



# Betekintés a DLC bevonatok extrém-kis súrlódási viselkedésének háttérében álló folyamatok sajátosságaiba

<sup>1</sup>Fülöp Fruzsina, <sup>1</sup>Széll Attila, <sup>2</sup>Horváth Richárd, <sup>2</sup>Marosné Berkes Mária

<sup>1</sup>Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, [fulop.fruzsina@phd.uni-obuda.hu](mailto:fulop.fruzsina@phd.uni-obuda.hu), [szell.attila@phd.uni-obuda.hu](mailto:szell.attila@phd.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup>Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Kari Kutatásszervező Központ, [horvath.richard@uni-obuda.hu](mailto:horvath.richard@uni-obuda.hu), [maros.maria@uni-obuda.hu](mailto:maros.maria@uni-obuda.hu)

---

## Összefoglalás

A szerszámok élettartamának növelése és a költségek csökkentése az ipari termelés fejlődésének fontos mozgatórugói. E cél elérése érdekében egyre szélesebb körben terjed az úgynevezett gyémántszerű szén bevonatok alkalmazása, amelyek extrém-kis súrlódással járó kopási viselkedésüknek köszönhetően jelentősen növelik a bevont alkatrészek teljesítményét. A különböző DLC filmek szuperkenési képessége széles körben kutatott terület. A szakirodalomban található mérvado elméletek, mint például a grafitizáció és a passziválási mechanizmusok, csak hiányos és ellentmondásos magyarázatot adnak a jelenségre. Ez a cikk rövid áttekintést ad ezekről az elméletekről, kiemelve az extrém-kis súrlódási viselkedést befolyásoló legfontosabb tényezőket és működési feltételeket, rámutatva néhány aktuális nyitott kérdésre és a DLC bevonatok extrém-kis súrlódási viselkedésének atomi léptékű elemzését magában foglaló új elméletekre, amelyek a nyitott kérdésekre perspektivikus választ adhatnak.

Kulcsszavak: DLC bevonat, grafitizáció, passziválás, tribofilmképződés, extrém-kis súrlódás

---

## 1. Bevezetés

A szén mindennapi életünk alapvető eleme, amely nélkül nem létezne élet a Földön. Természetesen nem került el a kutatók figyelmét sem, különösen különböző allotróp módosulatai, mint például a gyémánt, a grafit, a grafén, a különböző fullerének, vagy szén-nanocsövek, amelyek fizikai és kémiai tulajdonságait a 20. század eleje óta tanulmányozzák a szakemberek. A gyémántszerű szénbevonatok (Diamond-Like Carbon, DLC coatings) története az 1970-es évekre nyúlik vissza, amikor a kutatók felfedezték, hogy bizonyos amorf szénrétegek a gyémántéra emlékeztető keménységet és kémiai semlegességet mutatnak. Ezt követően a DLC-kutatás területe jelentősen fejlődött, és ennek eredményeképpen testreszabott mechanikai, optikai és tribológiai jellemzőkkel rendelkező DLC-változatok születtek. Különösen a hidrogénezett amorf szénrétegek kaptak nagy figyelmet, mivel a súrlódó felületeken kialakuló stabil transzferfilmeknek köszönhetően képesek drámaian csökkenteni a súrlódást és a kopást. Ezeknek a bevonatoknak igen jelentős a mechanikai teherbírása, jó a korrózióállóságuk és kiváló a biokompatibilitásuk, ami vonzóvá teszi őket az autóiipari alkatrészekről az orvosbiológiai implantátumokig terjedő felhasználásokban. A DLC-k a gyémántra jellemző nagy keménységet, kis súrlódási együtthatót és a kémiai semlegességet egyedülálló módon ötvözik, sokoldalú megoldást kínálva az igényes tribológiai környezetben való felhasználásra.

## 2. A DLC bevonatok fő jellemzői, alkalmazásai és típusai

A gyémánszerű szénbevonatok alkalmazása jelentős növekedést mutat a különböző iparágakban, köszönhetően különleges mechanikai, tribológiai és kémiai tulajdonságaiknak [1]. Az autóiparban és a repülőgépiparban a gyártók DLC bevonatokat alkalmaznak a motoralkatrészekben, csapágyakban és üzemanyag-befecskendező rendszerekben, hogy a csökkentett súrlódás és a kiváló teherbírás révén fokozzák a teljesítményt és meghosszabbítsák az élettartamot [2,3]. Az orvostudományban a DLC bevonatokat sebészeti eszközökön és ortopédiai implantátumokon alkalmazzák, csökkentve a kopást és a korróziót, javítva eközben a biokompatibilitást. Az elektronikai ipar is kihasználja a DLC által biztosított védelmet, amikor ezeket a bevonatokat olyan eszközökön alkalmazza, mint a merevlemez-meghajtók, optikai lencsék és félvezető alkatrészek, hogy elkerülje a kopást és a felületük környezet okozta károsodását [4]. A leválasztási technikák innovatív megoldásai, köztük a plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztás (PECVD) és a porlasztás, egyszerűsítették a DLC bevonatok előállítását, így azok alkalmassá váltak a széleskörű ipari felhasználásra. Ezenkívül számos tanulmány hangsúlyozza, hogy a fokozódó és egyre sokrétűbb alkalmazási követelmények kielégítése érdekében további olyan funkcionális tulajdonságok integrálására van szükség, mint például a még fokozottabb korrózióállóság, antibakteriális tulajdonságok, vagy a felületi energia értékének szabályozhatósága. Mivel a nagy teljesítőképességű anyagok iránti kereslet folyamatosan növekszik, a DLC bevonatok sokoldalúságuk következtében a fejlett technológiák élvonalába kerülnek. Folyamatos áttekintésük egyre újabb és újabb területekre további innovációkat generál az anyagtudományok és más mérnöki tudományok területén.

Összetételük alapján a DLC bevonatokat legcélszerűbben a nem-adalékolt (nem-dópolt) és az adalékolt (dópolt) DLC bevonatok csoportjába sorolhatjuk. Az előbbieket csak szén- és hidrogénatomokat, míg az utóbbi kategóriába tartozók hozzáadott fémes vagy nemfémes elemeket tartalmaznak.

A gyémánszerű szén egy olyan amorf szénszerkezet, amely nagy arányban tartalmaz  $sp^3$  kötésekkel. A nem adalékolt DLC-kben az amorf szénszerkezetben az  $sp^3$ ,  $sp^2$ , sőt kis mennyiségben az  $sp^1$  konfiguráció bármilyen kombinációja előfordulhat. Az atomos szerkezetet főként  $sp^3$  és  $sp^2$  klaszterek alkotják, amelyek bogáncs-szerűen kapcsolódnak egymáshoz. A 80 at. %-ot meghaladó  $sp^3$ -tartalmú DLC-ket tetraéderez amorf szén (ta-C), míg a legkisebb  $sp^3$ -tartalmúakat amorf szén (a-C) típusú DLC-knek nevezzük. A hidrogénezett változatokat ta-C:H és a-C:H jelöléssel különböztetjük meg. Ez utóbbiak  $sp^3$ -tartalma jellemzően 20-60 at. % közé esik [5], és az  $sp^3/sp^2$  arány a hidrogéntartalommal együtt nő, mivel a hidrogén stabilizálja az  $sp^3$ -kötéseket. Egy döntő fontosságú sajátosság az  $sp^3$ -kötésű szénatomok mátrixában elszórtan elhelyezkedő  $sp^2$  fázisban jelenlévő aromás klaszterek hányada [6,7]. Minél magasabb az  $sp^3$ -kötések száma, annál inkább gyémánszerű viselkedés jellemző ezekre a szerkezetekre, míg az  $sp^2$ -kötések számának növekedésével a viselkedés egyre jobban hasonlít a grafitéra.

