

Miskolci Egyetem
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

**Si₃N₄ KERÁMIA NANOKOMPOZITOK TRIBOLÓGIAI
VISELKEDÉSÉNEK ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA**

PHD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Németh Alexandra Kitti
okleveles gépészmérnök

**SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLOGIA
TÉMACSOPORT**

Doktori Iskola vezető:

Prof. Dr. Tisza Miklós
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

Prof. Dr. Tisza Miklós
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Tudományos vezető:

Dr. Marosné dr. Berkes Mária
habilitált egyetemi docens

**Miskolc
2019**

TARTALOM

Jelölések és rövidítések jegyzéke	III
Témavezetői ajánlás	V
1. Bevezetés, célkitűzések megfogalmazása	1
1.1. Bevezetés.....	1
1.2. Célkitűzések	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Si_3N_4 műszaki kerámiák főbb tulajdonságai és jellegzetes alkalmazásai.....	3
2.2. Si_3N_4 kerámiák anyagszerkezeti sajátosságai.....	5
2.3. A Si_3N_4 kerámiák teljesítőképességének növelése.....	5
2.4. A kopásállóság növelése az összetétel módosításával: a grafén, mint erősítőfázis (adalékanyag) sajátosságai és alkalmazása kerámia kompozitokban	6
2.4.1. A grafén, mint erősítőfázis (adalékanyag) sajátosságai és alkalmazása kerámia kompozitokban	6
2.5. Az anyagszerkezet módosítása technológia fejlesztés útján	7
2.5.1. A Si_3N_4 kerámiák gyártása meleg izosztatikus sajtolással	8
2.5.2. A szikraplazma szinterelés (SPS).....	10
2.6. Kopás és tribológia.....	14
2.6.1. A kopás fogalma, jelensége.....	14
2.6.2. A kopási módok és mechanizmusok	16
2.7. Kerámiák kopása	17
2.7.1. A Si_3N_4 kerámiák kopásának sajátosságai.....	18
2.7.2. SiC kopási folyamatának jellemzői	20
2.7.3. A tribokémiai mechanizmus.....	22
2.8. Tribológiai vizsgálatok.....	24
2.8.1. A ball-on-disc vizsgálatok elve	26
2.8.2. Vizsgálatok információ tartalma	28
2.9. A tribológiai vizsgálatok kiegészítő vizsgálati módszerei	31
2.9.1. Profilometriai vizsgálatok	31
2.9.2. Mikroszkópi vizsgálatok	32
2.9.3. Mechanikai vizsgálatok.....	33
2.9.4. Fizikai és anyagszerkezeti vizsgálatok.....	35
2.10. Kopási térképek.....	37
2.10.1. A kopási térképek főbb típusai és kidolgozásának lépései.....	37
2.11. Kopási modellek.....	41
2.11.1. A kopási modellek fejlődése, főbb típusai	42

2.11.2.	A modellek rendszerezése, főbb jellemzőik	45
3.	Az értekezés részletes célkitűzése	49
4.	Si ₃ N ₄ többrétegű grafén nanokompozitok tribológiai viselkedésének kísérleti vizsgálata	50
4.1.	A vizsgálat mintadarabok jellemzése	50
4.1.1.	A próbatestek kémiai összetétele, geometriai megjelenése	50
4.1.2.	Fázisösszetétel és mikroszerkezeti vizsgálatok	52
4.1.3.	A próbatestek elméleti és tényleges sűrűsége	53
4.1.4.	A próbatestek hővezetési együtthatója	54
4.1.5.	A mintadarabok felületének előkészítése	55
4.2.	Kiegészítő vizsgálatok.....	58
4.2.1.	Keménységmérés	58
4.2.2.	Vickers lenyomatos törési szívósság meghatározása	59
4.2.3.	A polírozott minták érdességi jellemzői és azok információ tartalma	60
4.2.4.	A kísérleti minták maradó feszültsége	63
4.3.	Tribológiai vizsgálatok.....	64
4.3.1.	Ball-on-disc elvű tribológiai vizsgálatok	64
4.3.2.	A kopásvizsgálatok előkészítése	66
4.3.3.	A kopási károsodás kvantitatív jellemzése.....	67
4.3.4.	A kopási károsodás kvalitatív jellemzése: kopási térképek	76
4.3.5.	A kopási viselkedés minőségi és morfológiai elemzése SEM felvételekkel kombinált 3D kopástérképek segítségével	81
4.3.6.	Kopástípusok és mechanizmusok vizsgálata.....	90
4.3.7.	Kopásnyomok morfológiai vizsgálata optikai mikroszkóppal	93
4.4.	Fél-fizikai kopási modell a kikopott térfogat becslésére	94
4.5.	A vizsgálati eredményekből levonható legfontosabb következtetések, megállapítások ..	99
5.	Tézisek, új tudományos eredmények	102
6.	A kutatómunka során kapott eredmények összefoglalása	104
7.	Summary	106
8.	Az új tudományos eredmények hasznosításának és a kutatási téma továbbfejlesztésének lehetőségei	108
	Köszönetnyilvánítás	109
	Az értekezés témájában releváns saját publikációk listája	111
	Mellékletek.....	113

JELÖLÉSEK ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

- α : konstans
 β : keményedési kitevő, –
 γ : dimenzió nélküli paraméter tömbi hevítésnél
 μ : súrlódási együttható
 $\mu_{\text{áll}}$: állandósult súrlódási együttható, –
 μ_{C} : az érintkező érdességi csúcsok súrlódáshoz való hozzájárulásának mértéke
 μ_{HD} : a viszkózus tapadás által módosított súrlódási együttható értéke
 μ_{th} : a súrlódási együttható határértéke a tribokémiai aktivált kopás esetén
 ν : a Poisson-tényező; értéke a vizsgált Si_3N_4 kerámiára: 0,23
 ν_1, ν_2 : a tárcsa és a golyó Poisson tényezői
 ξ : anyagi konstans (1,2 kerámiák esetén)
 ρ : az oxid film sűrűsége
 ρ_{minta} : próbatest sűrűsége, g/cm^3
 σ_s : a lágyabb anyag folyáshatára
 ϕ : elméleti anyagkonstans
 χ : illesztési parameter
 ψ : a gyémánt gúla lapszöge, 136°

LATIN BETŰS JELÖLÉSEK

- A: kikopott keresztmetszet, mm^2
 A_{C} : érdességi csúcsok területe az érintkezési felületen, –
 A_f : frekvencia faktor
 A_0 : Arrhenius-féle konstans oxidáció esetére, –
C: a kémiai környezet koncentrációja;
 c_0 : konstans, amely függ a hőmérséklet változásától
 c_s : egy anyagtól független konstans
D: a fém diffúziós együtthatója
E: rugalmassági modulus, GPa
 E^* : komplex rugalmassági modulus, GPa
 E_a : aktiválási energia,
f: a folyadék fázis által felvett terhelési hányad
 f_A^* : a felületi nyílt porozitás kritikus területi hányada
 F_C : Coulomb-féle súrlódó erő, N
 f_m : az olvadt anyag térfogati hányada a csúszó súrlódás során
 f_v : a zárványok térfogati hányada
 F_n a normál irányú terhelőerő, N
 F_s a súrlódási erő, N
 $\tilde{F}$: normalizált nyomás az érintkező felületen
h: a kopásnyom mélysége, mm
 h_c : kritikus filmvastagság, mm
H: felületi keménység
 H_0 : a fém keménysége szobahőmérsékleten, MPa

HV: Vickers keménység, GPa
 I: áramerősség, A
 k: fajlagos kopási sebesség, mm³/Nm
 k_{th}: hővezetési együttható, W/mK
 k₀: pre-exponenciális konstans a termikusan aktivált kémiai folyamat esetére
 K: dimenzió nélküli kopási tényező, –
 K_A: az érintkező érdességi csúcsokat figyelembe vevő konstans
 K_{IC}: törési szívósság, MPa·m^{1/2}
 K_{ox}: az oxid hővezetési együtthatója, W/mK
 l: csúszási úthossz, mm
 l_{lat}: a felület alatti laterális repedéshossz, mm
 m_{m,sz}: vizsgálati minta száraz tömege, g
 m_{v+p}: sűrűségméréshez használt víz és pohár együttes tömege, g
 m_{v+p+m}: sűrűségméréshez használt víz és pohár, valamint a mérendő minta együttes tömege, g
 n: fordulatszám, 1/min
 N: érdességi csúcsok száma az érintkezési felületen, –
 p: névleges nyomás, MPa
 p_{v,60}: párolgási korrekciós tényező, g
 Q₀: az oxidáció aktiválási energiája, kJ/mol
 Q_{tr}: tribokémiai folyamat aktiválási energiája, kJ/mol
 r: kopásnyom középsugara, mm
 r₀: a koptató tű (pin) rádiusza, mm
 R: egyetemes gázállandó, 8,314 J/(mol·K)
 R_a: átlagos felületi érdesség, μm
 R_b: a koptató golyó sugara, mm
 R_h: páratartalom, %
 R_i: reprezentatív hosszúság, mm
 R*: a súrlódó pár komplex sugara, mm
 s: a fretting típusú súrlódás amplitudója, Hz
 t: csúszási idő, s
 T: hőmérséklet, °C
 T₀: 300 °K
 T_a: abszolút környezeti hőmérséklet, °C
 T_b: tömbi hőmérséklet, °C
 T_f: villámhőmérséklet, °C
 T_{Lmet}: az összeolvadás látens hője térfogat egységre vonatkoztatva fém esetén, °C
 T_{Lox}: az összeolvadás látens hője térfogat egységre vonatkoztatva oxidok esetén, °C
 T_m: olvadási hőmérséklet, °C
 T_{mo}: az oxid olvadási hőmérséklete, °C
 T_s: felületi hőmérséklet, °C
 T*: egyenértékű hőmérséklet fém esetén, °C
 U: feszültség, V
 v: csúszási sebesség, mm/s
 v_{scan}: vizsgálati sebesség, s
 $\tilde{v}$: normalizált sebesség;
 V: kikopott térfogat, mm³
 w: kopási sebesség, mm³/m
 W: a repedés-ellenállás, MPa·m^{1/2}
 $\tilde{W}$: normalizált kopási tényező
 Z_c: az oxid-film kritikus vastagsága, mm

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Németh Alexandra Kitti a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán, Gépészmérnöki Szakon végezte BSc és MSc szintű tanulmányait. A bolognai rendszerű kétlépcsős képzésben 2009-2015 között intézetünk számos tantárgyát hallgatta, amelyek iránt kiemelt érdeklődést mutatott. Tanulmányai igen korai szakaszában, a BSc képzés II. tanévében azzal a kéréssel fordult hozzám, hogy TDK munka keretében kiegészítő tanulmányokat, kutatásokat szeretne folytatni szakmai irányításommal. Az azóta eltelt időszak alatt a különböző tudományos témakörökben folytatott közös munka során személyiségét, munkáját közelebbről is megismerhettem.

Tanulmányi munkájában szorgalmas, törekvő, az új dolgok iránt fogékony, érdeklődő hallgató volt, aki szakmai munkájában kötelességtudó, határidős feladatait mindig időre teljesítette, hallgatói kötelezettségein felül szívesen vállalt többletmunkát, például több éven át demonstratori tevékenységet folytatott az általam előadott tantárgyakban, segítve az intézetünkben folyó oktatási munkát. Adottságai szakmai ambícióval és igényességgel párosulnak, idegen nyelvtudása – megfelelő beszédképesség angol és német nyelvből – alkalmassá teszi arra, hogy nemzetközi szakmai konferenciákon és kutatási együttműködésekben is eredményesen szerepeljen.

A közös szakmai munka kezdetétől folyamatos és aktív pályázati tevékenységet folytatott annak érdekében, hogy aktuális kutatási feladatai pénzügyi háttérét – amelyek a műszaki kerámia kutatásokban nagyságrenddel nagyobbak, mint a fémek anyagokhoz kötődően – megteremtse. BSc szakdolgozatával elnyerte a Gépipari Tudományos Egyesület Miskolci Egyetemi Szervezete 2012/2013.-as tanévi Diplomatervezési Pályázatának első díját, valamint MSc tanulmányai során az Eötvös Lóránd Hallgatói Ösztöndíjat. PhD hallgatóként a Nemzeti Tehetség Program ösztöndíjasa volt (NTP-EFÖ-P-15), több rövid nemzetközi tanulmányútra szóló Campus Hungary pályázatot, valamint doktori képzésének befejező időszakában az Új Nemzeti Kiválósági Program (ÚNKP) ösztöndíjában részesült.

Kutató munkáját és aktív szakmai publikációs tevékenységét már a BSc szintű egyetemi képzésének ideje alatt megkezdte. Az egyetemi tanulmányai során TDK-kutatásokat folytatott és már ebben az időszakban kitűnt átlagon felüli munkabíráásával és teljesítményével, az elméleti és gyakorlati problémák megoldásában mutatott rátermettségével. Sikeresen részt vett helyi TDK (2012, 2013, 2014), és OTDK (2013, 2015) konferenciákon, 2 helyi szekcióban I. helyezést, valamint OTDK-n II. helyezést ért el. Előadást tartott több hazai és nemzetközi konferencián, ahol szakmai felkészültségéről, előadói- és vitaképességéről is tanúbizonyságot tehetett.

A Si₃N₄ alapú műszaki kerámiák tribológiai problémáival 2013 óta, azaz 6 éve foglalkozik. Az MLG adalékolású, korszerű, kopásálló alkalmazásokban elterjedten

használt kerámiák vizsgálata témakörben széleskörű kutatásokat folytatott, igen kiterjedt és sokirányú vizsgálati módszerekkel tárta fel a vizsgált anyagok anyagszerkezeti, mechanikai és tribológiai viselkedésének összefüggéseit. PhD tanulmányait mindig céltudatosan, tervszerűen, ütemesen végezte és eredményesen hajtotta végre.

Itt szeretném kiemelni, hogy az ilyen átfogó és komplex kutatások számos hazai és külföldi társintézménnyel közös együttműködés formájában képzelhetők csak el és valósíthatók meg, ami megfelelő rátermettséget igényel a kapcsolatépítés a szervezés, a kooperációs készség, vagy például az idegen nyelvek használata tekintetében. Alexandra doktori kutatómunkája során több, mint 15 másik intézmény vizsgálati potenciálját és szakmai segítségét hasznosította. Ezek közül a disszertációban bemutatott új tudományos eredmények elérésében kiemelt szerepet játszott az MTA Energiatudományi Kutatóközpontjától, az MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézetétől, a Szlovák Tudományos Akadémia kassai Anyagtudományi Kutatóintézetétől és a Miskolci Egyetem Anyagtudományi Karától kapott önzetlen szakmai segítség. Mindezek mellett a vizsgált témakör kutatásához hosszú éveken át komoly segítséget kapott – mind az infrastrukturális, mind az anyagi feltételek biztosítása tekintetében – a saját Intézetében megvalósuló nagyszabású kutatási projektektől.

A PhD fokozat megszerzéséhez szükséges összes tanulmányi kötelezettségét időben és kiváló eredménnyel teljesítette és az előírt publikációs feltételeknek is maradéktalanul eleget tesz. Több publikációja nemzetközi elismerést kapott, rangos folyóiratokban hivatkozásai vannak. Közleményei között szerepelnek hazai és nemzetközi konferencia és folyóirat cikkek (köztük két db Q1-es és IF-es folyóiratcikk), illetve egy monográfia fejezet társszerzője.

A Jelölt aktív és magas színvonalú, magyar és angol nyelven kifejtett publikációs tevékenysége, tudományos eredményeinek hazai és nemzetközi fórumokon való megmérettetése és eddigi elismerése garancia lehet arra, hogy értekezését rövid határidőn belül sikeresen megvédi. Elért eredményei iparilag és a különféle gyakorlati alkalmazások területén is nagy jelentőségűek, elősegítik az Si_3N_4 alapú kerámiák és azok grafén adalékolású kompozitjainak gazdaságosabb előállítását, hatékonyabb és célszerűbb felhasználását.

Mint témavezetője a disszertációban bemutatott eredményei tekintetében egyértelműen nyilatkozom, hogy a jelölt értekezése hiteles adatokat tartalmaz, az értekezésben foglalt tudományos eredmények a Pályázó eredményei, az értekezés az előírt formai követelményeknek a folyamatban lévő javítások után megfelel.

Miskolc, 2019. 04. 30.

Dr. Marosné dr. Berkes Mária
habilitált egyetemi docens

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK MEGFOGALMAZÁSA

1.1. Bevezetés

A szilícium-nitrid napjaink egyik legtöbbet alkalmazott műszaki kerámiája. Kiváló mechanikai és termikus tulajdonságkombinációk jellemzik, többek között nagy keménység, szilárdság, hősokkállóság és vegyi ellenálló képesség. Ezen kiváló mechanikai tulajdonságai miatt egyre fontosabb szerephez jut olyan ipari alkalmazások területén, mint például a vágószerszámok, vagy olyan robbanómotor alkatrészek, ahol jelentős kopások lépnek fel. A kritikus tönkremeneteli módok egyik legszélesebb körét a különféle kopási károsodások képviselik.

Ezeket a károsodási folyamatokat kontrolláló kopási mechanizmusok és azok mikroszerkezeti vonatkozásai, továbbá a kopási jellemzők és az anyagi tulajdonságok kölcsönhatásai a kopásos tönkremeneteli folyamat rendszer-jellege következtében a rendszer bármely elemének megváltozásakor módosulnak. A tribológiai tulajdonságok fizikai hátterének megismerése ezért a kopással szemben ellenálló anyagok előállítását célzó, hatékony és eredményes anyagtechnológiai módszerek kidolgozásának alapvető feltétele. A kopásállóság javítására számos eljárás – a felülettechnológiák különféle módszerei, mint például a különböző felületi hőkezelések, felületszilárdító technológiák, vagy az anyag összetételének módosítása, például erősítő fázisok bevitele az alaplátrixba, a látrix mikroszerkezetének módosítása, az üvegfázis összetételének vagy szerkezetének módosítása stb. – használatos. Utóbbiak közül a mikro- és nanoméretű szemcsék bevitele, valamint a gyártási technológia módosítása a legígéretesebb és egyben a legintenzívebben kutatott területek a kerámiák esetén.

Napjaink egyik legtöbbet kutatott szén módosulata a grafén, amely nagyon ígéretes adalékanyag a kerámia alapú kompozitok sűrűlődasának csökkentésére. Egyszerűen előállítható, kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, valamint könnyen elosztható a kerámia látrix anyagában. Ez utóbbi jelentős előnyt képvisel a többi karbon adalékanyaggal szemben.

A szilícium-nitrid kerámiák szerkezetét, ezáltal tribológiai teljesítőképességét nagyban befolyásolja a gyártás során kialakult anyagszerkezet. Napjaink korszerű gyártástechnológiája, a szikraplazmaszinterelés alkalmas lehet olyan anyagszerkezet létrehozására, amely kedvezőbb kopási viselkedést eredményezhet, mint a hagyományos szinterelési technológiák – például meleg izosztatikus sajtolás, melegszajtolás – által előállított.

A továbbiakban doktori disszertációm célkitűzéseit ismertetem.

1.2. Célkitűzések

Doktori munkám témája két különböző gyártástechnológiával előállított – azaz meleg izosztatikusan sajtolt (HIP) és szikraplazma szinterelt (SPS) – 1 és 3 m%-nyi többrétegű grafénnal (MLG) adalékolt Si_3N_4 nanokompozitok tribológiai viselkedésének elméleti és kísérleti vizsgálata.

Ennek során áttekintem a téma szakirodalmát, amelynek célja a vizsgált anyag szerkezetének bemutatása, tulajdonságainak, gyártástechnológiájának, valamint viselkedésének áttekintése. Ezt követően ismertetem a tribológiai folyamatokat és a vizsgált anyag jellemző kopási mechanizmusait. A kísérleti munka előkészítése céljából ugyancsak ez a fejezet foglalkozik a kerámiák tribológiai és egyéb mechanikai vizsgálatainak megismerésével és a kiértékelési lehetőségek bemutatásával.

Disszertációm célja összefüggések megállapítása a kétféle módon előállított monolitikus és a kompozit minták kopási viselkedése és mechanikai tulajdonságai, mikroszerkezete között, valamint annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a megfelelő szinterelési eljárás megválasztásával és a vizsgált adalékanyag hozzáadásával mely mechanikai tulajdonságok javulása érhető el, és ezek a tulajdonságok milyen összefüggésben állnak a kopási viselkedéssel.

Doktori munkám végső célkitűzése a kísérleti munka alapján kopási térképek megalkotása, valamint egy olyan modell létrehozása, amelynek segítségével megbecsülhető az anyag kopási viselkedése költséges kopásvizsgálatok nélkül.

A modellek lehetővé teszik a kopás erősségének meghatározását, a kopást befolyásoló paraméterek elemzését, továbbá elterjedten használják őket végeselemes szimulációk esetén. A kopási térképek alkalmazhatók lesznek az anyag kiválasztás területén, valamint elősegítik a vizsgált anyagok alkalmazási területeinek bővítését.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintés célja a kísérleti kutatómunka elméleti háttérének megismerése és részletes célkitűzésének megfogalmazása. Ennek érdekében először tanulmányozom a vizsgált anyag anyagszerkezetét, mechanikai és fizikai tulajdonságait, lehetséges felhasználási módjait és szokásos gyártási eljárását. Ezt követően bemutatom az előállítás egy lehetséges új módszerét, amelynek kopásállóságra gyakorolt hatását kívánom vizsgálni. A vizsgálandó károsodási mód, azaz a kopás jelenségének és általános jellemzőinek bemutatása után ismertetem a kerámiák kopási viselkedésének sajátosságait, az alkalmazni kívánt kopásvizsgálati módszert és a károsodás elemzéséhez jellemzően használt kiegészítő vizsgálatokat.

2.1. Si_3N_4 műszaki kerámiák főbb tulajdonságai és jellegzetes alkalmazásai

Szerkezeti kerámiának szokás nevezni azokat, amelyek nagy szilárdságúak és teherviselő szerkezetekben kerülnek felhasználásra. A leggyakrabban alkalmazott három szerkezeti kerámia az Al_2O_3 , a Si_3N_4 és a SiC .

A nitridkerámiák közé tartozó Si_3N_4 kiemelkedik a többi műszaki kerámia közül nagyobb kopásállóságával, jobb hősokkállóságával és hőstabilitásával. Legfontosabb tulajdonságai a következők [1]: sűrűség: $3,1 \text{ Mg/m}^3$; keménység: 14-19 GPa; Young-modulus: 320 GPa; törési szívósság: $4\text{-}8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; hőtágulási együttható: $3\cdot 10^{-6}/\text{K}$; hővezetési tényező: $35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; fajhő: $800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Előnyös tulajdonságait már a 20. század közepén felismerték, amikor belsőégésű motorokban használták. Az autóipari alkalmazását Nissan 1985-ben kezdte el, amikor elkészítette első szilíciumnitridből készült turbófeltöltőjét. Ezt követően felfedezték, hogy kiválóan funkcionálhat rakétákban is. Az első teljesen tömör, pórusmentes, melegen sajtolt Si_3N_4 kerámiákat 1961-ben állították elő.

Kis súrlódási együtthatójuk, a többi kerámiához képest kis rugalmassági modulusuk, kis sűrűségük és kicsiny gördülési ellenállásuk lehetővé teszi nagy hőmérsékleten üzemelő, kenőanyag nélküli csapágyakba való beépítésüket. Oxidáló közegben csak kis nyomásig stabil a szilíciumnitrid, levegőn könnyedén képződik a felületén szilícium-oxid réteg. Ez a réteg védi meg az anyagot a további oxidációtól, amennyiben ez eltávolításra kerül, például koptató igénybevétel esetén, viszonylag rövid idő alatt újra oxidaréteg képződik.

