

# Tribológiai vizsgálatok belső égésű motorokon

## ONLINE KOPÁSMÉRÉS RADIONUKLEÁCIÓS TECHNIKA SEGÍTSÉGÉVEL EGY VEZÉRMŰLÁNC PÉLDÁJÁN

**DR. MATHIAS ROMAN DREYER**

egyetemi docens  
tanszékvezető

**GERGYE TAMÁS**

egyetemi tanársegéd  
Széchenyi István Egyetem  
Belső Égésű Motorok Tanszék

A különböző tribológiai rendszereket (triborendszerek), amelyek a belső égésű motorokban (dugattyúgyűrű-hengerfal; dugattyú-hengerfal; főcsapágy-főtengely; hajtórúdcsapágy-főtengely; láncscap-láncszem...) megtalálhatóak, számos intézet és vállalat kutatja, vizsgálja. A triborendszereket különböző tényezők (olaj hőmérséklete, üzemanyag, adalékanyagok, terhelés, érintkező anyagok geometriája és összetétele...) befolyásolhatják, amelyek így a tribológiai viselkedést is megváltoztatják. A mai fejlett világban vannak úgynevezett online eljárások, melyek segítségével a súrlódási és kopási tulajdonságok mérhetők.

A cikkben bemutatásra kerül egy, a motorfejlesztésben használt online kopásmérési eljárás (radionukleációs technika). Bemutatásra kerül továbbá a módszer kialakulásának története, a mérés során lekopott részecskék tömegének, valamint a részecskék tömegéből számítható kopásmélység meghatározása. A cikk rövid betekintést ad a belső égésű motorok bonyolult tribológiai rendszereibe, majd egy példán keresztül bemutatja a kopásmérésben rejlő lehetőségeket.

## 1. BEVEZETÉS

A műszaki világban mindenhol, ahol az alkatrészek és gépelemek egymással érintkeznek, és egymáshoz képest relatívan elmozdulnak, fontos szerepet játszik a kopás. Az alkatrészek és gépelemek kopási jelenségeit empirikus képletekkel nem lehet leírni, leggyakrabban kísérletek útján határozzák meg. A kopás mechanizmusainak sokfélesége és összetettsége (pl.: kovácsüllyeszték kopása, belső égésű motor alkatrészének kopása) megköveteli, hogy a lejátszódó folyamatokat különböző kísérleti és mérési módszerekkel vizsgálják, majd a kapott eredményekből súrlódási törvények vezethetők le és azok tényezői határozhatók meg. [1]

A kopás mechanizmusainak vizsgálatához különböző mérési módszereket alkalmaznak. A hagyományos módszereknél („tömegellenőrzés módszer”, „optikai módszer”, „vegyelemző módszer”) az alkatrészek kopását szétszerelt állapotban, a vizsgálat előtt, majd egy bizonyos eltelt futási vagy működési idő után vizsgálják, és arra alkalmas mérésekkel (tömegellenőrzés, érdeség- és profil mérés) a kopás mértékét meghatározzák. [1], [2]

A tudományban és az iparban rengeteg technológiai lehetőség megtalálható, melyekkel a kopás folyamatai (kopásmechanizmusok) üzem közben (pl.: belső égésű motorok) vagy megmunkálás közben (pl.: marás és forgácsolás) online vizsgálhatóak. Ezeknél a módszereknél különböző technológiai megoldások fordulnak elő, melyekkel a kopás megállapítható. A kopás meghatározására neurális hálózatokat [4], [5]; ultrahangot [7], [8]; képfeldolgozást [11]; szerszámkopás méréséhez rezonanciafrekvencia-mérést [6]; olajban megtalálható részecskék méréséhez Hall-effektust [10] vagy radionukleációs technikát (RNT) [9] stb. használnak. [3]

Magyarországon először a Széchenyi István Egyetem Audi Hungaria Belső Égésű Motorok Tanszékén épült fel az az új technológia, mellyel a kopás online, két érintkező felület között, tribométeren vagy akár belső égésű motoron mérhető. Ez a folyamatos kopásmérés lehetővé teszi a kopássebesség meghatározását akár nm/h nagyságrendben is.

Egy triborendszerben legalább két érintkező alkatrész található, melynek egyidejű vizsgálata műszaki okokból szükséges. Az RNT-méréseknél fennáll a lehetőség egykomponenses (egy

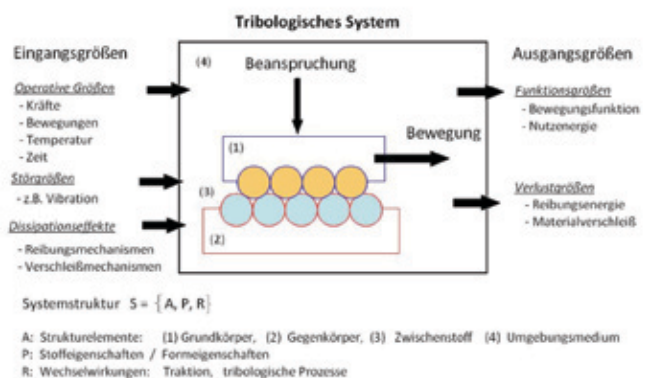
aktivált alkatrész) vagy kétkomponenses (két aktivált alkatrész: alap- és ellentest) mérés elvégzésére. Kétkomponenses mérés elvégzésének a lehetősége jelentősen függ az érintkezésben lévő alkatrészek anyagösszetételétől.

A cikkben, az RNT-módszer leírásán kívül egy példán keresztül kerül bemutatásra a vezérműlánc kopásmérése, amelyben az alapvető tribológiai vizsgálatok fontosságát is hangsúlyozza. Itt a figyelem különös tekintettel a modern belső égésű motorok kihívásaira koncentrál, amelyeket társadalmi és környezetpolitikai igények kielégítése érdekében egyre inkább optimalizálni kell.

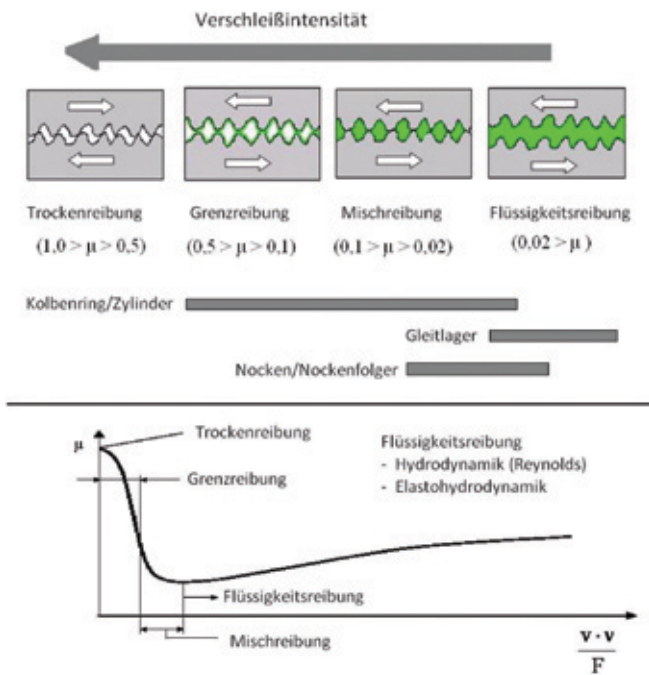
## A TRIBOLÓGIAI RENDSZER ALAPJA

Ahhoz, hogy a motor súrlódási veszteségét csökkentsük, a motort mint tribológiai rendszert optimalizálni kell.

A tribológia (visszavonva DIN 50323) a kölcsönösen egymáshozható és egymáshoz viszonyítva elmozduló felületek és a közöttük lejátszódó folyamatok tudománya és technológiája. Magába foglalja a súrlódás, kopás és kenés folyamatának leírását, valamint a határfelületeken lejátszódó kölcsönhatásokat szilárd testek, valamint szilárd test és folyadék vagy gáz között. [37]



1. ábra: tribológiai rendszer



2. ábra: súrlódási és kenésiállapotok [34]

A tribológiai rendszer (triborendszer) magába foglalja a tribológiai igénybevételeket. [37]

A súrlódás (visszavonva DIN 50281) egy kölcsönhatás az érintkező felületek között. A súrlódás a relatív mozgás irányával szemben hat. [37]

A kopás (visszavonva DIN 50320) a mechanikai hatások, szilárd, folyékony és gáznemű anyag érintkezése és relatív elmozdulása által, a szilárd test felületéről leváló anyagvesztéséget jelent. Ezeknek a szilárd, folyékony és gáznemű anyagok relatív elmozdulásából és érintkezéséből, a szilárd test felületére gyakorolt igénybevételt tribológiai igénybevételek nevezzük. Tribológiai igénybevétel alatt a külső igénybevételek a kopásrendszer elemeire gyakorolt hatásának az összességét értjük. [37]

A súrlódó felületepárok között kialakuló különböző kenési állapotokat a 2. ábra mutatja be.

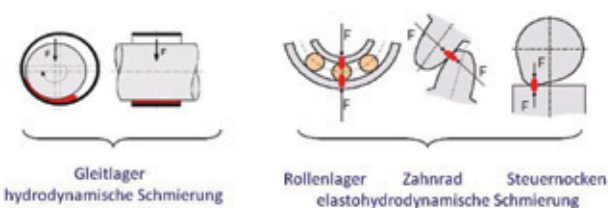
Négy tartomány különböztethető meg.

Száraz súrlódásnál tribológiailag igénybe vett felületek.

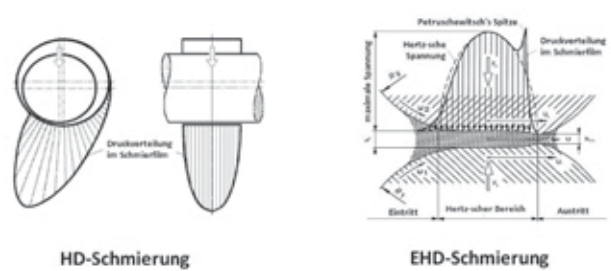
Vegyes súrlódásnál a terhelést részben a kenőréteg, másrészt az érintkező érdességcsúcsok veszik fel.

Tiszta folyadéksúrlódás akkor alakul ki, ha a súrlódó felületeket egy hordképes kenőfilmréteg választja el. Az erők az olajfilmrétegen keresztül adódnak át. A súrlódás a köztes közeg eredménye (belső súrlódás), valamint a köztes közeg viszkozitásától függ.

Megkülönböztetünk hidrodinamikusan és elasztó-hidrodinamikusan kenést. A kenés kialakulása a súrlódó felületek makrogeometriájától függ. Párhuzamos felületek között hidrodinamikusan kenőfilm-



3. ábra: hidrodinamikusan és elasztó-hidrodinamikusan kenőfilm kialakulása [34]



4. ábra: nyomáeloszlás a hidrodinamikusan és elasztó-hidrodinamikusan kenési állapotoknál [34]

réteg alakul ki. Az ellenkező értelemben görbült felületek közötti kenőfilmrétegben kialakuló nyomáeloszlás az elasztó-hidrodinamikusan elmélet segítségével írható le. Az elasztó-hidrodinamikusan kenés az érintkező felületek rugalmas alakváltozásának és a növekvő nyomás hatására létrejövő viszkozitásnövekedésnek az eredménye. A kenőfilm vastagsága rendszerint vékony, lásd 3. ábra és 4. ábra

### RADIONUKLEÁCIÓS TECHNIKA MÉRFÖLDKÖVEI (RNT)

Az izotóptechnika kopásmérésénél történő alkalmazásának lehetőségét E. O. Lawrence 1930-ban, a ciklotron kifejlesztésével egyidejűleg fogalmazta meg. Az alkatrészek kopásnak kitett tartományai aktiválhatók, majd a súrlódás következtében az aktivált tartományból leváló részecskék által kibocsátott sugárzás mérhető. [1], [9]

Kezdetben az alkatrészeket neutronnal sugározták be, melynek hatására a teljes alkatrész radioaktívá vált. Azért, hogy a sugárzás intenzitását mérni lehessen, az alkatrészek magas aktivitással kellett, hogy rendelkezzenek. A vizsgálatokat csak laboratóriumban, megfelelő védőintézkedés mellett lehetett csak elvégezni. [9], [12]

A karlsruhei egyetemen K. Kollmann vezetésével az FVV céggel együttműködve teremtették meg az izotóptechnika gépészeti alkalmazásának feltételeit. 1958 és 1970 között belső égésű motorok különböző alkatrészein kopásméréseket hajtottak végre. [15]-[17]

Az eljárást kiterjesztették az olajfilm-vastagság mérésére [18], majd a kopás során leváló részecskék méretelezésére [19] és a triborendszerben fellépő olajfogyasztás mértékének meghatározására [20]. A kutatásoknál két alapvető nehézségre derült fény. Egyrészt az elektronika megbízhatatlan volt, másrészt a neutronnal besugárzott alkatrészek nagy aktivitásának köszönhetően a munkavégzés körülményes volt. [9], [12]

Az utóbbi problémát egy új eljárással, a „vékonyréteg-aktiválási” (TLA) eljárás kivitelezésével oldották meg, melynek során csak a vizsgálandó alkatrészfelület közeli tartományát sugározzák be töltött részecskékkel. Ezek az elektromosan töltéssel rendelkező részecskék az anyagba behatolva leadják energiájukat és lefekeződnek, aminek köszönhetően csak a felületközelben tartomány aktiválódik. A sugár protonból, deuteronból és  $\alpha$ -részecskéből állhat. [9], [12]-[15], [21]

Andreas Gervé vezetésével a karlsruhei Magkutató Intézet két különböző kopásmérési eljárást fejlesztett ki. Az alapvető különbség a két módszer között abban áll, hogy míg a vékonyréteg-különbőség eljárásnál az alkatrész aktivitásának változásából, míg a koncentrációs eljárásnál az olajban található kopásrészecskék aktivitásváltoztatásából következtethetünk a kopásra. Az aktivitás változása a megfelelő felezési idővel és ellenőrző mérés segítségével korrigálható. [9]



## AZ RNT-KOPÁSMÉRÉS MÓDSZEREI

Ahogy fent említettük, az FVV megbízásából két különböző eljárást fejlesztettek ki a folyamatos kopásmérés számára. Ebben a fejezetben a különböző eljárásokról, a hozzájuk tartozó kalibrációs folyamatokról, valamint a tömeg meghatározásáról esik szó.

### Radionukleációs technika eljárásai

A következőekben a szűrőkoncentrációs eljárás és a vékonyréteg-különbség eljárás, valamint ezek különböző alkalmazásai kerülnek bemutatásra.

