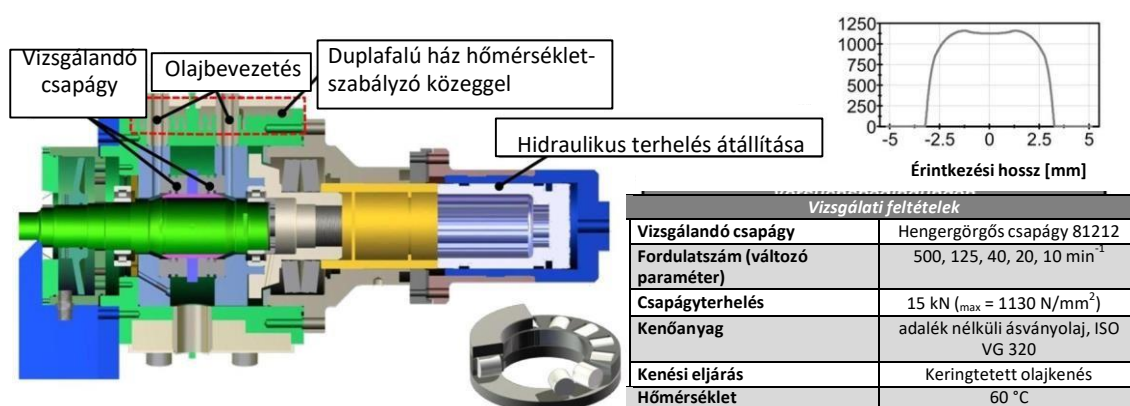
4.1 Vizsgálópad és mérési feltételek

Az axiális hengergörgős csapágyak vizsgálatát egy módosított FE8-vizsgálópadon végeztük. Az iparban és a kutatásban széles körben elterjedt az FE8-vizsgálópad használata a kenőanyagok kopás elleni védőhatásának megítélésére. Az itt használt módosított mérőfej a 6. ábrán látható. A kutatási célokra történő felhasználáshoz a vizsgálópad fokozatmentesen beállítható fordulatszámmal, hidraulikus rendszerű terhelésfelvitellel, duplafalú mérőfejjel és folyadék hőmérséklet szabályozással rendelkezik.

A bevizsgált csapágyak három kombinációját vizsgáltuk meg:

- nem barnított szabványos csapágy (acél/acél)
- barnított tárcsa és barnított gördülőelemek (barnított/barnított)
- barnított tárcsa és nem barnított gördülőelemek (barnított/acél)

Minden egyes kombinációt különböző fordulatszám fokozatú vizsgálatoknak vetettük alá. A fordulatszámot csökkentettük 500 perc^{-1} -ről 10 perc^{-1} -re. Mindegyik fordulatszám fokozaton 30 000 terhelés változást végeztünk. Mindegyik fokozat végén megmértük a csapágyalkatrészek gravimetriás tömegvesztését, a felület kontúrját és az érdességet.



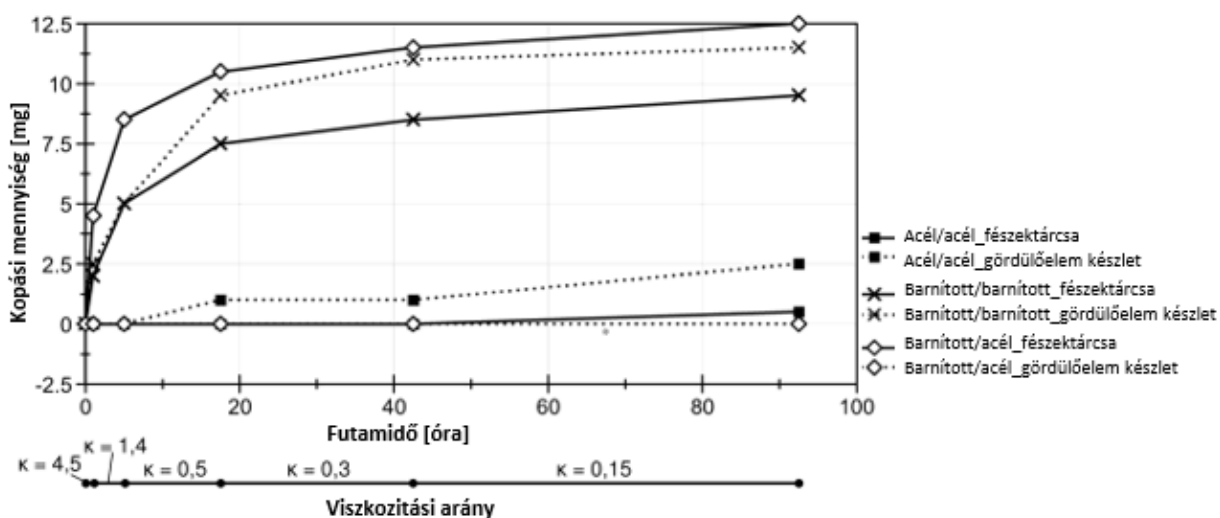
6. ábra: Az IME intézet univerzális FE8-vizsgálópadja és a vizsgálati feltételek