Előnyös tribológiai tulajdonságaiknak köszönhetően a Si_3N_4 alapú kerámiák kiválóan működnek abrazív kopásnak kitett helyeken is, például olajfűró berendezések alkatrészeként, vákuum-szivattyúkban, illetve fogászati fűrókban [2, 3].

A szilíciumnitrid kerámiák fentiekben bemutatott alkalmazási példáinak közös vonása, hogy mindegyiknél rendkívül fontos felhasználói tulajdonság a kopásállóság. Ez általában a legtöbb műszaki kerámiára is elmondható. Várható élettartamuk, hasznos üzemidejük és a koptató igénybevétellel szembeni ellenállásuk megítélése és becslése érdekében ezért nagyon fontos, hogy minél részletesebb ismeretünk legyen a kerámiák, köztük a szilíciumnitrid kerámiák kopási tulajdonságaira vonatkozóan [4, 5].

A Si_3N_4 súrlódási együtthatója bizonyos szakirodalmak szerint azonos anyagú súrlódó pár esetén lecsökkenhet akár 0,17-re is. Emellett a lágyacél ugyancsak azonos anyaggal koptatva 0,64, TiN bevonatú N695 acél 0,45, csapágyacél és a TiC (CVD) súrlódási együtthatója 0,25, valamint csapágyacél TiN (CVD) bevonatú ellentesttel koptatva 0,49 [6]. Mint látható a Si_3N_4 súrlódási együtthatója lehet nagyon kicsi is, így felveheti a versenyt akár a bevonatolt fémekkel is a versenyt, valamint a koptatás során keletkező tribofilm, mint szilárd fázisú kenőanyag, tovább csökkentheti ezt az értéket. Alkalmazásának hátránya azonban a nagy rugalmassági modulusuk.

A kerámia alapú kompozitok előállításának igénye napjainkban több szempontból is szükségsszerűnek mondható, mivel az anyagok teljesítőképességével szembeni elvárások a technika fejlődésével egyre inkább növekednek, így egyre speciálisabb elvárásokat támasztunk egy-egy alkatrészszel (anyaggal) szemben. Ezeknek a folyamatosan növekvő igényeknek kielégítése egynemű anyagokkal már nehezen oldható meg, ezért az anyagfejlesztések legdinamikusabban fejlődő iránya az egyre nagyobb, vagy különleges követelményeknek való megfelelés érdekében a társított anyagok, azaz kompozitok felhasználása, fejlesztése. Igaz ez a kopással szembeni ellenállás javítására, és a komplexen fellépő mechanikai, termikus és egyéb hatásokkal szembeni ellenálló képesség növelésére vonatkozóan is.

A szilíciumnitrid kompozitokban alkalmazott tulajdonságmódosító adalékok anyagminőségüket és hatásukat tekintve rendkívül változatosak lehetnek, amelyekre az alábbi felsorolás ad néhány példát:

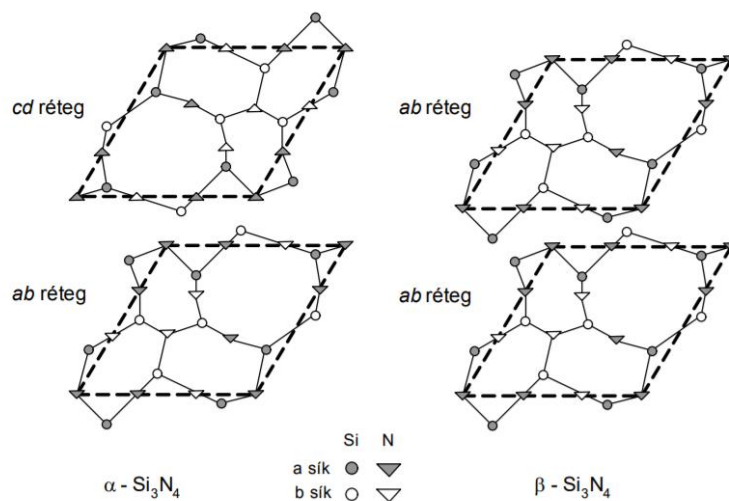
- SiC: mechanikai tulajdonságok javítása, a másodlagos fázis szemcseméretének befolyásolása [7];
- *Szén nanocsövek*: elektromos vezetőképesség biztosítása, hőállóság javítása, modulus növelése, szilárdság, törési szívósság, keménység stb. növelése [8, 9, 10, 11];
- *Grafén*: törési szívósság, kopásállóság, elektromos vezetőképesség javítása [12, 13, 14].

Ezek közül a szerkezeti és szerszámanyag céljára történő felhasználásokban a szilíciumnitrid alapú kompozit kerámiák elsődleges adalékanyagai a különféle szén származékok – például egy- és többfalú szén nanocsövek, grafén, grafít, szén szálak [15].

2.2. Si_3N_4 kerámiák anyagszerkezeti sajátosságai

A Si és a N atomok rövidtávú rendezettségét tetraéderes koordináció jellemzi. Az Si_3N_4 hosszútávú rendezettsége szerint háromféle kristályszerkezetű lehet. A legismertebb és a szokásos körülmények között gyártható polimorf változatai a hexagonális $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, a trigonális $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ és a gyakorlatban kevésbé alkalmazott köbös $\gamma\text{-Si}_3\text{N}_4$ [16].

A $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ abab rétegződésű, míg az $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ abcd rétegekből épül fel (1. ábra). Az utóbbi keménysége nagyobb: 17-19 GPa, míg törési szívóssága kisebb: $4\text{-}5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, a $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ esetén pedig ezek ellenkezője igaz: $\text{HV}=12\text{-}16\text{ GPa}$, $K_{\text{Ic}}=6\text{-}10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.



1. ábra. A Si_3N_4 különböző rétegei az α és a β módosulatokban [2]

A két fázis különböző tulajdonságait figyelembe kell venni a kerámiák előállításának megtervezésekor, ugyanis a jelenlévő fázisok, a bemutatott jelentős tulajdonságkülönbségek miatt alapvetően befolyásolják az anyag viselkedését [2].

A $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ termodinamikai szempontból stabilabb, ezért a Si_3N_4 -ből készült alkatrészek, eszközök többnyire ezt a fázist tartalmazzák. Ugyanakkor a $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ fázisú alkatrészekhez használt kiinduló por $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ fázisú.

A $\gamma\text{-Si}_3\text{N}_4$ a szilíciumnitrid legkevésbé ismert módosulata. Gyakran c módosulatlak is nevezik a szakirodalomban és szerkezete megegyezik a bór-nitridével. Ennek az allotróp módosulatlak a keménysége elérheti a $\text{HV}=32\text{-}35\text{ GPa}$ értéket. Előállítása nagy hőmérsékleten és nagy nyomáson laboratóriumi körülmények között történik [2].

2.3. A Si_3N_4 kerámiák teljesítőképességének növelése

Az előzőekben láttuk, hogy a szilíciumnitrid kerámiák rendkívül jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek és kopási tulajdonságaik is kedvezőek, ami jellegzetes, széleskörű kopásálló felhasználásukat magyarázza. Ezekben az alkalmazásokban a teljesítőképesség további növelése, azaz a kopásállóság további fokozása érdekében alkalmazható módszereket célszerű áttekinteni.

A tulajdonságok javítására irányuló anyagfejlesztések két legfontosabb iránya az összetétel, illetve az anyagszerkezet módosítása. Az előbbi érinti az alapanyag kémiai összetételének változtatását illetve összetett anyagok alkalmazásának vizsgálatát, az utóbbi esetben pedig elsősorban az anyagszerkezetet alapvetően meghatározó gyártási eljárások kapcsán elképzelhető fejlesztési lehetőségeket kell számba venni.

2.4. A kopásállóság növelése az összetétel módosításával: a grafén, mint erősítőfázis (adalékanyag) sajátosságai és alkalmazása kerámia kompozitokban

A szilíciumnitrid kerámiák anyagfejlesztésének összetétel módosító vonulata napjainkban leginkább a kompozitok alkalmazása irányába mutat. Ennek meghatározó irányzata a grafénnek, mint adalékanyagnak az alkalmazása.

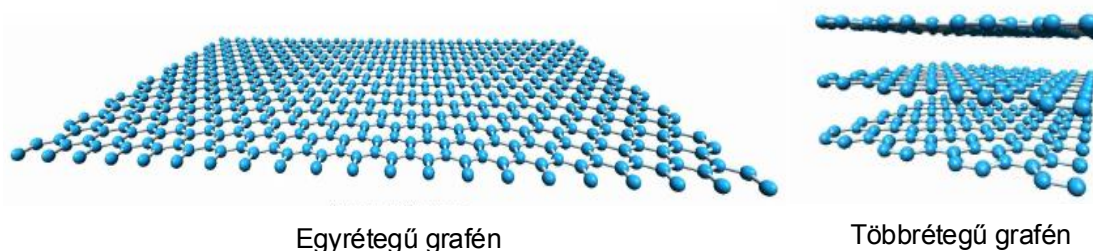
2.4.1. A grafén, mint erősítőfázis (adalékanyag) sajátosságai és alkalmazása kerámia kompozitokban

A fullerének (0D), a szén nanocsövek (1D) valamint a nanogyémánt (3D) felfedezése után sikerült megtalálni a szén egy új 2 dimenziós módosulatát, a grafént, amely a szén nanoszerkezetek családjának egyik napjainkban megismert tagja. Felfedezése Andrej Konsztantyinovics Geim és Konsztantyin Szergejevics Novoszjolov orosz kutatókhoz kötődik (2004), akiknek munkásságát 2010-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazták [17].

A grafén létezését a kutatók egy jelentős része igen hosszú ideig nem tartotta valószínűnek, mivel igen nagy felület/térfogat aránnyal rendelkezik, amely szerkezetét instabillá teheti. Különleges mechanikai és fizikai tulajdonságaival az anyagtudomány és az elektrotechnika egyik legkutatottabb anyagává vált. A grafén eredeti definíciója, vagyis, hogy a „*karbon egyetlen atomi vastagságú, sík, méhsejtrácsos szerkezetű módosulata*” [18], mára kiterjedt a néhány vagy több atomi rétegű hasonló szerkezetekre is. Ez annak köszönhető, hogy az egyetlen egy síkból álló grafén előállítása meglehetősen nehézkes, sokkal egyszerűbb ún. örlési módszerrel többrétegű grafént előállítani. Így találkozhatunk a kétrétegű (*bilayer*), háromrétegű (*trilayer*), néhány rétegű (*few-layer*), illetve multirétegű (*multilayer*) grafénok fogalmával is. A 2. ábra szemlélteti az egyrétegű és többrétegű grafént.

A grafén tulajdonságait az anizotrópia, vagyis a tulajdonságok irányfüggése jellemzi. Ennek az anyagnak a síkokban található kötési 200× erősebbek az acélénál (szakítószilárdsága 130 GPa), ennek következtében a legerősebb anyag, amit valaha az emberiség létrehozott. A Young-féle rugalmassági modulusa pedig 0,5 TPa [19]. Ami a grafén termikus tulajdonságait illeti, a Raman mérések segítségével meghatározott [20] hővezetési együtthatója $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ami több mint egy nagyságrenddel jobb a közismerten jó hővezető réz $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ hővezetési együtthatójának értékénél.

A grafén adalékolás elsődleges célja kompozitokban az elektromos vezetőképesség biztosítása. Kiváló elektromos tulajdonságainak köszönhetően valószínűleg az elektronikai ipart fogja forradalmasítani. Hasznosítható például elektródákban, fűtőelemekben, ellenállásként, szikraforgácsoló szerszámként, érzékelőkben, szenzorokban [21], nanoelektronikai alkalmazásokban [22], tranzistorokban [23, 24], hajlékony érintőképernyőkben [25] kompozitokban [26], hidrogén tárolókban [27], lítium elemekben [28] és grafén alapú antibakteriális lapokban [29].



2. ábra. Példák grafén szerkezetekre [30]

A felsoroltakon kívül tribológiai szempontból előnyös sajátossága, hogy kis súrlódási együtthatójának köszönhetően kiváló szilárd fázisú kenőanyagként szolgálhat. További hatása lehet kompozitokban, hogy az alapanyaggal reagálva új, komplex, C tartalmú erősítőfázisok keletkezhetnek.

Ha tribológiai igénybevételre szánt termékeket gyártunk a karbon származékok erősítőfázisként való felhasználásával kapcsolatos legfontosabb szempontok a következők: az alkalmazott grafén típusa, méretei, a mátrixban való eloszlása (diszperzitása), kölcsönhatása a mátrixanyaggal (például hatása a porozításra). Mindezek jelentős hatással vannak a kialakuló anyagszerkezetre és tulajdonságokra. Az általam vizsgált Si_3N_4 nanokerámiák örléses módszerrel készült többrétegű grafént tartalmaztak [31].

A szakirodalmi rész további részében a próbatestek gyártási módszereit tekintem át.

2.5. Az anyagszerkezet módosítása technológia fejlesztés útján

Szilíciumnitrid esetén a kialakuló anyagszerkezet és az ezáltal meghatározott anyagtulajdonságok nagymértékben függenek attól, hogy milyen gyártási módszert alkalmaznak.

A leggyakrabban alkalmazott gyártási eljárások a következőkkel készült szilíciumnitrid termékek típusai: *hidegsajtolást követően szinterelt* (röviden szinterelt), *melegen sajtolt* (Hot Pressed, HP), és *meleg izosztikus sajtolással* (Hot Isostatic Pressing, HIP), *gáznyomású szintereléssel* készült, illetve *reakció szinterelt* (Reaction Bonded, RB). Az olyan mechanikai tulajdonságok, mint a szilárdság, a keménység és a törési szívósság a kereskedelmi forgalomban kapható hidegsajtolással és azt követő szintereléssel készült Si_3N_4 termékek esetén kisebbek, mint a melegsajtolással készült változatoknál, amelyek általában MgO vagy Y_2O_3 adalékot tartalmaznak. Ez utóbbiaknál a szinterelés közben

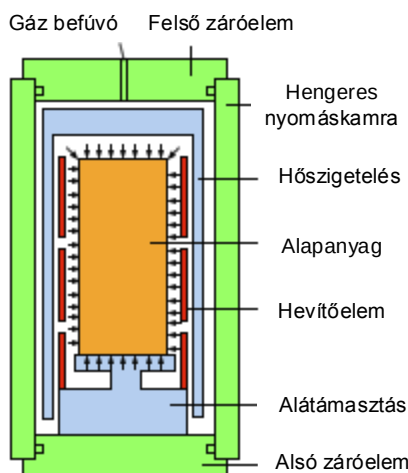
alkalmazott nyomás közel elméleti sűrűség elérését teszi lehetővé és kiváló mechanikai tulajdonságokat eredményez. Azoknak az alkatrészeknek a választéka azonban, amelyek meleg izosztatikus sajtolással és gáznyomású szintereléssel készülhetnek korlátozott és viszonylag drágák. Ezenkívül, a melegsajtolásos eljárások hátránya, hogy a hosszú idejű hőntartás következtében a nanokerámiák finom szemcséi eldurvulhatnak, kompozitok gyártása esetén pedig az adalékok, különösen a karbon származékok szerkezeti károsodásához, ezáltal tulajdonságromláshoz vezethetnek.

A legjobb minőségű Si_3N_4 termékek melegsajtolással és meleg izosztatikus sajtolással készíthetők. A legfontosabb elvárás ilyenkor, hogy a porozitás minél kisebb legyen, mivel ez a mechanikai tulajdonságokat rontja. Amennyiben oxid adalékanyagokat adnak a kiinduló szilícium-nitrid porhoz és ezt követően melegsajtolást vagy meleg izosztatikus sajtolást alkalmaznak, akkor a porozitás csökkenthető és a mechanikai tulajdonságok is javíthatók. A Si_3N_4 porból formázással (sajtolással) létrejött ún. nyerskerámia pórusmentesre szinterelhető, ha ritkaföldfém oxidokat és Al_2O_3 adalékanyagokat használnak. Emellett a kerámiák teljesítőképességének további növelésére, a gazdaságosság javítására egyre újabb, fejlettebb technológiák kerülnek kifejlesztésére. Egy ilyen új technológia például a *szikraplazma szinterelés* (Spark Plasma Sintering, SPS). A továbbiakban a vizsgált anyagoknál alkalmazott két eljárást mutatom be és hasonlítom össze.

2.5.1. A Si_3N_4 kerámiák gyártása meleg izosztatikus sajtolással

Az igényes kivitelű, finom szerkezetű, kiváló mechanikai tulajdonságú műszaki kerámiák előállítására a gyakorlatban jelenleg egyik legelterjedtebben alkalmazott, egyidejű alakadó- és szinterelési technológia, a meleg izosztatikus sajtolás módszere.

A meleg izosztatikus sajtolás, továbbiakban HIP eljárás során a szinterelt darabok előállítása nagy hőmérsékleten és nagy nyomáson porkohászati úton történik. Az eljárás vázlatát a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. A meleg izosztatikus sajtolás elvi vázlata [32]

A szintereléshez használt kiinduló porok keverése az ún. tisztaszobában történik, ahol igyekeznek meggátolni az alappor szennyeződését. A porok keverése és megfelelő szemcseméretre való őrlése történhet bolygómalomban vagy attritoros malomban. Az általam vizsgált próbatestek alapporát az utóbbi berendezéssel őrlték megfelelő szemcseméretűre. Ebben az esetben egy Si_3N_4 tégelyt alkalmaznak, amit ZrO_2 golyókkal töltenek fel, majd a por és víz/alkohol alkotta masszát a golyók szintjéig töltik, így kitölti a golyók közti teret. A monolitikus szilíciumnitrid kerámiák esetében az alapporon kívül egyéb tulajdonságjavító adalékokat, például Al_2O_3 -ot, valamint a diffúzió gyorsítása céljából az ún. folyadék fázisú szinterelés érdekében Y_2O_3 -ot, La_2O_3 -ot, SiO_2 -ot vagy MgO -ot adnak a kiinduló porkeverékhez. Az eljárás során az α -fázisú porból jellegzetes tűs morfológiájú β - Si_3N_4 keletkezik, amely nagyobb szívósságú, mint a kiinduló fázis. A β -fázis mennyisége a szinterelés hőmérsékletével és időtartamával együttesen szabályozható [33].

Ezt követően 4000 1/min fordulatszámon 4,5 óra alatt megfelelő szemcseméretűre őrlik a port. Így lehet a legjobban eloszlatni az adalékanyagot a Si_3N_4 mátrixban. Ezután az alapanyagot átszitálják, majd száraz sajtolással (220 MPa) nyerskerámia mintákat készítenek, amelyet ezután felmelegítenek, hogy elpárologhasson a sajtolásra használt segédanyag.

A következő lépés a hevítés, amely HIP eljárás esetében a hevítő elemek indirekt módon történő hevítésével valósul meg [34]. A szilíciumnitrid kerámiák szinterelése gyártási eljárástól függően HP és HIP esetében 1700-1800 °C-on és 10-200 MPa nyomáson történik, 1-3 órán keresztül nagy tisztaságú nitrogén gázban, bór-nitrid beágyazó por felhasználásával [35].

A szinterelt termék mechanikai tulajdonságai a gyártási paraméterek széles skáláján változhatnak. Meghatározó például a kiinduló por szemcsemérete, amely a legkorszerűbb kerámiákban kisebb, mint 200 nm. Fontos továbbá a porszemcse alakja, amely a legkedvezőbb esetben közel gömb alakú. A porszemcsék agglomerálódása minden esetben kedvezőtlen. A szinterelési adalékok önálló folyadékfázist képeznek a szemcsehatárokon, illetve a pórusokban. Ez részben hasznos, mivel a pórusok kitöltése révén csökken a feszültséggyűjtő helyek száma, ami a szívósságot, szilárdságot javítja. Ugyanakkor a szemcseközi üvegfázisok, amelyek a mechanikai tulajdonságok szempontjából kisebb teherbírású helyek, ha túl nagy mennyiségben vannak jelen, a terhelhetőséget, szilárdságot csökkentő helyekké válnak.

A HIP eljárás hátránya, hogy a nagy hőmérsékletű technológiai lépcső, azaz a szinterelés viszonylag nagy időszükségletű (több óra), emiatt költséges, továbbá, a hosszú hűtési idő káros lehet a mikroszerkezetre, részben a szemcsedurvulás veszélye miatt, részben pedig kompozitok gyártásakor az adalékanyag lehetséges szerkezeti degradációja miatt.

2.5.2. A szikraplazma szinterelés (SPS)

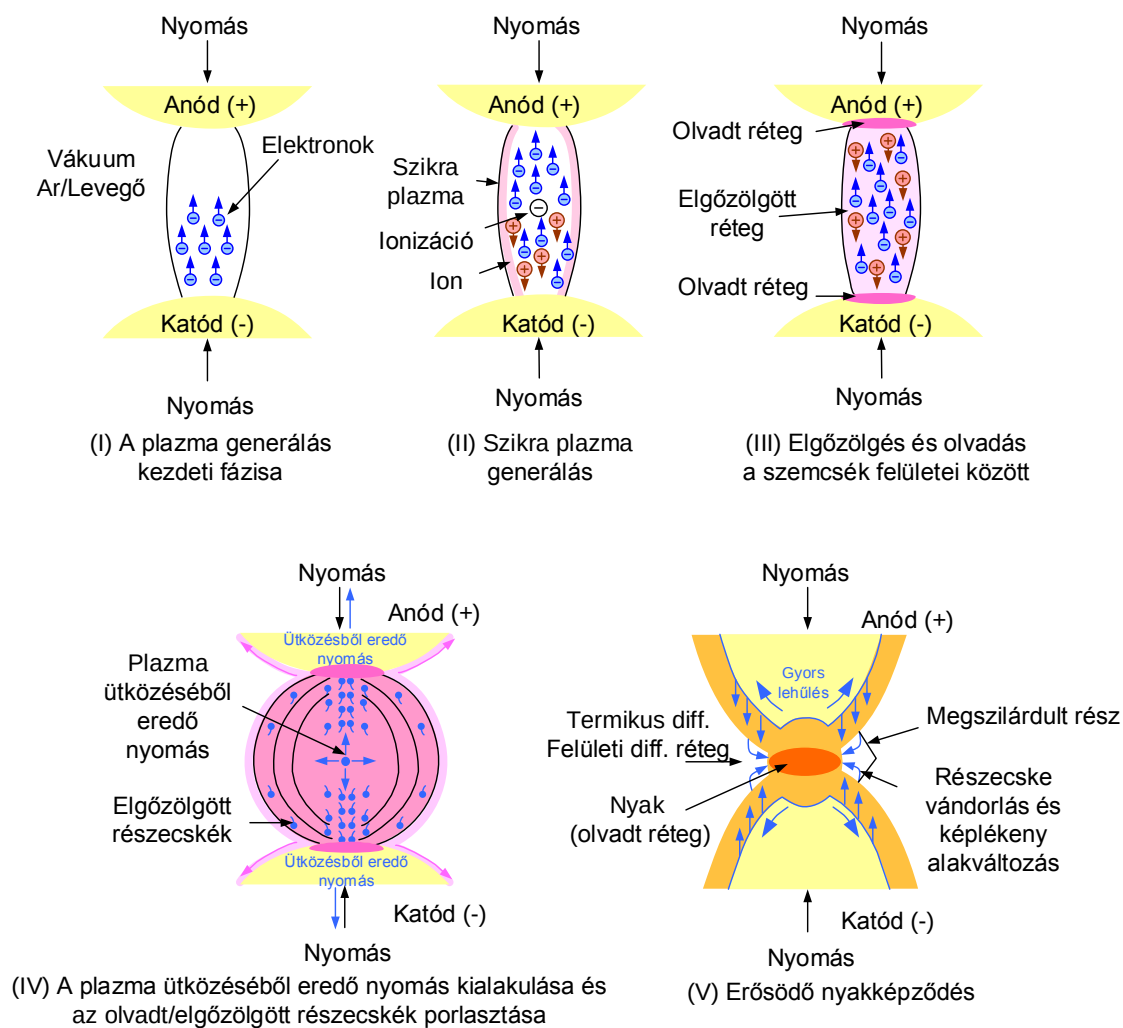
A vizsgált próbatestek gyártásához alkalmazott másik gyártási eljárás, a szikraplazma szinterelés (SPS) nagyon ígéretes lehet karbonnal adalékolt kerámia kompozitok előállítására.