#### Szűrőkoncentrációs eljárás (KMV)

A koncentrációs eljárásnál azoknak a kopásrészecskéknak az aktivitását mérjük, amelyek az aktivált területek tartományáról kerültek a szállítóközegbe. Ez módszer egy szállítóközeget igényel, amely a részecskéket a mérőfejekhez szállítja. A szállítóközeg lehet kenő-, ill. hajtóanyag. A szállítóközeget egy úgynevezett átfolyásmérőfejen (DMK) pumpálják keresztül. A mérőfej egy mérőtartályból és egy nagy érzékenységű NaJ-szcintillátorból áll. A mérőedényt a háttérsugárzás hatásainak kiküszöbölése céljából, ólomköpenyvel kell leárnyékolni. Ez a sugárterhelés a sugárzás pontos mérését és az egzakt kiértékelést megnehezítheti. [9], [12], [15]

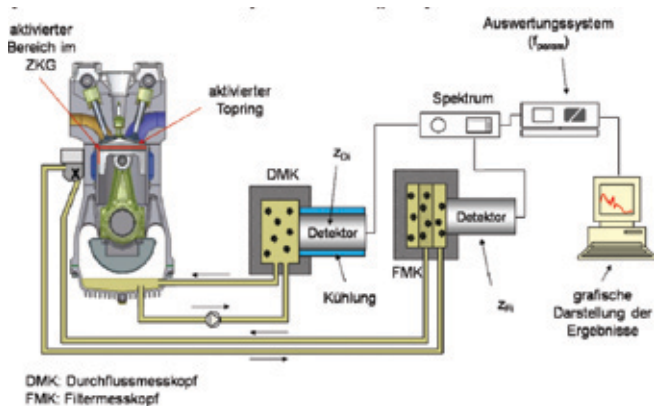
Azoknál a rendszereknél, ahol a szállítóközeget egy szűrőn is átáramoltatják, a rendszert egy külön mérőfejjel kell kiegészíteni, amely a szűrő sugárzási intenzitásának mérésére szolgál. A szűrő mérőfejjel kiegészített mérőelrendezés az **5. ábrán** látható.

Mind a szűrőmérőfejjel kiegészített úgynevezett szűrőkoncentrációs eljárás, mind a hagyományos koncentrációs eljárás alkalmas többkomponenses kopásmérés elvégzésére. [9]

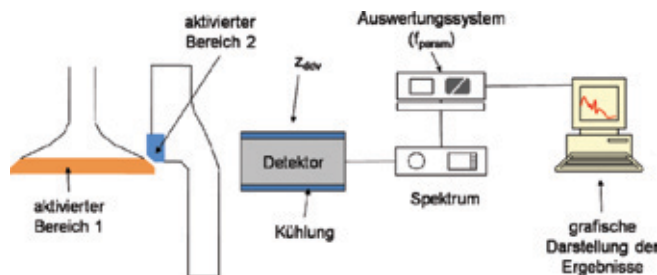
A lekopott tömeg (mikrogrammban) és az ebből számítható kopásmélység a kalibrációs és az alapkalibrálás során meghatározott adatok segítségével számítható ki. A számítások során különböző paramétereket kell figyelembe venni, mint például: az aktivált kopási részecskék felezési ideje. A számítógéppel történő kiértékelés valós időben történik, aminek köszönhetően a kopás alakulása valós időben ábrázolható. [9], [14]

#### Vékonyréteg-különbség eljárás (DDV)

Ezt az eljárást akkor alkalmazzák, amikor a koncentrációs eljárás nem lehetséges, mert nem áll rendelkezésre olyan szállítóközeg, ami a kopási részecskéket a mérőfejekhez szállítaná (például: szelep/szelepelemek). Ebben az esetben nem a részecskék sugárzását mérjük, hanem az alkatrészeken visszamaradó aktivitás mértékét. A kopásfolyamat során a leváló részecskék révén bekövetkező anyagvesztés összefüggésben van az alkatrész sugárzásintenzitásának csökkenésével. Az eljárás során alkalmazott mérési elrendezés a **6. ábrán** látható. A mérés pontossága körülbelül



5. ábra: szűrőkoncentrációs eljárás



6. ábra: vékonyréteg-különbség eljárás

egy-két nagyságrenddel kisebb, mint a koncentrációs eljárás esetében. [9], [15]

A vékonyréteg eljárásnál a  $\gamma$ -sugárzást szintén NaJ-szcintillátor érzékélővel mérjük, melyet az aktivált alkatrészről lehetőleg kis távolságban kell elhelyezni. Ennél az eljárásnál a természetes sugárzást csak az érzékítő háza árnyékolja le. Az aktivált alkatrész sugárzása egy kollimátor alkalmazásával irányítható. Az érzékítő itt is le kell árnyékolni, azért, hogy a háttérsugárzás hatása kiküszöbölhető legyen. Annak ellenére, hogy az alapelv nagyon egyszerű, a mérést számos tényező befolyásolhatja pl.: geometriai korlátok a detektor elhelyezésénél, valamint azon alkatrészek árnyékoló hatása, melyek a vizsgált test és a detektor között találhatók. Az érzékítő tartójában egy hűtővíz kör található, amivel az érzékítő hőmérsékletét kondicionálják. Az érzékítő tartóját rezgésmentesen kell felfüggeszteni. [9], [15]

Ennél az eljárásnál különösen fontos, hogy az aktiválás lehetőség szerint csak egy vékony rétegben történjen. Az aktiválást úgy kell megtervezni, hogy a fajlagos aktivitás a mérési tartománynak megfelelő mélységig állandó maradjon. Ha ez a tartomány túl nagy, akkor a keletkezett kopás túl kis változást idézne elő az alkatrész összaktiválásában. Ha az aktiválási mélység túl kicsi, akkor előfordulhat, hogy a mérés vége előtt az aktivált réteg teljesen elkopik. A mérés tervezése során törekedni kell arra, hogy a mérési tartományon belül az aktivitáscsökkenés és a kopásmélység között lineáris kapcsolat legyen. [9], [21]

#### A mérés kalibrálása

A következőekben a két különböző eljárás során alkalmazott kalibrációs folyamat kerül bemutatásra.

#### Szűrőkoncentrációs eljárás kalibrálása

Koncentrációs eljárásnál a kalibrálás két lépésből áll. A berendezés gyártója egy alapkalibrálást hajt végre, melynek során meghatározzák egyes izotópokra, ill. izotóppárokra vonatkozó együtthatókat és tényezőket. [14]

Az alapkalibrálás során meghatározott tényezőknek köszönhetően a mérések előtt szükséges mérőfejek kalibrálása szilárd próbatesttel történhet. Erre azért van szükség, mert a sugárzás, ill. az izotópok egymásra gyakorolt hatása, a térbeli eloszlástól jelentősen függ. A szilárd próbatest aktivitása és a feloldott próbatest (folyadék) aktivitása eltérő. Az alapkalibrálás során meghatározott tényezők a szilárd próbatest, valamint a feloldott próbatest közötti összefüggést adja meg. A mérések előtt elvégzendő kalibrálással, a vizsgálandó alkatrész(ek) aktivitásának viszonyát összefüggésbe hozzuk az alapkalibrálás során meghatározott tényezőkkel. [14]

#### Vékonyréteg-különbség eljárás kalibrálása

Ennél az eljárásnál a mérések előtti kalibrálás két lépésben történik. Először a háttérsugárzást határozzuk meg. A mérés során a detektor közelében nem lehet aktivált alkatrész. A háttérsugárzás meghatározása után az aktivált alkatrész beépíthető a motorba. [25]

Második lépésben az alkatrész összaktivitását mérjük meg, majd az eljárás számára fontos adatokat adjuk meg (aktiválási mélység, az aktiválás lineáris szakasza). [25]

**A lekopott részecskék aktivitása és tömege közötti összefüggés: a kopás meghatározása**

Azon kopásrészecskék tömege, amelyek az aktivált területről a felületek érintkezésének következtében leválnak, anyagvesztésként fogható fel. Az anyagvesztés a szűrőkoncentrációs eljárásnál az olajban található részecskék aktivitásának növekedését, míg a vékonyréteg-különbség eljárásnál a kezdeti aktivitásnak a csökkenését (alkatrész pillanatnyi aktivitása, ami a mérés után, az alkatrészen visszamarad) jelenti.

**A kopás meghatározása a szűrőkoncentrációs eljárásnál**

Az eljárás során mérjük a részecskék intenzitását a mérőfejekben (DMK, FMK) és ennek köszönhetően határozzuk meg a részecskék tömegét.

Az alapkálbrálási adatok felhasználásával, a kalibráló próbatest netto- és a mérési tartományának a másik izotóp mérési tartományára gyakorolt hatásának nagyságából, a kalibráló próbatest tömegéből és az úgynevezett tömeg-rétegvastagság viszonyból (MSV) határozható meg a kopás mértéke. [14]

$$W_{KMI}(t) = MSV \cdot K_{VK} \cdot V_{Ol} \frac{m_{kp}}{Z_{kp}} (Z(t) - U_r) \cdot e^{(\ln 2 \frac{t}{T_{hwz}})} \quad (1)$$

$W_{KMI}(t)$	kopás [ $\mu\text{m}$ ]
$m_{kp}$	kalibráló próbatest tömege [mg]
$Z(t)$	részecskék intenzitása az olajban [Imp/min]
$T_{hwz}$	nuklid felezési ideje [min]
$K_{VK}$	arányossági tényező [1/L]
$V_{Ol}$	olajtérfogat [L]
$Z_{kp}$	kalibráló próbatest intenzitása [Imp/min]
$U_r$	háttersugárzás [Imp/min]
$t$	mérési pontok között eltelt idő [min]
$MSV$	tömeg-rétegvastagság viszony [ $\mu\text{m}/\text{mg}$ ]

**A kopás meghatározása a vékonyréteg-különbség eljárásnál**

Ennél az eljárásnál az aktivitás lineáris tulajdonsága játszik fontos szerepet. Az alkatrész aktivitása növekvő kopásmélységgel lineárisan csökken. A névleges aktiválási vastagság ( $d_0$ ) és a lineáris szakasz határa ( $d_{lin}$ ) az aktiválási paramétereiből rendelkezésre áll. A visszamaradó összaktivitás arányban áll a mérés során mért intenzitással ( $Z_{DDV}(t)$ ). A tényleges kopásmélység ( $w_{DDV}(t)$ ) az aktuális intenzitásból ( $Z_{DDV}(t)$ ) és a kezdeti intenzitásból ( $Z_0$ ) határozható meg. [9]

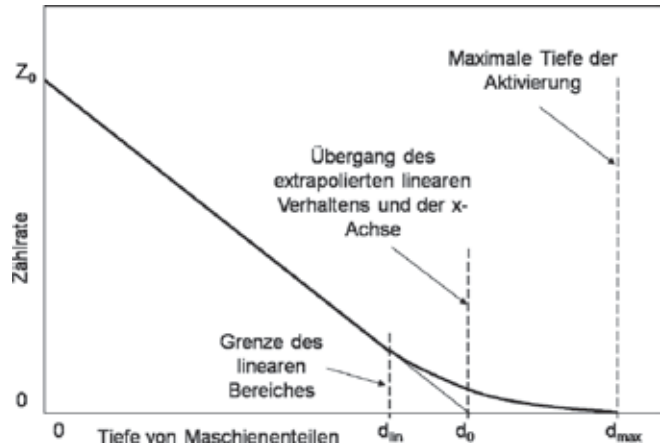
Ez a viszony csak a lineáris szakasz határáig érvényes. Az intenzitás és kopásmélység közötti összefüggés (2): [9]

$$W_{DDV}(t) = \frac{d_0}{Z_0} \left[ (Z_0 - U_r) - (Z_{DDV}(t) - U_r) \cdot e^{(\ln 2 \frac{t}{T_{hwz}})} \right] \quad (2)$$

**ALKATRÉSZEK AKTIVÁLÁSA**

Annak érdekében, hogy a kopásmérés elvégezhető legyen, a vizsgálandó alkatrészeket aktiválni kell, és rendelkezni kell egy  $\gamma$ -sugárzás mérésére alkalmas érzékelővel, amellyel az izotóp-állandók a kopás mértékével kapcsolatba hozhatók.

Alapvetően három eljárás áll rendelkezésre a szükséges aktiválás elvégzéséhez:



7. ábra: lineáris tartomány ábrázolása az aktivált alkatrészben

- Reaktorban (Preda, 1962; Chisu and Szabo, 1967) lassú neutronokkal történik az aktiválás.
- Ciklotronban (Gervé, 1972; Conlon, 1979, 1985; Jetly, 1982) egy úgynevezett vékonyréteg-aktiválás történik, ahol is töltött részecskéket használnak fel. [12], [23], [24]
- Az ezredfordulóig egy alternatív, úgynevezett ionbeültetési eljárást fejlesztettek ki, amellyel nem fémes anyagok aktiválhatók. [21]

A reaktorban, valamint a ciklotronban történő aktiválás során, az anyagban lejátszódó magreakciók, a következő egyenlettel (3) jellemezhetők: [9]

$$N(a, b)N^* \quad (3)$$

$N$	kiinduló elem [ $\mu\text{m}$ ]
$b$	reakció során az atommagból kilépő részecske
$a$	besugárzott részecske [mg]
$N^*$	keletkezett nuklid

Az irodalomban találunk utalásokat további aktiválási lehetőségekre, mint például radioactive marker insert method, radioactive marker melting method stb.

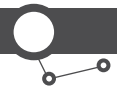
A következő fejezetben a leggyakrabban alkalmazott aktiválási eljárásokat mutatjuk be részletesen, valamint röviden ismertetünk további lehetőségeket.

**Neutronnal történő aktiválás**

Egy alkatrész neutronnal történő aktiválása során az aktiválandó területet termikus neutronnal sugározzák be. A lejátszódó magreakció többnyire ( $n, \gamma$ ). A termikus neutron energiája 0,025eV. Az alkatrész aktivitása egyebek között a tömegtől függ. Nagyobb alkatrészeknél olyan mértékű aktivitás érhető el, amely különleges védőintézkedések nélkül többé már nem alkalmazható. Ennek köszönhetően, ezt az aktiválási eljárást csak kisméretű motoralkatrészek esetében alkalmazható. A neutronnal történő aktiválás többnyire a leggazdaságosabb módszer, azonban a magas aktivitásnál, a szükséges óvintézkedések és biztonsági berendezések ezt az anyagi előnyt könnyen felemészthetik. [9], [42]

**Töltött részecskékkel történő aktiválás (vékonyréteg-aktiválás TLA)**

A töltött részecskékkel történő aktiválás ciklotronban vagy részecskegyorsítóban történik, és nagy előnye, hogy csak azok a területek kerülnek aktiválásra, ahol a kopás létrejön (nuklidtól és az anyagtól függően a maximális aktiválási mélység: kb. 10–500  $\mu\text{m}$ ). Ez annak köszönhető, hogy a töltött részecskék mozgási energiájukat gyorsan elvesztik. A részecskék behatolási mélysége függ a részecskék