Az osztályozás egy másik fontos szempontja a hidrogéntartalom. Ha az meghaladja a 40 at. %-ot, akkor erősen hidrogénezettnak nevezzük, míg ha 1 at. % alatt marad, akkor hidrogénmentes DLC bevonatoknak tekintjük őket [8]. Az előállítási módszer jelentősen befolyásolja a hidrogéntartalmat. A hidrogénmentes DLC-ket tiszta szénkatóddal állítják elő, míg a hidrogéntartalmú DLC-ket PECVD eljárással szénhidrogén prekursorok felhasználásával hozzák létre [9]. A H-tartalom növelésével a keménység és a kopásállóság csökken [10]. Az adalékolt DLC-k általában nagy hidrogéntartalmúak.

A DLC bevonat felépítését tekintve lehet egy- vagy többrétegű. A többrétegű szerkezet előnye, hogy az alkalmazott terhelés egyenletesebben oszlik el az érintkezési felületen, így javul a terhelhetőség.

### 3. A DLC bevonatok tribológiai sajátosságai

A DLC bevonatok tribológiai teljesítőképességét erősen befolyásolják a triborendszerben működő belső és külső tényezők [11]. Az elsődleges belső tényezők közé tartozik a hidrogéntartalom, a szénatomok konfigurációja – különösen az  $sp^3/sp^2$  kötések aránya –, a filmvastagság, a bevonat keménysége, a bevonat rétegszerkezete vagy az adalékolt elemek típusa [12]. Ezeket a jellemzőket a gyártási eljárás határozza meg. A külső tényezők közé tartoznak az üzemi körülmények, mint például a hőmérséklet, az alkalmazott terhelés nagysága, a csúszási sebesség, a súrlódópár anyaga, az érintkezési geometria, a kenés és a súrlódómozgás típusa (egyenes vonalú vagy körkörös, egyirányú vagy váltakozó irányú). A hidrogénezett, illetve hidrogénmentes DLC filmek súrlódási és kopási viselkedése jelentősen eltér egymástól, és nagymértékben függ a légkör nedvességtartalmától, mint külső tényezőtől. Ennek a tanulmánynak a fókuszában az erősen hidrogénezett DLC bevonatok tribológiai viselkedése áll.

A DLC bevonatokról közismert, hogy súrlódó igénybevétel során jellegzetesen kis súrlódás ( $\mu < 0,1$ ), vagy extrém-kis súrlódás ( $\mu < 0,001$ ) lép csak fel az egymáson elmozduló súrlódópárok között [13,14,15]. Azonban, az ennek hátterében álló kenési mechanizmust, amely ezt az egyedülálló viselkedésformát eredményezi, a kutatók munkáikban eltérő módon írják le, ami a jelenség ellentmondásos értelmezéséhez vezet. A DLC rétegek kiváló kenőképességére vonatkozó két leggyakoribb hipotézis a "*súrlódás okozta grafitizáció*" [11,16] valamint a "*passzíválási mechanizmus*" [17,18]. Az első elmélet szerint a mechanokémiai indukált tribofilm-képződés a DLC grafitos átalakulásán keresztül valósul meg, amely függ a terhelési erőtől és a súrlódási sebességtől. A második elmélet szerint a környezetben lévő elemi részecskék a csúszó határfelületen lévő szénatomok "lógó" (szabad) kötéseikhez kapcsolódnak, ami a felület passzíválását eredményezi. Tekintettel arra, hogy a szakirodalomban sokféle, esetenként egymásnak ellentmondó következtetések találhatók a különböző DLC-rétegekben megvalósuló kenési mechanizmusokra vonatkozóan, ezért ezeket az elméleteket kritikával kell szemlélni.

#### 3.1 A súrlódás okozta grafitizáció

A súrlódás okozta grafitizálódási folyamatról széles körben számolnak be a kutatók a szakirodalomban [11,19,20]. A különböző fejlett finomszerkezet vizsgálati módszerek azonban nem szolgáltatnak egyértelmű bizonyítékot a kristályos grafit szerkezet meglétére [21,22]. A feltételezések szerint a grafitizáció az aromás klaszterek ( $< 2$  nm) szintjén történik, és teljes mértékű grafitizáció nem érhető el a tiszta DLC-k súrlódásakor [23]. A kutatók által megfigyelt "grafitizációs" folyamat eredménye valójában egy amorf szénszerkezet, vagyis a grafit 2D kristályos szerkezete – amely a megszokott, rendkívül kicsiny súrlódás előfeltétele – nem jön létre.

A grafitról köztudott, hogy párás környezetben enyhe súrlódás jellemzi, ami vákuumban vagy bármilyen száraz vagy semleges atmoszférában nem valósítható meg [24]. Ezért a súrlódás okozta grafitizáció elmélete nem magyarázza meg kellően a hidrogénezett DLC bevonatok esetén nagy vákuumban vagy száraz nitrogén atmoszférában megfigyelt kivételesen enyhe súrlódási viselkedést [17,18]. Ronkainen és mtsai. [25], Cui és mtsai. [26], valamint Liu és Meletis [27] – kis H-tartalmú DLC filmekben változó csúszási sebességgel és vákuumnyomással végzett kísérletekkel kimutatták, hogy a súrlódási együttható értéke inert környezetben a környezeti nyomás és a fordulatszám (csúszási sebesség) arányától függ, amit a kenési sajátosságért felelős passzíválási mechanizmus bizonyítékának tekintettek. Ők és más szerzők [9] azt is megállapították, hogy a súrlódási együttható a grafitizálódás mértékével párhuzamosan nő, amikor a DLC szerkezetében a szénatomok konfigurációja  $sp^3$ -ról részlegesen  $sp^2$ -re változik, amit mindenekelőtt a csúszási felületbe bevitt, nyírás által indukált alakváltozási energia vált ki. Ebből is következik, hogy egy nagyobb terhelőerő nagyobb mértékű grafitizálódást idéz elő, következésképpen nem lehet felelős a kis súrlódás

jelenségéért. A kísérleti vizsgálatok mellett elméleti elemzések is folynak a grafitizációs mechanizmusnak a DLC-k kis- és extrém-kis súrlódási viselkedésében betöltött szerepének tisztázására. Pastewka és mtsai. [28] molekuladinamikai (MD) szimulációval ugyancsak megerősítették, hogy az a-C:H filmekben "grafitizációként" ismert folyamat az amorf szénhálózat szerkezetének kismértékű, helyi átrendeződését jelenti, az atomi konfiguráció  $sp^3$ -ból  $sp^2$ -be történő átalakulásával, kristályos grafitlemezek kialakulása nélkül. Az atomisztikus folyamatok szimulációi alapján arra következtettek, hogy a felszín legkülső rétegének passzíváló képessége meghatározó szerepet tölt be az extrém-kis súrlódás létrejöttében.