A technológia története a 1930-as években indult az Egyesült Államokból, amikor először használták az elektromos energiát közvetlenül szinterelésre. Ezzel egyidőben Japánban váltóárammal, hasonló elven működő eljárást fejlesztettek ki, majd szabadalmaztatták. Az 1960-as években jelent meg az a technológia, amit ma szikraplazma szinterelés néven ismerünk. Inoue (1965) és az SPS eljárás további feltalálói állapították meg, hogy a kötést az áram által generált szikra és az érintkező szemcsék közötti plazma kisülés hozza létre. Erről a jelenségről kapta a technológia a nevét is, vagyis *szikra plazma szinterelés és plazma aktiválta szinterelés* [36].

A technológia második generációja a '80-as évek közepén és a '90-es évek első felében került kifejlesztésre. Az SPS technológia igazi debütálása azonban a harmadik generációs berendezések megjelenése volt. Ezek a berendezések már nagyteljesítményű pulzáló egyenáramú generátorokkal vannak ellátva, 0,1-1 MN nyomóerőt tudnak kifejteni és 2-20kA közötti áramerősséggel működnek. Az eljárás széleskörű ismertségét akkor szerezte meg, amikor gradients és kompozit anyagok előállítására kezdték használni [37, 38].

A szikraplazma szinterelés szabályozott hőmérsékleten történik, anyagminőségtől függően széles, 200-2400 °C-os hőmérséklettartományban. Egy adott termék esetében az alkalmazott átlagos szinterelési hőmérséklet jellemzően 200-500 °C-kal kisebb, mint a hagyományos szinterelési eljárásoknál. A leggyakrabban alkalmazott szinterelési közegek közé tartozik a vákuum, az inert gázú vagy a redukáló hidrogén-bázisú atmoszféra.

A technológiai eljárás végrehajtása – a nyomás ráadása, a felhevítés, és a nyomás fenntartása – rövid idő alatt történik meg. Egy alkatrész előállításának időtartama átlagosan 5-25 perc között változik. A szinterelés során a viszonylag kis hőmérséklet és rövid szinterelési idő biztosítja a szemcsenövekedés és a mikrostruktúra szabályozásának lehetőségét. Korábbi kutatások feltételezték, hogy a szemcsék között erősen lokalizált formában plazmaképződés figyelhető meg. Ezt a jelenséget először Tokita [37] publikálta 1999-ben. Munkájában megemlíti, hogy a szemcsék közötti nyakképződésben szerepe van a kialakult plazmának is. További japán szerzők szintén megemlítik a plazmaképződés jelenséget, ugyanakkor ezek a publikációk 1993-1995 között születtek és többségük japán nyelven íródott, így tartalmuk nehezen ellenőrizhető. A 4. ábra szemlélteti a nyakképződés mechanizmusát az SPS szinterelés során Tokita szerint:



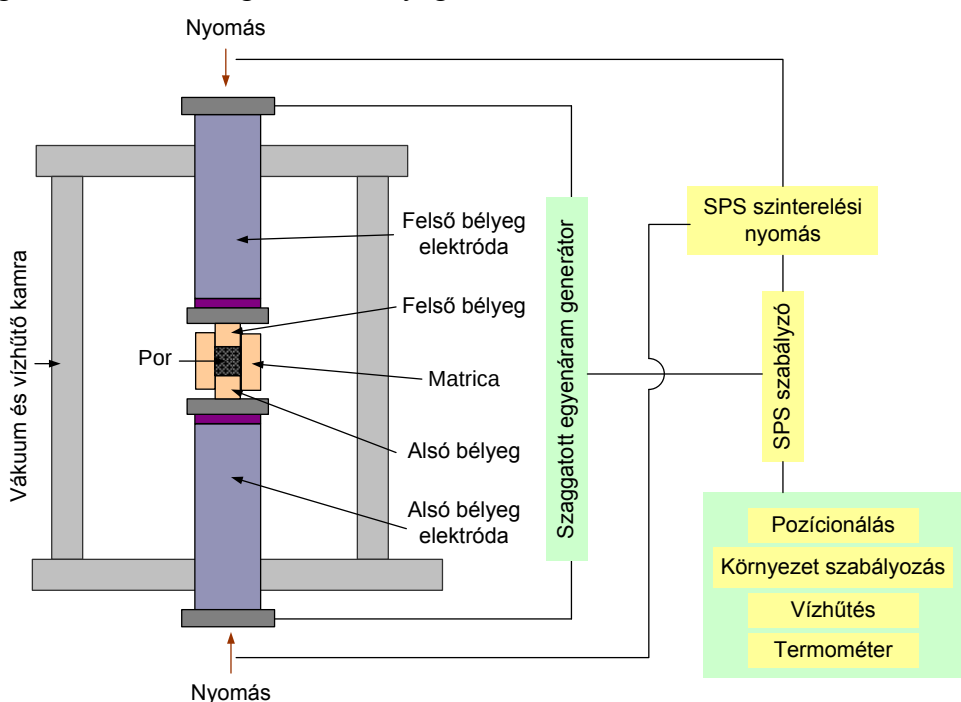
4. ábra. A nyakképződés mechanizmusa [37]

A 4. ábrán látható, hogy az első lépés során csak az elektronok áramlása figyelhető meg. Ezt követi a szikra plazma kialakulása és az ionizáció. A harmadik lépésben megfigyelhető egy elgőzölgött réteg kialakulása. A negyedik lépés szemlélteti a plazma ütközéséből eredő nyomás kialakulását, amely hozzájárul a szemcsék felületének tisztulásához, ezáltal növeli a kötés erősségét. Az utolsó lépésben kialakul a két szemcse között a nyak, amely megszilárdul, így kialakítva a kötést a két szemcse között. Mindezen lépések összessége nagyon rövid idő alatt megy végbe.

Bizonyos körökben elfogadott az, hogy elektromos kisülések mikroszkópi szinten jelen vannak [39], de napjainkban a szinterelési eljárásokkal foglalkozó kutatók nem értenek abban egyet, hogy a szinterelés során képződik-e plazma és jelentkezik-e szikrakisülés, vagy pusztán a Joule-hő segítségével történik a kötés kialakítása. Az egyik ilyen kutatás Tomino [40] és munkatársai nevéhez kötődik, akik alumínium-oxid port szintereltek grafit bélyeg és matrica között. Munkájuk során megállapították, hogy az alumínium-oxid poron nem volt megfigyelhető az áram átfolyása, ezért a nem vezető mintában nem volt megfigyelhető elektromos kisülés. Hasonló következtetést vont le Xie [41], aki tiszta alumínium szinterelésével foglalkozott és szintén nem figyelt meg kisülést a szinterelés

alatt. Egy másik nagy vonulemű kutatás során különböző por alapanyagokat (Al, Al₂O₃, Na, Ca, Mg, Zn) szintereltek különböző hőmérsékleten (225-650 °C), különböző közegekben (vákuum, Ar). Auger elektron spektroszkópia segítségével megállapították, hogy a kísérletek során egyetlen esetben sem volt megfigyelhető szikrakisülés vagy plazma kialakulása [42]. Összességében elmondható, hogy számos kísérlet történt a plazma és a szikrakisülés jelenségének bebizonyítására, azonban egy sem járt még sikerrel.

Az SPS eljárás jellegzetessége a rendkívül nagy termikus hatásfok, amely a szinterelést végző grafit matrica (5. ábra) és behelyezett por alapanyag hevítésének köszönhető. A technológia egyenletes hevítést biztosít a próbatest egész térfogatában, nagytisztaságú végterméket eredményez kellő hatékonyság mellett, így egyszerű előállítási módszert kínál a homogén, kiváló minőségű szilárd anyagok előállítására.



5. ábra. Az SPS technológia elvi vázlata [43]

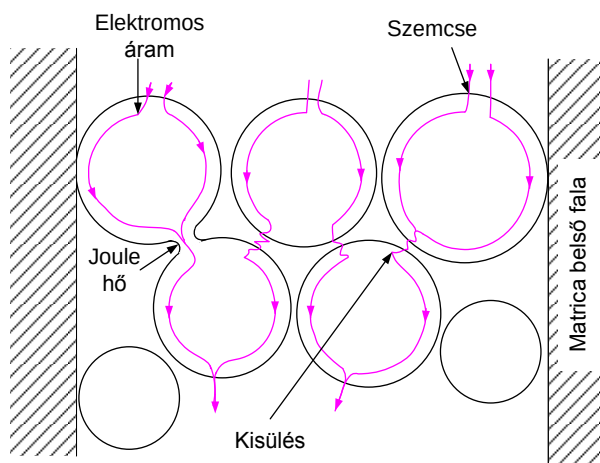
A rendszer tartalmaz egy egytengelyű terhelés kifejtésére alkalmas mechanizmust, egy beépített, vízhűtésű speciális gerjesztő mechanizmust, vízhűtésű vákuum kamrát, környezeti atmoszféra szabályzót, vákuum előállító egységet, speciális egyenáram generátort és a berendezés működésének szabályozására alkalmas egységet. A por alapanyagot a matricába és a bélyegek közé helyezik a szinterelő kamrába, amely két elektróda között található. Nyomás és áram alá helyezve a hőmérséklet gyorsan megemelkedik, amely jó minőségű szinterelt darabokat eredményez néhány perc alatt.

A nyomás fontos és meghatározó szerepet játszik a szemcsék növekedésének és a sűrűség végső értékének szabályozásában, ezért az SPS eljárás során a sajtolásnál alkalmazott erő pontos meghatározása fontos elem a technológia hatékonyságának növelése és a termék minősége szempontjából. A túl kicsi és túl nagy nyomás is negatívan

befolyásolhatja az eljárás eredményét. A nagyméretű daraboknál, ahol nagy sűrűségű munkadarab előállítása a cél, az erőt szakaszosan növelik, hogy elősegítsék az elgőzölgést [37, 44].

Az eljárás szaggatott egyenáramot alkalmaz (ON-OFF DC), amely egy speciális áramgenerátorból származik. Az SPS gyártásban a porszemcsék felülete sokkal egyszerűbben tisztul és aktiválódik, az anyagáramlás hatékonyabb mind mikro-, mind makroszinten, valamint alkalmazásával jó minőségű szinterelt darab készíthető alacsonyabb hőmérsékleten és gyorsabban, mint a hagyományos szinterelési eljárásoknál, ugyanis a részecskék között jelentkező Joule-hő segíti a részecskék összehegedését mechanikai nyomás alatt.

Az érintkező szemcsék felületei eléri a forráspontot, helyi elgőzölgés, valamint a porszemcsék felületének tisztulása figyelhető meg [45]. Ezen jelenségek kedvező útvonalat biztosítanak az áram átjárásának is. A 6. ábra mutatja be, ahogy a pulzáló áram keresztülfolyik a matricába betöltött szemcsék felületén.



6. ábra. Az elektromos áram átfolyása a szemcséken [43]

A szinterelés során keletkező nyomás eltávolítja a porszemcsék felületén adszorbeált gázokat és szennyeződések.

A technológia előnyei, hogy alkalmazásával javíthatók a kerámiák tulajdonságai, mint például elkerülhető a szemcsedurvulás, valamint szinterelés közben új fázisok létrehozására van lehetőség, amely javíthatja az anyagok kopással szembeni ellenállását és csökkentheti az alapanyag gyártási költségeit (például SiC esetén), továbbá alkalmazásával a kiinduló por megőrizheti α polimorf szerkezetét, amely egy kemény fázis és megfelelő szívósságnövelő eljárással jóval hasznosabb lehet a jelenléte kopás szempontjából.

Az eljárás lehetővé teszi a nanokerámiák nagyüzemi előállítását, elkerülve a hosszú idejű szinterelési technológiák okozta szemcsedurvulásokat és anyagszerkezeti hibákat. Alkalmazásával elkerülhető a kötőanyagok használata, amelyek jellemzően gyengítik az alapanyagot és hajlamossá teszik azt a kémiai kopásra és csökkentik szilárdságát.

További előnye, hogy alkalmazásával elérhető akár a 100%-os elméleti sűrűség is. Ennek technológiai és fizikai hátterét az adja, hogy a minta elemi részei közötti kötések erőssége befolyásolható a nyomás és a hőmérséklet pontos szabályozásával, ezáltal az anyag porozitása jobban kontrollálható. További előny, hogy a kémiai kötés létrehozható azonos és nem azonos anyagok között is, noha a teljesen különböző anyagok esetén számolni kell a rétegek és az eredeti anyag közötti termikus feszültségek létrejöttével.

A technológia segítségével lehetővé vált bonyolult geometriájú alkatrészek egylépcsős előállítása, továbbá megmunkálás nélküli (*near net shape*) és funkcionális – jellemzően gradiens – anyagok előállítása is. Továbbá, az SPS technológia 50-80%-kal költségkímélőbb, mint a hagyományos szinterelési technológiák, elsődlegesen a nagy hevítési sebességnek köszönhetően, ezáltal 20× gyorsabb lehet, mint a hagyományos eljárások. Hátránya azonban, hogy csak szimmetrikus alkatrészek legyártásra alkalmas, valamint az áramgenerátor ára magas.

Az SPS technológia nagyon ígéretes eljárás lehet a kerámia nanokompozitok előállítása területén [46, 47, 48 49, 50].

2.6. *Kopás és tribológia*

A tribológiai folyamatok során két érintkező felület relatív elmozdulása valósul meg. Ez a folyamat egyidejűleg magába foglalja a különböző nagyságrendű és típusú súrlódást, a kopást és a deformációs mechanizmusokat.

2.6.1. *A kopás fogalma, jelensége*

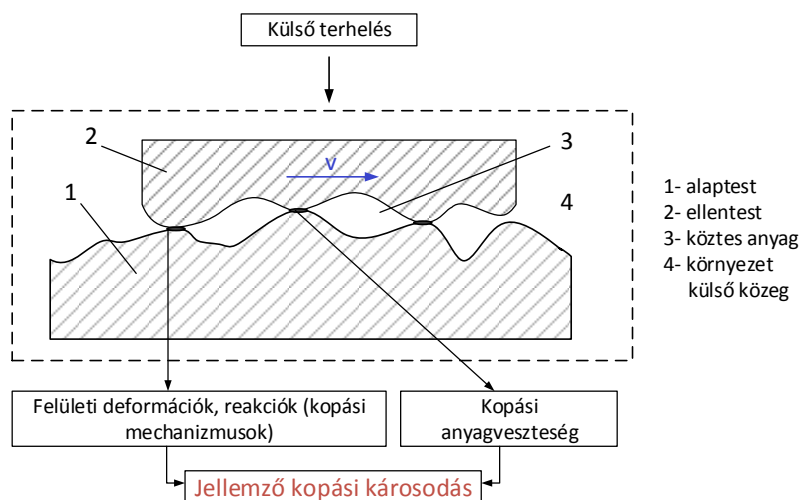
A tribológia az egymással érintkezésben, kölcsönös mozgási viszonyban lévő felületeket kutató tudományág, illetve ennek eredményeit felhasználó technika [51]. Más értelmezés szerint „*a tribológia a kölcsönösen egymásra ható és egymáshoz viszonyítva elmozduló felületek tudománya és technológiája, egyben felöleli az ezzel kapcsolatban álló gyakorlati intézkedéseket*” [52].

A kopás szilárd testek felületén bekövetkező anyagveszteség, amelyet szilárd, cseppfolyós vagy légnemű ellentesttel, illetve közeggel való érintkezés és relatív elmozdulás okoz [53]. A relatív elmozdulás okozta igénybevétel lehet: csúszás, gördülés, ütközés, lengés, abrázió, erózió, kavitáció, amelyek külön-külön, vagy kombináltan is jelentkezhetnek.

Kopás során az érintkező és elmozduló felületek között súrlódás lép fel, és a fellépő mechanikai, termikus és vegyi igénybevételek hatására a kölcsönhatásban levő súrlódó felületekről anyagrészecskék válnak le. A folyamat eredményeképpen a felületek alakja, mérete megváltozik és a felületek különböző mértékű károsodást szenvednek. Általában normálisnak tekintjük és a működés természetes velejárójának, ha a kopási folyamatban az anyagleválás lassú, fokozatos. Nem megengedhetők azonban a gyorsan létrejövő, és

növekvő mértékű felületi károsodások: berágódások, karcoldások, bemarkódások, összehegedések.

A kopási folyamatot leíró tribológiai rendszer felépítését a 7. ábra illusztrálja:



7. ábra. A kopást okozó igénybevételek és a kopási károsodás elemeinek kapcsolata az elvi tribológiai rendszerben

A tribológiai folyamatok a méretskála különböző szintjein értelmezendők:

- A nanotribológia vagy molekuláris tribológia a molekulák, az atomok között fellépő jelenségeket például a van der Waals erőket vizsgálja, vagy például az egykristályok szerkezetét;
- A mikrotribológia vagy „asperitás”-tribológia definiálása Bowden és Tabor (1950) tanulmányához köthető, amelyben a szerzők a súrlódás, a kopás és adhézió jelenségét a felületi topográfia oldaláról közelítették meg. A mikrotribológia középpontjában a rugalmas és képlékeny deformáció, a törés, a roncsolódások (törmelék-képződés), a tribofilm képződés és topográfiai hatások állnak;
- Makrotribológia vagy érintkezési tribológia a 20. század kezdetéhez kapcsolódó kutatásokban játszott jelentős szerepet. Ez a terület foglalkozik a fogaskerek, görgők, csapágyak érintkezési problémáival, továbbá a Hertz feszültséggel és elasztó-hidrodinamikai (EHD) kenéssel. Ehhez a területhez tartozik a szabad szemmel látható kopási mechanizmusok tanulmányozása is (például berágódás, pitting);
- Az alkatrész-tribológia feladatköre az olyan jellegzetes paraméterek mérése és meghatározása, amelyek az alkatrészek, szerkezeti elemek kölcsönhatásával kapcsolatosak. Ilyenek például a nyomaték, a résméret, a kiegyenlítettség [54].

2.6.2. A kopási módok és mechanizmusok

A kopás nem tekinthető anyagtulajdonságnak. Egy anyag fajlagos kopási sebessége 10^{-3} és 10^{-10} mm³/Nm között változhat függően az érintkezési feltételektől, vagyis az érintkező anyagok tulajdonságaitól, az érintkezési nyomástól, a csúszási sebességtől, az érintkező felületek nagyságától, a felület érdességétől, a környezettől, a kenés meglététől és minőségétől [55].

A kopási sebesség állandó terhelőerő és elmozdulási sebesség mellett is változik az érintkezési folyamatok ismétlődése során. Általánosságban elmondható, hogy a kezdeti, tranzienst szakaszban nagyobb értéket vesz fel, mint az állandósult szakaszban.

A kezdeti kopás és az állandósult kopás fogalmakat azért különböztetjük meg, hogy jellemezzük az ismételt érintkezések okozta kopás sebességének változását. Acél-acél érintkezési felületek kopása esetén ezt a változást az okozza, hogy a kopási mód megváltozik, például az adhéziós kopást korróziós (oxidációs) kopás váltja fel. A bekopás fogalmát pedig a kezdeti nagy sebességű kopási folyamatok leírására használjuk.

A kopási mechanizmusok tekintetében Kato szerint megkülönböztetünk mechanikai, kémiai és termikus kopást [55]. Ezek a mechanizmusok tovább oszthatók kopási módokra vagy kopástípusokra, amelyeken belül hét különböző alosztály található: abrazív, adhéziós, fáradásos, képlékeny, korróziós, olvadásos és diffúziós. A többségük kopási modellek segítségével leírható és matematikai összefüggések segítségével számítható a kopási sebességük, de sok kopástípus esetében még nincs megbízható kopási modell és a károsodás mértékének számszerűsítése is nehézségekbe ütközik.

Itt kell megjegyezni, hogy a különféle szakirodalmakban a tribológiával foglalkozó szakemberek a kopási folyamatok osztályozására, leírására vonatkozóan rendkívül eltérő terminológiát használnak, amelyek egymásnak is sokszor ellentmondanak. A tribológiai folyamatok, károsodási módok, mechanizmusok, kopástípusok egységes leíráshoz egy olyan új egységes rendszer kidolgozása és alkalmazása szükséges, mint amelyet például a [56] munka szerzője is javasol.

A legátfogóbb osztályozások szerint makroszkopikusan megkülönböztetünk mechanikai, termikus és kémiai kopástípusokat/módokat (például adhéziós, abrazív), ezen belül pedig az uralkodó kopási folyamatok mikroszintű mechanizmusai alapján definiálják a kopási mechanizmusokat (például tribofilm képződés és leválás).

A kopástípusok közül a legismertebb az adhéziós-, az abrazív-, a fáradásos- és korróziós vagy tribokémiai kopás. Az általam vizsgált szilícium-nitrid kerámiákat az utóbbi jellemzi [57, 58], a továbbiakban ezt a tématerületet tekintem át.

2.7. Kerámiák kopása

A kopással kapcsolatos szakirodalmak döntően a fémek anyagok kopási jelenségeit tárgyalják. Kerámiák anyagok súrlódási-kopási károsodására kevesebb a rendelkezésre álló ismeretanyag.

A kopási károsodás egymással kölcsönhatásban lévő bonyolult folyamatok eredménye. Függ az anyagok minőségétől és a tribológiai rendszer működési feltételeitől.

Fémek anyagok kopásállósága jellemzően az abrazív kopási folyamatokban az anyag keménységével hozható elsősorban kapcsolatba. Kerámiáknál a keménység mellett más anyagjellemzők leginkább a szívósság, rugalmassági modulus és szilárdsági jellemzők együttesen határozzák meg a kopással szembeni ellenállást.

A kerámiák és fémek kopási viselkedése alapvetően eltér, amelyre a szakirodalom számos példát ismertet [52, 59, 60]. Ezeknek az anyagoknak a különböző mechanikai viselkedése az atomjaik közti eltérő kötésekből és szerkezetükből ered. Ez a különbség a kopási viselkedés során is meghatározó.

A képlékeny fémekkel szemben a kerámiák kopását nem túlzottan nagy igénybevételek esetén inkább a mikrotörés és az azzal kapcsolatba hozható anyagi sajátosságok (például szívósság, szemcseméret, szemcsehatármenti fázisok) irányítják. Nagyobb terheléskor azonban a fellépő jelentős mértékű súrlódási hő olyan feltételeket teremthet, amelynek hatására a kerámiák reakcióba lépnek a környezettel és új vegyületek alakulnak ki. Ezek a vegyületek hatással vannak a súrlódási együtthatóra, csak úgy, mint a fémek esetében. Olvadt vagy lágy állapotban például kenéshez vezetnek, míg rideg törmelékként a súrlódó felületek között maradván intenzív abrazív kopást okozhatnak.