E1	NUCLEAR REACTION	ABUNDANCE (%)	THRESH-OLD (Mev)	T <sub>1/2</sub> (d)	MAJOR GAMMA RADIATION (keV) AND INTENS (%)	YIELD (μCi μA <sup>-1</sup> H <sup>-1</sup> )	USEFUL IRRADIATED THICKNESS (μm)	RADIO-ACTIVE CONTAMINATION	PERIOD BETWEEN IRRADIAT. AND MEAS (d)	USEFUL WORKING TIME INTERVAL (d)
A1	<sup>27</sup> Al(He3,2α) <sup>22</sup> Na	100	2.1	9.5x10 <sup>3</sup>	1278(100)	0.1	300	<sup>22</sup> Na, <sup>25</sup> Al	30	>365
Ti	<sup>48</sup> Ti(d,2n) <sup>48</sup> V	73.56	7.3	16	945(10)	0.7	220	<sup>48</sup> Sc, <sup>48</sup> Sc, <sup>47</sup> V	1	60
	<sup>48</sup> Ti(d,n) <sup>48</sup> V	73.56	4.9	16	983(100) 1312(57)	30	370	<sup>47</sup> V		60
V	<sup>51</sup> V(p,n) <sup>51</sup> Cr	99.75	1.6	27.8	320(9)	80	320		7	90
Cr	<sup>52</sup> Cr(d,2n) <sup>52</sup> Mn	89.76	8.0	5.2	741(82) 935(84) 1434(100)	1.5	120	<sup>51</sup> Cr, <sup>54</sup> Mn	1	30
Cu	<sup>65</sup> Cu(d, 2n) <sup>65</sup> Zn	30.9	4.4	245	1115(49)	0.6	130	<sup>63</sup> Zn	7	365
	<sup>65</sup> Cu(d, 2n) <sup>65</sup> Zn	30.9	2.2	245	1115(49)	1.5	270		7	365
Fe	<sup>56</sup> Fe(p,n) <sup>56</sup> Co	91.68	5.4	77.4	847(100) 1040(15) 1240(66)	4.0	240		7	300
	<sup>56</sup> Fe(d,2n) <sup>56</sup> Co	91.68	7.8	77.3	1240(66)		100	<sup>57</sup> Co, <sup>52</sup> Mn, <sup>54</sup> Mn	15	300
	<sup>56</sup> Fe(d,n) <sup>37</sup> Co	91.68	0	270	122.(85)		70	<sup>52</sup> Mn, <sup>54</sup> Mn	15	600
Ag	<sup>109</sup> Ag(d,2n) <sup>109</sup> Cd	48.65	3.2	453	88(95)	2.0	50	<sup>107</sup> Cd	5	600
Sn	<sup>124</sup> Sn(d,n) <sup>124</sup> Sb	5.38	3.7	61	603(97)	1.0	100	<sup>120</sup> Sb, <sup>122</sup> Sb	30	180

1. táblázat: aktiválási lehetőségek [22]

kék energiájától, valamint az anyag tulajdonságától. A különböző részecskeenergiával történő aktiválás a behatolás mélységét, és ezzel az aktiválás mélységét is befolyásolja. A kopásmérés számára azonban nem a maximális behatolási mélység, hanem a létrehozott aktivitás lineáris lefutása a döntő jelentőségű. Csak így biztosítható, hogy ebben a kb. 10–500 μm tartományban az aktivitás homogén eloszlású legyen. [9], [12], [22], [26]

A vékonyréteg-aktiválásnál nemcsak a teljes felületet aktiválják, hanem azokat a vizsgálandó területeket, amelyek a mérés szempontjából érdekesek. Ebből következően a felület függetlenül az alkatrész nagyságától a kiválasztott területeken vékony rétegben aktiválható. Természetesen a kiválasztott helyek, a sugár számára elérhetőek kell, hogy legyenek, azaz láthatóak kell, hogy legyenek. [9]

Azoknál a részecskénél, amelyekkel a vizsgálandó felületeket besugározzák, a kiinduló és a létrehozott nuklidtól függően protonról, deuteronról és α-részecskéről beszélhetünk. A nagy mozgási energiával az atommagba behatoló részecskék az atommagot instabil közttes állapotba hozzák, amelyek ezután érzékelhető sugárzás kibocsátásának formájában stabil állapotba mennek át. [9], [12]

Mind a vékonyréteg-, mind a reaktorban történő aktiválás során kb. 0,5–100 MBq aktivitást hoznak létre. Az alsó határt a mérés szükséges pontossága, míg a felső határt a sugárvédelem és az aktiválási költség határozzák meg. Az aktiválás során figyelembe veendő paraméterek az olajmennyiség, a vizsgálat időtartama és az elvárt kopás mértéke. Különös jelentőséggel bír a mérőnuklid kiválasztása, mivel a különböző mérőnuklidok jelentősen eltérő tulajdonságokat (detektor érzékenysége) mutatnak. [9]

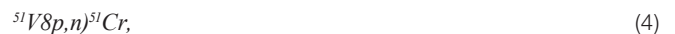
Annak érdekében, hogy az aktiválás során lejátszódó folyamatokat jobban megérthessük, két példa kerül bemutatásra.

Az aktiválás szempontjából fontos, hogy az aktiválandó felületeket és az elvárt kopásmélységet meghatározzuk, valamint hogy az anyagösszetételben egy lehetséges mérőnuklidot találjunk.

Ezen a ponton mindig felvetődik a kérdés, milyen sugárral (α-részecske, proton, deuteron) milyen nuklid hozható létre az anyagból.

Példa 1:

A vanádiumbevonattal rendelkező lánccsapokból Cr-51 hozható létre. Az aktiválás során lejátszódó magreakció:



A vanádium atommagot protonnal sugározzák be. Az atommag átalakulása során az atommag neutront bocsát ki. A visszamaradt elem a króm, amelynek a relatív atomtömege 51.

Ha kétkomponenses mérést végzünk, akkor fontos, hogy egy másik mérőnuklidot is létrehozzunk az anyagból.

Példa 2:

Az acél lánccsapokból, amelyek legnagyobb része vas, többek között Co-56 vagy Co-57 hozható létre. Költségszempontok miatt elsősorban Co-56-ot hoznak létre. Az aktiválás során lejátszódó magreakció:



A vas atommagot protonnal sugározzák be. A magátalakulás során az atommag neutront bocsát ki. A visszamaradt elem a kobalt, amelynek relatív atomtömege 56. A Co-57 más besugárzási energia mellett keletkezik, illetve diszkrét anyagmennyiségekben.

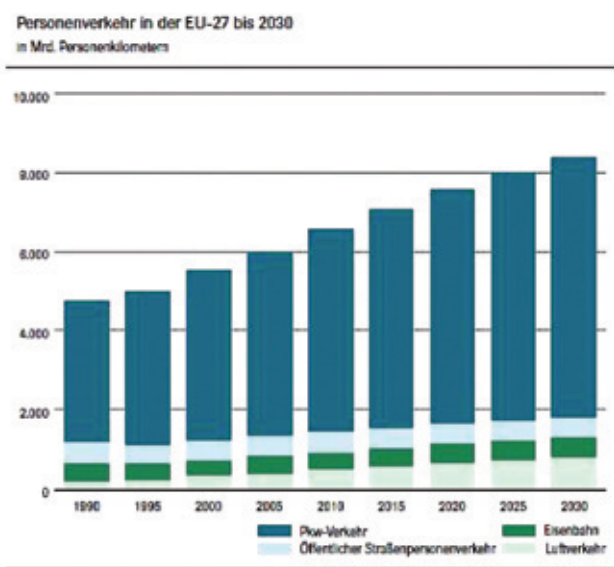
#### Beültetési aktiválás

Szintetikus anyagok aktiválása a fent említett aktiválási módokkal szembeni nagy érzékenységük miatt csak bizonyos esetekben és csak korlátozott feltételek mellett lehetséges. [21]

A karlsruhei Magkutató Intézet (KfK) a Kurchatov Intézettel közösen kifejlesztett egy módszert, amelynek segítségével radioaktív ionok közvetlenül az alkatrészek felületébe ültethetők be. Az ionsugár Be-7 ionból áll, amelynek felezési ideje 53 nap és gammaenergiája 478 keV. [21]

Az aktiválandó alkatrészbe bevitt ionok a következő magreakciót hozzák létre:  $^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$ . Egy külső sugárból (B-10 ionok, amelynek energiája 6-10 MeV között lehet) egy hidrogénkonverterben Be-7 ionokat hoznak létre. Ezek azonos irányban haladnak, mint a fősugár. Az átalakító után a sugár egy abszorpciósűrűbe kerül, amely a B-10 ionokat felfogja, így az alkatrészt már csak a Be-7 ionok érik el. [21]

A rendszer továbbfejlesztésének köszönhetően elérték, hogy hőre lágyuló műanyagok, hőre keményedő műanyagok, elasztomerek és hasonló szintetikus anyagok a besugárzás hatására anyagkárosodás nélkül aktiválhatók. Ezzel az eljárással az



8. ábra: várható személyforgalom az EU-27-ben 2030-ig [27]

alkatrészek (anyagminőségtől függően) kb. 20 µm mélységben aktiválhatóak. [21]

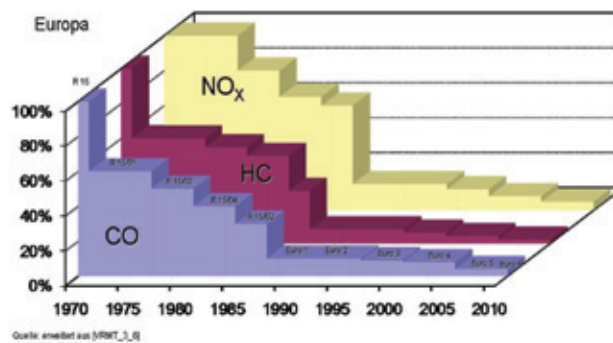
**További lehetőségek az alkatrészek aktiválására**

A további eljárásokat különleges alkalmazások esetében használják.

A radioaktív jelző olvasztó módszernél (radioactive marker melting method) a radioaktív pornak az olvadákkal történő gyors és jó keveredése szükséges. E célra először a nuklidokat ( $^{59}\text{Fe}$ ;  $^{60}\text{Co}$ ) egy kapszulába töltik, amelynek anyaga megegyezik a vizsgálandó anyaggal. A vizsgálatok szerint a tiszta keveredéshez a nuklidoknak vizsgálatoktól függően 40–60 s-ra van szükségük. [12]

Az elektrolitos lecsapatási módszernél (electrolytic deposition method) az elektródát radioaktív anyagból készítik. Az elektrolízisnek köszönhetően Ag, Zn, Cr, Sn rakódik le a felületre. Ez a módszer jól alkalmazható a felületek kopásának meghatározására. [12]

**Entwicklung der PKW Schadstoffemissionen / Grenzwerte**



9. ábra: károsanyag-kibocsátás határértékeinek alakulása Európában [29]

A radioaktív cinkbevonat módszernél (radioactive zinc coating method) radioaktív cink 450 °C-on történő szublimálásáról van szó (szublimálás: szilárd halmazállapotú anyag melegítés hatására bekövetkező gázzá történő átalakulását jelenti, anélkül, hogy közben folyékony állapotot venne fel). A cink lerakódik a felületre. Az eljárás előnye az elektrolitos lerakódással szemben, hogy a próbaelőkészítési idő lecsökken (50 h-ról 3-4 h-ra). A legnagyobb hátránya, hogy különleges óvintézkedések és védőfelszerelések szükségesek a munkához. [12]

**BELSŐ ÉGÉSŰ MOTOROK TRIBOLÓGIÁJA**

**A belső égésű motorokkal szemben támasztott követelmények**

A mobilitás és a közlekedés a fő jellemzője a modern társadalomnak és a gazdasági fejlődésnek. A mobilitással szemben támasztott követelmények olyan sokrétűek, mint az ember maga. A fő fejlődési irányok: urbanizáció, növekvő mobilitás a fejlődő országok nemzetgazdaságában, a szállított áruk mennyiségének rohamos növekedése és a különböző szállítási módok hálózatba rendezése. Az iparosodás óta a járművek fejlesztése ezért mindig is szorosan összefügg az új technikai megoldásokkal és technológiákkal.

A saját járművel történő egyéni személyi közlekedés továbbra is az első helyen szerepel (lásd 8. ábra). [27]

A világban forgalomban lévő járműveknek és mozgó munkagépeknek a száma ugyancsak növekvő tendenciát mutat, és már a milliárdos határt is átlépte. Az évente forgalomba hozott járművek száma a világgazdasági problémák ellenére eléri a 100 milliót. [28]

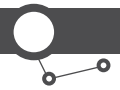
Erre a fejlődésre való tekintettel felvetődik az a kérdés, meddig tartható fenn ez a fejlődési tendencia:

- Milyen mértékben terhelik a járművek a környezetünket?
- Mennyi ideig elegendőek még a rendelkezésre álló (hagyományos) üzemanyagkészletek?

A környezetpolitika válasza ezekre a kérdésekre mindig egyértelmű: az autóiiparnak az elmúlt két évtizedben az egyre szigorodó nemzeti és nemzetközi normáknak megfelelő járműveket kellett

KLIMAGAS	TONNA	ÁTVÁLTÁSI TÉNYEZŐ	TONNA	RÉSZARÁNY
szén-dioxid (CO <sub>2</sub> )	858 000 000	1	858 000 000	87,4%
metángáz (CH <sub>4</sub> )	2 885 000	23	66 335 000	6,8%
kéjgáz (N <sub>2</sub> O)	194 000	296	57 424 000	5,8%
összeg (CO <sub>2</sub> -bez.)			981 779 000	100%

2. táblázat: mért és átszámolt üvegházhatású gázok mennyisége Németországban (2001)



a piacra vinni, lásd **9. ábra**.

A károsanyag-kibocsátás radikális csökkentése mellett a kilencvenes években egy új szempont is a figyelem szempontjába került, miután az úgynevezett klímagázokat tették felelőssé az éghajlat változásáért.

Az 1994-es kiotói konferencia meghatározta a klímagázok körét, és egyúttal meghatározta az átszámítási együtthatókat is.

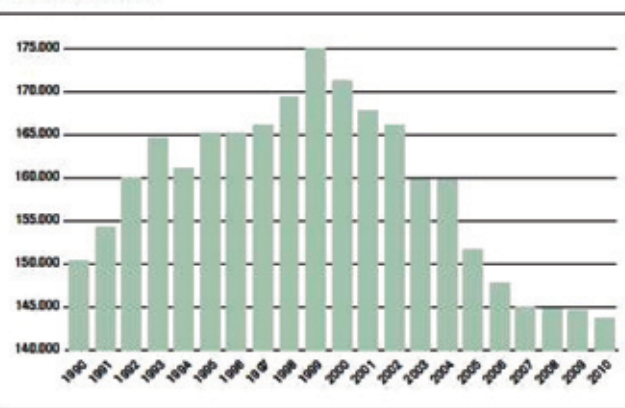
Az európai autógyártók azonnal reagáltak az új kihívásokra. Egy önkéntes kötelezettségvállalás keretében megállapodtak, hogy a járművek úgynevezett flottafogyasztását fokozatosan csökkentve a CO<sub>2</sub>-kibocsátás értékét 2008-ig 140 g/km értékre csökkentik.

A kezdeti kedvező tendenciák után 2002-től kezdve a fejlődés mértéke egyre inkább elmaradt a célkitűzésektől.

2009-ben az Európai Bizottság rendeletben szabályozta a személygépkocsik, majd 2011-ben a 3,5 t alatti könnyű használati járművek CO<sub>2</sub>-kibocsátását. [27]

- Személygépkocsik esetében valamennyi gyártó és importőr számára 2015-ig előírták az átlagos flottakibocsátás 130 g CO<sub>2</sub>/km értékre történő csökkentését. 2020-ig a határérték szintjét 95 g CO<sub>2</sub>/km-ben rögzítették.
- A könnyű használati járművek esetében a megfelelő határértékszintek: 175 g CO<sub>2</sub>/km 2015-ig és 147 g CO<sub>2</sub>/km 2020-ig. A rendelet a fokozatos bevezetés elvére épül (Phasing-in). Ez azt jelenti, hogy a határértéket fokozatosan kell megközelíteni [27]
- SZGK: 2012-től az új gépkocsiflotta 65%-ának, 2013-tól 75%-ának, 2014-től 80%-ának, végül 2015-től a flotta 100%-ának

CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Straßenverkehrs  
Einheiten in 1.000 Tonnen



Quelle: UBA Nationaler Inventarbericht 2011

10. ábra: német közúti forgalom CO<sub>2</sub>-kibocsátásának alakulása [27]

figyelembevétele.