A molekuladinamikai (MD) szimulációkon alapuló legfrissebb kutatások megerősítették a fent említett eredményeket. Zhu és mtsai. egy [29] kimutatták, hogy a grafitizációs mechanizmus képes csökkenteni az érintkezési felületeken a nyírófeszültséget, de csak abban az esetben, ha közben a grafén kritálszerkezete nem sérül meg. A grafénszerkezet torzulása és károsodása azonban az érintkezési felületen a nyíróerő növekedéséhez vezet.

### **3.2 Passzíválási mechanizmus**

A csúszófelület passzíválódása a különböző típusú DLC bevonatok esetén eltérő módon történik. A hidrogénmentes, illetve a nagyon kis hidrogéntartalmú DLC-k esetében a lógó felületi szénkötések (dangling bonds) passzíválását a környezetben lévő vízmolekulák hidrogénje segíti elő. Aktív anyagok, például víz nélkül a nyírás által indukált lógó szénkötések nem semlegesíthetők, és olyan körülmények között, amikor az F normálirányú terhelés, és az n a fordulatszám hányadosa, azaz az  $F/n$  értéke kicsi, a súrlódási együttható nagy ( $> 0,3$ ) lesz [26,30].

Az erősen hidrogénezett DLC bevonatok esetében a felület már önpasszívált állapotban van [31], így a gyenge van der Waals-erők irányítják a súrlódási viselkedést [32], és a súrlódási együttható értéke jellemzően kicsi,  $\mu = 0,01 \dots 0,1$ . Erdemir [33] szerint az elsődleges ok a hidrogén-termináció, amelynek során a H erős kötések hoz létre a felületi C atomokkal, és különböző mechanizmusokon keresztül passzíválja a felületet, megakadályozva, hogy az kémiai reakcióba lépjen a csúszó ellenpár felületével. Arra is rámutatott, hogy a rétegleválasztási technológia igen fontos szerepet játszik abban, hogy mennyire csökkenthető majd a súrlódási együttható. Az erősen hidrogénezett DLC esetében, amint azt Fontaine és társai [34] kimutatták, a plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztással (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition, PECVD) készült DLC bevonat esetében érhető el a legkisebb érték.

A felületi C-H kötések oxidációja a levegőből vagy vízből származó oxigén segítségével, tovább növelheti a hidrogénkötések mennyiségét a csúszófelületen, ami erősebben passzívált felületi réteget eredményez, és tovább csökkenti a súrlódási együtthatót [35,36]. Ez az oxidáció a DLC felület nedvesíthetőségét is módosíthatja, kissé hidrofób jellegét hidrofillé (OH végződésűvé) változtatja [37], tovább javítva a felület adszorpciós képességét, azaz a környezetből származó anyagok megtapadását a felületen. Hatékony súrlódáscsökkentést OH-terminációval többek között Morita és mtsai., [38], illetve Qi és mtsai. [39] figyeltek meg.

Wang és mtsai. [40] ún. reaktív erőter (ReaxFF) – azaz a legkorszerűbb kötésrend-alapú – szimulációkkal vizsgálták, hogy hogyan hat az oxigéndús környezet a DLC filmek sajátos, enyhe súrlódással járó viselkedésére. Megállapították, hogy a DLC filmek súrlódási mechanizmusa oxigénben gazdag környezetben erősen időfüggő. A súrlódáscsökkentést kezdetben a felületen fizikailag adszorbeálódott oxigénmolekulák okozzák, majd a súrlódás stabilizálódása után pedig a szénhálózatba kémiaiilag abszorbeálódott oxigén, amely egy oxigénnel átitatott anyagszerkezetet hoz létre. Ebben a folyamatban olyan gázmolekulák keletkeznek, amelyek idővel befolyásolják a DLC filmek súrlódási viselkedését. Például a C–O csoportok, illetve a CO vagy CO<sub>2</sub> molekulák elősegítik a lamellás szerkezetek kialakulását a határfelületeken.

Qui és mtsai. [26] kimutatták, hogy száraz súrlódáskor (vákuumban, vagy  $RH < 2\%$  relatív páratartalom esetén) a csúszási sebesség inkább a passzíválási mechanizmusokon keresztül – mégpedig a kémiai reakciókhoz rendelkezésre álló időn keresztül – befolyásolja a súrlódási együtthatót, mintsem a DLC réteg korábban feltételezett "grafitizálódása" révén. A csúszási sebesség növelésével a passzíválási mechanizmus intenzitása csökken, és a súrlódási együttható nő.

### **3.3 A tribofilm-képződési koncepció**

A bevonat módosított felületi rétege, amely egy mechanokémiai úton kiváltott tribokémiai reakció során jön létre, kenőfilmnek, azaz tribofilmnek tekinthető, amely lehetővé teszi a hidrodinamikai kenési állapotra jellemző  $\mu = 0,001 \dots 0,01$  extrém-kis súrlódási együttható tartomány elérését. Mivel az ilyen típusú tribo-oxidációs reakció aktiválási energiát igényel, amelyet a súrlódási folyamat alakváltozási energiájának kell fedeznie, feltételezhető, hogy ez a szuperkenési állapot csak a terhelési és környezeti feltételek (kritikus terhelési erő, felületi hőmérséklet, relatív páratartalom,  $F/n$  arány stb.) különleges kombinációja esetén jelenhet meg. A vízádszorpció révén megvalósuló tribofilmképződés bizonyos kerámiaanyagok –  $Si_3N_4$ ,  $SiC$  – esetén is jól ismert [41,42]. Ezek a tribokémiai reakciók mechanikai energia bevitelével, akár környezeti hőmérsékleten is kiválthatók, amit az úgynevezett triboplasma-elmélet [43] magyaráz. Eszerint a tribokémiai reakció aktiválásához nincs szükség az atomi kötés előzetes felszakítására, mivel a súrlódás során mechanokémiailag indukált kis-energiájú elektronok tribo-emissziója megy végbe, valamint aktív helyek, például pozitív ionok jönnek létre a felületen [44]. Ilyenkor a nyírási alakváltozás energiája fedezheti egy fázisátalakulás vagy kémiai reakció aktiválási energiáját, amely így atermikusan is képes végbemenni [45].