A fordulatszám változtatásával és egyébként azonos üzemi feltételek mellett változik a csapágóban a kenési állapot. A csapágó méretezésében a viszkozitási arány κ a kenési állapot paramétereként szolgál. A 6. ábrán látható feltételek esetében a κ értéke 4,5 – 0,15 tartományban változik. A lefolytatott vizsgálatok keretén belül így megközelítően be lehetett állítani az összes kenési állapotot a teljes kenéstől kezdve az erős vegyes súrlódásig.

4.2 Kiértékelés

A 7. ábrán láthatók a vizsgálatok alatt a fészektárcsákon és a gördülőelemeken tapasztalható gravimetriás módszerrel meghatározott kopási mennyiségek. Az alsó részben a mindenkor viszkozitási arány és a hozzá tartozó futamidő intervallumok láthatók. A megvizsgált három kombináció kifejezetten eltérő viselkedést tanúsít az anyaglemunkálásra vonatkozóan.

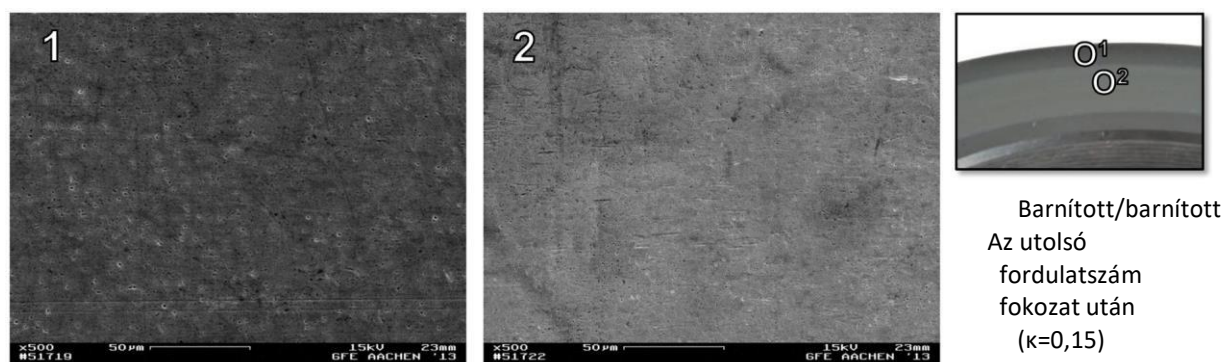
A barnított alkatrészeken közvetlenül a vizsgálat kezdetén lép fel kopás és degresszív lefolyású, holott a vizsgálati idő előre haladásával a kenőfilm vastagsága egyre jobban csökkent és ezáltal kritikusabb kopási feltételek alakultak ki. Ezért ezt a viselkedést inkább a bejáratásként értelmezhetjük. A tulajdonképpen elvárt viselkedést az acél/acél kombináción figyelhetjük meg. Teljes kenés esetén először nem lép fel anyaglemunkálás. Csak a kenőfilm vastagságának további csökkenésével láthatók első kopási jelenségek.