- Könnyű használati járművek: 2014-től a flotta 70%-ának kell a határértékeket teljesíteni, 2015-ben 75%-ának, 2016-ban 80%-ának, 2017-től pedig 100%-ának.

### CO<sub>2</sub>- és sűrűdás-csökkentés

Technikai megoldások a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésére CO<sub>2</sub> az üzemanyag égése során keletkezik az égéstérben: [34]

$$m_{CO_2} = \frac{(0,82 \cdot m_{Tüa} \cdot 0,29 \cdot CO - 0,866 \cdot HC)}{0,273} \quad (6)$$

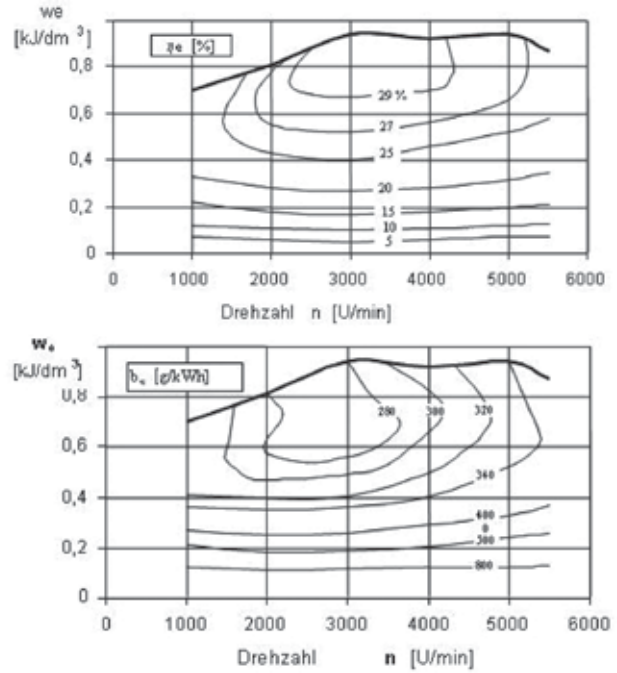
$m_{CO_2}$  az égés során keletkezett CO<sub>2</sub> tömege

$CO$  kibocsátási érték, kipufogógázban mért

$m_{Krst.}$  az elégett üzemanyag tömege

$HC$  kibocsátási érték, kipufogógázban mért

Ebből látható, hogy a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentése a tüzelő-



11. ábra: egy benzinmotor hatásfokának és fogyasztásának jellegzője [31]

anyag-fogyasztás csökkentésével valósítható meg.

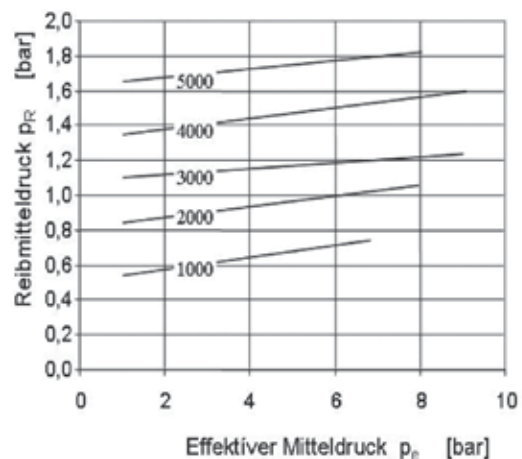
Motoroldalról a következő intézkedésekkel lehet üzemanyag-fogyasztás-csökkentést megvalósítani:

- Downsizing (a hengertérfogat csökkentése)
- Változtatható szelepezérlés
- Hengerlekapcsolás
- Thermomenedzsment
- Szabályozott olajszivattyú
- Stop-Start automatika.

Hogy milyen sikeresen lehet ezt a gyakorlatba átültetni, azt a **10. ábra** mutatja Németország vonatkozásában. Az új járművek forgalomba helyezése, az újonnan fejlesztett, hatékonyabb motorok és a közvetlen súlycsökkentésnek köszönhetően összességében a CO<sub>2</sub>-kibocsátást csökkentették. [27]

A továbbiakban a motoroldali megtakarítási potenciálokra koncentrálnunk.

A **11. ábra** egy benzinmotor hatásfokát és fogyasztásának



12. ábra: mért sűrűdési középnyomás a terhelés és fordulatszám függvényében [32]

jelleggörbét mutatja.

Felismerhető, hogy részterhelésnél, amelyben a modern belső égésű motorok többnyire üzemelnek, a gazdaságosság drasztikusan csökken. Ennek fő oka a mechanikai veszteségek értéke, melyet a motor mozgó alkatrészei között fellépő súrlódás, valamint a segédberendezések (víz-, olaj-, tüzelőanyag- és vákuumszivattyú), hajtásának teljesítményszükséglete határoz meg. [31]

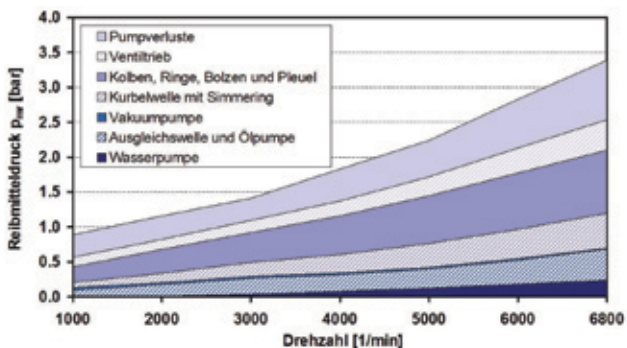
A mechanikai veszteségek nagyságát kevésbé a terhelés (effektív középnyomás), mint inkább a fordulatszám értéke befolyásolja, lásd **12. ábra**. [32]

Motor: V Löklet: 1.3 Liter,  $\epsilon=8,2$ , hengerek száma: 4, löket/furat: 0,96, paraméter: fordulatszám

A **13. ábra**, az egyes részegységek mechanikai veszteségének arányát mutatja.

Motorüzemben a forgattyús mechanizmus (főtengely, hajtórúd, dugattyú, dugattyúgyűrű, kiegyenlítőtengely) és a szelepezérlés elemei felelősek elsősorban a súrlódási veszteségekért.

A súrlódásnak két szempontból is nagy jelentősége van:



13. ábra: az egyes részegységek mechanikus veszteségének aránya [33]

- A súrlódás következtében súrlódási veszteség keletkezik, amely a hatásfokot csökkenti
- A súrlódás során keletkező erő és hő a két érintkező felület között károsodási folyamatokat (kopás) indít el, amely az alkatrész működési képességét negatívan befolyásolja.

**Technikai megoldások a motorban található tribológiai rendszerek optimalására**

A motorban üzem során a forgattyús hajtás egyes elemein és a dugattyúcsoporton, a szelepezérlésen, a lánc- vagy szíjhajtáson és a segédberendezéseken, mint például vízszivattyú, olajszivattyú, generátor stb. mechanikai veszteség lép fel.

A hatásfok javításának hatékony módja ezen veszteségek következetes, módszeres csökkentése.

**a) A forgattyús mechanizmus súrlódási veszteségének csökkentése**

A motor súrlódási veszteségének túlnyomó részét a forgattyús hajtómű szolgáltatja. A hajtómű egyes elemei (dugattyú, dugattyúgyűrűk, hajtórúd, forgattyús tengely) által okozott veszteségek százalékos megoszlását a 14. ábra mutatja. [53]

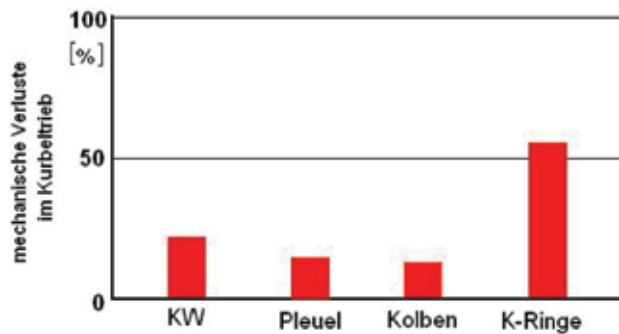
**A dugattyú, dugattyúgyűrű-hengerfal tribológiai rendszere**

A tribológiai rendszer különleges problémája, hogy egyszerre több körülménynek is meg kell felelnie.

*Megvezetés:*

A dugattyú a hengerfuratban, a gáz- és tömegerők hatására egyenes vonalú alternáló mozgást végez, miközben az érintkezési felületeket változó nagyságú normálerők (FN) terhelik.

*Tömítés:*



14. ábra: mechanikus veszteség eloszlása a forgattyús hajtásban [53]

A dugattyúgyűrű feladata az égéstér tömítése, miközben a gyűrű hengerfalon axiális irányú (úgynevezett primer) a gyűrűhorony lapfelülete pedig radiális irányú (úgynevezett szekunder) csúszó, tehát súrlódást kiváltó mozgást végez.

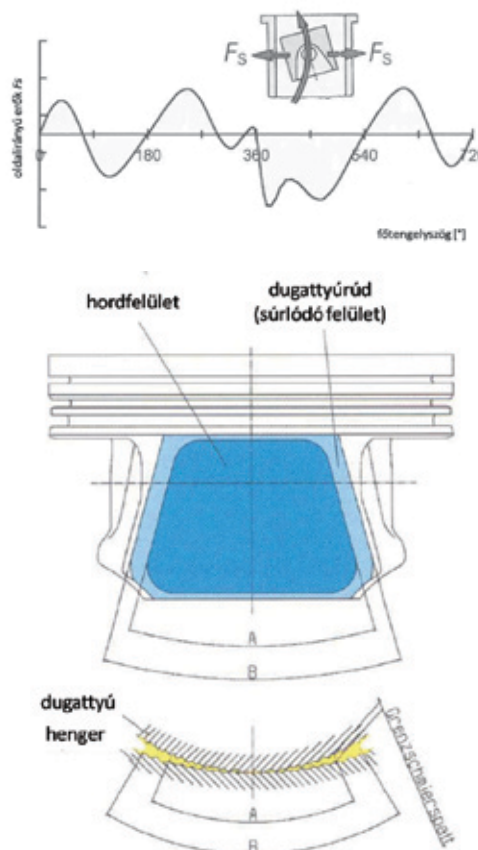
*Hőelvezetés:*

A dugattyúgyűrűk feladata, hogy a dugattyú túlmelegedésének megakadályozása érdekében a dugattyúba fellépő hőmennyiség egy részét a hűtött hengerfalon keresztül elvezesse. Az olajfilm a két alkatrész közötti hőátadásban döntő szerepet játszik.

*Az olajháztartás szabályozása*

A dugattyúgyűrűk feladata, hogy a dugattyúcsoport és a hengerfal közötti súrlódó erők csökkentése érdekében egy vékony, de összefüggő olajfilmről gondoskodjon, másrészt a felesleges olajmennyiséget a henger felületéről eltávolítsa.

*Dugattyú-hengerfal*



15. ábra: oldalirányú erők alakulása egy négyütemű motornál [54]



A dugattyú és hengerfal közötti súrlódási feltételeket elsősorban a mikro és makro geometriai paraméterek (érdesség, a dugattyú és a henger alakja), a pillanatnyi terhelések (oldalirányú- vagy normál erő), a sebesség, valamint az alkalmazott kenőolaj hőmérséklettől is függő tulajdonságai határozzák meg.

Az oldalirányú erők hatására a dugattyú a hengerfuratban a hengerfurat tengelyére merőleges irányba másodlagos (haladó és billenő) mozgást végez. [57]

A tényleges terhelt hordfelület szélessége viszonylag szűk sávra korlátozódik. A súrlódási veszteségek csökkentése érdekében a nagyfordulatú Otto-motorok dugattyúinál a dugattyúszár szélességét jelentős mértékben lecsökkentik, lásd **15. ábra**.

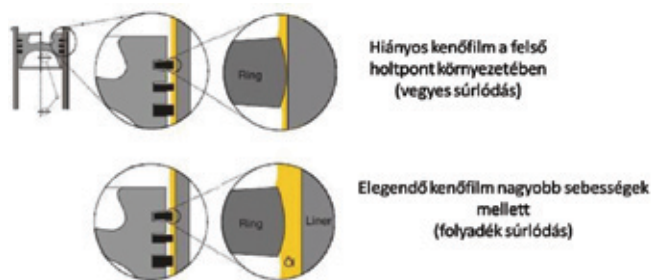
A nagyterhelésű dízelmotorok esetében ez az intézkedés szilárdsági problémák miatt nem alkalmazható.

### Dugattyúgyűrű-hengerfal

A dugattyúgyűrű-hengerfal rendszer nemcsak a nagy súrlódási részarány miatt (több mint 50%), amely a fordulatszámtól, hőmérséklettől és terheléstől függően változik, hanem a motor élettartamára kifejtett hatása miatt is jelentős.

A dugattyú oszcilláló mozgása miatt a gyűrűk a felső, valamint az alsó holtpont környezetében a kedvezőtlen vegyes súrlódásnak megfelelő feltételek mellett dolgoznak, lásd **16. ábra**.

A holtpontok környezetében kialakuló kedvezőtlen kinematikai



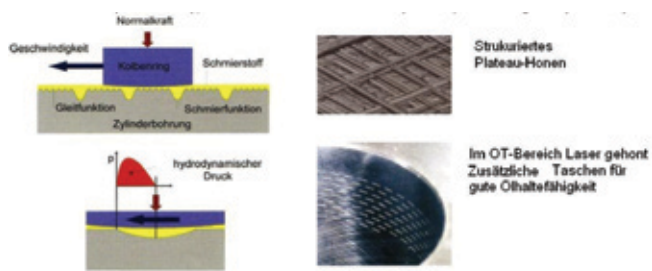
16. ábra: tipikus kenési állapotok a különböző dugattyúpozíciókban [34]

feltételek ellenére elvárt, hogy a hosszú élettartamot biztosítsuk, egyrészt a különböző hengeranyagoknál különleges megmunkálási technológiákat kell alkalmazni, ezáltal a kritikus területeken elegendő olajtartó képesség érhető el, másrészt a gyűrűket jellegzetes geometriával és bevonatokkal kell ellátni.

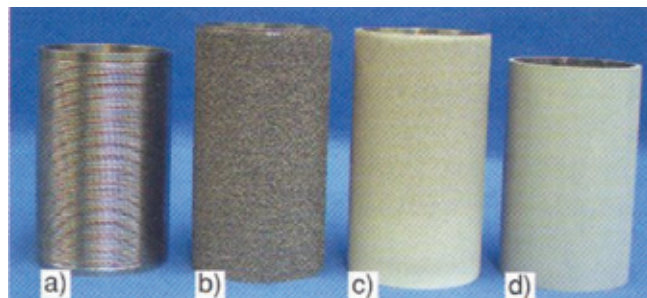
Az öntöttvas hengerek esetében kétfokozatú úgynevezett platóhónolást alkalmaznak, esetenként a felső holtpont környezetében lézertűréssel kiegészítve. Így biztosítható a felület kielégítő olajtároló képessége a megfelelő struktúrájú hordfelület mellett, lásd **17. ábra**.

Az utóbbi 20 esztendőben a súrlódás csökkentése érdekében megfigyelhető az érdességi paraméterek tendenciós csökkenése.