Dickrell és mtsai. modellje szerint [46] a súrlódópárok határfelületén a kis relatív páratartalom és a szubsztrát nagy hőmérséklete csökkenti a súrlódási együtthatót, és a hidrogénezett DLC filmek extrém-kis súrlódási jelensége jellemzően  $RH < 1\text{-}2\%$ -os relatív páratartalom mellett érhető el. Ugyanakkor továbbra is nyitott kérdés volt a szén-alapú filmek, mint például egy grafitizált DLC réteg vízzel való kölcsönhatásának mechanizmusa, amelyet Rietsch és mtsai. [47], valamint Kumar és munkatársai [48] tárgyaltak részletesen munkáikban.

A választ Fontaine és mtsai. [34] adták meg, bebizonyítva, hogy a DLC bevonatok extrém-kis súrlódási állapotának létrejöttéhez tribofilm képződés szükséges, azaz egy olyan transzferréteg kialakulása, amely képes megakadályozni az egymáson csúszó ellendarabok közötti tapadást, valamint lehetővé tenni a lekopott felületek öngyógyulását. A kulcskérdés az  $sp^2$  kötések szénatomjainak  $\pi$ -orbitálisai közötti kölcsönhatások elkerülése. Munkájukban az extrém-kis súrlódási tényezőjű állapot létrejöttének két alapvető feltételét határozzák meg. Ezek egyike, hogy a hidrogéntartalomnak elég nagynek kell lennie az  $sp^2$  konfigurációjú szénatomok közötti kölcsönhatások elkerülésére, a másik, hogy a súrlódó felületek között folyamatosan jelen legyen egy viszkozoplasztikus transzferréteg. Felhívják a figyelmet az oxigén szerepére is, amely eltávolíthatja az  $sp^2$  szénatomokat a felületről, megakadályozva ezzel az adhéziót. Ez a folyamat azonban erősen nyomásfüggő, és nagyobb oxigénnyomáson akár a védőfilm teljes eltávolításához is vezethet, amelynek következtében a súrlódási együttható jelentősen, akár 0,2-0,3-ra is megnövekedhet.

Scharf és mtsai. [49] a különböző fémkarbiddal erősített a-C és a-C:H bevonatoknál megfigyelt extrém-kis súrlódási folyamatok kinetikáját és peremfeltételeit úgy írták le, hogy bevezették a sebességi akkomodáció módjának (Velocity Accommodation Mode, VAM) fogalmát. Egyik lényeges megállapításuk, hogy a súrlódási és kopási folyamatokat a transzferfilm kialakulás-tapadás- és leválás egymást követő eseményei, azaz a "harmadik test folyamatok" kontrollálják, és nem a súrlódópárok kiinduló anyagának tulajdonságai. A kialakuló súrlódási együttható értéke nagymértékben függ a terhelési körülményektől a Hertz-féle érintkezési nyomás és a tribofilm kialakulását befolyásoló relatív páratartalom értékén keresztül. Amíg a transzferfilm nem alakul ki,

és nem tapad fel a súrlódópár felületére, – mint például a bejáratási szakaszban – addig a súrlódási együttható értéke nagy ( $\mu = 0,6$ ), és a VAM-ot a súrlódó ellenanyagok eredeti felülete közötti határfelületi csúszás határozza meg. A transzferfilm kialakulásának korai szakaszában pedig, amikor az még könnyen leválik a súrlódó ellenpárról, a VAM a harmadik test, azaz a transzferfilm nyírásával és extrúziójával megvalósuló mechanizmusra módosul, és a súrlódási együttható kissé csökken ( $\mu = 0,2-0,4$ ). Majd állandósult állapotban a bevonat felületén kialakult és a súrlódópárra felpadt tribofilm az egymáson csúszó felületeket elválasztja egymástól, hasonlóan ahhoz, mint ahogyan az az elasztó-hidrodinamikai kenési állapotban történik, és jelentősen kisebb súrlódási együtthatót ( $1-5 \times 10^{-2}$ ), valamint két nagyságrenddel kisebb kopási sebességet eredményez. Ebben az esetben a VAM a felpadt transzferréteg és a kopott DLC bevonat közötti határfelületi csúszás. A fémes adalékanyagok és a nedvesség célszerűen módosíthatják a tribofilm tapadását. Amikor például egy WC/a:C-H bevonat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ellenpárral súrlódik, a transzferfilm kialakulása kevésbé jellemző, mivel a W nem lép reakcióba az  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -dal, és a transzferfilm is nehezen tapad az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ellendarab felületéhez.

Okubo és mtsai. kimutatták [50], hogy az extrém-kis súrlódással járó folyamat és az ehhez szükséges tribofilm-képződés döntően a légkörből származó hidrogén hatására indul meg, míg önmagában a DLC bevonat hidrogéntartalma kevésbé meghatározó az extrém-kis súrlódás elérése szempontjából.

### 3.4 Súrlódási- és kenésállapotok

Az egymáson elmozduló felületek közötti súrlódási együtthatót számos tényező szabályozza, és a következő összetevők eredőjeként értelmezhető [51,52]:

$$\mu = \mu_{ad} + \mu_{pl} + \mu_e + \mu_d, \quad (1)$$

ahol

- $\mu_{ad}$  - az adhézióból származó összetevő (elsősorban fémekre jellemző);
- $\mu_{pl}$  - a képlékeny alakváltozásból eredő összetevő;
- $\mu_e$  - a rugalmas alakváltozásból eredő összetevő, amely döntően a tribofilm alatti tartományban következik be;
- $\mu_d$  - a harmadik test-szerű kopási törmelék részecskéi okozta összetevő.

Az erősen hidrogénezett ( $H_C > 30\%$ ) DLC bevonatok esetében az első összetevő elhanyagolható, mivel a passzívált felület jelentősen tisztítja az ellenpárt. A többi összetevő a normálirányú terhelés növelésekor változik. Például a rugalmas és képlékeny alakváltozás növekedése közvetlenül megnöveli a felületi rétegbe bevitt alakváltozási energiát, ami fizikai, kémiai és szerkezeti átalakulásokat indít el. Feltételezve, hogy a szubsztrát szilárdsága elég nagy ahhoz, hogy ellenálljon annak a kritikus terhelésnek, amely a tribokémiai reakciókhoz szükséges aktiválási energiát szolgáltatja, és a relatív páratartalom is kicsi, a kedvező körülmények a korábban említett oxidációs folyamatok révén beindítják a tribofilm kialakulását. Ha a szubsztrát keménysége kicsi, akkor a tribofilm kialakulásához szükséges kritikus terhelés viszont képlékeny deformációt okoz az alapanyagban, amelyet a rajta lévő kemény kerámiabevonat nem képes követni, ezért eltörik és leválik. Ebben az esetben a bevonatból származó kemény kopási törmelék nagy súrlódási együtthatóval járó, harmadik-testes abrazív kopást okozhat.

A súrlódó felületek között kialakuló kenési feltételek alapján megkülönböztethető négy kenési állapot a határkenés, a vegyes-, a hidrodinamikai- és az elasztó-hidrodinamikai kenés. Ezek szoros kapcsolatban állnak a felületi mikrogeometriával, ezért a minimális filmvastagság ( $h$ ) és az érintkező

érdességi csúcsok magasságának ( $R_a$ ) arányával jellemezzük őket.