Ismétlődő igénybevétel során a rideg anyagok hajlamosabbak a korai tönkremenetelre. Ezt tapasztalhatjuk például pin-on-disc kopási vizsgálatok végrehajtásakor. Bizonyos esetekben a kerámia szerszámot rideg fémrel párosítva a tű (pin) kopása gyorsabb, mint a tárcsa (disc) kopása, rideg kerámiák párosításakor pedig a tárcsa kopik gyorsabban, mivel a tárcsán a tű ismétlődő elcsúszása ciklikus feszültséget halmaz fel [59], amely, ha a tárcsa ridegebb anyagból készül, gyorsabban vezet kopásos tönkremenetelhez. Az anyagok felületén lejátszódó kémiai reakciók intenzitása súrlódás esetén megnő. A kerámiák súrlódási folyamatainál megjelenhet a helyi képlékeny alakváltozás, a tribokémiai reakciók módosíthatják a csúszási felületet és egy köztes filmréteg kialakulásához vezethetnek. A felsoroltak közül a kerámiáknál leginkább a tribokémiai hatások és azok következtében fellépő kopási károsodások a jellemzőek. Kerámiáknál az összetétel mellett rendkívül fontos a porozitás mértéke is, ami alapvetően rontja a kopással szembeni ellenállást. Ugyanilyen kedvezőtlen a felületi érdesség romlása.

A kerámiáknál előforduló kopási formákat, mechanizmusokat számos szakirodalom vizsgálja. A legjellemzőbb kopási mechanizmusok az abrazív, adhézios, tribooxidációs és

eróziós kopás. Az általam is vizsgált szívósabb, nem-oxid típusú kerámia jóval nagyobb ellenállást mutat az eróziós kopással szemben, mint az oxidkerámiák [61].

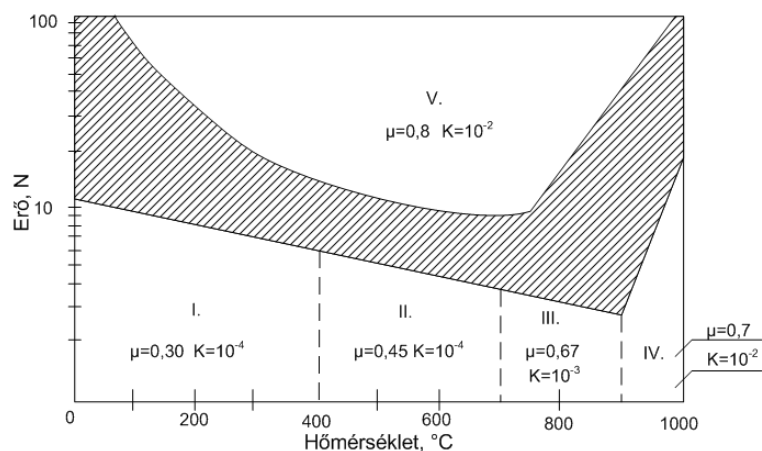
2.7.1. *A Si_3N_4 kerámiák kopásának sajátosságai*

Amint azt a korábbiakban bemutattam, a szerkezeti kerámiákat széles körben alkalmazzák triboanyagokként. Az ilyen célú felhasználások során a legfontosabb kérdés, hogy egy adott üzemi körülmény esetén milyen mértékű kopásra számíthatunk, mekkora lehet a hasznos élettartam, illetve melyek azok a terhelési feltételek, amelyek az enyhe és az erős kopás tartományát elválasztják. A kutatások másik fontos kérdésköre, hogy kenőanyagok segítségével hogyan tudjuk a kopási károsodás mértékét csökkenteni és a hasznos élettartamot meghosszabbítani. Az enyhe és az erős kopás tartományát jól megkülönböztethetjük a törési folyamat sajátosságai alapján. Az enyhe kopás során a kopási anyagveszteség egy kvázi-képlékeny törési folyamat során keletkezik, oly módon, hogy az érintkezési felületek alatt nagyszámú mikrorepedés keletkezik, amelyek fokozatosan összenöve és kijutva a felszínre anyagleválást okoznak. Ezzel szemben az erős kopást jellemzően klasszikus ridegtörési folyamat okozza, amikor a repedés a Hertz-féle érintkezési feszültség hatására jön létre és kijutva a felszínre pikkelyszerű kipattogzást, anyagleválást okoz.

A nem oxid-kerámiák – mint a Si_3N_4 – esetén jellemző a tribokémiai kopás, mivel a jelenlévő környezeti közeg (például a levegő páratartalma) segíti a kémiai reakció lejátszódását. Ezen reakciók hatására kialakuló komplex oxid vagy hidroxid filmréteg gyenge adhéziós kötással kapcsolódik az alapanyaghoz, ezért súrlódás közben igen könnyen letöredezhet és kopási törmelék képezhet. Amennyiben ez nem történik meg, csökkenti a kopás mértékét. Így elmondható, hogy a kialakuló réteg fizikai-, kémiai-, mechanikai jellemzőitől függ a filmképződés és az anyagleválás egymáshoz viszonyított sebessége, ami meghatározza a kopási károsodást irányító folyamatokat.

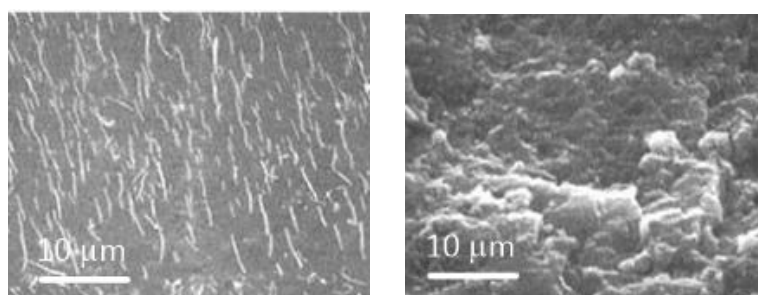
Meleg izosztatikus sajtolással gyártott Si_3N_4 kerámiákra az enyhe és erős kopás tartománya közötti átmenetet ábrázolja a 8. ábra kis sebességű, saját anyagú ellentesttel végzett, kenés nélküli ball-on-flat típusú kopásvizsgálat esetén. Az ábra öt tartományt foglal magába. Az első négy és az ötödik tartományt elválasztó határterület (8. ábra, sraffozott tartomány) kiterjedtebb, mint például Al_2O_3 -nál. Kis terhelésnél és alacsony hőmérsékleten ($T < 400^\circ\text{C}$) az I. tartomány érvényes, ahol a tribológiai viselkedést a kopásnyomban képződő szilícium-hidroxid kontrollálja [16]. Az I. régióban a súrlódási együttható 0,3 körüli értéket vesz fel, míg a kopási sebesség 10^{-4} nagyságrendű. A szilíciumhidroxid képződését FTIR spektroszkópiával, (Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia) röntgen diffrakciós vizsgálattal, és Auger spektroszkópiával mutatták ki [62]. A hidroxidrétegből képződött hengerszerű kopási törmelék képlékenyen alakváltozott jellegzetes mintázatát mutatja a 9. a) ábra. A II-III-IV. tartományokban a hőmérséklet növekedésével a különféle összetevők oxidációs folyamatai és a keletkező oxidok leválása

irányítja a kopást, egyre növekvő súrlódási együttható ($\mu=0,7$) és kopási tényező ($K=10^{-2}$) mellett. A terhelőerő növelésével valamennyi tartomány eléri az erős kopás mezejét.



8. ábra. Meleg izosztatikusan sajtolt (HIP) Si_3N_4 kopási diagramja

Kenőanyag nélküli, levegőn végzett ball-on-flat vizsgálat saját anyagú ellentesttel, egyenesvonalú, alternáló mozgással; csúszási sebesség: 1,4 mm/s, golyóátmérő: 12,7 mm, polírozott felület $R_a = 0,1-0,2 \mu\text{m}$ [55]



a)

b)

9. ábra. Mikrofelvételek a Si_3N_4 kopásnyom károsodásairól a) I. tartomány: Si_3N_4 /víz tribokémiai reakciója; b) V. tartomány: a tribofilm mikrotöréses feldarabolódása [55]

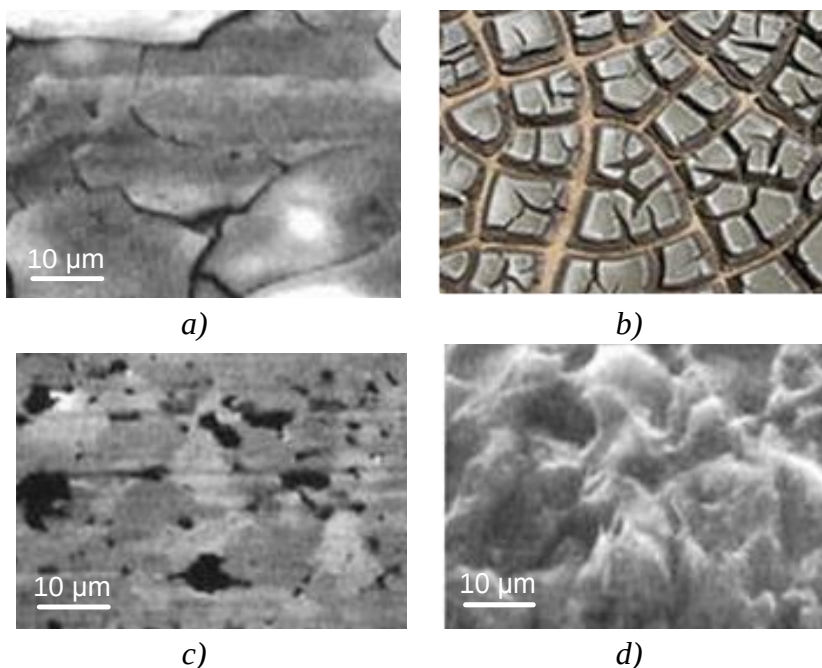
Az V. jelű tartományban a domináns kopási mechanizmus a mikrotörés az erős kopás tartományára jellemző K értékekkel ($\mu=0,8$; $K=10^{-2}$). Szobahőmérsékleten az enyhe és erős kopás közötti átmenet kezdetéhez tartozó határterhelés 14 N, amely a hőmérséklet növelésével jelentősen csökken és 900°C-on már csak 3 N, miközben a kopási tényező két nagyságrenddel növekszik. A szakirodalmak szerint a Si_3N_4 kerámiáknál az erős és enyhe kopás közötti átmenetet a csúszási sebesség csak kevésbé befolyásolja, ugyanakkor a kritikus határterhelés kezdeti értékét akár 100 N-ra is növelhetjük kenőanyagok, például faggyú, paraffin olaj alkalmazásával [55, 62, 63].

A tervezett kopásvizsgálataim során Si_3N_4 alaptestet párosítom SiC ellentesttel. Mindkét anyag kopási viselkedése befolyásolja a kopásvizsgálat eredményét, ezért szükséges a SiC kopási folyamatának szakirodalmi áttekintése is.

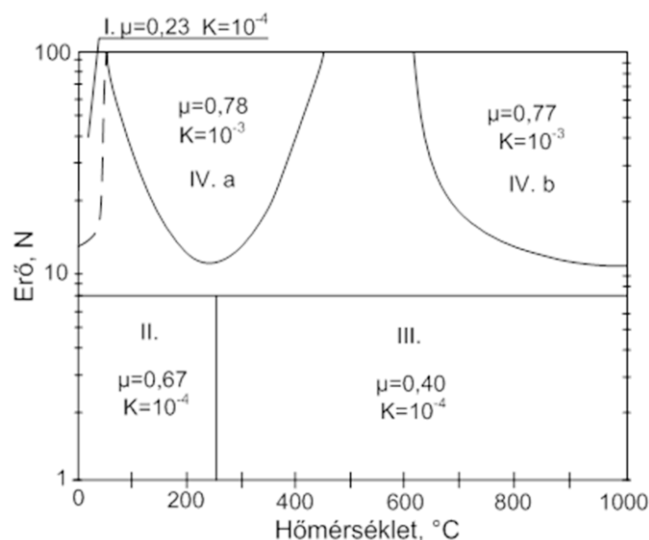
2.7.2. SiC kopási folyamatának jellemzői

A SiC kerámiák kopása során, a Si_3N_4 -hez hasonlóan, megfigyelhető a kerámia és a víz tribokémiai reakciója és tribofilm képződése a kopásnyomban, amint azt a 10. ábra a) részlete mutatja. Szobahőmérsékleten, nagy relatív páratartalom mellett és nagy terhelőerővel végzett vizsgálatok esetén ennek a tribofilmnek köszönhetően a súrlódási együttható és a kopási tényező értéke kicsi. SiC kerámián kis sebességű, azonos anyagú ellentesttel – a 8. ábrán megadott körülményekkel azonos módon – végzett ball-on-flat vizsgálatok során felvett kopási diagramot mutat a 11. ábra.

Az I. tartományban, ahol a vízpára és a SiC közötti tribokémiai reakció kontrollálja a kopási mechanizmust, a súrlódási együttható értéke 0,23, a kopási tényező 10^{-4} . A tribofilm összefüggő filmréteget képez a kopásnyomban, amely nagyobb terheléseknél összetöredezik és részlegesen leválk a felületről. A megmaradó összefüggő tribofilm pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat során vákuumban megrepedezik és mikrorepedések hálózata jön létre, hasonló mintázatot mutatva, mint a kiszáradt agyag (10. b) ábra). A páratartalom 70%-ról 30%-ra csökkenésekor a kenőanyagként szolgáló filmképződés gyengül és a súrlódási együttható értéke 0,7-re növekszik.



10. ábra. (a) Összetöredezett tribofilm SiC felületén (b) kiszáradt iszap (c) II. tartomány: szántásos kopás (d) IV. tartomány: mikrotörések [55]



11. ábra. Szinterelt SiC kopási diagramja

Kenőanyag nélküli, levegőn végzett ball-on-flat vizsgálat saját anyagú ellentesttel, egyenesvonalú, alternáló mozgással; csúszási sebesség: 1,4 mm/s, golyóátmérő: 12,7 mm, polírozott felület $R_a = 0,1-0,2 \mu\text{m}$ [55]

A kopási térkép II. tartományában, ahol kisebb a terhelőerő, kb. 250°C-ig a károsodást az ún. szántásos kopás jellemzi, amelynek jellegzetes képe a 10. c) ábrán látható. A barázdált felszínen a súrlódási együttható a páratartalomtól függetlenül megnövekszik ($\mu=0,67$), de a kopási együttható kicsi marad (10^{-4}), mivel a kis terhelés miatt az anyagvesztés kismértékű. Az ilyen kis terhelések esetén, a hőmérséklet növelésekor a SiC oxidációjának következtében az összefüggő filmképződés erősödik és a súrlódás, valamint a kopás mértéke csökken (III. tartomány).

Nagy terhelések esetén különösen nagy hőmérsékleteknél, erősödik a tribo-oxidáció, a tribofilm összetöredezik (10. d) ábra) nagy súrlódási együtthatót és erősebb kopást eredményezve (IV. tartomány a 11. ábrán).

Az enyhe kopás mellett megjelenő erős kopás tartományát SiC esetében a hőmérséklettől függetlenül, a vizsgált körülmények között az $F = 7 \text{ N}$ terhelési szint választja el egymástól. Szakirodalmi eredmények szerint az átmenethez tartozó kritikus terhelés értéke kenőanyag jelenlétében 200 N fölé is növelhető. Jellegzetes eltérés a Si_3N_4 -hez képest, hogy SiC kerámiáknál az enyhe és erős kopás között mindössze egy nagyságrendnyi eltérés van a kopási együttható értékében [64].

A következő fejezetben mind a Si_3N_4 , mind a SiC kerámiákra jellemző kopási mechanizmussal foglalkozom.

2.7.3. *A tribokémiai mechanizmus*

A kerámiák, különösen a nitrdek, oxidok és karbidok számos előnyt nyújthatnak a hagyományos anyagú súrlódó párokhoz viszonyítva, ugyanis ezek az anyagok kémiailag nagyon stabilak, ugyanakkor súrlódás közben nagyon reakcióképesé válhatnak. A kerámiák súrlódás közben jóval érzékenyebbek a környezeti változásokra, mint a fémek, ezért nagyon fontos, hogy foglalkozzunk a kopáshoz kapcsolódó fizikai és kémiai háttérrel.

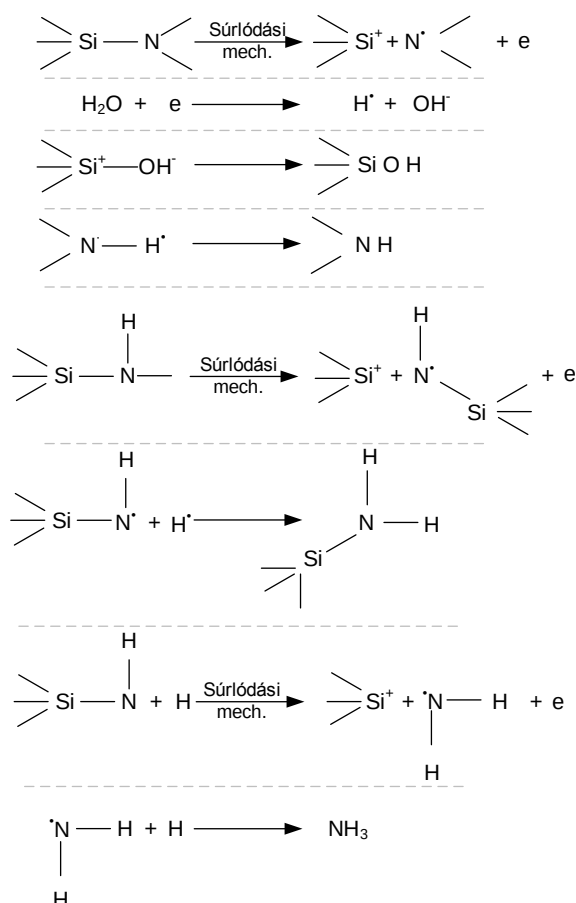
A kerámiák koptatása során találkozhatunk a tribokémia fogalmával, vagyis a triboemisszióval és a mikroszkópi szintű kémiai reakciókkal. (Kivételt képeznek azok az esetek, amikor a tribológiai folyamatok ultranagy vákuumban mennek végbe.) A fő kémiai jelenségek a kerámiák súrlódásakor a hőmérséklet emelésével és alacsony energiájú elektronok kibocsátásával alakulnak ki. Ezek a kis energiájú elektronok tribokémiai reakciókat indíthatnak el, amelyek eredménye egy kopáscsökkentő film kialakulása a felületen. A triboemissziós folyamatokban a tribológiai károsodás mellett kibocsátott ionok, fotonok, UV sugárzás, infravörös sugárzás és hang kibocsátás is jelen lehet.

Kajdas [65] tanulmányában áttekinti a triboemissziót, különös tekintettel az elektron-kibocsátásra. A súrlódás során új felületek jönnek létre, amelyek „hidakat” képeznek a fizikai és a kémiai kopási folyamatok között, amelyek mikroszkópikus szinten különböző kopási mechanizmusok megjelenési formáihoz vezetnek. Kim és szerzőtársai [66] munkájukban leírták az elektron és foton triboemisszióját és megmérték az elektron energiáját MgO gyémánttal történő karcolása során. Molina és szerzőtársai [67] szintén tanulmányozták a triboemissziót kontakt súrlódás esetén konstans terhelőerővel és csúszási sebességgel gyémánt/alumínium, gyémánt/Si₃N₄ és Al₂O₃/Al₂O₃ súrlódó pároknál.

A Si₃N₄ tribokémiai folyamatai

A tribokémiai reakciók nagyon összetettek, habár a NIRAM-HSAB (*Negative-Ion-Radical Action Mechanism-Hard and Soft Acids and Bases*) leírás figyelembe veszi ezeket. Ez a tribokémiai modell a negatív ionok-gyökök reakciójára épül és a súrlódó kerámia felületek és a kenőanyag/környezet között lezajló kémiai folyamatot mutatja be. A folyamat két lépésből épül fel: az első a súrlódó anyagok közeggel történő kémiai reakcióját, mint például a Si₃N₄ és víz/oxigén molekulákkal történő reagálását, míg a második lépés az első lépésben kialakult felület és az adalékanyagok/ kenőanyagok között végbemenő folyamat. [68].

A NIRAM-HSAB modell legegyszerűbb formája Si₃N₄ és víz esetére a 12. ábrán látható [69].

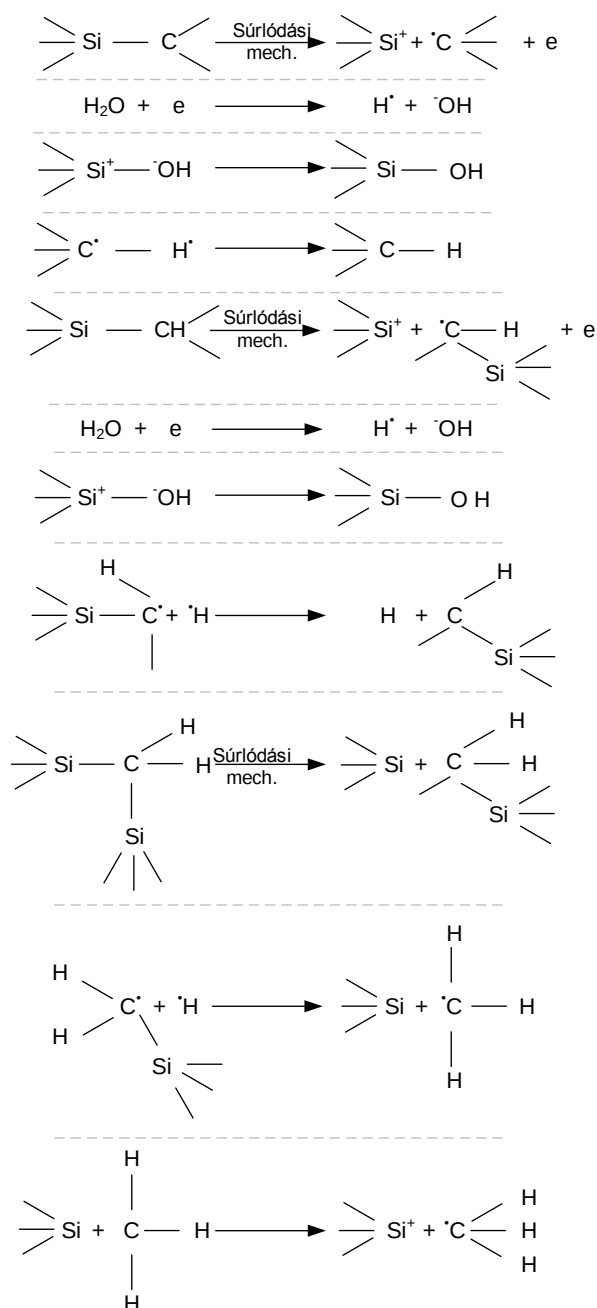


12. ábra. A Si_3N_4 és a víz közvetett reakciója [70]

A SiC tribokémiai folyamatai

Mivel a kutatásaim keretein belül elvégzett tribológiai vizsgálatoknál az ellentest SiC-ből készült, át kellett tekintenem a SiC tribokémiáját is, amelyet a 13. ábra szemléltet.