A törekvések során, az üzemanyag-fogyasztás, valamint a



17. ábra: különböző felületi szerkezetek alkalmazása szürkeöntvény hengerfalakon [51]



18. ábra: hengerperselyek [52] a) szürkeöntvény, b), c) hibrid, d) Al-Si

CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentése miatt, könnyűfém hengertömböket alkalmaznak. A kopásállóbb üzem számára különleges hengerperselyeket használnak, lásd **18. ábra**.

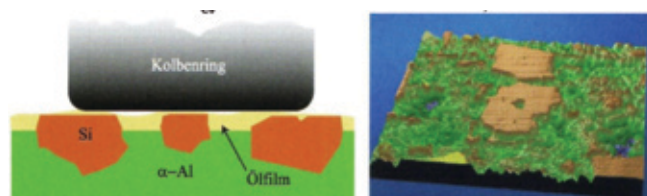
Egy másik lehetőség az úgynevezett primér szilíciumkristályoknak a feltárása. Ennél az eljárásnál a finomhónolás után a szilíciumkristályok között az alumínium mátrixot 1-2 μm mélységben eltávolítják. Ily módon a felület olajtároló képessége javítható, és a szabadabbá vált kemény szilíciumkristályok egy kopásálló felületi szerkezetet képeznek. [56]

A feltárás elektrokémiai vagy mechanikus úton hónolással történik, lásd **19. ábra**.

A dugattyúgyűrűknek összetett feladatot kell teljesíteni: a nagy nyomású hengertér tömítését, dugattyú felől a hűtött hengerfal irányába történő hőelvezetést és az olajellátás szabályozását. Ezeknek a feladatoknak a teljesítése csak különböző módon kialakított dugattyúgyűrűkkel lehetséges.

Mivel a gyűrűk száma és az érintkező felületek nagysága nagymértékben befolyásolja a súrlódási veszteségeket, az utóbbi évtizedekben egyértelműen megfigyelhetők a következő tendenciák:

- A dugattyúgyűrűk számának a csökkentése



19. ábra: kenőrendszer modellje (balra: szabadabbá vált hipereutektikus AlSi hengerfelület topográfiaja)

- A gyűrű magasságának a csökkentése
- Egy Otto-motor jellegzetes gyűrűkészletét mutatja be a **20. ábra**.

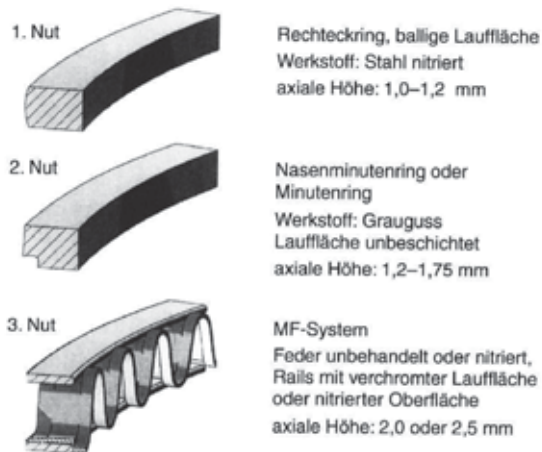
A csökkentett érintkezési felületeken nagy terhelések alakulnak ki, amelyek csak különleges kopásálló bevonattal kompenzálhatók. A futófelületre különböző védőbevonatokat hordanak fel: króm, króm-kerámia, króm-gyémánt, molibdén- és PVD-bevonat.

### Főtengely fő- és hajtórúdcsapágyai

A fő- és hajtórúdcsapágyakat gáz- és tömegerők terhelik. Hagymányosan vékony falú hidrodinamikussá siklócsapágyakat használnak. A csapágyaknak egy sor különböző, egymásnak esetenként ellentmondó követelménynek kell megfelelniük. A csapágy nagy mechanikai szilárdsága és a „beágyazóképesség” például egymástól eltérő anyagjellemzőket feltételeznek. A probléma megoldására többrétegű csapágyakat alkalmaznak, lásd **21. ábra**.

A nagy teljesítményű járműmotorokban fellépő igénybevételeknek a többrétegű konstrukcióval és célirányos anyagkompozitok alkalmazásával általában meg lehetett felelni.

A problémát jelenleg az okozza, hogy a 2000/53/EG EU-ren-



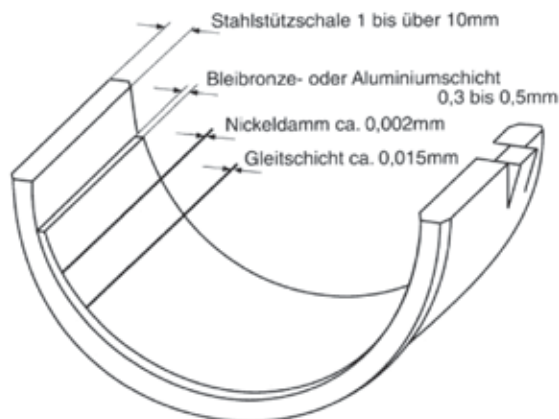
20. ábra: egy modern benzinmotor tipikus dugattyúgyűrűi [55]

delet előírja az ólomtartalmú komponensek fokozatos korlátozását.

Az ólommentes csapágyanyagok fejlesztése és bevezetése különböző okok miatt problémás, legalábbis technikailag nehéz:

- Az ólom esetében egy olyan összetevőről kell lemondani, melynek alkalmazásával a csapágy szűkségfutási jellemzői és a beágyazóképessége eddig különösen kedvezően volt befolyásolható.
- Az ólom kiváltását akkor kell megvalósítani, amikor a motorcsapágyak terhelése a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentése érdekében bevezetett intézkedések következtében (downsizing) növekedni fog.
- A könnyűszerkezeti anyagok alkalmazása a modern, kompakt motorszerkezetekben nagyobb mértékű alakváltozásokat okozhatnak, amelyeket kisebb méretű csapágyaknak kell felvenni.
- A motorban alkalmazott kenőolaj mennyiségének csökkentése, az olaj viszkozitásának csökkentése (könnyű futató olajok), valamint az olajcsere-periódus meghosszabbítása a csapágy üzemi viszonyait negatívan befolyásolhatja.
- A fogyasztás csökkentése érdekében bevezetett Start-Stop rendszer a megsokszorozódott indítási folyamatok eredményeképpen járulékos igénybevételt okoz összességében meghosszabbodott vegyes súrlódásfázis mellett.

Tekintélyes csapágygyártóknál már évek óta intenzív kutatási és fejlesztési munka folyik a motorcsapágyak ólomtartalmának



21. ábra: csapágy elvi felépítése [53]

csökkentése és az ólom elkerülése érdekében. Egy jellemző példája ezen törekvéseknek a Federal Mogul G-188-as csapágya, lásd **22. ábra**.

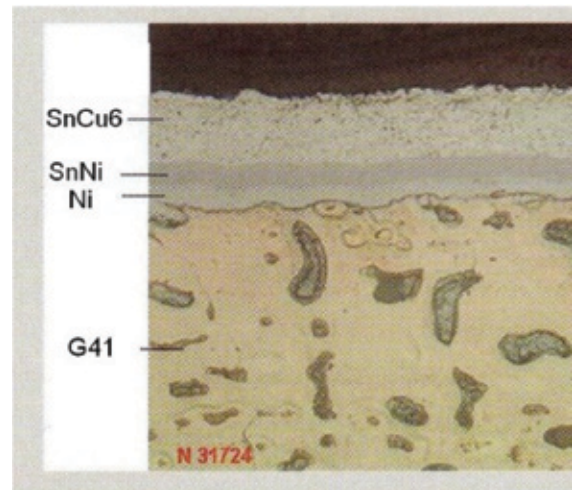
Úgy tűnik, hogy a jelenlegi siklócsapágy-konstrukciókkal és anyagkombinációkkal a súrlódáscsökkentés technikai és technológiai lehetőségeit kimerítettük.

Ahol a terhelések és a beépítési feltételek engedik, a siklócsapágyakat görgőcsapágyakkal helyettesíthetjük. Ezzel a súrlódási veszteségek jelentős mértékben csökkenthetők, lásd **23. ábra**

### b) Szelepezérlés súrlódási vesztesége

A járműmotorokban különböző szelepezérlési elrendezési változatokat használnak. A **24. ábra** áttekintést ad a különböző elrendezési formákról.

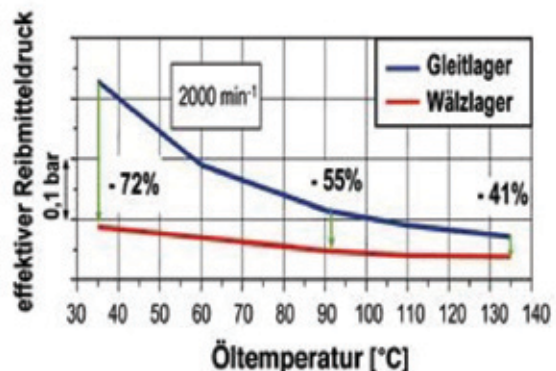
Az egyes változatoknál mind a vezérműtengely- és hibacsapágyazásban, mind a bütők és a vele együttműködő modul között csúszó és gördülő érintkezés is megvalósítható.



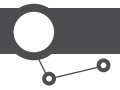
- Schicht: Stahlrücken
- Schicht: Gussbronzeschicht G41
- Schicht: Nickelschicht
- Schicht: Dämm aus Zinn und Nickel
- Schicht: Gleitschicht bestehend aus reinem Zinn, mit ein gebetteten harten Zinn-Kupfer-Partikeln (SnCu40)

22. ábra: siklócsapágy felépítése (Federal Mogul) [58]

A súrlódási veszteségek csökkentése a mozgó alkatrészek tömegének csökkentésével és a csúszó súrlódás helyett görgős átviteli modulok alkalmazásával valósítható meg, lásd **25. ábra**.

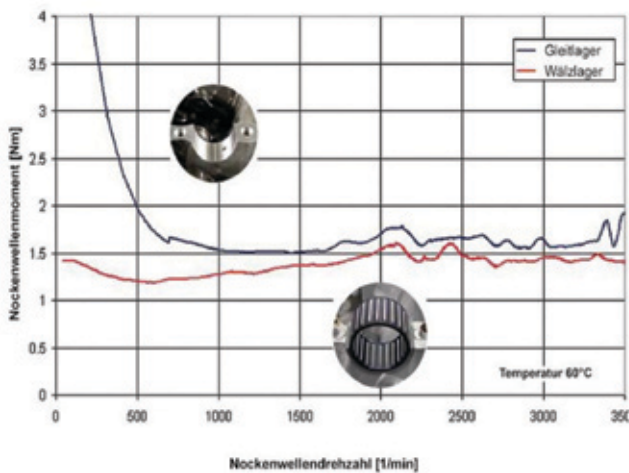
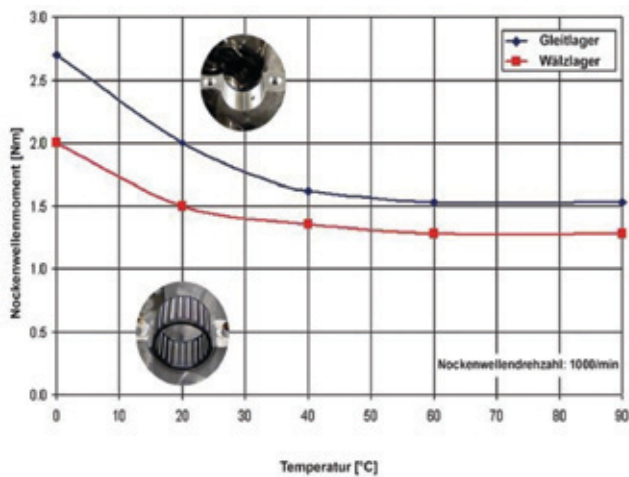


23. ábra: súrlódási veszteség csökkentése görgőcsapágy alkalmazásával [35]



	I.	II.	III.	IV.
Konstruktions-variante				
Bezeichnung	OHV	OHC	OHC	OHC
Typisches Modul	Stößel Stange	Kipphebel	Schwinghebel	Tassenstößel

24. ábra: szelepvezérlés-elrendezések [31]



25. ábra: vezérműtengely hajtónyomatékának csökkentése gördülő-csapágy alkalmazásával [36]

### ÁTTEKINTÉS A RADIONUKLEÁCIÓS TECHNIKA BELSŐ ÉGÉSŰ MOTOROKON TÖRTÉNŐ ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEIRŐL

Az RNT-módszer többek között a dugattyúgyűrűn, a hengerfalon, fő- és hajtórúdcsapágyon, a vezérműtengely bütyökelületén, a vezérműláncon stb. fellépő kopás meghatározására használható. [16]-[18], [24], [38]-[41], [44], [45], [50]

Katzenmeier az RNT segítségével, a siklócsapágyak kopását mérte, a kopást befolyásoló felületi érdességnek és az érintkező felületek anyagpárosításának a hatását vizsgálta statikus és dinamikus terhelés alatt. A mérések eredményei a kopás- és bejáratás viselkedéséről adnak információt. Feltételeket vezetett le a megengedett terhelést, ill. kenőrés nagyságát illetően, és megállapította, hogy ezekkel a feltételekkel a csapágy megfelelő bejáratása és biztonságos üzeme szavatolható. [18]

Kehrwald és Gervé üzem közben vizsgálta a siklócsapágyakat folyamatos kopásmérés segítségével. Megállapították, hogy a tribomutáció a későbbi kopásviselkedésre nagyobb hatással lehet, mint a tervezési szakaszban előre megadott felületi érdesség és legkisebb kenőrés. [39]

Tribomutáció alatt azt az anyagváltozást értjük, amely a súrlódó érintkezés következtében a felületi tartományba bejutó, térben és időben megoszló energiámmennyiség okoz. Tribomutáció egyaránt megtalálható a gyártásban (végső megmunkálás), a bejáratás szakaszában és az üzemi működés ideje alatt is.

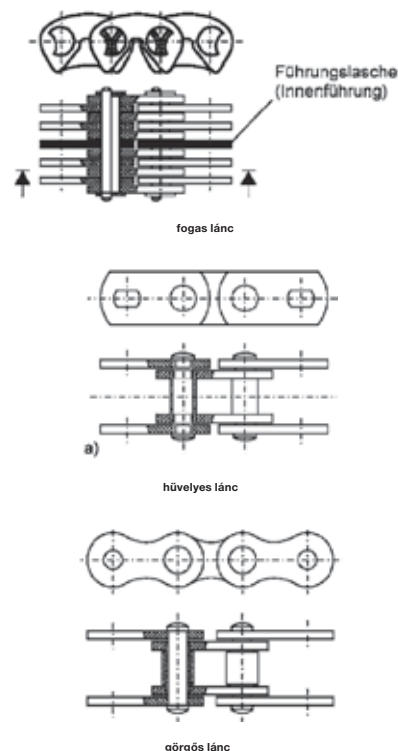
Kaiser egy hathengeres dízelmotoron vizsgálta az RNT segítségével a dugattyúcsoport súrlódási veszteségeit. Munkája során különböző alakú és anyagú dugattyúgyűrűk és gyűrűhoronyok súrlódásra kifejtett hatásával foglalkozott. Az előbb felsorolt tényezők mellett a fordulatszám, terhelés és az olaj hőmérsékletének a hatását is vizsgálta. Megállapította, hogy a különböző anyagpárosítású dugattyúcsoportnál ( ) a kopási viselkedések között jelentős eltérés adódott. [17]

Volz a dízelmotor-dugattyú csoport számára egy bejáratási programot optimalizált, amelyben a bejáratás feltételeinek (teljesítmény, fajlagos üzemanyag- és olajfogyasztás), a (dugattyúgyűrű-hengerfal) kopásra kifejtett hatásait tárta fel. [45]

### A VEZÉRMŰLÁNC KOPÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSA RNT SEGÍTSÉGÉVEL

A lánc esetében, a súrlódás és kopás jelentős része az alkatrészek érintkezésében, a tribológiai partnerek között (fogas láncnál: láncsap és láncszem; görgős láncnál: görgő és a lánckerék; hüvelyes láncnál: hüvely és a lánckerék) keletkezik. További súrlódás található a lánckerék fogazata és a lánc kapcsolatánál, valamint a lánc és a láncvezetők között. A különböző lánc típusokat a **26. ábra** mutatja be.