Határmenti kenés (BL) akkor következik be, amikor  $h < R_a$ , ezért a kenőanyag szakadozottá válik, lehetővé téve a súrlódópárok közvetlen érintkezését az érdességi csúcsok mentén. A terhelést ezek a csúcsok (aszperitások) a felületükön képződött molekuláris filmrétegen keresztül veszik fel, amelyet olyan atomcsoportok alkotnak, amelyek fizikailag (van der Waals-erők révén) vagy kémiai (kovalens kötések révén) adszorbeálódnak a felületen, és viszonylag nagyobb súrlódási együtthatót okoznak. Fizikai adszorpcióra hozható példák a gyengén kötődő szénhidrogének és a felületen erősen adszorbeálódott poláros molekulák (OH, NH<sub>2</sub> vagy COOH csoportok). A kemisorpció egyetlen monorétegre korlátozódik [53], a  $h$  filmvastagság jellemzően 70 nm-nél kisebb, a  $\mu$  súrlódási együttható értéke pedig 0,08-0,15 között változik [54].

Teljes filmkenés, vagy hidrodinamikai kenés (HL) esetén a súrlódó felületek nem érintkeznek egymással, teljesen elválasztja őket egymástól egy olyan kenőanyagfilm, amelynek vastagsága jóval meghaladja az érdességi csúcsok magasságát,  $h \gg R_a$ . Az ilyen kenési állapot kialakulásához négy előfeltételnek kell teljesülnie, amelyek a következők: kenőfilm jelenléte, a súrlódó felületek közötti relatív sebesség, a kenőfilm viszkozitása és megfelelő felületi geometria [55]. Ez utóbbi kapcsán a felületi érdesség ( $R_a$ ) szerepét kell kiemelni a hidrodinamikai kenési állapot elérésében. A jellemző filmvastagság ilyen esetekben  $h \sim 1 \mu\text{m}$ , a súrlódási együttható pedig a legkisebb értékeket veszi fel,  $\mu = 10^{-2} \dots 10^{-4}$ .

A HL speciális esete az elasztó-hidrodinamikai kenés (EHL), amikor a nagy érintkezési nyomás a súrlódó felületek olyan mértékű rugalmas deformációját okozza, amely eléri a kenőanyagfilm vastagságának nagyságrendjét,  $h = 10 \dots 70 \text{ nm}$  [55,57]. A súrlódási együttható értéke és a súrlódási veszteségek ilyenkor is nagyon kicsik, akárcsak a HL üzemmódban.

## **4. Elemzés, áttekintés**

Mind a bemutatott elméleti ismereteink, mind a kísérleti munkák során szerzett tapasztalataink [60–66] azt tükrözik, hogy a hidrogénezett DLC bevonatok tribológiai viselkedését meglehetősen összetett módon befolyásolják a külső és belső tényezők. Az eredő súrlódási együttható nemcsak szorosan függ a működésben lévő tribológiai rendszer aktuális állapotától, hanem időfüggő természetű, aminek következtében a triborendszer elemei is időbeli változást mutatnak. A DLC bevonatok extrém-kis súrlódási állapotának kialakulását követően annak megszűnését, majd regenerálódását több szerző [15,34], is megfigyelte, megállapítva, hogy a szuperkenési állapot fenntartását, átmeneti megszűnését, majd újbóli megjelenését a hatóidő – azaz, ameddig a súrlódó felület az adott környezeti hatásoknak ki van téve – egyértelműen befolyásolja. Ezért a valós üzemi körülmények ismerete elengedhetetlen az ilyen bevonatok üzemi teljesítőképességének előrejelzéséhez [58,59]. Ezek a kutatások bizonyítékkal szolgálnak arra is, hogy a súrlódást valójában nem a csúszási sebesség, ahogyan azt korábban feltételezték, hanem az azon keresztül érvényesülő kitettségi idő kontrollálja. Ennek oka a gáznemű elemek kölcsönhatása a kopásnyom felületével, ahogyan azt már korábban említettük a hidrogén-, oxigén- stb. végződésű szénláncok létrejöttével (termináció) megvalósuló passziválási mechanizmusok tárgyalásakor.

A felületi kémia fontosságát több szerző is hangsúlyozza, mind a bevonatok kémiai összetételével, mind a környező atmoszférával kapcsolatban [67,68]. Ezek a jellemzők közvetlenül befolyásolják a DLC filmeknek az adott triborendszerben érvényesülő komplex mechanikai, fizikai és kémiai hatásokra adott változatos tribológiai válaszát a különböző védőmechanizmusok működésén keresztül [12,69,70].

A DLC bevonatok extrém-kis súrlódási viselkedésének rendkívül összetett jellege miatt a kísérleti úton megszerezhető ismeretek csak részleges betekintést nyújthatnak a súrlódási-kopási viselkedés ténylegesen lejátszódó folyamataiba, amelyek csak az adott vizsgálati körülmények

esetén érvényesek.

Az atomisztikus megközelítés új távlatokat nyit az anyagszerkezet legfinomabb szintjén lejátszódó kopási mechanizmusok azonosítására, elemzésére és megértésére. Kuwahara és mtsai. [71] – kvantum molekuladinamikai szimulációk és ultra-nagy vákuumban végzett, különböző H-tartalmú DLC bevonatokon végrehajtott, egyenesvonalú, alternáló koptatási kísérletek eredményei alapján – rávilágítanak, hogy az a-C:H bevonatok extrém-kis súrlódása az érintkező felületek helyi hidrogéntartalmának finomhangolásával szabályozható. A súrlódási mechanizmusokat az állandósult súrlódási folyamat utolsó 0,1 ns-os periódusára vonatkozó szimulációkból levezetett anyagszerkezeti szempontok alapján is osztályozták, négy típust definiálva, amelyek a következők: hideghegedés (cold welding, CW), amikor a súrlódási együttható  $\mu > 0,2$ ; aromás grafenoid passziválás (aromatic graphenoid passivation, AP); vegyes passziválás (mixed passivation MP) és hidrogén passziválás (hydrogen passivation, HP), ahol az utolsó három esetben fordulhat elő a szuperkenés. Tisztán CW állapot akkor jön létre, amikor a hidrogéntartalom rendkívül kicsi,  $C_H < 3,7$  at.%, míg  $C_H > 22$  at.% esetén a HP mechanizmus veszi át az irányító szerepet. Amikor a hidrogéntartalom a  $\delta 3,7$  at.%  $C_H < 22$  at.% tartományba esik, akkor a CW, AP és HP mechanizmusok együttesen fordulhatnak elő, de a szuperkenési állapotot elsősorban az aromatizáció okozza, és a súrlódási együttható a  $\mu = 0,05 \dots 0,2$  tartományba esik. Ha a tartomány alsó határát kissé megemeljük, azaz a H-tartalom  $\delta 5$  at.%  $C_H < 22$  at.% között változik, akkor már az MP súrlódási mechanizmus válik dominánssá, és a súrlódási együttható kisebb lesz, de széles határok,  $\mu = 0,002 \dots 0,2$  között változhat, amiatt, hogy ebben a háromféle csoportban az irányító kopási mechanizmus jelentősen eltér egymástól.