7. ábra: Kopási mennyiségek kiválasztott alkatrészeken az axiális hengergörgős csapágókon végzett vizsgálatokban

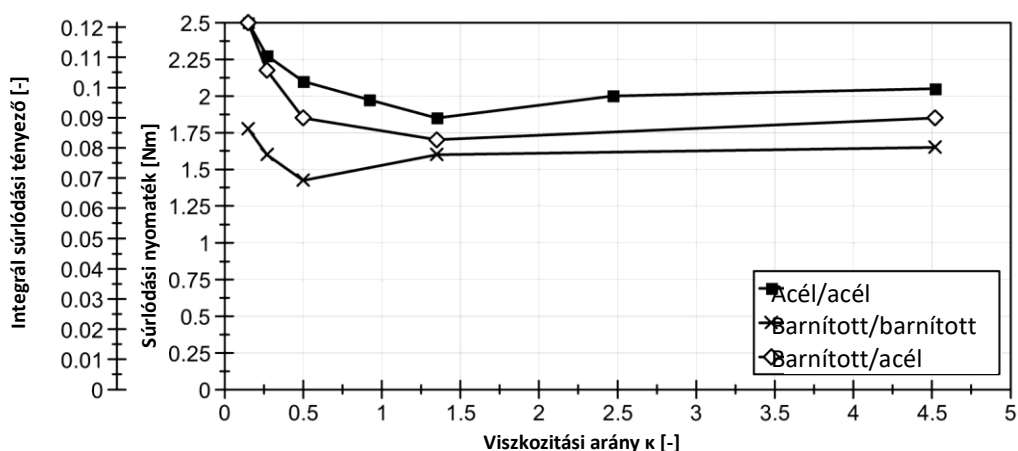
Minden fordulatszám fokozat után letapogató méréseket is végeztünk a csapágyak komponensein. A kinematikából kifolyólag az axiális hengergörgős csapágyban jelentkező csúszásnak ilyen feltételek mellett semmilyen hatása sincs a bejáratásra. A külső érintkezési tartományban mérhető magasabb csúszási értékek alapján itt jelentkezik a klasszikus adhéziós és súrlódásos kopás esetében a maximális anyaglemunkálás. Ezzel ellentétben az összes fordulatszám fokozatnál a bejáratott futópálya mélysége a teljes szélességében nagyon egyenletes. Tehát nem várható a feszültségek túlzott növekedése az érintkezési felületek geometriájának megváltozásával. Már a radiális csapágyvizsgálatok is megmutatták, hogy ez a bejáratás azonos módon, csúszás nélkül zajlik le. A bejáratási mélység itt is kb. $1\text{ }\mu\text{m}$ volt, habár itt lényegesen nagyobb volt a nyomás.

A radiális csapágyak vizsgálatához hasonlóan a szemmel történő megvizsgálás során egyetlen barnított alkatrészben sem volt észlelhető a bevonat teljes lehordása. Ennek bizonyítására pásztázó elektronmikroszkóppal összehasonlító felvételeket készítettünk. Ekkor egy barnított fészektárcsa görgőtest által nem érintett felületét hasonlítottuk össze a bejáratott futópálya felületével. A 8. ábra bal oldali felvételén látható a gördülőelem által nem érintett felület, tehát a barnított felület új állapotban. A végmegmunkálás egyes nyomai mellett továbbra is fel lehet ismerni a barnítóréteg finom pórusait. A jobb oldalon lévő felvételen látható a kb. $1\text{ }\mu\text{m}$ mélységű bejáratott terület. A végmegmunkálás nyomai már nem látszanak, ugyanakkor itt is megtalálhatók a barnítóréteg pórusai. Az alaposabb vizsgálatok is azt eredményezik, hogy a kiválasztott vizsgálati feltételek között nem tapasztalható teljes mértékű anyaglemunkálás.



8. ábra: Barnított/barnított kombinációból vett barnított fészektárcsa pásztázó elektronmikroszkópikus felvétele. Balról: gördülőelem által nem érintett; Jobbról: $1\text{ }\mu\text{m}$ mélységű bejáratás.

A bejáratás alatti viselkedés megvizsgálásán kívül kiértékeljük az axiális hengergörgős csapágyakon végzett vizsgálatokat is a súrlódási viselkedés vonatkozásában. A 9. ábrán látható a mért tehetetlenségi-súrlódási nyomaték a viszkozitási arány κ függvényében. A megvizsgált kenési állapotokat a klasszikus Stribeck-görbe írja le. A három kombináció összehasonlítása mutatja, hogy mind a barnított/barnított, mind a barnított/acél kombinációnál a teljes kenési tartományban csekélyebb súrlódás észlelhető, mint a nem barnított csapágyaknál. A jobb összehasonlíthatóság és a széles körű gyakorlati felhasználás végett az ábrázoláshoz a viszkozitási arányt κ választottuk.