Annak érdekében, hogy a láncsap és láncszem között, az érintkezésnél keletkező kopást – ami a láncnyúlásért felelős – a



26. ábra: lánc típusok [47]



27. ábra: Láncajtás súrlódási vesztesége (statikus és dinamikus terhelés) [48]

radionukleációs technika segítségével meghatározzuk a tribológiai rendszer elemeit (láncsap, láncszem) aktiválni kell.

Mivel a belső égésű motorok vezérműlánc olajtérben dolgozik, a mérések során a szűrőkoncentrációs eljárást alkalmaztuk.

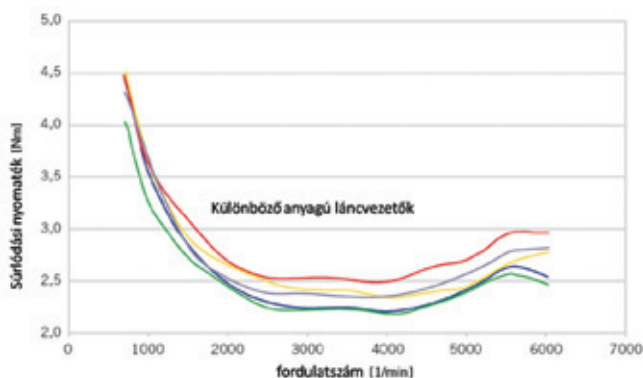
## SÚRLÓDÁS ÉS KOPÁS ALAPJA, A TRIBOLÓGIAI RENDSZER BEMUTATÁSA

A láncajtás súrlódási veszteségének nagysága függ a terhelés módjától (statikus, dinamikus).

„A lánc elrendezése, az alkalmazott lánc típus, a láncvezetőknél alkalmazott anyagok, valamint a láncajtás kenése befolyásolhatják a statikus súrlódási veszteséget. A főtengelyről és szeleplevezérlésből származó gerjesztések, a láncfeszítő csillapítása, a láncajtás komponenseinek tömeg- és merevségi viszonyai, valamint a befecskendezőszivattyú fázishelyzete és a lánckerekek makrogeometriája főképp a súrlódási veszteség dinamikus részét befolyásolja.” [48]

Statikus és dinamikus terhelésből származó súrlódási veszteségeket ábrázol a 27. ábra a motor fordulatszámának függvényében.

A különböző lánc típusok súrlódásának vizsgálatakor (strip-módszer) figyelembe kell venni, hogy a vezérműlánc vonala és a láncvezetőknél alkalmazott sugarak változatlanok maradjanak. Ha a láncvezető geometriájában eltérés van, akkor az közvetlen kihatással van a normálerőre, azon keresztül a felületek között kialakuló súrlódóerőre. [48]



28. ábra: Láncvezető különböző anyagainak hatása a súrlódási viszonyokra [48]

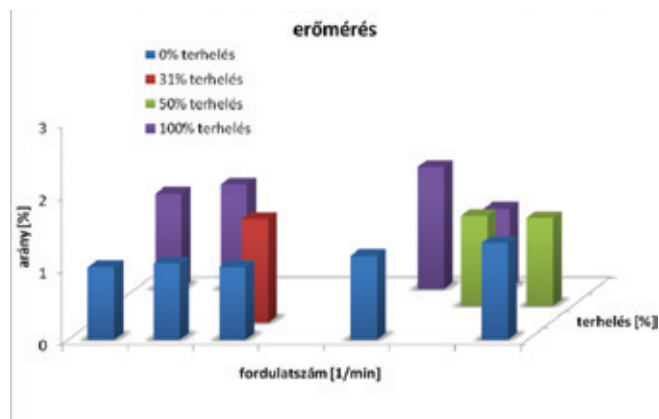
A láncsap bevonatolásával lehetőség nyílik a súrlódás- és kopásállóság javítására. Az IWIS kifejlesztett egy új eljárást (rég: IC-technológia, új: IC+-technológia), amellyel 10–20% javulás érhető el (mindkét eljárásnál a láncsapot krómkarbid (10–20 µm) bevonattal látják el). [48]

A láncszem megmunkálásának optimalizálásával (finomsajtol, utánvágott) lehetőség nyílik a súrlódási veszteség további csökkentésére. [48]

További tribológiai rendszer található a lánc és a láncvezetők között. Anyagként PA66-ot vagy PA46-ot alkalmaznak, amelyek fröccsöntéssel jó felületi minőségben állíthatók elő és mechanikai tulajdonságaik is jók. [48]

A piacon megtalálható anyagkombinációkat tesztelt az IWIS, és a súrlódási viselkedések közötti különbséget vizsgálta. Ezekben a kísérletekben a kenőviszonyoknak és az olajhőmérsékletnek a hatását mérték. Ha az érintkező alkatrészek (lánc és láncvezető) anyagkiválasztása megfelelő, akkor akár 10% súrlódásvesztés-csökkenés érhető el. További lehetőség, amellyel a triborendszer befolyásolható, a láncvezetők topográfiájának optimalizálása. [48]

A súrlódás csökkentésének egy másik módja a láncgörbe optimális megtervezése. A tervezőnek kerülnie kell az erősen görbült láncvezetőket, ezáltal a normálerő csökkenthető. Ennek köszönhetően kisebb súrlódóerő adódik. Egy szimuláció segítségével a láncgörbe szerkezetét optimalizálták és a láncfeszítő geometriájának változásával, valamint az olajellátás egyidejű javításával a súrlódási veszteség akár 70%-os csökkentése is elérhető. [48]



29. ábra: Láncerők (adott fordulatszámon különböző terhelés hatására fellépő min. és max. erő)

## LÁNCERŐ MÉRÉSE

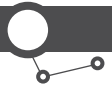
Ahogy fent említettük, a lánc súrlódás- és kopásviszonya a terheléstől függ. Ahhoz, hogy a terhelést meghatározzuk, a lánc láncterőmérést végeztünk.

A láncterőt befolyásoló terhelések a főtengely lengéseiből és a vezérműtengelyen a szelepek működtetéséből származó nyomatékból származnak.

A mérések során a hidraulikus láncfeszítő elmozdulását, a láncfeszítőben kialakuló olajnyomást, valamint a vezetőelemek gyorsulását mértük és ezen adatokból határoztuk meg a feszítőelem csillapítását és a létrejövő normálerőt.

A vezetőelemen fellépő normálerő alapján a láncterő, a befolyásoló paraméterek figyelembevételével, egy MATLAB program segítségével számítható.

Az erők arányát a 29. ábra mutatja be. A diagram, az adott fordulatszámon változó terhelés mellett fellépő minimum és ma-



ximum erőnek a viszonyát ábrázolja. Az erőminimum 1000 1/min fordulaton terheletlen állapot mellett jelentkezik.

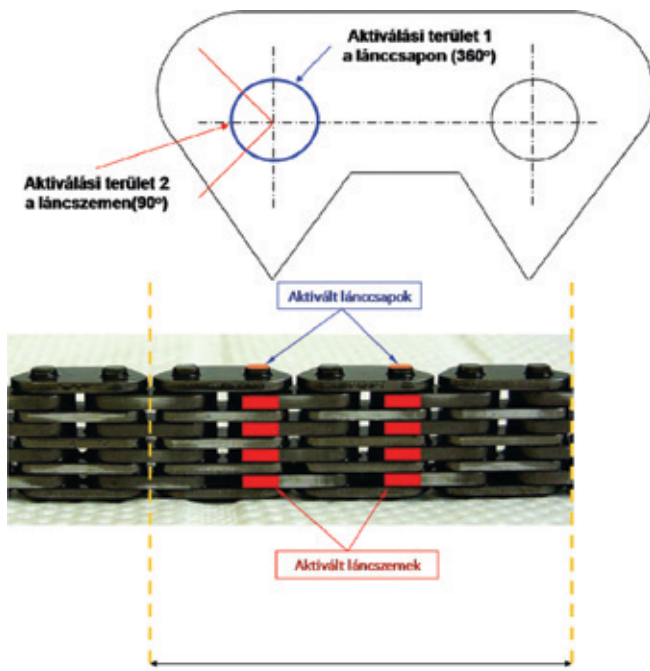
Értékelés a kopásmérés eredményei után adható, ahol a kopássebesség változását ábrázoljuk.

### LÁNC ALKATRÉSZEINEK AKTIVÁLÁSA

Ahogy az előző fejezetben bemutattuk, a lánchajtásban több olyan triborendszer is található, ahol a lánc súrlódási vesztesége csökkenthető.

A következőekben bemutatásra kerülő kopásmérés során a lánccsap és láncszem közötti triborendszert vizsgáltuk. Ez a kopás a lánc valamennyi érintkezési pontján összegezve felelős a vézerműlánc nyúlásáért.

A kísérletben két lánccsap 360°-ban és nyolc láncszem 90°-os tartományban lett aktiválva. A lánccsap egy kb. 10 µm vastag vanádiumbevonattal rendelkezik. A lánccsap vanádiumbevonatából Cr-51 nuklid, míg a láncszem vasrészéből Co-56 nuklid hozható létre (lásd **1. táblázat** és a következő oldalak). Az aktivált területet a **30. ábra** mutatja be.



30. ábra: lánc aktiválása. Fent: a lánccsap és láncszem aktivált területe; lent: aktivált alkatrészek helyzete

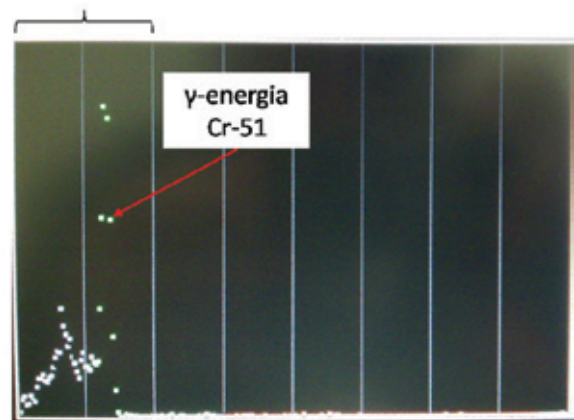
A létrehozott nuklidok különböző tulajdonságokkal rendelkeznek. A Cr-51 gammaenergiája 320 keV. Ez a háttérsugárzás tartományába esik, ami a pontos kiértékelést megnehezíti. A nuklid spektruma a **31. ábrán** látható.

A Co-56 egy béta-sugárzó (511 keV) és több gammaenergiával rendelkezik (847 keV, 1238 keV, 1771 keV). A nuklid spektruma a **32. ábrán** látható.

### FELÜLETEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Figyelembe kell venni, hogy a kopás az RNT-mérés során egy térbeli átlagérték, ami az aktivált felületről leváló részecskékből határozható meg. Ahhoz, hogy a kopás térbeli eloszlását az aktivált tartományban megítélhessük, a vizsgálandó alkatrészek profilját a kísérlet előtt és után mérjük, majd összehasonlítjuk. A

### háttérsugárzás (Compton-hatás)



31. ábra: Cr-51 spektruma

lánccsapon és a láncszemen a profilmérést 0° és 270°-nál hajtjuk végre (lásd **34. ábra**).

Az aktivált lánccsap profiljait a **35. ábra**, az aktivált láncszemek profilját a **36. ábra** mutatja be.

A járatás utáni visszamérések eredményeit a **37. ábra** és **38. ábra** mutatja be. A vizsgálatok után a lánccsapprofil változása nem értékelhető, ugyanis a lánccsap eredeti mérési pontjai (0° és 270°) nem azonosíthatók.

A láncelemeknél a mérési helyek újból megtalálhatók, így a profilmérési eredményei egymással összehasonlíthatók. Ahogy a **37. ábra** mutatja, az alkatrész megmunkálása után visszamaradó felületi egyenetlensége kisimult.

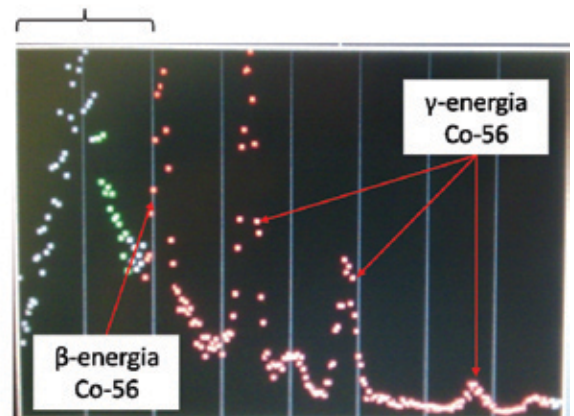
### EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

#### Bejáratás alatt lejátszódó tribomutáció

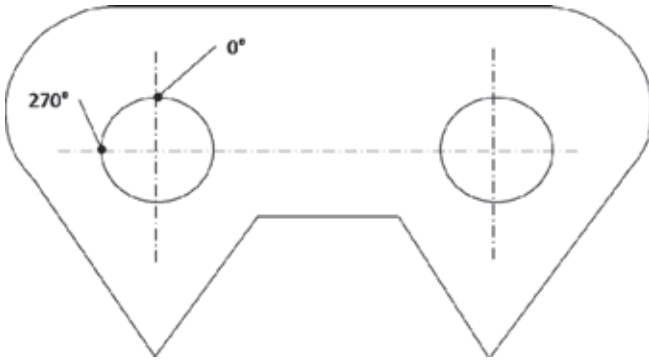
Az az energia, amely a súrlódás során a felületbe bejut, három részre osztható fel.

A súrlódás által igénybe vett felületről leváló részecskék számára szükséges energiamennyiség ( $E_w$ ), amely a részecskék kötési energiájának felel meg. [39]

### háttérsugárzás (Compton-hatás)



32. ábra: Co-56 spektruma



33. ábra: profilmérés helyei a láncszem és lánccsapon

A bevitt energia ( $E$ ) második része az anyag tribomutációjára szolgál. [39]

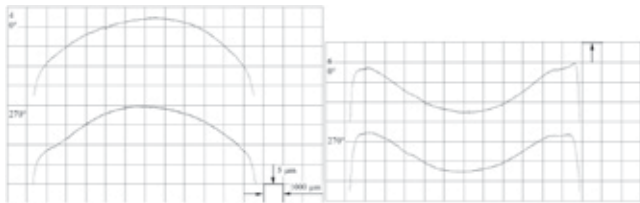
A tribomutáció a felületközeleli rétegek súrlódási energia által létrehozott változása. A változás új elemkeveréket, kémiai kötések változását vagy anyagszerkezeti változásokat hozhat létre. Az alkatrészek megmunkálása közben, a megmunkálási paraméterek változtatásával is létrehozható tribomutáció, amely a bejáratást segíti.