Az egyik legújabb elképzelés szerint a H-passziválás a C–H<sub>x</sub> (x = 1–3) típusú szénhidrogén csoportokat létrehozó tribo-indukált oligomerizáción keresztül valósul meg. Ez kellő összhangban van Fontaine és mtsai. [34] megfigyelésével, miszerint a felületi reológiai tulajdonságok kiemelkedő szerepet játszanak abban, hogy az a-C:H bevonatokban létrejön-e a szuperkenéses állapot.

## 5. Összefoglalás

Az extrém-kis súrlódási jelenséget mutató DLC bevonatok ipari méretű elterjedését a gyakorlatilag kopásmentes súrlódás által biztosított rendkívüli előnyök magyarázzák.

A szupersúrlódás jelenségét magyarázó elméletek sokfélesége és különbözősége abból adódik, hogy a különböző DLC filmek tribológiai viselkedése és a súrlódási viselkedést irányító domináns folyamatok mechanizmusai a belső és külső befolyásoló tényezők révén rendkívül összetettek. E tényezők közé tartozik a csúszófelületek felületi kémiája, amelyek közül elsődleges jelentősége a H-tartalomnak van. Ide tartoznak az ugyancsak meghatározó szereppel bíró terhelési körülmények, mint például az érintkezési nyomás, az expozíciós idő (amely a csúszási sebességen keresztül érvényesül), a légkör jellemzői (a passziválásra alkalmas gáznemű elemek különböző forrásain keresztül), a felületi topográfia (az érintkezési csúcsok magasságán keresztül), valamint a kialakult transzferretek és tribofilmek mechanikai, fizikai, kémiai és reológiai tulajdonságai.

A tanulmányunkban tárgyalt szuperkenőképeség hátterében álló folyamatok, amelyek értelmezése a szakirodalomban rendkívül változatos, mind létező, valós események. Ezek azonban csak meghatározott körülmények között és meghatározott ideig működnek, de összességében magyarázatot adhatnak a DLC filmek sajátos kopási viselkedésére.

A grafitizáció, a passziválás és a tribofilm-képződés itt tárgyalt elméletei az elmúlt 30 évben jelentős fejlődésen mentek keresztül, amelyek ellentmondásai elsősorban abból adódtak, hogy a kutatók általában egyetlen mechanizmussal próbálták megmagyarázni a szuperkenéses súrlódás jelenségét. Ezzel szemben, ezen folyamatok bármelyike előfordulhat önállóan vagy kombináltan is egy adott tribológiai rendszerben. Nagyon fontos tudni azonban, hogy ezek a különböző



mechanizmusok milyen terhelési és üzemi körülmények között érvényesülhetnek. Ehhez elengedhetetlen a vizsgálati körülmények minden eddiginél pontosabb meghatározása és figyelembevétele, hogy az ilyen bevonatokat az alkalmazási célnak legjobban megfelelően lehessen kialakítani.

Az extrém-kis súrlódás mögött meghúzódó folyamatok fizikai hátterének megértése csak a fejlett szimulációs és modellezési módszerek segítségével vált-válik lehetővé, amelyek atomi szinten képesek feltárni az érintett folyamatokat. Ezen az úton még csak elindultak a kutatók, de máris számos részfolyamatot sokkal komplexebben látunk és értelmezhetünk, mint korábban. Fontos, hogy minél pontosabban és mélyebben megértsük ezeket mikro- és nanoszintű eseményeket, mert ez teszi lehetővé számunkra, hogy a bevonatok tulajdonságait kívánság szerint testre szabjuk, kifejlesszük a leghatékonyabb gyártási technológiákat, meghatározzuk a legcélszerűbb alkalmazási területeket, és leghatékonyabban kihasználjuk ezeknek a különleges DLC bevonatoknak az előnyeit.

## **6. Hivatkozások**

- [1] Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(4-6), 129–281. doi:10.1016/s0927-796x(02)00005-0
- [2] Hauert, R. (2003). A review of modified DLC coatings for biological applications. *Diamond and Related Materials*, 12(3-7), 583–589. doi:10.1016/s0925-9635(03)00081-5
- [3] Roy, R. K., & Lee, K.-R. (2007). Biomedical applications of diamond-like carbon coatings: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 83B(1), 72–84. doi:10.1002/jbm.b.30768
- [4] Ciprian I. (2021). A comprehensive review on thin film depositions on PECVD reactors. *Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Science and Technology and Information*, Vol. 14, ISSN 2066-8562. doi: 10.56082/annalsarsciinfo.2021.1-2.12
- [5] Angus, J. C., & Hayman, C. C. (1988). Low-Pressure, Metastable Growth of Diamond and “Diamondlike” Phases. *Science*, 241(4868), 913–921. doi:10.1126/science.241.4868.
- [6] Angus, J. C., & Jansen, F. (1988). Dense “diamondlike” hydrocarbons as random covalent networks. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 6(3), 1778-1782.
- [7] Franceschini, D. F. (2002). Growth, Structure, and Properties of Plasma-Deposited Amorphous Hydrogenated Carbon-Nitrogen Films, In: *Advances in Plasma-Grown Hydrogenated Films*, Series: Thin Films and Nanostructures, V. Agranovich, Deborah Taylor (Ser. Eds), Academic Press, ISBN: 9780080542874
- [8] Zahid, R., Hassan, M. B. H., Varman, M., Mufti, R. A., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. B. M., & Gulzar, M. (2016). A Review on Effects of Lubricant Formulations on Tribological Performance and Boundary Lubrication Mechanisms of Non-Doped DLC/DLC Contacts. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 42(4), 267–294. doi:10.1080/10408436.2016.1186599
- [9] Lusk, D., Gore, M., Boardman, W., Casserly, T., Boinapally, K., Oppus, M., ... & Lapp, S. (2008). Thick DLC films deposited by PECVD on the internal surface of cylindrical substrates. *Diamond and Related Materials*, 17(7-10), 1613–1621. doi:10.1016/j.diamond.2008.01.051.
- [10] Jansen, F., Machonkin, M., Kaplan, S., & Hark, S. (1985). The effects of hydrogenation on the properties of ion beam sputter deposited amorphous carbon. *Journal of Vacuum Science*

& Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 3(3), 605-609.