A keletkezett $\bullet\text{CH}_3$ gyökök nagyon rövid életűek és erősen reaktívak, ugyanis amikor egy másik molekulával ütköznek, hajlamosak párba rendeződni egy pár nélküli elektronnal. Több, mint egy hidrogén atom másik molekula vagy a H gyökkel való rekombinációja esetén metán keletkezik. Ezen tribokémiai reakciók során keletkező termékek természetes kenőanyagot biztosíthatnak száraz súrlódás esetére a kerámia próbatestek felszínén. Fontos megemlíteni, hogy korábbi tribokémiai kutatások [71], amelyek a víz és a szilícium alapú felületek tribokémiai reakciójával foglalkoznak, rávilágítottak arra a tényre, hogy a Si-H kötések száma növekszik a páratartalommal, akárcsak az OH^- koncentráció a kopási törmelékben.



13. ábra. A SiC és a víz közvetett reakciója [68]

Ebben a fejezetben egy triboreakciós modellt mutattam be, amelyet főleg kerámiák víz kenés melletti koptatásakor alkalmaznak. Habár a szakértők szerint túl korai egyetlen egyenletet felállítani, amely minden kerámiára alkalmas lehet, azonban Si₃N₄ esetére jól igazolt modellnek tűnik az előbb bemutatott, amely a kis energiájú elektronok emisszióján alapszik.

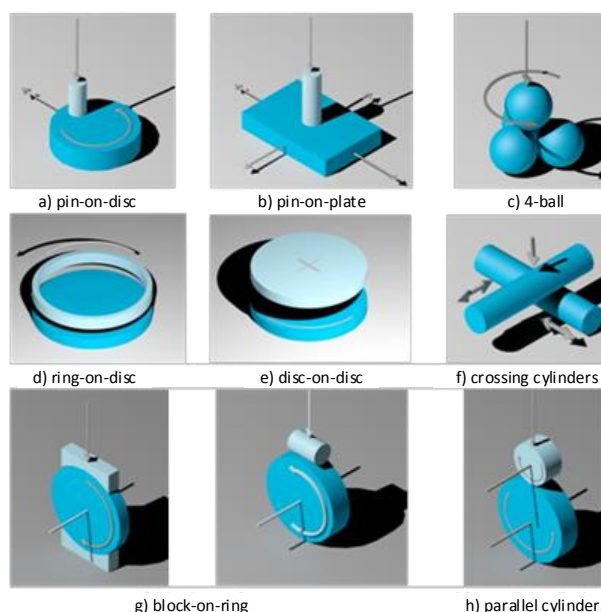
2.8. Tribológiai vizsgálatok

Az értekezésemben bemutatott vizsgálatokkal egy új fejlesztésű kerámia kompozitot kívánok a tribológiai teljesítőképesség szempontjából minősíteni és feltérképezni a

lehetséges újabb alkalmazási területeket. Ehhez fontos az anyag viselkedésének megértése a bekövetkező károsodási folyamatok tanulmányozása.

A tribológiai vizsgálatok célja többféle lehet: minősíthetünk velük már meglévő anyagokat, vizsgálhatjuk az új fejlesztésű anyagok teljesítőképességét és segítségével tanulmányozhatjuk a kopási károsodási folyamat sajátosságait különféle terhelési feltételek mellett. A tribológiai vizsgálatok számos elrendezésben léteznek, eltérő célokra alkalmasak, eltérő igénybevételi viszonyokat modelleznek, lehetőleg a valós igénybevételi viszonyoknak megfelelően. A vizsgálati módszer kiválasztásában meghatározó a vizsgálati cél, de nagyban függ a rendelkezésre álló vizsgálattechnikai feltételektől, a pénzügyi forrásoktól és a kitűzött célok időbeli megvalósítási kötöttségeitől. A kopásvizsgálatok eredménye (2.8.2. fejezet) rendkívüli módon függ a tribológiai rendszer elemeitől, az alkalmazott módszertől, berendezéstől és a vizsgálati feltételektől, körülményektől.

A különböző anyagok kopási viselkedésének jellemzésére számos különböző elrendezésű kopásvizsgálat létezik (14. ábra). Fontos különbséget tenni a vizsgálatok között aszerint, hogy szimmetrikus vagy aszimmetrikus elrendezésűek.



14. ábra. Különböző elrendezésű kopásvizsgálatok [72]

A 14. ábra e), f) és h) része szimmetrikus elrendezésű vizsgálatokat szemléltet. Az ilyen elrendezésű vizsgálatokat általában olyan kopásvizsgálatokhoz használják, amelyeknél az alaptest és az ellentest anyaga azonos. A szimmetrikus elrendezésű vizsgálatokat alkalmazzák általában modellvizsgálatokhoz, valamint olyan esetekben, amikor a súrlódó pár két tagja különböző anyagminőségű.

Az aszimmetrikus elrendezésűek közül az a) és b) jelű vizsgálatok a leggyakrabban használatosak, mivel a csúszó érintkezés folyamatosan fennáll és a vizsgálati minta elhelyezésétől függően különböző eredményeket kaphatunk. Rugalmas alkalmazhatósága,

valamint a vizsgálati minták egyszerű geometriája miatt az aszimmetrikus csoportba tartozó a) jelű ún. ball/pin-on-disc típusú vizsgálat a leggyakrabban alkalmazott modellkísérlet csúszó kopás vizsgálatára [112].

Az ilyen típusú vizsgálatok elvégzését az eredmények összehasonlíthatósága érdekében célszerű szabványok útmutatásai alapján elvégezni. A különféle országokban használt, általánosan elterjedt és pin/ball-on-disc eljárásra vonatkozó néhány szabványra mutat példát az alábbi felsorolás:

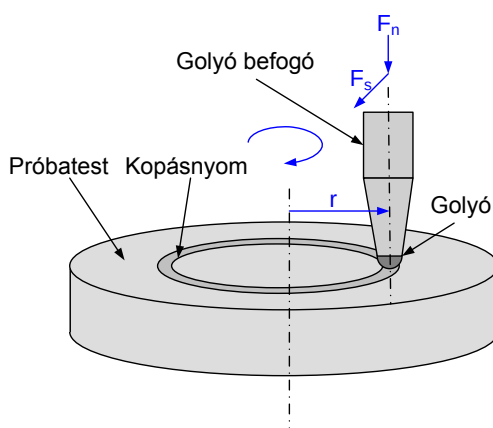
- ASTM G99-17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus;
- ASTM G133 - 05 (2016): Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear;
- ASTM G115 - 10 (2013): Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients;
- BS EN 1071-13:2010: Advanced technical ceramics. Methods of test for ceramic coatings. Determination of wear rate by the pin-on-disk method.

2.8.1. A ball-on-disc vizsgálatok elve

A kerámiák ball-on-disc elrendezésű kopásvizsgálatával az ISO 20808 jelű szabvány foglalkozik [73]. Ez a szabvány a kopást a következőképpen definiálja: „Folyamatos tömeg/anyagmennyiség eltávolítása a szilárd anyag felületéről az anyag vagy anyagok érintkezése közben történő folyamatos mozgás segítségével”.

A kerámiák kopásának jellemzésére szolgáló ball-on-disc vizsgálatok a keramikus anyagféleségek széles skáláján alkalmazhatók.

A vizsgálat során egy golyót (15. ábra), mint ellentestet egy előre meghatározott nyomóerővel (F_n) szorítunk a vizsgálandó próbatesthez, úgy, hogy a súrlódó felületek között egy pont formájú érintkezési kapcsolat jöjjön létre, amely a kopás mértékének növelésével egyre növekvő felületté alakul.



15. ábra. A "pin-on-disc" elvű vizsgálat vázlata

A vizsgálat előnye, hogy széles tartományban változtathatók a vizsgálati paraméterek, vagyis az alkalmazott terhelőerő, a csúszási sebesség, az ellentest anyaga és átmérője, a csúszási sugár és a teljes csúszási úthossz. Lehetőség van továbbá a kenési állapot megváltoztatására is. A vizsgálat kivitelezésénél fontos, hogy a bemenő paramétereket a lehető legnagyobb pontossággal szabályozzuk és dokumentáljuk, mivel változásuk jelentős mértékben módosíthatja a mért kopási jellemzőket.

A vizsgálatához használt golyó átmérőjének a szabvány szerint nagyobbnak kell lennie, mint 5mm, az átlagos felületi érdesség (R_a) értéke pedig nem lehet nagyobb, mint 0,1 μm (ISO 4287). A golyót úgy kell rögzíteni a befogóban, hogy kizárható legyen bármilyen irányú elmozdulás, görbülés, vagyis tiszta súrlódás valósulhasson meg.

A vizsgált próbatestnek vastagabbnak kell lennie, mint 2 mm, illetve elég nagy felületűnek ahhoz, hogy a csúszási kör átmérője meghaladja a 30 mm-t. A próbatesttel szemben elvárás, hogy sík felületű és párhuzamos lapokkal határolt legyen. A felület érdessége (R_a), ebben az esetben sem lehet nagyobb 0,1 μm -nél (ISO 4287 [74]).

A szabványos vizsgáloberendezésnek a következők egységekből kell felépülnie:

- Próbatest tartó, a próbatest rögzítéséhez;
- Forgatórendszer, a próbatest forgatásához;
- Golyótartó, az ellentest befogásához;
- Terhelő mechanizmus, a golyó benyomásához a próbatestbe;
- Berendezés, amely méri a fellépő erőket és a súrlódási együtthatót;
- Berendezés, amely kontrollálja a vizsgálo atmoszférát és további kiegészítő eszközök.

A próbatest tartónak a vízszintes vagy függőleges tengely körül el kell tudni forognia a rögzítés céljára szolgáló alapon. A meghajtó-rendszernek alkalmasnak kell lennie a sebesség szabályozására. A vizsgálo helyiség atmoszféráját szabályozni kell. A hőmérséklet megengedett változása: $\pm 2^\circ\text{C}$, míg a páratartalom megengedett értéke $50\% \pm 10\%$ [73].

A kerámia próbatestek felületelőkészítése különösen nehéz feladat, ugyanis a vonatkozó gyakorlati tapasztalatok hiányosak. A fémekre kidolgozott felületelőkészítési tervek a kerámiák nagy keménysége miatt nem alkalmazhatók, ugyanakkor megvalósításuk jóval nagyobb figyelmet és türelmet igényel a ridegség miatt.

A felületelőkészítés során kapott felületminőség alapvetően meghatározza a kopásvizsgálat során mért eredmények értékelhetőségét. Amennyiben a felületelőkészítés után a próbatest felülete minőségileg nem megfelelő, például ferde, egyenetlen vagy hullámos, az eredmények nem használhatók fel a kiértékeléshez, azonban ezekre a paraméterekre vonatkozó ajánlást a korábban említett ISO 20808 szabvány nem említi.

Fontos továbbá, hogy kerámia minták esetén azonos módon legyenek előkészítve a próbatestek, mivel eltérő felületelőkészítéssel eltérő maradó feszültségi állapot alakulhat ki, amely befolyásolhatja a kopásvizsgálat eredményét.

A vizsgálat során a minta felületének és az ellentest középvonalának egymásra merőlegesnek kell lennie, mivel a legkisebb ferdeség is hibás eredményt szolgáltathat. Fontos továbbá, hogy a kopásvizsgáló berendezésnek kalibrálnak kell lennie. Kerámia minták esetén előfordulhat, hogy a nem megfelelő, nem egyenletes leszorítás miatt a próbák könnyen eltörhetnek már akár vizsgálat előtt, a próbatest befogásakor. Ez az értékes minták elvesztését is jelentheti.

A kerámiák kopási viselkedését a környezeti hőmérséklet és pára egyaránt befolyásolja, ezért szükséges ezen két paraméter nagypontosságú szabályozása.

Számos kutató [75, 76] foglalkozott a ball-on-disc típusú vizsgálatok megbízhatóságának és ismételhetőségének vizsgálatával. Az egyik ilyen kutatócsoport [76] Round-Robin vizsgálatok keretében vizsgálta a pin-on-disc vagy disc-on-disc típusú tribológiai vizsgálatok megbízhatóságát és ismételhetőségét. Megállapították, hogy a vizsgálatokhoz alkalmazott vákuum és annak jellemzői nagymértékben befolyásolják a vizsgálatok eredményét. Polimer és bronz párosításakor, valamint kenőanyaggal végzett acélok vizsgálata esetén a kopási és súrlódási jellemzők ismételhetősége megfelelő volt. Ez a kutatás is alátámasztja, hogy az előírtaknak megfelelően, nagy precizitással előkészített ball-on-disc típusú vizsgálatok jó reprodukálhatósággal rendelkeznek, ezért a vizsgálat során meghatározott jellemzők alkalmasak lehetnek arra, hogy a kopási mérőszámokat egy kopási modell segítségével megbecsülhessük.

Munkám során áttekintettem egy tribológiai vizsgálatokhoz szükséges minimális mintaelem számmal is foglalkozó doktori értekezést [56], amely szerint 2,27 mérés egy adott paraméter kombinációval már reprezentatív lehet.

A választott kopásvizsgálati módszert nyilvánvalóan egyrészt az anyagminőség, másrészt az fogja meghatározni, hogy a vizsgált anyag a gyakorlati életben milyen feltételek között fog felhasználásra kerülni.

2.8.2. *Vizsgálatok információ tartalma*

A súrlódási együttható a kopási folyamat jellemzésére használt legfontosabb kiegészítő információja, amelyet az alábbi egyenlettel határozhatunk meg:

$$\mu = F_s / F_n [-], \quad (1)$$

ahol: F_s a súrlódási erő és F_n a normál irányú terhelőerő.

A súrlódási együttható változását a csúszási úthossz függvényében a kopásvizsgáló berendezés a kopás teljes időtartama alatt rögzíti. A vizsgálati eredmények kiértékelése során megkülönböztethetünk a teljes csúszási úthosszon mért átlagos súrlódási együtthatót

(μ), valamint az állandósult súrlódási együtthatót (μ_{all}), amelyet a teljes csúszási úthossz azon szakaszán határoztam meg, ahol a súrlódási együttható közel állandó.

A kopásvizsgálatot követően lehetőség van a mintából kikopott anyag tömegének meghatározására, amely nagy pontosságú mérleggel történik. Ezt követően az anyag sűrűségének ismeretében kiszámítható a kikopott térfogat értéke (V) is. Ugyanezen kikopott térfogat közelítően meghatározható profilometriai vizsgálat útján is. A mérési módszer leírását a 2.9.1. fejezet tartalmazza. Ez a mérőszám a legegyszerűbb és általánosan használt jellemző, amely a profilométerrel meghatározott kikopott keresztmetszet (A , mm²) és a kopásnyom középsugara (r , mm) alapján az alábbi módon számítható:

$$V = \frac{\pi \cdot r \cdot A}{2} \left[mm^3 \right]. \quad (2)$$

Lehetőség van az ellentest, vagyis a golyó kopásának meghatározására is. Ez jellemzően tömegméréssel vagy optikai úton (mikroszkóppal) történik.

További kopási károsodást jellemző mérőszámok, amelyek számszerű meghatározása a kikopott térfogat alapján történik, az alábbiak:

– *Kopási sebesség, w :*

$$w = \frac{V}{l} \left[\frac{mm^3}{m} \right], \quad (3)$$

ahol V a kikopott térfogat, l a teljes csúszási úthossz.

– *Fajlagos kopási sebesség, k :*

$$k = \frac{V}{F_n \cdot l} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right], \quad (4)$$

ahol V a kikopott térfogat, F_n a normál irányú terhelőerő, L a teljes csúszási úthossz.

Akár csak a kerámiák súrlódási együtthatója, a fajlagos kopási sebesség is érzékeny a levegő páratartalmának változására. Fischer és munkatársa vizsgálataik során kimutatták, hogy Si₃N₄/Si₃N₄ pin-on-disc típusú vizsgálatakor a páratartalom drasztikus növelésével a fajlagos kopási sebesség jelentősen lecsökken. 20%-os páratartalom esetén a fajlagos kopási sebesség értéke 10⁻⁴ mm³/Nm, míg ugyanez a paraméter 60%-os páratartalom esetén 10⁻⁶ mm³/Nm-re csökkent [77]. A k mérőszám alkalmazásának hátránya, hogy nem veszi figyelembe a vizsgált anyag keménységét, valamint feltételezi, hogy a kopási sebesség független a látszólagos érintkezési felületről és a felületi topográfiától. Alkalmazhatóságának egyszerűsége miatt azonban széles körben használják a kopási viselkedés jellemzésére [78].

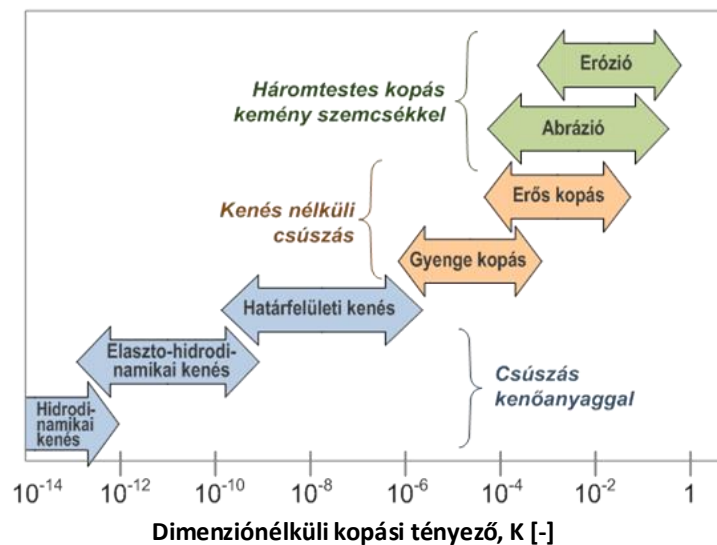
– Dimenziótlan kopási tényező, K :

$$K = k \cdot H [-], \quad (5)$$

ahol H a vizsgált próbatest felületének keménység értéke GPa-ban megadva.

A mérőszám alkalmazásának korlátai megegyeznek a fajlagos kopási sebességnél ismertettekkel, leszámítva, hogy ez az összefüggés már figyelembe veszi a vizsgált anyagok keménységét.

A 16. ábra segítségével megbecsülhetjük, hogy a K adott értékeinél közelítőleg milyen típusú kopási viselkedésre számíthatunk.



16. ábra. A dimenziótlan kopási tényező jellemző értékei különböző vizsgálati feltételek mellett [55]

Kenés nélküli esetekben csúszó súrlódáskor, azaz száraz súrlódáskor a K elérhet egészen nagy, akár 10^{-2} értéket, de lehet egészen kicsiny, 10^{-6} értékű is. Ezt az értéktartományt a $K=10^{-4}$ érték két részre osztja, az erős és gyenge kopás tartományára, amelyek az anyagleválás mechanizmusa szempontjából jelentősen különböznek. Fémek esetén az erős kopás tartományában jellemző az alapanyagéval azonos összetételű, nagyméretű törmelékek képződése, míg gyenge kopás esetén a törmelék finomabb és döntően oxidokból épül fel. Kerámiák esetében az erős kopás rideg töréssel társul, míg gyenge kopáskor a jellemző viselkedés a reakciótermékek (esetenként hidrátok) leválása a felületről [55].

A kopásvizsgálatokat követően lehetőség van a folyamatot irányító kopási mechanizmusok és kopásmódok meghatározására, mind a tárcsa, mind a golyó kopásnyomának mikroszkópos elemzésével.

A következő fejezetben a kopásvizsgálatok egyik sarkalatos pontjával, a felülelőkészítéssel foglalkozom, amely nagymértékben befolyásolja a vizsgálat eredményét.

2.9. A tribológiai vizsgálatok kiegészítő vizsgálati módszerei

Ahhoz, hogy komplex képet kaphassunk egy anyag tribológiai viselkedéséről a kopásvizsgálatok mellett szükséges egyéb, kiegészítő-jellegű vizsgálatok elvégzése is. Ezek a vizsgálatok azért fontosak, hogy meg tudjuk magyarázni az anyagnak a kopás során tapasztalt viselkedését. A leggyakrabban alkalmazott kiegészítő technikákat az 1. táblázat foglalja össze:

1. táblázat. A kopási viselkedés jellemzésére leggyakrabban alkalmazott kiegészítő vizsgálati módszerek

Vizsgálat típusa	Vizsgálat célja		
	Koptatott felületek, kopásnyomok vizsgálata	Kopási törmelékek vizsgálata	Felületközeli/felület alatti tartományok vizsgálata
Vizuális vizsgálat	✓	✓	
Optikai mikroszkópok	✓	✓	✓
SEM	✓	✓	
Profilometria	✓		
Vickers keménység			✓
Vickers lenyomatos törési szívósság vizsgálat			✓
XRD		✓	
TEM		✓	
SIMS			✓
XPS	✓		

A felsorolt kiegészítő vizsgálatok egy része a vizsgált anyag kiinduló állapotának jellemzésére szolgál, például kiinduló érdesség, felületelőkészítés utáni érdesség meghatározása, összetételi elemzés, illetve fizikai és mechanikai tulajdonságok vizsgálata, szövetszerkezet vizsgálat. Másik része pedig az elvégzett kopásvizsgálatok értékeléséhez mennyiségi és minőségi paraméterek meghatározására szolgál. A továbbiakban a kopásvizsgálatok során alkalmazott legfontosabb kiegészítő vizsgálati módszereket tekintem át.

2.9.1. Profilometriai vizsgálatok

A profilometriai vizsgálat a felületek érdességének és topográfiájának vizsgálatára alkalmazott eljárás, amelynek során érintésmentes vagy érintkezéses módszerrel, letapogatják a vizsgálandó próbatest felületét. A berendezés érzékeli a felületi egyenetlenségeket és megjeleníti azokat. Működési elvük szerint vannak tapintócsúcsos, lézerezékelős és konfokális profilométerek.

A kopásnak kitett felületek ún. működő felületek, amelyek felületi egyenetlenségei, mikrogeometriája nagymértékben befolyásolja a működési tulajdonságokat, így például a kopási viselkedést. A felületek érdességét többnyire az amplitúdó paraméterekkel szokás jellemezni. A rendkívül széles választék ellenére, ezek közül sajnos még ma is csak

néhányat használunk. Ezek a következők: maximális egyenetlenség (R_t), egyenetlenség magasság (R_z), átlagos érdesség (R_a) [79].

A vizsgálatok során lehetőségünk van a kikopott keresztmetszet meghatározására, amiből következtethetünk a vizsgált anyagok kopási viselkedésére. A kikopott keresztmetszet (A) értékét kopásnyomként a szabvány által meghatározott módon, 4 merőleges metszetben (ISO 20808) határozzák meg, amelyből számos további mérőszám (például a kikopott térfogat), kopási jellemző származtatható.

2.9.2. Mikroszkópi vizsgálatok

A különböző mikroszkópi vizsgálatok széleskörben elterjedtek a kerámiák kopásvizsgálatakor, mivel a morfológiai elemzések, kopási törmelékek vizsgálata során nyerhető vizuális információ nem esik abba a mérettartományba, hogy az szabad szemmel is vizsgálható legyen. A mikroszkópi vizsgálatok eszközei között megtalálhatók különböző fénymikroszkópok, sztereo mikroszkópok, valamint a nagy nagyítással rendelkező pásztázó elektronmikroszkópok is.

Optikai mikroszkópos vizsgálatok

Az optikai mikroszkópokat legelterjedtebben fémes anyagok vizsgálatára alkalmazták, ezért fémmikroszkópoknak is nevezzük őket. Az optikai mikroszkópok a fénysugarakat az optika törvényei alapján használja fel a nagyított kép létrehozásában. Az optikai mikroszkópok maximális hasznos nagyítása 1000-1500 $\times$, felbontási határuk 200 nm.

A kerámiák kopásvizsgálatához kapcsolódóan az optikai mikroszkópokat alkalmazzák kopásnyomok morfológiai elemzésekor és a kopási törmelékek szemcseméretének, valamint a porozitás vizsgálatakor.

Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok

A pásztázó elektronmikroszkóp (*Scanning Electron Microscope, SEM*) elsősorban fémtani vizsgálatokra szolgáló eszköz. Ezzel az eszközzel a tárgy egy meghatározott területét vizsgálják egy vékony elektronnyalábbal, amely végigpásztázza a felület miközben az elektronsugár és a tárgy kölcsönhatását detektorok érzékelik, amelyek képképzésre, illetve összetétel elemzésre használhatók [80].

A nagyenergiájú beeső elektronsugár és a próba anyagának kölcsönhatása révén keletkezett legfontosabb jeltípusok: a visszaszórt elektronok (SE), szekunder elektronok (BSE), az ún. próbaáram, illetve a különféle röntgensugárzások. A szekunder elektronok részletdús, nagy (1-10 nm) felbontású képképzésre adnak lehetőséget. Ez a vizsgálati mód elsősorban topográfiai, azaz a felületen található objektumok morfológiai vizsgálatára alkalmas. A visszaszórt elektronok mennyisége nagymértékben függ az atomok minőségétől (rendszámától), ezért ezzel a jellel már az összetételre vonatkozóan is kaphatunk információt, az eltérő minőségű atomok eltérő árnyalatú tartományokként

jelennek meg a képen. Fontos, hogy míg képalkotáskor nm nagyságrendű tartományokra vonatkozó információkat is el tudunk különíteni (SE képpel), addig a mikroszondás elemzés tartománya nem lehet kisebb (finomabb), mint a felület alatti 0,1-1 μm mélységű tartomány [81]. Elterjedten használatos fraktográfiai vizsgálatokra, a különféle károsodási folyamatok okainak feltárásában, tönkremeneteli mechanizmusok azonosításában, például súrlódási, kopási módok, mechanizmusok felismerésében [81, 82].

2.9.3. Mechanikai vizsgálatok

A kopásvizsgálatokat kiegészítő mechanikai vizsgálatok széles skálán mozoghatnak aszerint, hogy a vizsgált anyag kopási viselkedését mely tényezők befolyásolják a leginkább. kerámiák esetén ezek a jellemzők a keménység, a törési szívósság, a rugalmassági modulus, és a hajlítószilárdság. A továbbiakban a Vickers-keménység és a Vickers lenyomatos törési szívósság vizsgálatot, valamint a sűrűségmérést ismertetem röviden, mivel a kísérleti munkám során ezeket a vizsgálatokat végeztem el.

Vickers keménység meghatározása

A Vickers keménység a különféle anyagok keménységének összehasonlítására szolgáló empirikus mérőszám. Ennél a mérési eljárásnál a behatolótest egy gyémántból készült négyzet alapú szabályos gúla, így a legkeményebb anyagok vizsgálatára is alkalmas, ezért kerámiák vizsgálatakor a leggyakoribb mérési módszer. A keramikus anyagok vizsgálatának specialitása, hogy a fémek anyagokkal ellentétben, ahol nem használunk mértékegységet, a keménységi mérőszámot a jellemzően nagy keménység értéke miatt GPa egységben adjuk meg. Így például a műszaki kerámiák jellegzetes keménységi értékei jellemzően az 10-80 GPa tartományba esnek. A dolgozatban vizsgálandó Si_3N_4 kerámiák jellemző keménysége a ridegebb α módosulat esetén 14-18 GPa, míg a szívós β - Si_3N_4 ennél lágyabb, mindössze 12-14 GPa keménységű.

A Vickers lenyomatos törési szívósság meghatározása

A mérnöki gyakorlatban a kerámiák törési szívósságának meghatározására számos módszer létezik. Általánosan alkalmazott szabvány az ASTM C1421 - 16 (*Standard Test Methods for Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics at Ambient Temperature*). Az első keramikus vizsgálatok a fémekre kidolgozott törésmechanikai módszereken alapultak. Ezek közül a legismertebb eljárásokat és szabványait a 2. táblázat tartalmazza.

Ezen vizsgálatok hátránya azonban, hogy a próbatesteket a mérés előtt a kívánt alakra kell munkálni, vagy a vizsgálatnak megfelelő geometriájú mintát kell szinterelni, amely különösen nagy idő- és költségráfordítást igényel. Emiatt az utóbbi években kerámiák esetén a Vickers lenyomatos szilárdsági vizsgálat (*Vickers Indentation Strength Bend Test, VISB*) és a Vickers Lenyomatos Törési Szívósság Vizsgálat (*Vickers Indentation Fracture Toughness Test, VIF*) terjedt el. Előnyük az előbbiekhöz képest, hogy a próbatest

előkészítése jóval egyszerűbb, a szerszám és a berendezés szabványos és könnyen hozzáférhető, valamint jó az eredmények reprodukálhatósága. Vonatkozó szabványa az ISO/AWI 21618 (*Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for fracture resistance of monolithic ceramics at room temperature by indentation fracture (IF) method*) [83].

A vizsgálat azon alapszik, hogy ha a Vickers keménységmérés során megnöveljük a terhelőerőt, a benyomódás hatására a rugalmas húzófeszültségek a rideg anyagokban a lenyomat sarkaiban repedéseket hoznak létre. Ezek a repedések lehetőséget adnak arra, hogy empirikus összefüggések segítségével egyszerű keménységméréssel az anyag törési szívósságát meghatározzuk. A Vickers lenyomat közelében kialakuló repedés geometriája függ a vizsgálandó anyag viselkedésétől, nagyon rideg kerámiák, például üveg esetén ún. fél-penny repedéskép alakul ki, míg szívós kerámiák esetén Palmqvist-repedés jön létre. A törési szívósság értékének meghatározására szolgáló összefüggés típusa a fenti viselkedéstől függ.

2. táblázat. Kerámiák törési szívósságának meghatározására alkalmazott hagyományos módszerek és szabványaik

Eljárás	Szabvány
Egyoldalon berepesztett tartó vizsgálata Single Edge Pre-cracked Beam Test (SEPB)	ISO 15732:2005: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for fracture toughness of monolithic ceramics at room temperature by single edge precracked beam (SEPB) method
Kettős konzolos tartó vizsgálata Double Cantilever Beam Test (DCB)	—
Egyoldalon bemetszett tartó vizsgálata Single Edge V-Notched Beam Test (SEVNB)	ISO 23146:2012: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test methods for fracture toughness of monolithic ceramics -- Single-edge V-notch beam (SEVNB) method
Chevron-bemetszésű tartó vizsgálata Chevron-Notched Beam Test (CNB)	ISO 24370:2005: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) -- Test method for fracture toughness of monolithic ceramics at room temperature by chevron-notched beam (CNB) method

Szívós műszaki kerámiáknál, például Si_3N_4 -nél az egyik leggyakrabban alkalmazott összefüggés az ún. Shetty-formula [84]:

$$K_{Ic} = \beta (HW)^{\frac{1}{2}} \left[\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \right], \quad (6)$$

$$\beta = \frac{1}{3(1-\nu^2) \left(2^{\frac{1}{2}} \pi \tan \psi \right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (7)$$

ahol:

- ν : a Poisson-tényező; értéke a vizsgált Si_3N_4 kerámiára: 0,23 [2];
- ψ : a gyémánt gúla lapszöge 136° ;

- $W=P/4l_{lat}$, a repedés-ellenállás, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$;
- l_{lat} : a felület alatti laterális repedéshossz, mm;
- P : a terhelőerő, N.

Az összefüggés széleskörű alkalmazásának egyik oka, hogy mindössze két egyszerűen mérhető jellemző, a keménység és a repedéshossz meghatározását igényli, és nem tartalmazza a költségesen meghatározható rugalmassági modulus értékét. Fontos megjegyezni, hogy az így kapott mérőszám megbízhatósága nagyban függ attól, hogy a képletben szereplő anyagi konstans mennyire alkalmas a vizsgált anyag jellemzésére. Különösen új összetételű, vagy új szerkezetű anyagoknál ezért a mérőszám értékének megbízhatósága kérdéses lehet. A monolitikus műszaki kerámiák törési szívóssága az $1\text{--}10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ tartományba esik. A vizsgálandó Si_3N_4 kerámiáknál HIP eljárással elérhető törési szívósság a β fázis esetén 5-7, míg az α fázis esetén $4\text{--}5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

A Vickers lenyomatos törési szívósság vizsgálatánál a repedés keletkezése és terjedése különbözik a többi szabványosított törésmechanikai vizsgálatoknál alkalmazottól. A Vickers lenyomatos vizsgálat során komplex háromdimenziós repedésekből álló rendszer alakul ki nagymértékű maradó feszültséggel. Egyes szakemberek szerint ez a vizsgálat nem kellően megbízható adatot szolgáltat a kerámiák és egyéb rideg anyagok törési szívósságáról [85] és a klasszikus törésmechanikai módszerekkel meghatározott K_{Ic} értékekkel csak korlátozottan összemérhető.

2.9.4. Fizikai és anyagszerkezeti vizsgálatok

Sűrűségmérés

A kerámiák sűrűségének meghatározása Archimedes-i módszerrel lehetséges a legegyszerűbben. A mérés első lépéseként lemérjük a mintákat szárazon ($m_{m,sz}$), valamint a méréshez használt poharat és benne a vizet (m_{v+p}). A következő lépésként a vékony drótra kötözött próbatesteket 60 s-időtartamig belemerítjük a pohárba. A vízben tartás időtartama alatt a víz párolog, ennek megfelelően a párolgási korrekciós tényezőt is figyelembe kell venni ($p_{v,60}$), amit hozzáadnak a 60 másodperc merítés után rögzített pohár, a víz és a vízbe merített minta együttes tömegéhez (m_{v+p+m}). Ezt követően kiszámoljuk a merített tömeget:

$$m_{m,m} = m_{v+p+m} - m_{v+p} \quad [g]. \quad (8)$$

A kapott értékek alapján a sűrűség az alábbi egyenlettel számítható:

$$\rho_{minta} = \frac{m_{m,sz}}{[m_{m,sz} - (m_{m,m} - m_{m,sz})]} \rho_{víz} \quad [g / cm^3] \quad (9)$$

A hővezetési tényező mérése

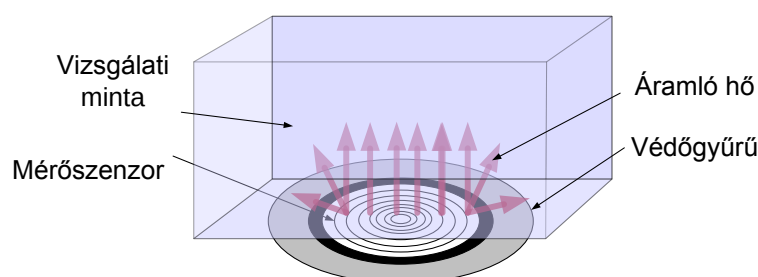
Számos kutató foglalkozik a Si_3N_4 kerámiák hővezetési tényezőjének meghatározásával [86, 87, 88, 89]. Ez az érték a vizsgált kerámiák esetén $15\text{--}30 \text{ W/mK}$ közötti értéket vesz

fel [1, 90]. A kopási folyamatokban a hővezetésnek kiemelt szerepe van, mivel a súrlódás során keletkező hő és annak akkumulálódása a minta felületén befolyásolhatja a kopási folyamatokat.

Az általam alkalmazott vizsgálatok során MTPS (*Modified Transient Plane Source*) módszert használtuk. Ebben az esetben a szenzor 1-3 másodperces impulzusban a minta felé konstans hőmennyiséget közvetít, melyet a szenzor spirális fűtőelemében folyó árammal lehet szabályozni (17. ábra). Az egyirányú hőátadást a fűtőelemet körbevevő gyűrű is szabályozza. A minta és a szenzor felületén bekövetkező hőmérsékletváltozás a szenzorban feszültségesést indukál. A feszültségesés mértékéből kiszámítható a vizsgált minta hővezetése.

A hővezetés fordítottan arányos a minta és a szenzor felületén mérhető hőmérsékletváltozással. Jó hővezető anyagok esetén a feszültségesés kisebb, míg az alacsony hővezetésű anyagoknál nagyobb.

Jelen mérésnél azonban problémát jelenthet, hogy a kisméretű minták – lapos tárcsák – hővezetési tényezőjének csak az ún. „*through thickness*”, azaz felületre merőleges irányú értékét tudjuk meghatározni.



17. ábra. Hővezetési tényező mérése

Röntgen diffrakciós vizsgálat (XRD)

A röntgen diffrakció vizsgálat elvi alapja, hogy röntgensugarakat sugárzunk át kristályos anyagokon és a szórt sugárzás detektálásával nyerhetünk információt a kristályszerkezetéről. A röntgensugárzás elhajlásával/diffrakciójával kapott intenzitásmaximumok térbeli helyzetéből és relatív erősségéből meghatározhatjuk az ismeretlen anyagok kristályszerkezetét, többfázisú anyagok esetén a fázisok mennyiségét, valamint ez az eljárás alkalmazható maradó feszültségek meghatározására is megmunkált felületek esetén. Ezek a maradó feszültségek húzó (például köszörülés esetén), vagy nyomó jellegűek (például polírozás esetén), hasznosak és károsak is lehetnek. Maradó feszültség alakulhat ki a megmunkálások, hőkezelések során – mechanikai vagy hőfeszültségek, fázisátalakulások hatására bekövetkező egyenlőtlen képlékeny deformáció miatt, valamint üzemelés közben, például egymáson gördülő, csúszó alkatrészekben.

A vizsgált darab felszínével párhuzamosan, tetszőleges irányban ható maradó feszültségeket mérhetjük meg ezzel a módszerrel. A mérések során a kb. 20-30 μm vastagságú felület alatti rétegből kaphatunk információt.

Kerámiák kopásvizsgálatakor alkalmazhatjuk a röntgen diffrakciós eljárást a szintereléskor, polírozáskor, csiszoláskor, valamint a koptatást követően kialakult feszültségállapot jellemzésére, mivel ez a feszültségállapot befolyásolhatja az anyag kopási viselkedését.

2.10. Kopási térképek

Számos kopási mechanizmust definiáltak már az irodalomban. Fémek esetén beszélhetünk az adhéziós-, az abrazív-, a fáradásos- és a korróziós vagy tribokémiai kopásról. Rideg anyagok – mint például a kerámiák – esetén, felléphet abrázio, fáradásos és tribokémiai kopás is. A különböző mechanizmusok csoportosíthatók fizikai vagy kémiai folyamataik szerint egyaránt. A legtöbb esetben több kopási mechanizmus játszódik le egyszerre és nagyon nehéz megállapítani ezek részarányát a kopási folyamatban.

2.10.1. A kopási térképek főbb típusai és kidolgozásának lépései

Az első kísérlet a kopás bemenő paraméterei (például csúszási sebesség, idő, terhelőerő) és kimenő paraméterei (például kopási sebesség) közötti komplex kapcsolat leírására a 20. században történt [91, 92]. A vizsgált anyag acél és öntöttvas volt. Ezek voltak az első diagramok, amelyek számszerű információt szolgáltattak a kopási tényező értékeiről az érintkezési feszültség és a csúszási sebesség függvényében.

A kopási térképek jelentősége kerámiák esetén nagyobb, mint a fémek anyagoknál, ugyanis ezeknél az anyagoknál több a kopást befolyásoló paraméter és bonyolultabb azok egymásra gyakorolt hatása, ezért a kopás mértékének „becslése” is nehezebb. A kerámiákra vonatkozó kopási térképek később is jelentek meg, mivel ezen tribológiai anyagok alkalmazása is később terjedt el, amikor már kellően nagy volt a törési szívósságuk és javult a megbízhatóságuk. A kerámia kopástérképek – mind a 2D kopási mechanizmus-, és kopásátmenet-, mind a 3D kopási sebesség és kopási tényező térképek – elsőként Al_2O_3 -ra, ZrO_2 -ra és SiC -ra jelentek meg. Ezt követték a kerámia kompozitokra, rétegekre és bevonatokra vonatkozó térképek. Ezekkel párhuzamosan jelentek meg azok az átfogó művek a szakirodalomban, amelyek leírják a kopási térkép készítésének metodikáját és felhívják a figyelmet azok korlátaira.

A kopási térképeknek három típusa van: a kopásátmenet térképek, a kopási sebesség térképek és a háromdimenziós kopási térképek. Mindhárom más és más szerepet tölt be, együttes használatukkal pedig komplex képet kaphatunk a vizsgált anyagpár kopási viselkedéséről az adott terhelési feltételek és vizsgálati körülmények között.

A kopási térképek egyfajta osztályozási rendszert jelentenek, megadva a kopási károsodás mértékét a különböző lehetséges befolyásoló tényezők, mint független változók

függvényében [93]. A változók lehetnek folyamatosak vagy diszkrét [94]. Az első csoportba tartozik a terhelőerő (F), a csúszási sebesség (v), a hőmérséklet (T) és az idő (t), a második csoportba pedig a súrlódó pár anyaga, az érintkezési geometria, a súrlódási mód, a környezeti feltételek, a kenés és az esetleges felületi szennyezőanyagok. Az előbbiek az ún. általános, még az utóbbiak rendszer specifikus jellemzők is [95].

Nehéz azonban azt megválasztani, hogy mely paramétereket használjuk egy kopási térkép elkészítéséhez. A leggyakrabban használt független változók az általános, folyamatosan változtatható értékű paraméterek. Ezen paraméterek megfelelő kiválasztásával 3D kopástérképek készíthetők. A legtöbb esetben a kopási térképeket az alábbi változók kombinációjának függvényében készítik el: $w=f(F, v)$; $w=f(v, T)$; $w=f(v, t)$; $w=f(F, T)$; $w=f(F, t)$; ahol: w a számszerű kopást jellemző mérőszám (például kopási sebesség, dimenzió nélküli kopási tényező stb.), F a normálirányú terhelőerő vagy érintkezési feszültség (amely nehezen meghatározható és a kopás során változhat is); v a csúszási sebesség; T a hőmérséklet; t az idő.

Egy adott anyag általános kopási viselkedésének meghatározására a legjobb, ha kenésmentes a súrlódás, valamint a mintát a saját anyagával megegyező ellentesttel koptatjuk. Az érintkezési geometriát és a súrlódási módot egy szabványos laboratóriumi kopásvizsgálati eljárásnak megfelelően (például a pin-on-disc elrendezésű kopásvizsgálat) kell megválasztani, mivel ezen méréseknek legjobb a reprodukálhatósága és a leginkább összehasonlítható vizsgálati eredmények érhetők így el. Ezt ajánlják új fejlesztésű anyagok kopási tulajdonságainak meghatározásakor is.

A térképek elkészítésének jellemző lépései az alábbiak [96]:

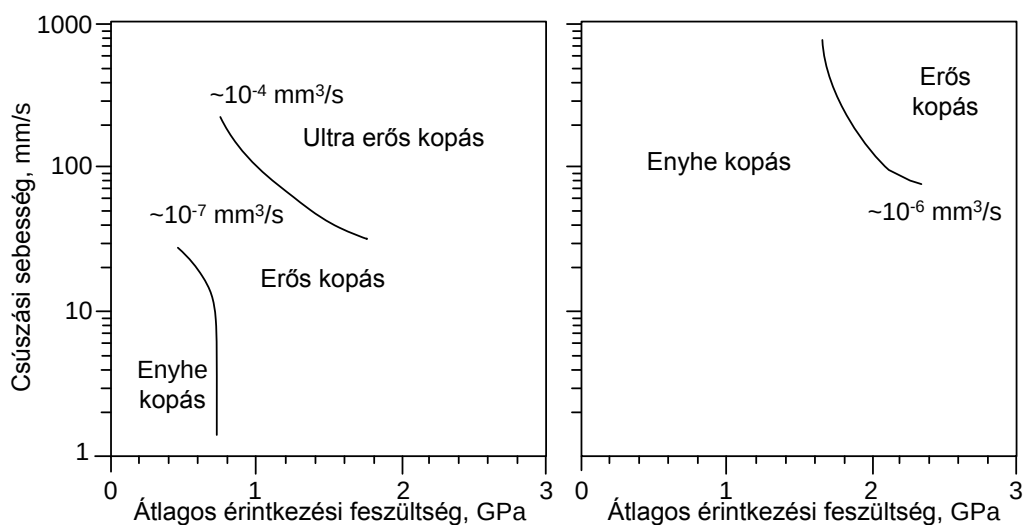
- A vizsgálandó anyag, anyagpár kiválasztása;
- A tribológiai vizsgálat típusának kiválasztása; a vizsgáló berendezés és a vizsgálati változók meghatározása;
- Próbatestek felületelőkészítése a kopásvizsgálatokhoz;
- Próbakísérletek elvégzése különböző paraméterekkel, széles terhelési tartományban;
- Célkísérletek elvégzése kontrollált feltételek mellett;
- Minőségi és mennyiségi kopási jellemzők meghatározása;
- Adatfeldolgozás és kiértékelés: mennyiségi jellemzők kiértékelése; a kopási károsodás mértékének meghatározása, valamint annak vizsgálata, hogy hogyan hat a kopási paraméterek változása a kopás mértékére;
- A minőségi információk kiértékelése; a kopásnyomok morfológiai elemzése például SEM felvételek alapján;

- Kopási térkép készítése mennyiségi jellemzők alapján (például kopási sebesség, dimenzió nélküli kopási tényező) a sebesség és a terhelőerő függvényében.

A kerámiákról készített kopástérképek eredeti céljuk szerint egyfajta osztályozási rendszerként voltak használatosak. Napjainkban elterjedten alkalmazzák őket a kopási modellek kidolgozására, valamint mérnöki szerkezetek tervezése, anyagkiválasztás és a kopást befolyásoló paraméterek vizsgálata céljából

A kopásátmenet térképek

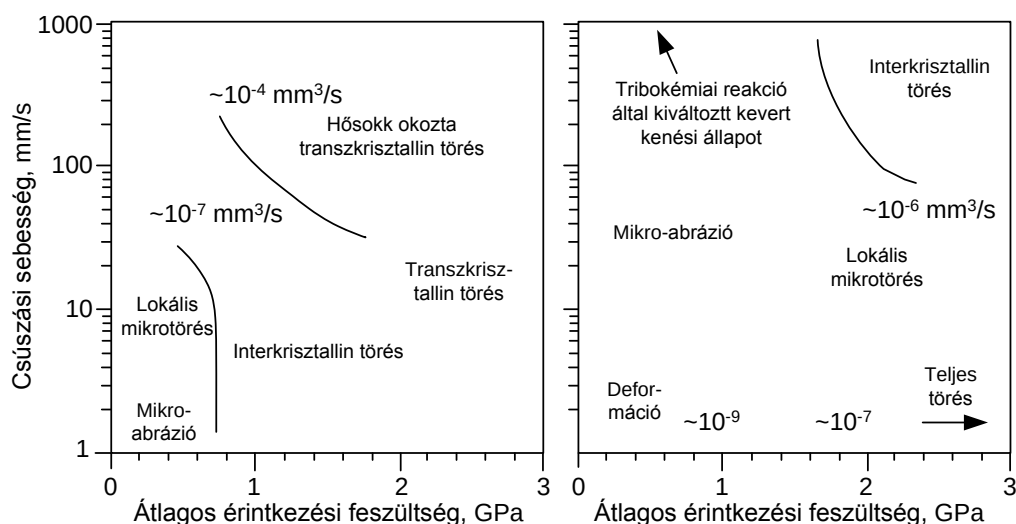
Az első 2D térképek ún. kopásátmenet térképek voltak [97, 98, 99, 100]. Ezek szemléltetik az átmenetet az erős és a gyenge kopás tartománya között a vizsgált triborendszerben adott normál irányú terhelőerő és csúszási sebesség tartományban. Ezekre a térképekre mutat példát a 18. ábra $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ súrlódó pár esetére tisztított paraffin olajban és száraz súrlódás esetén. Ezen típusú diagramok 3D térképekből is egyszerűen szerkeszthetők: egy állandó kopási sebességet jelölő síkkal darabolják fel a térképet, majd a kapott görbét levetítik, ennek eredményeként kontúrdiagram jelenik meg. Az így kapott konstans kopási sebességet jelölő görbék mentén egyszerűen elválaszthatók egymástól a különböző kopási módok [101, 102, 103, 104, 105, 106]. A kopásátmenet térképek előnye, hogy a különböző kopási tartományok határértékei számszerűen meghatározottak, így a szubjektivitás kiküszöbölhető.