A bevitt energia harmadik része hővé alakul. [39]

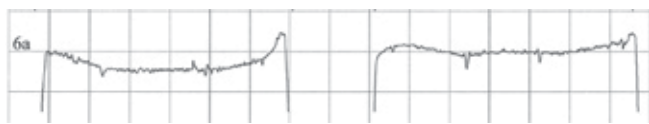
$$E_R = E_Q + E_{TM} + E_W, \quad (7)$$

- $E_R$  súrlódási energia
- $E_{TM}$  tribomutáció
- $E_Q$  hőenergia
- $E_W$  kopásrészecskék kötési energiája

A bejáratás során mérhető kopás megmutatja, hogy a triboszerbe bevitt energia elegendő-e és a bejáratás alatt a felüle-



34. ábra: profilmérés helyei a láncszemen és lánccsapon



35. ábra: lánccsap profilja a mérés kezdetekor

tek a tribomutáció hatására megfelelően kondicionálódtak-e. Ha ez a bevitt energia nem elegendő, akkor a kopás egy nem degresszív vagy legalább egy enyhén progresszív (viszonylag magas gradienssel) görbe segítségével írható le (lásd 38. ábra).

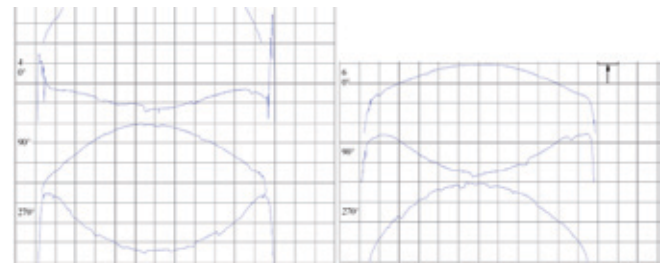
Egy jó bejáratás azzal jellemezhető, hogy a kezdeti magas kopássebesség a kezdet után gyorsan lecsökken, és egy közel állandó kopássebességre áll be. A bejáratás alatt lejátszódó kopásgörbe, a következő függvényvel írható le. [44]

$$w = c + \frac{\delta w_e}{\delta t} + a_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{b_1}}\right) + a_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{b_2}}\right), \quad (8)$$

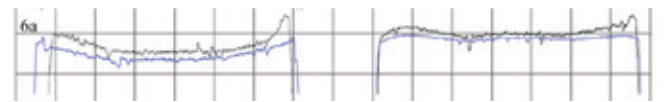
- $a_1; a_2; b_1; b_2$  Fittparameter
- $c$  konstans
- $w_e$  bejáratás kopása
- $w$  kopás

A láncszem kopásának lefolyása egy tipikus bejáratási kopást mutat, amelynél a kezdeti kopássebesség nagy, majd az érintkező zónából való anyagleválás lecsökken, lásd 40. ábra. Az ábrán a mért kopás, valamint a 8 egyenlettel számítható kopás látható.

A lánccsap (Cr-51), mint ahogy a 41. ábrán a láncszemmel összehasonlítva látható, a bejáratás alatt a kopásértékek nagymértékű ingadozását mutatja, ami – ahogy előbbi fejezetekben kifejtettük – várható volt.



36. ábra: láncszem profilja a mérés kezdetekor

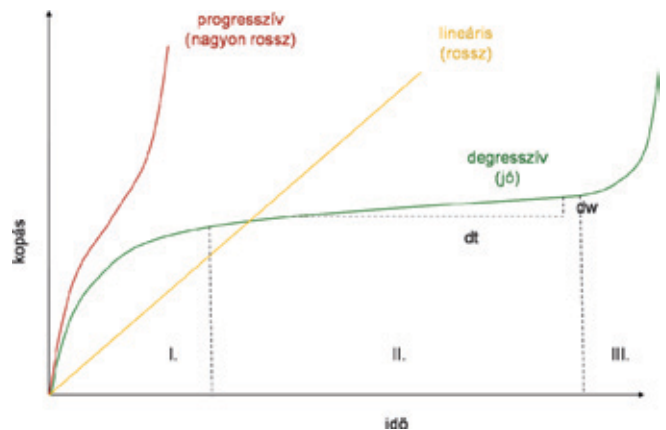


37. ábra: lánccsap profilja a kísérlet után

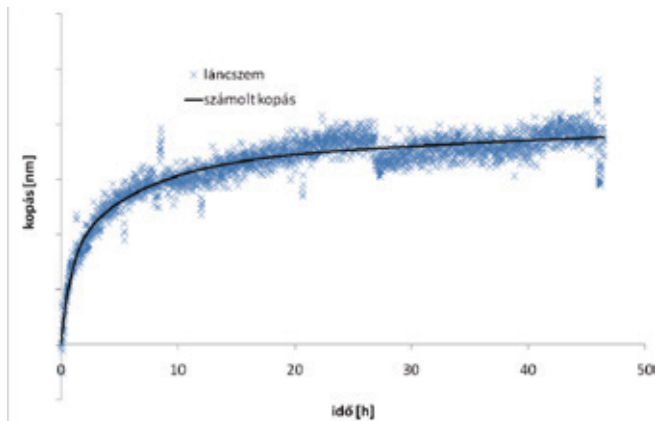
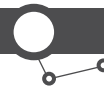
## KOPÁSSEBESSÉGEK MEGHATÁROZÁSA FORDULATSZÁM-TERHELÉS JELLEGMEZŐN

A bejáratás utána fordulatszám-terhelés változtatásával különböző munkapontokon mértük a kopássebességet 90 °C-ra kondicionált olajjal.

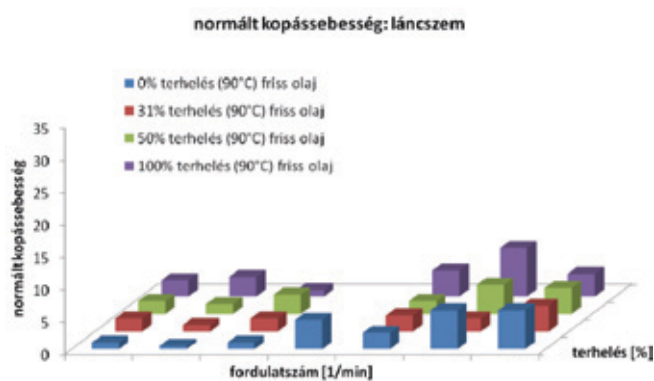
A lánccsapon minden terhelésnél egy tendencia figyelhető meg. A kopássebesség emelkedő fordulatszám mellett növekszik (lásd 42. ábra). Magas fordulatszám-tartományban a kopássebesség közel kétszerese az alacsony fordulatszám-tartományban mért értékekhez képest. Ugyancsak megfigyelhető az a tendencia, hogy emelkedő terhelés mellett a kopássebesség, ha nem is nagymértékben, növekszik. A legnagyobb kopássebesség 5900 1/min-es 100% terhelés mellett jelentkezik.



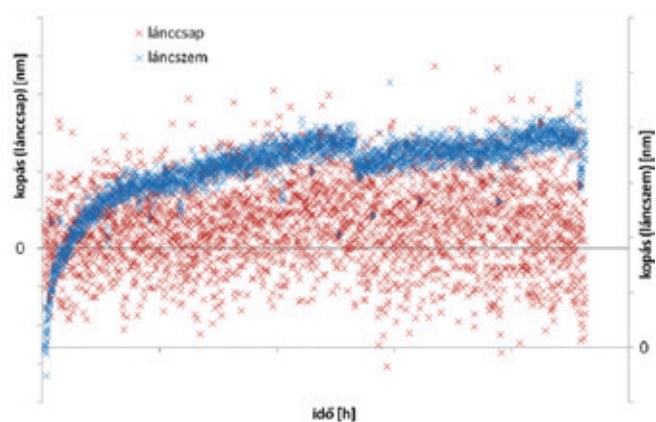
38. ábra: kopásgörbék elvi lefutása



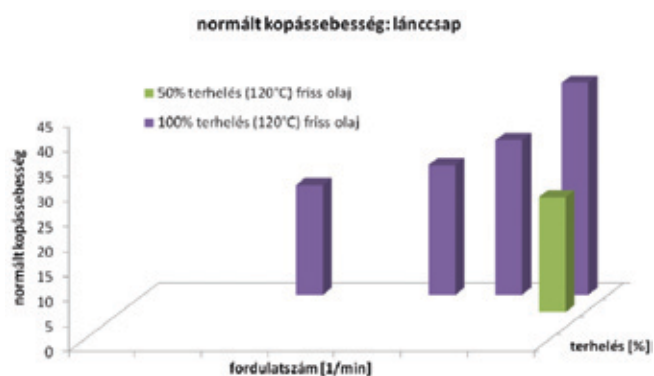
39. ábra: láncszem kopása a bejáratás alatt



42. ábra: láncszem kopássebessége – 75 h járatás után 90 °C-os olajjal



40. ábra: láncscsap és láncszem kopása a bejáratás alatt



43. ábra: láncszem kopássebessége – 75 h járatás után 90 °C-os olajjal

A következő ábrákon (41-48) a kopássebesség normált értéke került ábrázolásra. Az értékeket az 1000 1/min 0% terhelésű 90 °C-ra kondicionált olajjal, a láncszemen mért kopássebességre vonatkoztattuk. ( $\dot{w}_{norm}(1000/min, 0\%, 90^\circ C, F-rischöl, Lasche)=1$ )

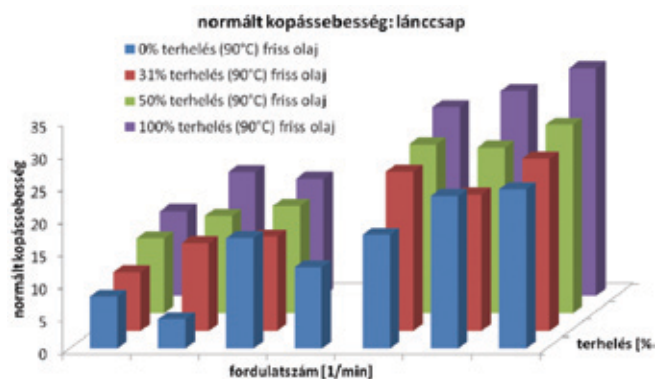
Hasonló tendencia, mint a láncscsapnál, a láncszemen nem figyelhető meg, lásd 43. ábra. A vanádiumbevonattal rendelkező láncscsap kopássebessége jelentősen nagyobb, mint a bevonattal nem rendelkező láncszemé.

A 90 °C-os olajjal történt mérés után öt munkapontban vizsgáltuk az olaj hőmérséklet-változásának a hatását. Az olaj 120 °C-ra

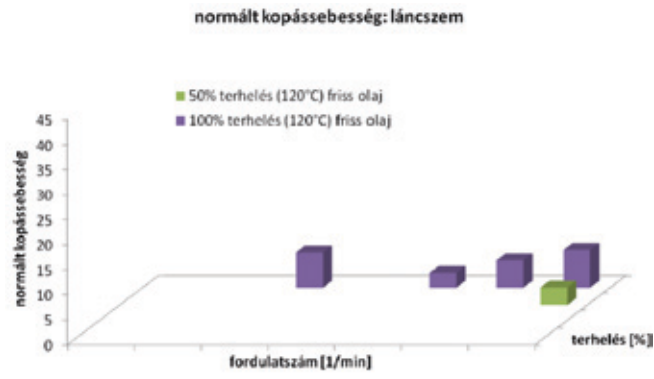
történő kondicionálása mellett kialakuló kopássebességek a 44. ábrán és 45. ábrán láthatóak. Sem a láncscsap, sem a láncszem nem mutat érzékenységet a megnövekedett hőmérsékletre, lásd 48. ábra és 49. ábra.

A kiválasztott öt munkapontban vizsgáltuk a használt olajnak a kopásra gyakorolt hatását, amelynél az olajat 90 °C-ra kondicionáltuk, lásd 45. ábra és 46. ábra.

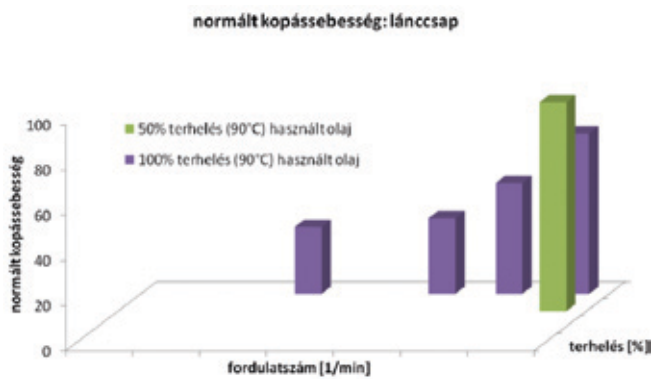
Megfigyelhető a használt olajnak a kopásra gyakorolt hatása. Növekvő fordulatszám mellett a kopássebesség jelentősen növekszik. A láncscsap kopássebessége fáradt olajnál kb. kétszer akkora, mint friss olajnál volt. A láncszem kopássebessége teljes



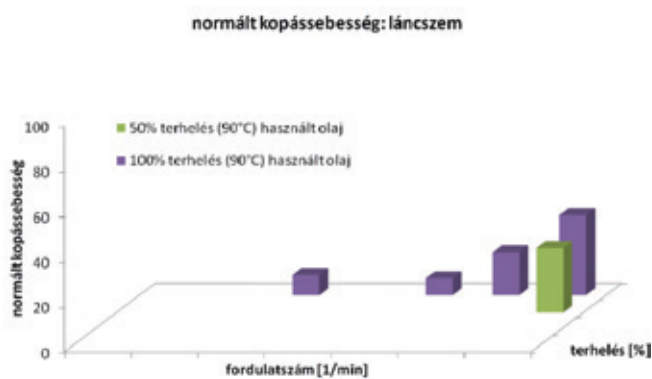
40. ábra: láncscsap és láncszem kopása a bejáratás alatt



44. ábra: láncscsap kopássebessége – 15 h járatás után 120 °C-os olajjal



45. ábra: láncszem kopássebessége – 15 h járatás után 120 °C-os olajjal



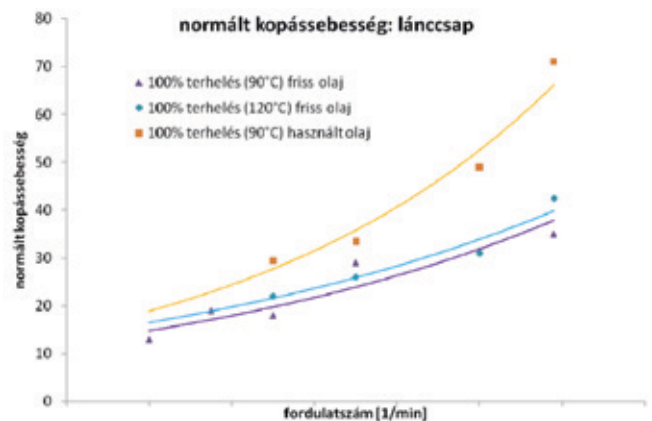
46. ábra: láncszem kopássebessége – 15 h járatás után 90 °C-os használt olajjal

terhelésnél közel tízszer akkora, mint a friss olajnál volt, lásd 48. ábra és 49. ábra.