9. ábra: Az axiális hengergörgős csapágyban mért súrlódási nyomatékok a megvizsgált kombinációk esetében a viszkozitási arány függvényében

5. Súrlódásmérések

Az axiális csapágyakon végzett vizsgálatok igazolták a súrlódás csökkenését. A súrlódási viselkedés részletesebb megvizsgálása érdekében méréseket végeztünk egy golyó-a-tárcsán elrendezésű tribométeren. Ennek az az előnye, hogy meg lehet figyelni a kizárólag egyetlen egy érintkezési pontban a kenőanyag-felület kölcsönhatásából eredő hatásokat. Nem lépnek fel olyan zavaró tényezők, mint például a csapágykosár súrlódása a gördülőcsapágyak közvetlen mérésekor.

5.1 Vizsgálópád és mérési feltételek

A méréseket a gyakorlatban megtalálható golyó-a-tárcsán elrendezésű, a PCS-Instruments cég által gyártott EHL2-tribométeren, végeztük. Az elvi felépítés a 10. ábrán látható. A tribométer lehetővé teszi az érintkezési pontban lévő kenőfilm vastagságát 1 nm pontossággal. Mivel a kenőfilm vastagságának mérése esetében egy optikai rendszerről van szó és a barnított felületek tükrözése csekély, kizárólag súrlódásméréseket végeztünk. Ehhez a golyó meghajtási láncában mértük a fordulatszámot, így az érintkezési pontban zárni lehetett a súrlódási erőt.

Vizsgálati feltételek		Csúszás/gördülés arány (SSR)	Gördülési sebesség
Megvizsgált kombinációk	Acél tárcsa / acél golyó Barnított tárcsa / acél golyó Acél tárcsa / barnított golyó Barnított tárcsa / barnított golyó	$\frac{v_{sl} - v_{ro}}{v_{sl} + v_{ro}} \cdot 100\%$	$\frac{v_{ro}}{2}$
Érintkezési erő	47 N ($\text{max} = 1100 \text{ N/mm}^2$)		
Csúszás/gördülés arány	-100 %-tól +100 %-ig		
Gördülési sebesség	500 mm/s		
Kenőanyag	adalék nélküli ásványolaj, ISO VG 320		
Hőmérséklet	60 °C		
Fajlagos kenőfilm vastagság	3,1		

Tárcsameghajtás

Golyómeghajtás

Forgatónyomaték mérés

Terhelés felvitel

10. ábra: Az EHL2-tribométer elvi felépítése és a vizsgálati feltételek

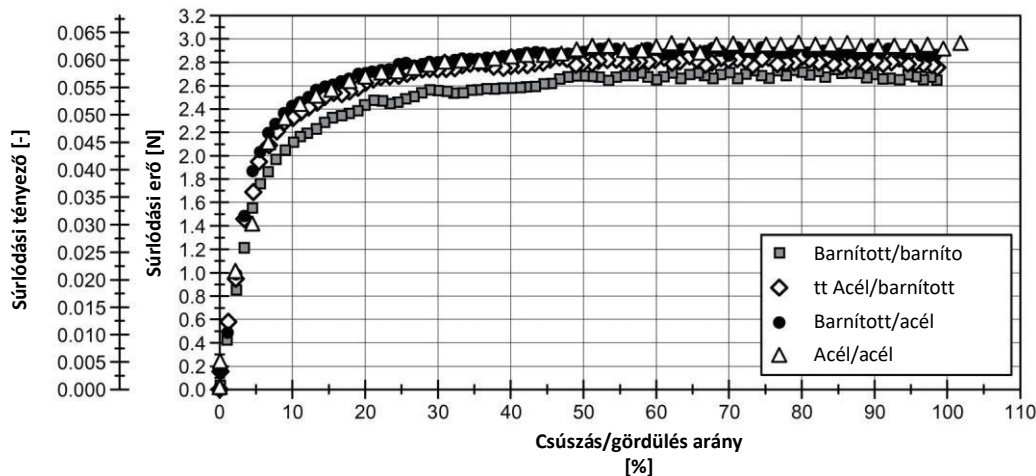
A részletes vizsgálati feltételeket a 10. ábrán foglaltuk össze. A súrlódásméréseket 500 mm/s nagyságú állandó gördülési sebesség mellett végeztük. A terhelést állandó 47 N értéken tartottuk és a csúszás/gördülés arány -100% -tól +100% -ig változott. A csúszás/gördülés arány és a gördülési sebesség meghatározása ugyancsak a 10. ábrán látható. A kenési állapotot a fajlagos kenőfilm vastagsággal λ lehet leírni és a megállapított 3,1 érték alapján a teljes kenés tartományába sorolható.