18. ábra. Kopásátmenet térképek $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ súrlódó párok esetére (a) kenés nélkül és (b) tisztított paraffin olajban [58]

Kopási mechanizmus térképek

Egy másik típusa a 2D kopási térképeknek a kopási mechanizmus térkép (19. ábra), amely jellemző kopási mechanizmusokat tünteti fel különböző terhelési és csúszási sebesség tartományokban [107, 108, 109].



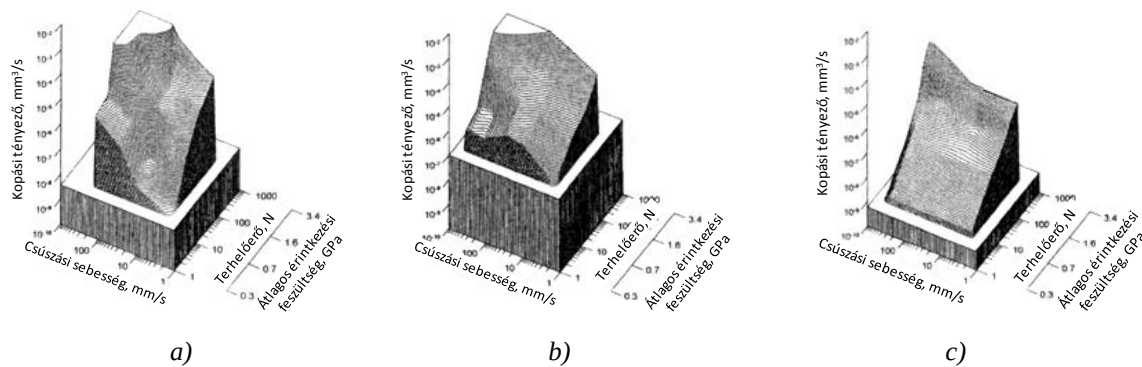
19. ábra. Kopási mechanizmus diagram $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ súrlódó párok esetén (a) kenés nélküli esetre és (b) tisztított paraffin olajban [58]

Ez a típust többször kombinálják a kopásátmenet térképekkel és azonos diagramban ábrázolják őket [110, 111]. Alkalmazhatók továbbá ún. károsodás-térképként is, így segítségükkel meghatározható egy adott szerkezet biztonságos terhelési tartománya.

A kopási mechanizmus térképek elkészítéséhez elengedhetetlen a mechanizmusok meghatározása. Számos kutató különböző szempontok szerint (sokszor szubjektíven) csoportosítja és nevezi meg ezeket a mechanizmusokat, nincs egységes osztályozási rendszer, ami félreértésekhez vezethet a különböző szakirodalmak elemzése során.

Kopási károsodás térképek

A kopási károsodást számos mérőszámmal jellemezhetjük (k , K , V), amelyekből egyaránt készíthetünk 2 és 3 dimenziós térképet. A 3D kopási térképek általában a kopási tényező értékeit szemléltetik a normál irányú terhelőerő és csúszási sebesség függvényében. Ezeket a látványos térképeket számos esetben alkalmazzák, azonban bizonyos kerámiák esetén – beleértve az Si_3N_4 -et is – kevés ilyen áll a rendelkezésünkre, mivel sok vizsgálat kell elkészítésükhöz és ezeket a vizsgálatokat azonos körülmények között kell elvégezni. Az 20. ábra ilyen térképet mutat be $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ párosításra száraz súrlódás esetére, valamint további kettőt kent állapotra. Mint, ahogy az ábrán is látható, a térképek kiválóan szemléltetik a kopási tényező változását az átlagos érintkezési feszültség és a csúszási sebesség függvényében a három eltérő közeg, kenőanyag esetén.



20. ábra. 3D kopási térképek $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ súrlódó párok esetére (a) levegőn (b) tisztított paraffin olajban és (c) vízben [112];

A 3D kopási térképek szerkesztésekor korlátot jelenthet a szerkesztéshez alkalmazott program által használt közelítési mód, mivel ha ez nem megfelelő, a program alul illetve túlbecsülheti két mért pont közötti értékeket.

Összességében elmondható, hogy a kopási térképek egyfajta adatbázisként funkcionálnak, adatokat szolgáltatnak a kopási károsodásról adott terhelési feltételek mellett. Nagyon fontos szerepet töltenek be a tervezésnél és az anyag kiválasztásnál, valamint a kopási modellek fejlesztésekor egyaránt. A térképek segítségével kopási modellek állíthatók elő, amelyek már alkalmasak lehetnek a kopás mértékének becslésére.

2.11. Kopási modellek

Adott anyag kopásának elemzésekor fontos figyelembe venni, hogy a különböző kopási modellek különböző kopási módok és mechanizmusok esetén érvényesek.

A fémek kopásának modellezésével számos kutató foglalkozott már korábban is [113, 114], ezért az évek során többféle kopási modell született különböző anyagokra és alkalmazásokra. Sajnálatos módon a legtöbb modell csak egy adott anyagpárosításnál, érintkezési geometria, környezeti körülmények és bizonyos kenés típusok esetén alkalmazható. Ezzel kapcsolatos tapasztalatait Ludema egyik munkájában [115] összegezte. Összesen 5466 folyóiratcikket elemzett és összegyűjtött 32 paramétert, amelyeket az erózió mértékének becslésére használtak a kutatók [116, 117, 118, 119]. Munkája eredményként megállapította, hogy nem talált az erózióval kapcsolatban olyan általános modellt, amely minden esetben alkalmazható lenne.

A bemutatott példából látható, hogy egy adott anyag kopásának mérése, jellemzése, megértése komplex feladat. Általánosságban elmondható, hogy a kopás függ az érintkező felületek anyagától, annak állapotától, a felületek minőségétől, beleértve azok érdességét, oxidációra való hajlamát, az elmozdulás sebességétől, a terhelőerőtől, a kenőanyag jelenlététől és minőségétől. A nagyszámú változótól való függés komoly akadályt képez annak, hogy a kopás mértékét nagy biztonsággal megbecsülhessük.

2.11.1. A kopási modellek fejlődése, főbb típusai

Az 3. táblázat magába foglalja az elmúlt 60 év szakirodalmában a kerámiák vonatkozásában fellelhető fontosabb kopási modelleket, az általánosan alkalmazhatóktól kezdve egészen azokig, amelyeket csak a Si_3N_4 kerámiánál használnak. A táblázatban feltüntettem a modell típusát, amely lehet matematikai (M) és fizikai (F).

A kopási folyamatok matematikai leírására szolgáló első összefüggések a súrlódási törvények voltak. Amonton (1699) és Coulomb (1781) által javasolt összefüggések [120, 121] azon a feltételezésen alapulnak, hogy a súrlódó erő arányos a normálirányú terhelőerővel és független az érintkezési felülettől. Habár az alkalmazott megközelítés nem teljes mértékben helytálló, napjainkban is alkalmazzuk bizonyos száraz súrlódást feltételező esetekben.

A kopási modellek klasszikus képviselője az Archard- vagy Rabinowitz-féle modell (3. táblázat 1. sor), amely a súrlódó pár képlékeny alakváltozásán alapszik, valamint abrazív kopást feltételez [116, 122]. Ezt az egyenletet leginkább fémek esetén alkalmazzák, de kerámiák esetén is ezt a jól ismert modellt használják, például a kopási tényező kiszámításakor. 1971-ben, 18 évvel később Quinn kidolgozta azt a modellt (3. táblázat 2. sor), amely a kopást már termikusan aktivált folyamatként írja le és alkalmas mind kerámiák, mind fémek tribokémiai kopásának becslésére [123]. Hornborgen fémek esetén az anyag mechanikai tulajdonságaival (például törési szívósság, rugalmassági modulus) hozza kapcsolatba a kopást. Figyelembe véve a kerámiák azon tulajdonságát, hogy képesek képlékeny alakváltozásra és abrazív kopáskor jelentkező alakítási keményedésük akár már normál környezeti hőmérsékleteknél is jelentkezik, ezért ez a modell (3. táblázat 3. sor) alkalmazható egyes kerámiák abrazív kopásának a becslésére is [124].

A kikopott térfogat becslése mechanikai jellemzőkből meghatározó jelentőségű a rideg kerámiák kopási folyamatának elemzésében. Az Evans és Marshall által használt összefüggés (3. táblázat 4. sor), amely a laterális törési modellen alapszik, nagyon hasonlít a Hornborgen-féle modellre, mivel mindkettő figyelembe veszi a törési szilárdság és keménység közti összefüggést is [125, 126, 127, 128].

1987-ben Lim és Ashby már felismerte a különböző kopásmechanizmusok jelentőségét és ezek alapján készítették el modelljeiket (3. táblázat 5-9. sor). Az általuk felállított kerámia kopási modellek különböző kopási mechanizmusokra és környezeti feltételekre érvényesek. Ezek a modellek is figyelembe veszik azokat az anyagtulajdonságokat, amelyek kontrollálják a kopás során fellépő fizikai-kémiai folyamatokat. A differenciálás a különböző kopási mechanizmusok között nagyban hozzájárul a kopási térképek továbbfejlődéséhez [129].

Andersson és Olofsson (1990) egy egyszerűsített kopási modellt (3. táblázat 10. sor) használt a kopási viselkedés szimulációjának támogatásához [130]. Az általuk megalkotott egyenlet tulajdonképpen egy általános Archard-féle modellnek felel meg, amely a kopási

sebességet az érintkezési nyomás és a csúszási sebesség függvényében fejezi ki. Az ilyen típusú modellek egyszerűsége nyilvánvalóan vonzó a végeselemes szimulációkban való felhasználáshoz, de amikor a kopás mértékének becslésére használjuk ezt a modellt, jóval körültekintőbben kell figyelembe venni érvényességét és pontosságát.

Williams (2005) a terhelésnek kitett felület kopás miatt bekövetkező változását egy egyszerű dimenziótlan összefüggéssel (3. táblázat 11. sor) közelíti, feltételezve hogy a lineáris anyagvesztesség (w) és az érintkezési tartomány jellemző hossza (R_l) egy egyszerű lineáris függvénye az általa javasolt modellben az egyenlet jobb oldalán (3. táblázat. 11/i) álló paraméter csoportnak [131]. Az általa javasolt összefüggés a korábban bemutatott modellekben megjelenő anyagjellemzőkön kívül a valós kopási folyamatot jellemző súrlódási együtthatót is tartalmazza. Kísérleti úton igazolt megfontolásokra alapozva azonban a súrlódási együtthatót kiküszöböli a képletből ilyen módon általánosított modellhez (3. táblázat., 11/ii) jutva, ami már az Archard-féle összefüggéssel azonos alakú. A modellből egyértelműen arra következtethetünk, hogy a pV szorzat egy jól megalapozott tervezési paraméternek tekinthető a kenésmentes abrazív kopási folyamatok során.

Napjaink korszerű kopási modelljei (Dante, Kajdas, 2012, 3. táblázat 12-14. sor) a Si_3N_4 kopását tribokémiai folyamatok atomisztikus leírásával jellemzik [132].

A fizikai alapokon nyugvó modellek egy általános jövőbeli trendnek tekinthetők, ezt támasztja alá a Tewari és munkatársai által nemrégiben közölt modell (3. táblázat 15. sor) is [133, 134]. Ez a modell a tribokémiai kopást írja le nagy terheléskor fellépő fretting típusú érintkezés esetén. Az összefüggés a Herzt-féle érintkezési feszültségen alapszik és megadja a kapcsolatot a kikopott térfogat és a rendszer paraméterek (például terhelőerő, elmozdulás frekvenciája, ellentest sugara) és az anyagi paraméterek (például a súrlódó test törési szívóssága és a súrlódó pár rugalmassági modulusa) között. Ez az első fizikai alapokon nyugvó modell ilyen feltételek mellett. Rideg kerámia tárcsa és gömbölyű, alakított fém ellentest fretting típusú kopása esetén Tewari úgy becsüli (3. táblázat 16. sor) meg az oxidációs kopás értékét, hogy kombinálja a fent említett Hertz-féle érintkezési feszültségen alapuló tribokémiai kopási modellt az oxidációs kopás alapvető kémiai törvényszerűségeivel, amelyet exponenciális formában tartalmaz az egyenlet.

Ebből a rövid áttekintésből látható, hogy a kezdeti fenomenologikus leírásmódoktól és a kopás mértékének empirikus közelítésétől kiindulva mára eljutottak a kopás elemi folyamatainak kiterjedt elemzéséig, amely immár lehetőséget ad fizikailag megalapozott kopási modellek felállítására [135, 136].

Mindezek ellenére a kísérleti úton meghatározott empirikus modellek jól meghatározott körülmények esetén ma is hatékonyan használhatók a kopási tulajdonságok gyors, pontos és egyszerű becslésére.

3. táblázat. A legfontosabb kopási modellek 1953-tól napjainkig

No.	Év	Szerző(k)	Összefüggés	Ref.	Anyag (Mech.)
1.	1953	Archard J. F.	i) $V = K \cdot \frac{F_n}{H} \cdot l \Rightarrow$ ii) $k = \frac{K}{H} \cdot \frac{V}{F_n l}$	[122]	Általános
2.	1971	Quinn, T. F. J.	$V = \frac{F_n l}{\rho v H} A_f \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right)$	[123]	Kerámia (tribok. kopás)
3.	1977	Hornbogen, E.	$\dot{w} = \frac{K f F_n^{3/2} \beta^2 E \sigma_s}{H^{3/2} K_{Ic}^2}$	[124]	Fém
4.	1980	Evans, A. G.	$V = c \cdot \frac{F_N^{9/8}}{K_{Ic}^{1/2} \cdot H^{5/8}} \left(\frac{E}{H}\right)^{4/5} \cdot l$	[125]	Kerámia
5.	1987	Lim, S. C., Ashby, M.F.	$\tilde{F} = \frac{1}{(1 + \gamma_t \tilde{v}^2)^{1/2}} \left[1 - \frac{(T_b - T_0)}{20 T_m} \ln\left(\frac{10^6}{\gamma \tilde{v}}\right) \right]$	[129]	Kerámia (berágódás)
6.	1987	Lim, S. C., Ashby, M.F.	$\tilde{W} = \left(\frac{(T_m - T_0)}{T^*}\right) \frac{H_0}{T_{Lmet}} \frac{1}{\gamma \tilde{I}} \left[\gamma \tilde{F} \mu \frac{T^* \gamma}{(T_m T_0)} - l \right]$	[129]	Kerámia (olv. kopás)
7.	1987	Lim, S. C., Ashby, M.F.	$\tilde{W} = \left(\frac{c^2 A_0 r_0}{Z_c D}\right) \exp\left[-\frac{Q_0}{RT_f}\right] \frac{\tilde{F}}{\mu}$	[129]	Kerámia (gyenge ox. kopás)
8.	1987	Lim, S. C., Ashby, M.F.	$\tilde{W} = f_m \frac{K_{ox} (T_{mo} - T_b)}{T_{Lox} D} \left(\frac{\tilde{F} N}{\gamma \tilde{v}}\right)^{1/2} \left[\gamma \tilde{v} \frac{a H_0 a \alpha}{K_{ox} (T_m^{ox} - T_b)} \left(\frac{\tilde{F}}{N}\right)^{1/2} \mu - l \right]$	[129]	Kerámia (ultra-erős ox. kopás)
9.	1987	Lim, S. C., Ashby, M.F.	$\tilde{W} = \frac{2 \alpha f_v}{f_A^*} \tilde{F}$	[129]	Kerámia (képl. ir. kopás)
10.	1990	Andersson, S., Olofsson, U.	$\frac{h}{l} = k p$	[130]	Általános
11.	2005	Williams, J. A.	i) $\frac{w}{R_l} = f\left(\frac{F}{R_l^2 H}, \frac{V t}{R_l}, \mu\right) \Rightarrow$ ii) $w = \frac{w}{t} = K \frac{p V}{H}$	[131]	Általános
12.	2012	Dante, R. C., Kajdas, C. K.	$k = c_0(T, F, C)(\mu - \mu_{th})$	[132]	Si ₃ N ₄ (tribok. k.)
13.	2012	Dante, R. C., Kajdas, C. K.	$\mu = f \mu_{HD} + (1 - f) \mu_C$	[132]	Si ₃ N ₄ (tribok. k.)
14.	2012	Dante, R. C., Kajdas, C. K.	$k = K_A(1 - f) = K_C \frac{\mu - \mu_{HD}}{\mu_C - \mu_{HD}}$	[132]	Si ₃ N ₄ (tribok. k.)
15.	2009	Tewari, A. et al.	$V = \frac{\pi s \xi^2}{3} \left(\frac{3 F_n R_b}{4 E^*}\right)^{2/3} \sqrt{\left[\left(\frac{4 \chi^2 E^* F_n}{3 \beta^3 K_{Ic}^2 R_b}\right)^{2/3} - 1\right]}$	[133]	Kerámia kompozitok (tribok. k.)
16.	2012	Tewari, A.	$V_T \approx \exp\left[-\frac{B}{\left(T_a + 2,25 \mu F_n^{2/3} (E^* / R^*)^{1/3} v / 8 k_{\perp th}\right)}\right]$	[134]	Fém/ker. kompozitok (oxidációs tribok. k.)

2.11.2. A modellek rendszerezése, főbb jellemzőik

A szakirodalmi áttekintést követően modellenként áttekintettem, hogy melyik összefüggés számol a vizsgált anyagokból származó paraméterekkel, a kopásvizsgálat be- és kimeneti paramétereivel, valamint empirikus konstansokkal. A kopási károsodáshoz való viszony alapján megkülönböztettem bemeneti és kimeneti paramétereket. A bemeneti paraméterek között találhatók anyagfüggő és vizsgálati feltételektől függő paraméterek egyaránt.

A paraméterek csoportosíthatók továbbá az adott paraméter meghatározásának nehezsége szerint is. E szerint megkülönböztettem „nehezen” és „könnyen” mérhető paramétereket. A 4. táblázatban összegyűjtöttem, hogy adott modell milyen paraméterekkel számol, majd statisztikát készítettem az így kigyűjtött adatokból. (A nehezen mérhető paraméterek vastag betűvel íródtak.)

4. táblázat. A tribológiai modellekben szereplő mennyiségek csoportosítása típus szerint

Paraméter		Modell sorszáma															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A vizsgált anyag(ok)tól függő bemeneti paraméterek	D: a fém diffúziós együtthatója							x	x								
	E*: komplex rugalmassági modulus, GPa															x	x
	E: rugalmassági modulus		x	x	x												
	f_A*: a felületi nyílt porozitás kritikus területi hányada									x							
	f_v: a zárványok térfogati hányada									x							
	H: felületi keménység, GPa	x	x	x	x							x					
	H₀: a fém keménysége szobahőmérsékleten						x		x								
	h_c: kritikus filmvastagság																x
	K_A: az érintkező érdességi csúcsokat figyelembe vevő konstans														x		
	K_{IC}: törési szívósság			x	x											x	
	K_{ox}: az oxid hővezetési együtthatója								x								
	k_{th}: hővezetési együttható																x
	Q₀: az oxidáció aktiválási energiája																x
	Q_{tr}: tribokémiai folyamat aktiválási energiája							x									
	T*: egyenértékű hőmérséklet fém esetén						x										
	T_b: tömbi hőmérséklet				x				x								
	T_{Lmet}: az összeolvadás látens hője térfogat egységre vonatkoztatva fém esetén					x											
	T_{Lox}: az összeolvadás látens hője térfogat egységre vonatkoztatva oxidok esetén								x								
	T_m: olvadáspont				x	x			x								
	T_{mo}: az oxid olvadáspontja								x								
	Z_c: az oxidfilm kritikus vastagsága							x									
	β: keményedési kitevő				x											x	
	ρ: az oxid film sűrűsége		x														x
	σ_s: a lágyabb anyag folyáshatára			x													

Paraméter		Modell sorszáma															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Kopásvizsgálat bemeneti paraméterei	$\tilde{F}$: normalizált nyomás a csatlakozó felületen							x	x	x							
	$\tilde{v}$: normalizált sebesség					x	x		x								
	A_f : frekvencia faktor		x														
	A_c : érdességi csúcsok területe az érintkezési felületen																x
	F_n a normál irányú terhelőerő	x	x	x	x		x						x			x	x
	l : csúszási úthossz	x	x		x						x						
	N : érintkezési csúcsok száma a felületen								x								
	p : névleges nyomás										x						
	R^* : a súrlódó pár komplex sugara																x
	r_0 : a tű rádiusza							x									
	R_b : a golyó sugara															x	
	R_f : reprezentatív hosszúság											x					
	s : a fretting típusú súrlódás amplitudója															x	
	t : csúszási idő											x					x
	T : hőmérséklet												x				
	T_a : abszolút környezeti hőmérséklet																x
	T_f : villámhőmérséklet							x									
	v : csúszási sebesség		x														x
	χ : illesztési paraméter															x	
Kopásvizsgálat kimeneti paraméterei	f : a folyadék fázis által felvett terhelési hányad													x	x		
	f_m : olvadt anyag térfogati hányada a csúszó súrlódás során								x								
	K : dimenzió nélküli kopási tényező	x		x								x					
	T_s : felületi hőmérséklet		x														
	V : kikopott térfogat											x					
	μ : súrlódási együttható						x	x	x			x	x		x		x
	μ_C : az érintkező érdességi csúcsok súrlódáshoz való hozzájárulásának mértéke													x	x		
	μ_{HD} : a viszkózus tapadás által módosított súrlódási együttható értéke													x	x		
Konstansok	μ_{th} : a súrlódási együttható határértéke a tribokémiailag aktivált kopás esetén												x				
	a : konstans								x								
	A_0 : Arrhenius-féle konstans oxidáció esetére							x									
	C : konstans				x			x					x				
	k_0 : pre-exponenciális konstans a termikusan aktivált kémiai folyamat esetére																x
	R : univerzális gázállandó		x					x									
	T_0 : 300 °K					x	x										
	α : konstans								x	x							
	γ : dimenzió nélküli parameter tömbi hevítésnél					x	x		x								
	ξ : anyagi konstans (1,2 kerámiák esetén)															x	
	ϕ : elméleti anyagkostans			x													

A 4. táblázat alapján 62 különböző paraméter található 16 különböző kopási modellben. Átlagosan egy modell 7,125 adattal számol, amelyből: 2,5 anyagjellemző, anyagi mérőszám, 2,25 a kopásvizsgálat bemeneti paraméterei közé tartozik, 1,25 a kopásvizsgálat eredményéből származtatott paraméter, 1,125 pedig konstans. A legtöbb paramétert a 8. számú egyenlet veszi figyelembe, összesen 15-öt, amely 7 db anyagjellemző, 3 db bemeneti paraméter, 2 db kimeneti paraméter és 2 db konstans.