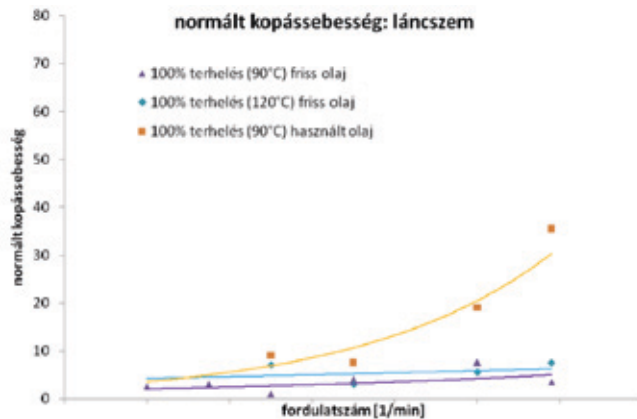
Jellegzetes általánosítható összefüggés a mért láncero (lásd 6. fejezet) és a mért kopássebesség között nem figyelhető meg, lásd 49. ábra.

### A LÁNCNYÚLÁS SZÁMÍTÁSA AZ RNT SEGÍTSÉGÉVEL MEGHATÁROZOTT KOPÁS MÉRTÉKÉBŐL

A belső égésű motor vezérműláncát úgy tervezik, hogy a maximális nyúlása a 0,3% – 0,5% értéket ne haladja meg, a motor 300 000 km-es futásteljesítménye alatt. [49]

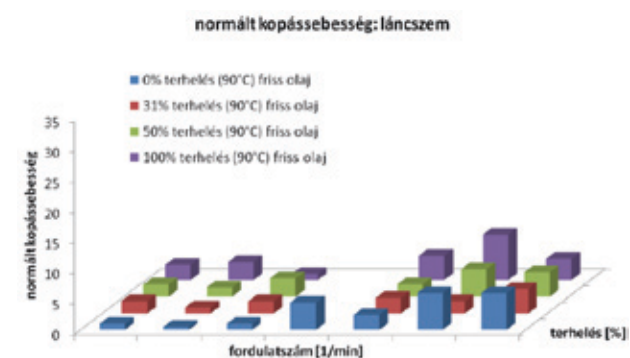
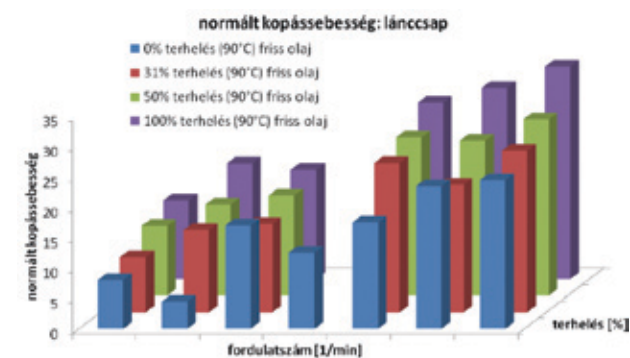
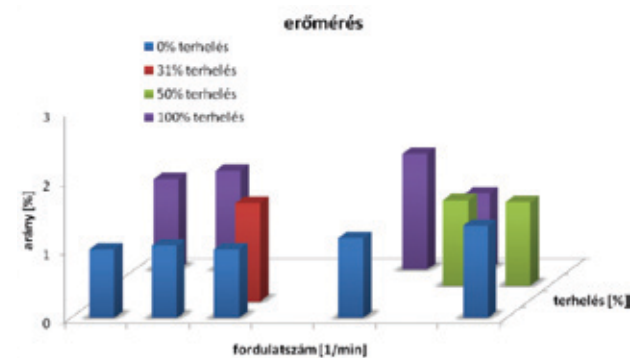


47. ábra: láncszem kopássebességének összehasonlítása (90 °C-ra és 120 °C-ra kondicionált friss és használt olaj, 100% terhelésen)



48. ábra: láncszem kopássebességének összehasonlítása (90 °C-ra és 120 °C-ra kondicionált friss és használt olaj, 100% terhelésen)

Az RNT által meghatározott kopássebességek segítségével, a kopásból a láncnyúlás számítható. Feltételezve, hogy a kopás a láncszemekben és a láncszemek között egyenlő, a láncnak a nyúlása a kísérlet után 0,2%-ra tehető.



49. ábra: láncero összehasonlítása a láncszem és láncszem kopássebességével



## ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben az RNT-technika történetét és módszereit és alkalmazhatóságát részletesen mutattuk be. Az online kopásmérés segítségével egy vezérműlánc kopásviselkedését vizsgáltuk. A kísérletek során, a vizsgálandó alkatrészeket vékonyréteg-aktiválás módszerével aktiváltuk. A kopásrészcsek aktivitását az

olajban mértük (szűrőkoncentrációs eljárás). A bejáratás után az eredmények a láncszemek és láncszapok kis kopását mutatták. A láncszap mért értékeinek az ingadozása, a Cr-51 nuklid tulajdonságával magyarázható. Az olajhőmérséklet változtatásának a hatása a kopásra nagyon kicsi. Használt olajjal történtek vizsgálatok. A vizsgált munkapontokban jelentősen megnövekedett kopást mutatnak. ●

### IRODALOM

- [1] T. Gergely, M. R. Dreyer, Advanced wear measurement of machine components of combustion engine – Radionuclide-technique (RNT) for on-line measurement of the wear, 18th International Conference on Mechanical Engineering – OGÉT 2010, Nagybánya, 22-25. April 2010.
- [2] D.J. Picken, H. Hassan, T.C. Butterly, The use of surface metrology instrumentation to measure rates of wear of internal combustion engine components, *Wear*, Vol. 73, 1981, pp. 185-192.
- [3] Dimla E. Dimla Snr., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 40, 2000, pp. 1073–1098.
- [4] C. Chungchoo, D. Saini, On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 42, 2002, pp. 29–40.
- [5] S.K. Choudhury\*, V.K. Jain, Ch.V.V. Rama Rao, On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 39, 1999, pp. 489–504.
- [6] H. Hocheng, K.L. Kuo, On-line tool wear monitoring during ultrasonic machining using tool resonance frequency, *Journal of Material Processing Technology* Vol 123, 2002, pp. 80-84.
- [7] Taysir H. Nayfeh, Osama K. Eyada and John C. Duke, JR, An integrated ultrasonic sensor for monitoring gradual wear on-line during turning operations, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 10, 1995, pp. 1385-1395.
- [8] Nidal H. Abu-Zahra, Gang Yu, Analytical model for tool wear monitoring in turning operations using ultrasound waves, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 40, 2000, pp. 1619–1635.
- [9] M Scherge, K Pöhlmann, A Gervé, Wear measurement using radionuclide-technique (RNT), *Wear*, Vol. 254, Issue 9, May 2003, pp. 801-817.
- [10] Yuang-Cherng Chiou, Rong-Tsong Lee, Chih-Yih Tsai, An on-line Hall-effect device for monitoring wear particle in oils, *Wear* Vol. 223, 1998, pp. 44–49.
- [11] M. Castejón, E. Alegre, J. Barreiro, L.K. Hernández, On-line tool wear monitoring using geometric descriptors from digital images, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 47, 2007, pp. 1847–1853.
- [12] P. M. Racolta, Nuclear Methods for Tribology, *Appl Radiat. Isot.*, Vol. 46, No. 6/7, 1995, pp. 663-672.
- [13] B. Herkert, Die Aktivierung von metallischen Maschinenteilen mit geladenen Teilchen zur Durchführung von Verschleißmessungen, KfK-Bericht 2096, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, 1975.
- [14] B. Herkert, Verschleißmessungen mit Hilfe von Radionuklidten nach dem Durchflußverfahren, KfK-Bericht 2182, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Juli 1975.
- [15] T. W. Conlon, Thin layer activation by accelerated ions-application to measurement of industrial wear, *Wear* Vol. 29, 1974, pp. 69-80.
- [16] B. Herkert, Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik schnelllaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope, KfK-Bericht 1567, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Februar 1972.
- [17] W. Kaiser, Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiß in einem 6-Zylinder-Dieselmotor (Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen), KfK-Bericht 1568, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Februar 1972.
- [18] G. Katzenmeier, Das Verschleißverhalten und die Tragfähigkeit von Gleitlagern im Übergangsbereich von der Vollschrüierung zu partiellem Tragen (Untersuchungen mit Hilfe von Radioisotopen), KfK-Bericht 1569, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, Februar 1972.
- [19] M. Fautz, Größenanalyse von Verschleißteilchen mit Hilfe von Radioisotopen, KfK-Bericht 2343, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, November 1976.
- [20] G. Fritzsche, Entwicklung von Ölverbrauchsmeßmethoden für Kolbenmaschinen unter Verwendung der Radionuklidtechnik, KfK-Bericht 2463, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Laboratorium für Isotopentechnik, Karlsruhe, Germany, März 1978.
- [21] P. Fehsenfeld, A. Kleinrahm, V. Novikov, Radionuclide technique in mechanical engineering (RTM), XIII. Internat. Conference on cyclotrons and their Applications, Vancouver/Canada 6-11.7.1992.
- [22] G. Blondiaux, E. Dragulescu, P.M. Racolta, L. Craciun, A.T. Serban, R. Stroosnijder, Development of calibration methods for TLA and UTLA, Report WP9 IDRANAP 33-02/2002
- [23] P.M. Racolta, L. Popa-Simil, E. A. Ivanov, B. Alexandreanu, Cyclotron accelerated beams applied in wear and corrosion studies, *Radiat. Phys. Chem.* Vol. 47, No. 5, 1996, pp. 677-680.
- [24] Huang Donghui, Wang Pingsheng, Tian Weizhi, Zhao Dequan, Cao Guangzhou, Ni Bangfa, Zhang Xiuhua, Li Lin, Zhang Guiying, Liu Cunxiong, Li Dehong, Study on real-time wear measurement of piston-ring and cylinder-bore in an engine using thin layer activation method, *Applied Radiation and Isotopes* Vol. 66, 2008, pp. 1073-1078.
- [25] IAVF Antriebstechnik GmbH, DK4 Verschleißmesssystem Benutzerhandbuch, Karlsruhe, 12.12.2006
- [26] International Atomic Energy Agency, The thin layer activation method and its applications in industry, IAEA-TECDOC-924, Vienna, 1997.
- [27] VDA Jahresbericht 2011.
- [28] Wirtschaftszahlen zum Automobil ([wikipedia.org/wiki/automobilproduktion](http://wikipedia.org/wiki/automobilproduktion)).
- [29] Emission-Standards – European Union.
- [30] VDA Jahresbericht 2002.
- [31] P. Gál, Analyse von Reibungsvorgängen in der Ventilsteuerung von Verbrennungsmotoren, (PhD) Dissertation, TU Budapest, 2005.
- [32] R. van Basshuisen, W. Schmädeke, R. Vogt, Reibungsverluste von Fahrzeugmotoren unterschiedlicher Größe und Zylinderzahl, *MTZ* (41) 11/1980.
- [33] K. Volker, Reibungsreduzierung bei PKW-Motoren: ein effizienter Weg zur Verbesserung von Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission, 1. Tribologie Tagung, Győr, 2010.
- [34] P. Gál, Vorlesung Kraftfahrzeugmotoren-3, Universität Győr
- [35] St. Pischinger, H. A. Kochanowski, Ch. Steffens, S. Sonnen, Akustische Auslegung von Wälzlagern im Kurbeltrieb, *MTZ* 3/2009.
- [36] Ch. Struwe, St. Schattenberg, M. Schebitz, Reibungsreduktion am Ventiltrieb durch ganzheitliche Betrachtung der Systemkomponenten, *MTZ* 07-08/2008.
- [37] GfT Arbeitsblatt 7, Tribologie Definition, Begriffe, Prüfung, August 2002.
- [38] W. Mach, A. Gervé, Zum Verschleißverhalten von Nocken und Stößeln in Verbrennungsmotoren, GfT-Fachtagung, Göttingen, 27-28. November 1995. Moers, Germany, 1995.
- [39] B. Kehrwald, A. Gervé, Verschleißanalyse von Gleitlagern in Verbrennungsmotoren, GfT-Fachtagung, Göttingen, 27-28. November 1995. Moers, Germany, 1995.
- [40] B. Kehrwald, P. Berlet, Tribomutation im Einlauf - Beispiele aus Modellversuchen am Tribometer und aus Messungen an Verbrennungsmotoren, GfT-Fachtagung, Göttingen, 5-6. November 1996. Moers, Germany, 1996.
- [41] M. Scherge, Nanovererschleiß an Gleitlagern: Eine Charakterisierung mittels Radionuklidtechnik, Oberflächenanalytik sowie Mikro- und Nanotribometrie, GfT-Fachtagung Band I, Göttingen, 24-26. September 2001. Moers, Germany, 2001.
- [42] Dr. Fritz Ullmann, Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Band. 20 Radionuklide, Verlag Chemie GmbH, 1981.
- [43] Horst Czichos, Karl-Heinz Habig: Tribologie-Handbuch, 3. Auflage, Vieweg+Teubner, Berlin, 2010.
- [44] M. Scherge, A. Gervé, P. Berlet, M. Kopnarski, H. Oechsner, M. Scheib, Tribomutation von Werkstoffoberflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderwickels II, Vorhaben Nr. 716, 31.10.2001.
- [45] J. Volz, Erstellung optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren (Ein System unter Anwendung von Radionuklidten), KfK-Bericht 2432, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, Germany, März 1977.
- [46] A. Dudás, M. R. Dreyer, Development of modern single cylinder test engine, 18th International Conference on Mechanical Engineering – OGÉT 2010, Nagybánya, 22-25. April 2010.
- [47] W. Steinilper, B. Sauer, Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 (Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben), 6. Auflage, Springer Verlag, 718 pages, 2008.
- [48] T. Fink, H. Bodenstein, Möglichkeiten der Reibungsreduktion in Kettentrieben, *MTZ* (72) 07-08/2011, pp. 582-587.
- [49] T. Fink, V. Hirschmann, Kettentriebe für den Einsatz in modernen Verbrennungsmotoren, *MTZ* (62) 10/2001, pp. 796-806.
- [50] M. Dienwiebel, M. Scherge, Neue Erkenntnisse zur Tribologie von überreutektischen AlSi-Zylinderlaufflächen, *MTZ* 03/2007, S. 187-189.
- [51] G. Flores, T. Abeln, U. Klink, Funktionsgerechte Endbearbeitung von Zylinderbohrungen aus Gusseisen, *MTZ* 03/2007, S. 181-185.
- [52] Die Bibliothek der Technik, Band 278, Aluminium Motorblöcke, Verlag Moderne Industrie, 2005
- [53] Gál P. – Nagyszokolyai, I., Gépjárműmotorok II., Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [54] MAHLE GmbH, Kolben und motorische Erprobung, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [55] Von Basshuisen, R. – Schäfer, F., Handbuch Verbrennungsmotor, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2005
- [56] M. R. Dreyer, L. Solecki, Indirect Geometric Measurements on Surface Replicas, 19th International Conference on Mechanical Engineering – OGÉT 2011, Csíksomlyó, 28. April – 01. May 2011.
- [57] T. Morauszki, M.R. Dreyer, Dynamic FEM-Simulation of the Piston-Liner Contact, Fisita World Congress 2010, Book of Abstracts Scientific Society for Mechanical Engineering (GTE), Budapest 2010, ISBN 978-963-9058-28-6, p. 234ff.
- [58] N. Graham, L. Schnell, G. Arnold, Bleifreie Laufschrift für hochbelastete Haupt- und Pleuellager, *MTZ* (64) 10/2003, pp. 880-883.