5.2

Kiértékelés

Már az axiális hengergörgős csapágyakon végzett korábbi mérések is igazolták a súrlódás csökkenését teljes kenési körülmények között is. Az EHL2-tribométer lehetővé teszi a kenőanyagok súrlódási viselkedésének megkülönböztetését elasztó-hidrodinamikai feltételek mellett. A 11. ábrán látható, hogy a leírt eljárással meg lehetett mérni a barnítás a kenőanyag súrlódására gyakorolt hatását.

A barnított/barnított kombináció esetében volt észlelhető a legcsekélyebb súrlódás az összes csúszási állapotban. Az acél/acél kombinációval szemben a mérhető súrlódáscsökkenés kb. 7%. A kenőanyag súrlódáscsökkenésének több oka is lehet. Egyrészt a barnítás a felület nedvesedő képességének megváltozását idézheti elő. Nem lehet kizárni a felület enyhe porózus felületének hatását sem. Továbbá a barnítóréteg akadályozhatja az érintkezési felület hőelvezetését, amely az érintkezési felületen alacsonyabb viszkozitáshoz vezethet, ez pedig csökkentheti a kenőanyag súrlódást



11. ábra: Az EHL-tribométerben mért súrlódási erő 500 mm/s gördülés sebesség mellett

6. Összefoglalás és kiértékelés

Barnított radiális és axiális csapágyak alkatrészeit vizsgáltunk meg golyó-a-tárcsán elrendezésű súrlódásmérő készüléken. A vizsgálatok célja volt, megállapítani a gördülőcsapágyaknál szélesen alkalmazott barnítás hatását mind a vegyes súrlódás, mind a teljes kenés tartományában. A következőkben összefoglaljuk a vizsgálati sorozat legfontosabb eredményeit:

Az NU206 radiális hengergörgős csapágyon röviddel a vizsgálat megkezdése utáni nagy nyomás mellett gyors bejáratást lehetett kimutatni. Ez a bejáratás anyagvesztéssel jár, amely a

futónyom kb. 1 μm mély benyomódását idézi elő. A vizsgálat kezdetén lezajló bejáratás után a további üzemelés közben nem lép fel további anyaglemunkálás, miközben a barnítóréteg nem hordódik le teljesen.

Az axiális hengergörgős csapályakon ugyancsak gyors bejáratást állapítottunk meg lényegesen alacsonyabb nyomás mellett.

A bejáratás a felületi érdesség csökkenésével áll kapcsolatban.

A bejáratási mélység az axiális hengergörgős csapály kinematikailag előidézett csúszásától függetlenül, a görgőpálya szélességében állandó.

A barnított axiális hengergörgős csapályban mind a vegyes súrlódás, mind a teljes kenés feltétele mellett csökken a súrlódás a nem barnított csapággal szemben.

Az EHL2-tribométerben igazolni lehetett a kenőanyag súrlódás 7%-os csökkenését a golyók és tárcsák barnítása által, magas csúszási értékek és teljes kenés mellett.

A barnításnak tulajdonított jó bejáratási tulajdonságok ezáltal általánosságban bizonyítást nyertek. A gördülőcsapályak barnítása az itt ismertetett vizsgálatok háttérében mindenképpen ésszerűnek látszik. Egyes károk, mint pl. az elkenődés, elsősorban a még nem bejáratott csapályakon jelentkeznek. Ez alapján a gyors bejáratás csökkentené az ilyen károk veszélyét.