- [11] Liu, Y., Erdemir, A., & Meletis, E. I. (1996). An investigation of the relationship between graphitization and frictional behavior of DLC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 86-87, 564–568. doi:10.1016/s0257-8972(96)03057-5
- [12] Zahid, R., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Mufti, R. A., Zulkifli, N. W. B. M., ... & Azman, S. S. B. N. (2016). Influence of intrinsic and extrinsic conditions on the tribological characteristics of diamond-like carbon coatings: A review. *Journal of Materials Research*, 31(13), 1814–1836. doi:10.1557/jmr.2016.31
- [13] Fontaine, J., Le Mogne, T., Loubet, J. L., & Belin, M. (2005). Achieving superlow friction with hydrogenated amorphous carbon: some key requirements. *Thin Solid Films* 482, 99–108.
- [14] Erdemir, A., Eryilmaz, O. L., & Fenske, G. (2000). Synthesis of diamondlike carbon films with superlow friction and wear properties. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 18(4), 1987-1992.
- [15] Heimberg, J. A., Wahl, K. J., Singer, I. L., & Erdemir, A. (2001). Superlow friction behavior of diamond-like carbon coatings: Time and speed effects. *Applied Physics Letters*, 78(17), 2449–2451. doi:10.1063/1.1366649
- [16] Voevodin, A. A., Phelps, A. W., Zabinski, J. S., & Donley, M. S. (1996). Friction induced phase transformation of pulsed laser deposited diamond-like carbon. *Diamond and Related Materials*, 5(11), 1264-1269.
- [17] Erdemir, A. (2001). The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 146, 292-297.
- [18] Donnet, C., Fontaine, J., Grill, A., & Le Mogne, T. J. T. L. (2001). The role of hydrogen on the friction mechanism of diamond-like carbon films. *Tribology Letters*, 9, 137-142.
- [19] Kim, D. W., & Kim, K. W. (2013). Effects of sliding velocity and normal load on friction and wear characteristics of multi-layered diamond-like carbon (DLC) coating prepared by reactive sputtering. *Wear*, 297(1-2), 722-730.
- [20] Chen, C., Xue, P., & Diao, D. (2022). Graphitization vs tribo-oxidation governing friction behaviors of doped graphene nanocrystalline carbon films. *Carbon*, 197, 435-443. doi:10.1016/j.carbon.2022.07.001
- [21] Yen, B. K., Schwickert, B. E., & Toney, M. F. (2004). Origin of low-friction behavior in graphite investigated by surface x-ray diffraction. *Applied physics letters*, 84(23), 4702-4704.
- [22] Rietsch, J. C., Brender, P., Dentzer, J., Gadiou, R., Vidal, L., & Vix-Guterl, C. (2013). Evidence of water chemisorption during graphite friction under moist conditions. *Carbon*, 55, 90-97.
- [23] Sanchez-Lopez, J. C., Erdemir, A., Donnet, C., & Rojas, T. C. (2003). Friction-induced structural transformations of diamondlike carbon coatings under various atmospheres. *Surface and Coatings Technology*, 163, 444-450.
- [24] Bhushan, B. (1999). Chemical, mechanical and tribological characterization of ultra-thin and hard amorphous carbon coatings as thin as 3.5 nm: recent developments. *Diamond and Related Materials*, 8(11), 1985–2015. doi:10.1016/s0925-9635(99)00158-2

- [25] Ronkainen, H., Varjus, S., Koskinen, J., & Holmberg, K. (2001). Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings. *Wear*, 249(3-4), 260-266.
- [26] Cui, L., Lu, Z., & Wang, L. (2014). Probing the low-friction mechanism of diamond-like carbon by varying of sliding velocity and vacuum pressure. *Carbon*, 66, 259-266. doi:10.1016/j.carbon.2013.08.065
- [27] Liu, Y. A. N., & Meletis, E. I. (1997). Evidence of graphitization of diamond-like carbon films during sliding wear. *Journal of Materials Science*, 32, 3491-3495.
- [28] Pastewka, L., Moser, S., & Moseler, M. (2010). Atomistic insights into the running-in, lubrication, and failure of hydrogenated diamond-like carbon coatings. *Tribology Letters*, 39, 49-61.
- [29] Zhu, X., Wang, X., Liu, Y., Luo, Y., Liu, Y., Zhang, H., & Zhao, X. (2023). Effect of the graphitization mechanism on the friction and wear behavior of DLC films based on molecular dynamics simulations. *Langmuir*, 39(5), 1905-1913. doi: 10.1021/acs.langmuir.2c02925
- [30] Kim, H. I., Lince, J. R., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A. (2006). Environmental effects on the friction of hydrogenated DLC films. *Tribology Letters*, 21, 51-56.
- [31] Andersson, J., Erck, R. A., & Erdemir, A. (2003). Frictional behavior of diamondlike carbon films in vacuum and under varying water vapor pressure. *Surface and Coatings Technology*, 163, 535-540.
- [32] Erdemir, A., & Donnet, C. (2006). Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(18), R311.
- [33] Erdemir, A. (2001). Superlubricity and Wearless Sliding in Diamondlike Carbon Films. *MRS Proceedings*, 697. doi:10.1557/proc-697-p9.1
- [34] Fontaine, J., Le Mogne, T., Loubet, J. L., & Belin, M. (2005). Achieving superlow friction with hydrogenated amorphous carbon: some key requirements. *Thin Solid Films*, 482(1-2), 99–108. doi:10.1016/j.tsf.2004.11.126
- [35] Abou Gharam, A., Lukitsch, M. J., Qi, Y., & Alpas, A. T. (2011). Role of oxygen and humidity on the tribo-chemical behaviour of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings. *Wear*, 271(9-10), 2157-2163.
- [36] Li, H., Xu, T., Wang, C., Chen, J., Zhou, H., & Liu, H. (2007). Tribochemical effects on the friction and wear behaviors of aC: H and aC films in different environment. *Tribology International*, 40(1), 132-138.
- [37] Yun, D. Y., Choi, W. S., Park, Y. S., & Hong, B. (2008). Effect of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> plasma etching treatment on the surface of diamond-like carbon thin film. *Applied Surface Science*, 254(23), 7925-7928.
- [38] Morita, Y., Shibata, T., Onodera, T., Sahnoun, R., Koyama, M., Tsuboi, H., ... & Miyamoto, A. (2008). Effect of Surface Termination on Superlow Friction of Diamond Film: A Theoretical Study. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(4), 3032–3035. doi:10.1143/jjap.47.3032
- [39] Qi, Y., Konca, E., & Alpas, A. T. (2006). Atmospheric effects on the adhesion and friction between non-hydrogenated diamond-like carbon (DLC) coating and aluminum – A first

- principles investigation. *Surface Science*, 600(15), 2955–2965.  
doi:10.1016/j.susc.2006.05.008
- [40] Wang, Y., Yin, Z., Fan, D., & Bai, L. (2022). Friction behaviors of DLC films in an oxygen environment: An atomistic understanding from ReaxFF simulations. *Tribology International*, 168, 107448.
- [41] Maros, M. B., & Németh, A. K. (2017). Wear maps of HIP sintered Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(14), 4357-4369.  
doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.005
- [42] Opitz, A., Ahmed, S. U., Schaefer, J. A., & Scherge, M. (2002). Friction of thin water films: a nanotribological study. *Surface science*, 504, 199-207.
- [43] Nakayama, K., & Nevshupa, R. A. (2002). Plasma generation in a gap around a sliding contact. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35(12), L53–L56.  
doi:10.1088/0022-3727/35/12/101
- [44] Kajdas, C. K. (2005). Importance of the triboemission process for tribochemical reaction. *Tribology International*, 38(3), 337–353. doi:10.1016/j.triboint.2004.08.017
- [45] Gilman, J. J. (1996). Mechanochemistry. *Science*, 274(5284), 65–65.  
doi:10.1126/science.274.5284.65
- [46] Dickrell, P. L., Argibay, N., Eryilmaz, O. L., Erdemir, A., & Sawyer, W. G. (2009). Temperature and water vapor pressure effects on the friction coefficient of hydrogenated diamondlike carbon films.
- [47] Rietsch, J. C., Brender, P., Dentzer, J., Gadiou, R., Vidal, L., & Vix-Guterl, C. (2013). Evidence of water chemisorption during graphite friction under moist conditions. *Carbon*, 55, 90-97.
- [48] Kumar, N., Dash, S., Tyagi, A. K., & Raj, B. (2011). Super low to high friction of turbostratic graphite under various atmospheric test conditions. *Tribology international*, 44(12), 1969-1978.
- [49] Scharf, T. W., & Singer, I. L. (2009). Role of the Transfer Film on the Friction and Wear of Metal Carbide Reinforced Amorphous Carbon Coatings During Run-in. *Tribology Letters*, 36(1), 43–53. doi:10.1007/s11249-009-9457-z
- [50] Okubo, H., Oshima, K., Tuboi, R., Tadokoro, C., & Sasaki, S. (2015). Effects of Hydrogen on Frictional Properties of DLC Films. *Tribology Online*, 10(6), 397–403. doi:10.2474/trol.10.397
- [51] Larsen-Basse, J. Basic theory of solid friction, in: *ASM Handbook*, vol. 18. Ed: Blau, p. 57–84.
- [52] Maros B., M., Németh, A. K., Károly, Z., Bódis, E., Maros, Z., Tapasztó, O., & Balázs, K. (2016). Tribological characterisation of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology. *Tribology International*, 93, 269–281. doi:10.1016/j.triboint.2015.08.041
- [53] Sethuramiah, A., & Kumar, R. (2016). Boundary Lubrication Mechanisms and Modeling. *Modeling of Chemical Wear*, 69–104. doi:10.1016/b978-0-12-804533-6.00004-4

- [54] Akchurin, A., Bosman, R., Lugt, P. M., & van Drogen, M. (2015). On a Model for the Prediction of the Friction Coefficient in Mixed Lubrication Based on a Load-Sharing Concept with Measured Surface Roughness. *Tribology Letters*, 59(1). doi:10.1007/s11249-015-0536-z
- [55] Affatato, S. (2014). Tribological interactions of modern biomaterials used in total hip arthroplasty (THA). *Perspectives in Total Hip Arthroplasty*, 99–116. doi:10.1533/9781782420392.2.99
- [56] Jolkin, A., & Larsson, R. (2000). Determination of Lubricant compressibility in EHL conjunctions using the Hybrid technique. In *Tribology Series* (Vol. 38, pp. 589-596). Elsevier.
- [57] Burstein, L. (2011). Lubrication and roughness. *Tribology for Engineers*, 65–120. doi:10.1533/9780857091444.65
- [58] Czifra, Á., & Ancza, E. (2024). Micro-and nano-roughness separation based on fractal analysis. *Materials*, 17(2), 292.
- [59] Horváth, R., Czifra, Á., & Drégelyi-Kiss, Á. (2014). Effect of conventional and non-conventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 297–304. doi:10.1007/s00170-014-6642-5
- [60] Fülöp F., & Maros B. M. (2018). Tribology testing of superhard multilayered DLC coatings on tool steels. In: Tamás, Mankovits (eds.) *Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2018): Book of extended abstracts*. Debrecen, Hungary: DE Müszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 238. 51-52.
- [61] Siddiqui, S. A., Biro, A. Sz., & Maros B. M. (2019). The Effect of Surface Preparation on Friction and Wear Behaviour of DLC Coated X42Cr13 Plastic Mold Tool Steel. *Tehnika (Beograd)* 74(2), 175-180. doi:10.5937/tehnika1902175S
- [62] Siddiqui, S. A., & Maros, B. M. (2019). Wear behaviour of duplex (PN+PVD) treated layers produced on X42CR13 steel. *Multidisciplinary Sciences: Proceedings of the University of Miskolc (Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye)* 9(1) 3-11. doi:10.35925/j.multi.2019.1.1
- [63] Fülöp, F., & Maros, M.B. (2023). A Comparative Study on the Tribological Performance of a Monolayer TiBN and Multilayered TiBN/DLC Coating on X210Cr12 Tool Steel. In: Jármái, K., Cservedák, Á. (eds) *Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 620-635. doi:10.1007/978-3-031-15211-5\_52
- [64] Maros, B. M., & Siddiqui, S. A. (2022). Tribological Study of Simply and Duplex-Coated CrN-X42Cr13 Tribosystems under Dry Sliding Wear and Progressive Loading Scratching. *Ceramics*, 5(4), 1084-1101. doi:10.3390/ceramics5040077
- [65] Siddiqui, S. A., & Maros, B. M. (2022). Comparative Study on the Scratch and Wear Resistance of Diamond-like Carbon (DLC) Coatings Deposited on X42Cr13 Steel of Different Surface Conditions. *Ceramics*, 5(4), 1207-1224.
- [66] Fülöp, F., & Maros, B. M. (2023). Tribological behaviour of TiBN and DLC top-layered coating systems. *Anyagvizsgálók Lapja*. (1) 6-12.
- [67] Erdemir, A., Eryilmaz, O. L., & Kim, S. H. (2014). Effect of tribochemistry on lubricity of

- DLC films in hydrogen. *Surface and Coatings Technology*, 257, 241–246. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.0
- [68] Polaki, S. R., Kumar, N., Madapu, K., Ganesan, K., Krishna, N. G., Srivastava, S. K., ...& Tyagi, A. K. (2016). Interpretation of friction and wear in DLC film: role of surface chemistry and test environment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(44), 445302. doi:10.1088/0022-3727/49/44/445302
- [69] Kuwahara, T., Moras, G., & Moseler, M. (2017). Friction Regimes of Water-Lubricated Diamond (111): Role of Interfacial Ether Groups and Tribo-Induced Aromatic Surface Reconstructions. *Physical Review Letters*, 119(9). doi:10.1103/physrevlett.119.096101
- [70] Jae-Il Kim, Woo-Young Lee, Takayuki Tokoroyama, and Noritsugu Umehara (2023) Superlubricity with Graphitization in Ti-Doped DLC/Steel Tribopair: Response on Humidity and Temperature, *ACS Applied Materials & Interfaces* 15 (15), 19715-19729, DOI: 10.1021/acsami.3c01704
- [71] Kuwahara, T., Long, Y., Martin, J. M., Moras, G., & Moseler, M. (2021). Superlow Friction of a-C:H Coatings in Vacuum: Passivation Regimes and Structural Characterization of the Sliding Interfaces. *Coatings*, 11(9), 1069. <https://doi.org/10.3390/coatings11091069>