A táblázatos áttekintésből látható továbbá, hogy számos modell figyelmen kívül hagy egy-egy paramétercsoportot, vagy egy paramétert vesz csak figyelembe a paramétercsoportból, vagy olyan paraméterrel számol, amely nehezen mérhető:

- Nem számol a koptatott anyagtól függő bemeneti paraméterekkel vagy csak egy paramétert vesz figyelembe: 1, 10, 11, 12, 13;
- Nehezen mérhető anyagfüggő bemeneti paraméterekkel számol (például: a zárványok térfogati hányada): 2, 6, 9, 7, 14, 16;
- Nem számol a vizsgálat bemeneti paramétereivel vagy csak egy paramétert vesz figyelembe: 3, 5, 13, 14;
- Nehezen mérhető bemeneti vizsgálati paraméterrel számol (például: az érintkezési csúcsok száma a felületen): 9, 15, 16;
- Nem számol a vizsgálat kimeneti paramétereivel vagy csak egy paramétert vesz figyelembe: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 16;
- Nehezen mérhető kimeneti vizsgálati paraméterrel számol: 7, 8, 12, 13, 14;
- Nem számol konstanssal: 1, 10, 11, 13, 14.

Több modell figyelmen kívül hagyja a vizsgált anyagok anyagtulajdonságait, vagy a vizsgálat be- és kimeneti paramétereit. További probléma, hogy a modellek olyan paraméterekkel is számolnak, amely nehezen mérhető és számszerűsíthető. Megfigyelhető továbbá, hogy nem veszik figyelembe a modellek az inhomogén anyagok tulajdonságait, homogén anyagot feltételeznek, ami alkalmazásukat behatárolja. Az összegyűjtött modellek kétharmada számol valamilyen konstanssal, amelynek a meghatározásáról a modellek forrása nem tesz említést.

A modellezés kapcsán nagyon fontos, hogy egy-egy modell áttekintésekor figyelembe vegyük a mérési módszer megbízhatóságát, hogy az adott modell elve nem ütközik-e valamilyen fizikai törvényszerűséggel, illetve, hogy végeztek-e más kutatók is becsléseket az adott modell alkalmazásával. Előfordul, hogy egy publikációban nem közlik részletekbe menően az adott mérés körülményét, például kerámiák esetén nincs információ a páratartalomról vagy a pontos anyagösszetételről, ami félrevezető becslést eredményezhet. A mérés megfelelő dokumentációja a modellezés szempontjából elengedhetetlen lenne.

Számos modell vesz figyelembe olyan paramétereket, amelyek nehezen mérhetők (például a felületen lévő érdességi csúcsok száma), így a modell nehezen alkalmazható. Sok esetben a hiányzó paraméterek meghatározásához nehéz, időigényes és igen költséges mérések szükségesek. Néhány esetben egy-egy ilyen paramétert valamilyen szakirodalmi adattal helyettesítenek, ez azonban jelentősen eltérhet a valós értéktől, így hibás becsléshez vezethet új gyártású/összetételű vagy inhomogén anyagoknál.

A felvázolt modellek sok esetben csak egy-egy kopási mechanizmus esetén érvényesek. A kopási módok és mechanizmusok/almechanizmusok kategorizálásának tekintetében sincs egyetértés a kutatók között, a mechanizmusok azonosítása szubjektív, valamint nem minden esetben van lehetőség a kopásnyom teljes felületének megvizsgálására, csak néhány felvétel készül a kopásnyomról, így hibás megállapításokra juthatunk. Előfordulhat továbbá, hogy az adott anyag kopási viselkedésekor más mechanizmus is megjelenik például tribokémia kopás mellett abrazív, miközben a legtöbb modell csak egy-egy mechanizmusra vonatkozik. Véleményem szerint törekedni kellene egy egységes besorolási rendszer összeállítására, valamint az észlelt mechanizmusokat alapos dokumentációval alá kell támasztani.

Számos modell figyelmen kívül hagyja a vizsgált anyagpár kopási viselkedés szempontjából fontos anyagtulajdonságainak jelentős részét (például keménység, törési szívósság), valamint a vizsgálati paramétereket (például erő, csúszási úthossz, vagy a kopásvizsgálat ideje). Ezekről a paraméterekről, adatokról egy modell felállításakor nem lehet eltekinteni.

A modellek kapcsán összességében elmondható, hogy nincs olyan kopási modell, amely az összes anyagra és kopási módra, mechanizmusra alkalmazható lenne. Sok esetben a mérések dokumentációja hiányos, nem rendelkezünk elegendő információval a mérés menetéről, a befolyásoló tényezőkről. Ahhoz, hogy komplex képet kaphassunk egy-egy anyag kopási viselkedéséről, a modellek harmonizálására lenne szükség, több vizsgálatra, több anyagon, több kutató által. Ezzel szemben sok esetben mindössze néhány mérési eredményre alapozzák a felállított modellt. Fontos lenne a modellezés szempontjából, hogy a megfelelő, mérhető változókat alkalmazzuk, az adott egyenlet dimenzióanalízise is történjen meg és azok az információk is legyenek közölve, amelyekre az adott modellt alapozzák. Szükséges lenne továbbá a megfelelő ellenőrzés, hogy ne csak egy mérési sorozatra legyen alapozva az adott egyenlet, alapos dokumentáció tartozzon hozzá és ha van rá mód, a modell folyamatosan fejlesztve legyen.

Doktori kutatómunkám egyik célkitűzése a különböző módon előállított Si_3N_4 alapú kerámia kompozitok kopási viselkedésének becslésére alkalmas kopási modell felállítása, amely könnyen meghatározható paraméterekkel számol, figyelembe veszi a kopásvizsgálatok be- és kimeneti paramétereit, valamint a vizsgált anyagok kopás szempontjából legfontosabb mechanikai tulajdonságait.

3. AZ ÉRTEKEZÉS RÉSZLETES CÉLKITŰZÉSE

Kutatómunkám célja a műszaki alkalmazásokban kiemelt szerepet betöltő Si_3N_4 alapú kerámiák tribológiai teljesítőképességének vizsgálata, a kopásállóságot befolyásoló egyes anyagszerkezeti és technológiai tényezők hatásának jellemzése.

Ennek érdekében tribológiai kísérleteket hajtok végre, amelyek eredményei alapján a vizsgált szerkezeti kerámiák hatékonyabb tribológiai alkalmazását elősegítő különféle kopási térképek kidolgozását és domináns kopási módra kopási modellek megalkotását tűzöm ki célul. A felsorolt célok eléréséhez a szakirodalmi ismeretek áttekintése és értékelése alapján az alábbi kísérleti és elméleti feladatok végrehajtását tervezem:

- HIP és SPS szinterelésű, monolitikus és többrétegű grafén (1 és 3 tömeg%) adalékolású Si_3N_4 nanokompozitok tribológiai viselkedésének vizsgálata ball-on-disc típusú kopásvizsgálatok elvégzésével a terhelőerőt és a csúszási sebességet széles tartományban változtatva; a kopási viselkedés jellemzésére különféle kvantitatív és kvalitatív jellemzők (kopási sebesség, dimenzió nélküli kopási tényező, súrlódási együttható, kopási mechanizmusok) meghatározása;
- a kopási viselkedéssel összefüggésbe hozható mechanikai tulajdonságok (keménység, hővezetési tényező, törési szívósság) meghatározása;
- a széles tartományt lefedő terhelési paraméterek függvényében meghatározott különféle kopási mérőszámok (fajlagos kopási sebesség, dimenziótlan kopási tényező) birtokában 2D és 3D típusú kopási térképek kidolgozása;
- egy olyan kopási modell megalkotása, amely alkalmas mindkét gyártástechnológiával, mindhárom összetételben készült kerámia kompozitokon különböző terheléssel végzett kopásvizsgálatok során létrejövő kikopott térfogat becslésére.

Az elvégzett vizsgálatok lehetőséget adnak a vizsgált keramikus anyagok lehetséges és javasolt alkalmazási körének kibővítésére, továbbá alapul szolgálhatnak a további anyagtechnológiai fejlesztésekhez. A kapott eredmények várhatóan adatbázisokban is hatékonyan felhasználhatók. A kopási térképek többek között az anyagkiválasztásban nyújthatnak hasznos segítséget. A kopási jellemzők és az anyagtulajdonságok közötti kapcsolatok meghatározásával kidolgozott modellek pedig a kopási károsodás becslésére alkalmazhatók.

A következő fejezetekben a fenti célkitűzésekben megfogalmazott feladatok megoldása érdekében önállóan elvégzett elméleti és kísérleti kutatómunkám kerül bemutatásra.

4. Si_3N_4 TÖBBRÉTEGŰ GRAFÉN NANOKOMPOZITOK TRIBOLÓGIAI VISELKEDÉSÉNEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

4.1. *A vizsgálat mintadarabok jellemzése*

4.1.1. *A próbatestek kémiai összetétele, geometriai megjelenése*

A disszertációmban vizsgált szilíciumnitrid minták kétféle szinterelési eljárással készültek: meleg izosztatikus sajtolással (HIP) és szikraplasma szintereléssel (SPS). Mindkét esetben három különböző összetételű mintát vizsgáltam. Az adalék nélküli változat, amely referencia anyagként szolgált, tömegarányban kifejezve a következő összetételű volt: 90% Si_3N_4 , 4% Al_2O_3 , 6% Y_2O_3 . A HIP eljárással készült minták esetén a megadott összetételű alappor 100 grammjához még 11,1 g PEG formázási adalékot is adtak, amelyet szinterelés előtt oxidációs folyamatban eltávolítottak. A kompozit minták 1% és 3% őrléssel készített többrétegű grafént tartalmaztak. A HIP próbatesteket az MTA TTK MFA Kerámia és Nanokompozitok Osztálya, az SPS mintákat az MTA TTK, AKI Funkcionális és Szerkezeti Anyagok Osztálya gyártotta. A tárcsa alakú minták mérete eltérő volt: a HIP minták átlagos átmérője 27 mm, vastagsága 3,5 mm, míg az SPS gyártású minták átlagos átmérője 20,6 mm vastagsága 3 mm volt. A próbatestek alapanyaga (kivéve a HIP gyártásnál használt PEG formázási adalékot), tehát mindenben megegyezett.

A HIP eljárással készült próbatestek gyártási eljárása a következő volt: A grafént nem tartalmazó referencia próbatestek Si_3N_4 alapanyagát a szinterelési adalékokkal – Al_2O_3 (Alcoa, A16) és Y_2O_3 (H.C. Starck, grade C). – összekeverték és 4000 1/min fordulatszámon őrlték 5 órán keresztül. A golyósmalomban 2 mm átmérőjű ZrO_2 őrlőgolyókat használtak a megfelelő szemcsenagyság (monolitikus: 0,4 μm ; kompozit: 0,2 μm) eléréséhez szükséges őrlési időtartamig.

A próbatestek gyártásához felhasznált többrétegű grafént (MLG) grafit alapanyagból 10 órán keresztül tartó őrléssel állították elő. Ezek után hozzákeverték a Si_3N_4 mátrixanyaghoz, majd 4,5 órán keresztül 4000 1/min fordulatszámú attritor malomban őrlték a keveréket. Ezt követően a malom fordulatszámát lecsökkentették 600 1/min-ra, majd folytatták az őrlést fél órán keresztül. Az elkészült kerámia porkeveréket egy órán keresztül ultrahangos ethanol-fürdőben tisztították, majd polietilén-glikol (PEG), formázási adalékanyagot adagoltak hozzá. Ezt követően a keveréket 150 μm lyukátmérőjű szitán átszitálták. A nyerskerámia minták alakadása 220 MPa nyomáson száraz sajtolással történt. Ezután rendkívül lassan hevítették 400 °C-ig, hogy oxidációval eltávolítsák a PEG adalékot. A kerámiák HIP szinterelése 1500 °C -on és 20 MPa nyomáson történt, 3 órán

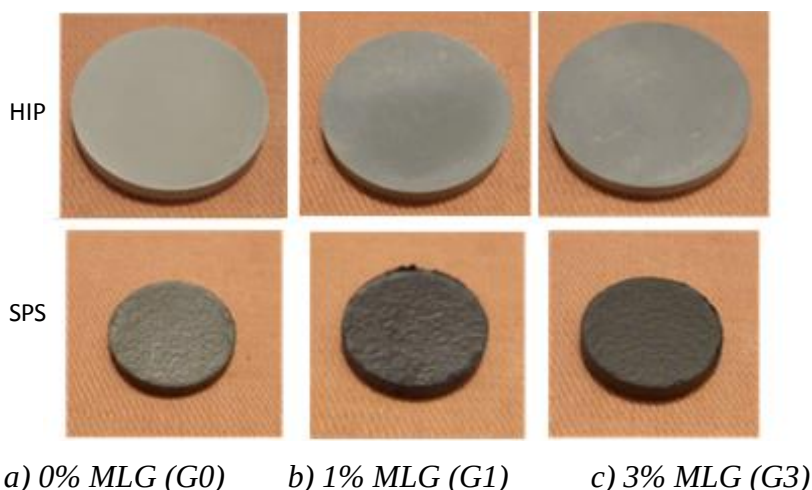
keresztül nagy tisztaságú nitrogén gázban, BN beágyazó por felhasználásával [137]. A hevítési sebesség nem haladta meg a 25 °C/min értéket.

Az SPS technológiánál a szinterelendő por felhevítésének sebessége a hevítés eltérő módjának köszönhetően nagyobb, mint a melegsajtoló eljárások esetén (80 °C/min). A szinterelési idő így csökkenthető és a gyártási sebesség is növelhető. A próbatestek gyártása során a vizsgálati minták alapanyagát egy 20,6 mm belső átmérőjű hengeres grafit téglébe töltötték (21. ábra), majd egy FTC GmbH által gyártott SPS berendezésben 600 °C-ra hevítették pulzáló egyenárammal, ami lassú 100 °C/min hevítési sebességet biztosított. A megadott hőmérsékletet így módon 6 perc alatt érték el. Ezt követően a matrica felületére fókuszált pikométerrel szabályozva növelték tovább a hőmérsékletet 1500°C-ig. A teljes hevítési-hőntartási idő 5 perc volt, amelynek során 50 MPa nyomáson következett be a szinterelés. A hűtési fázisban az 1500–1000 °C tartományban 400 °C/min sebességgel hűtötték le a mintákat [137].



21. ábra. A por kézi tömörítése és a szinterelő kamra szinterelés előtt

A próbatesteket a 22. ábra szemlélteti. A HIP gyártású próbatestekből típusonként 5-5 darabbal, az SPS gyártású próbatestekből 4-4 darabbal rendelkezem.



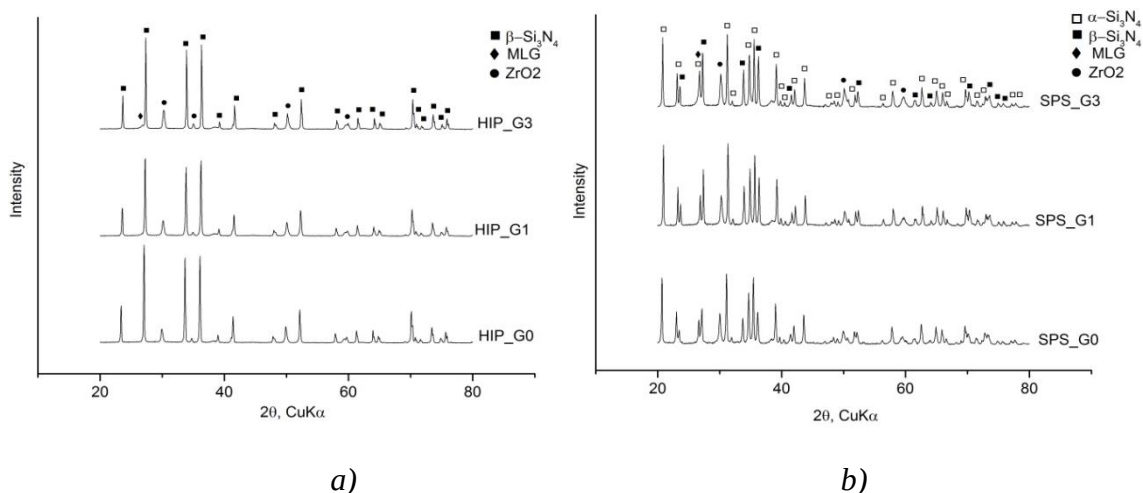
a) 0% MLG (G0) b) 1% MLG (G1) c) 3% MLG (G3)

22. ábra. A próbatestek felületelőkészítés előtt

4.1.2. Fázisösszetétel és mikroszerkezeti vizsgálatok

A vizsgálatok során tanulmányoztam a próbatestek anyagszerkezetét. A mikroszerkezeti vizsgálatokhoz Zeiss EVO MA10 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtam. A fázisösszetétel meghatározására röntgen diffrakciós elemzést végeztünk Phillips PW 1830 típusú röntgendiffraktométerrel Cu-K α sugárzás használatával. Mindkét berendezés a Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Karának, Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében működik. A vizsgálatokat az Intézet kollégái végezték.

A kétféle gyártású mintákon elvégzett röntgen diffrakciós vizsgálatok (23. ábra) a kerámiák fázisösszetételéről adnak információt. Ennek alapján megállapítottam, hogy a HIP gyártású próbatestekben a kiinduló por teljes egészében átalakult β -Si $_3$ N $_4$ -dé, tehát itt 100%-ban ez a fázis van jelen. Ezzel szemben az SPS technológiával készült próbatestekben 65–66%-ban α -Si $_3$ N $_4$ -et találtunk és mindössze 23–25% volt az átalakult β -Si $_3$ N $_4$ fázis aránya.

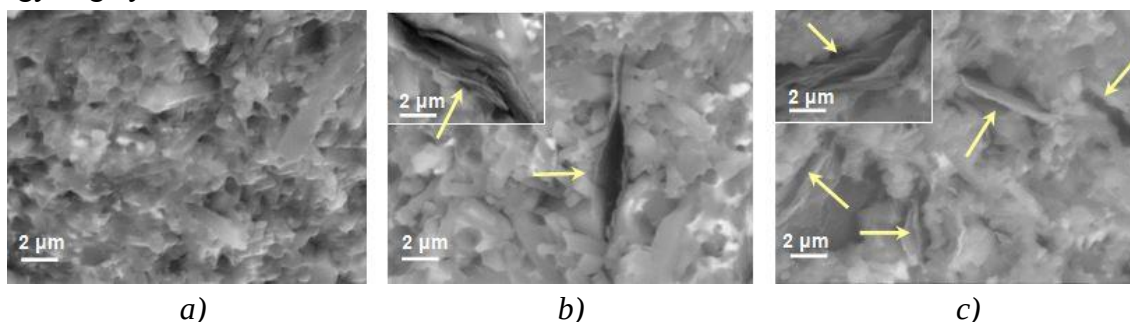


23. ábra. Fázisösszetétel vizsgálat röntgenspektrumai a) HIP és b) SPS gyártású mintákra;
Jelölés: G0– monolitikus; G1–1 tömeg% MLG; G3–3 tömeg% MLG tartalmú minták

A kerámiák mikroszerkezetét a töretfelületek SEM vizsgálatával elemeztem. A HIP eljárással előállított próbatestek mikroszerkezete a 24. ábrán látható. Ezek a minták összetételtől függetlenül tűs morfológiájú β -Si $_3$ N $_4$ -et tartalmaztak. Az ábra b) és c) részlete jól szemlélteti a grafén többrétegű szerkezetét. Ettől eltérő volt az SPS technológiával készült minták szövetszerkezete, ahol a szemcsék alakja a többségében jelenlévő α -Si $_3$ N $_4$ -nek megfelelően equaxiális volt, de ezek mellett felismerhetők voltak a részben átalakult β -Si $_3$ N $_4$ szemcsék is. Az SPS minták szövetszerkezetét a 25. ábra mutatja.

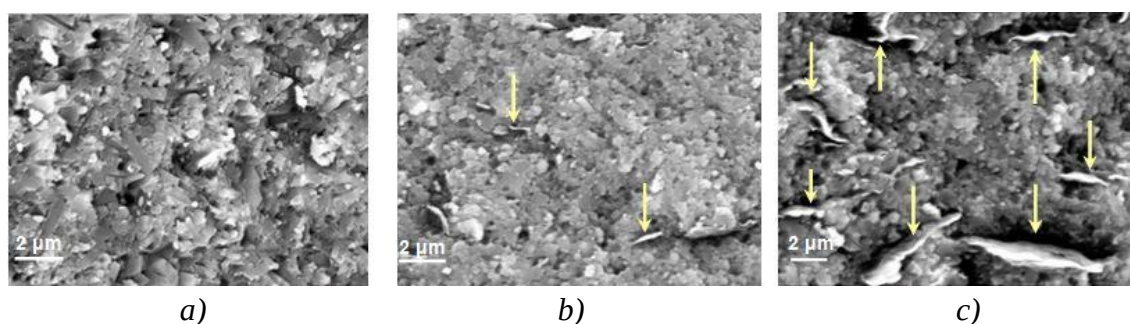
A felvételekből látható, hogy az MLG lemezek egyenletesen oszlanak el a kerámia mátrixban és hosszuk kb. néhány mikrométer. A lemezek vastagsága 8–10 nm, hosszuk maximum 100 nm. Hasonló eredményekről olvashatunk más kutatók munkájában is [138, 139].

A SEM képeken látszik továbbá, hogy a HIP eljárással előállított próbatesteknél az MLG részecskék véletlenszerű orientációjúak, míg az SPS-sel előállított mintáknál elhelyezkedésüket tekintve anizotrópia figyelhető meg, a szintereléskor fellépő egytengelyű terhelés miatt.



24. ábra. A HIP eljárással előállított próbatestek mikroszerkezete

a) monolitikus Si_3N_4 ; b) Si_3N_4 + 1 tömeg% MLG c) Si_3N_4 + 3 tömeg% MLG



25. ábra. A SPS eljárással előállított próbatestek mikroszerkezete

a) monolitikus Si_3N_4 ; b) Si_3N_4 1 tömeg% MLG-vel c) Si_3N_4 3 tömeg % MLG-vel

4.1.3. A próbatestek elméleti és tényleges sűrűsége

A minták sűrűségét archimedesi módszerrel határoztam meg. Az eredmények az 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat. A vizsgált minták látszólagos sűrűsége

Szinterelési eljárás	MLG, tömeg%	Látszólagos sűrűség, g/cm^3	Szórás	Variancia együttható, %
HIP	0	3,217	0,036	1,12
	1	3,269	0,051	1,55
	3	2,743	0,113	4,11
SPS	0	3,246	0,001	0,04
	1	3,168	0,170	5,37
	3	3,133	0,043	1,39

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a monolitikus és az 1% MLG-t tartalmazó minták mindkét gyártási eljárás esetén hasonló sűrűség értékeket eredményeztek, míg a 3% grafént tartalmazó, HIP eljárással készült mintáknál a sűrűség jelentős csökkenését tapasztaltam, azaz megnőtt a porozitás. Az SPS gyártású mintáknál ugyancsak sűrűség-

csökkenés volt megfigyelhető, de jóval kisebb mértékben, mint a HIP minták esetén. Ezeknek oka, hogy a nagyméretű grafén részecskék akadályozzák az alapanyag szemcséinek összenövését, azaz a szinterelődést.

4.1.4. A próbatestek hővezetési együtthatója

A monolitikus minták esetén a sűrűség növelésével a hővezető képesség nőhet, továbbá nagyságát az adalékanyagok minősége, mennyisége, valamint a kialakuló anyagszerkezeti hibák is befolyásolják.

A hővezetési tényezőt C-Therm TCi™ (Thermal Conductivity Analyzer, Miskolci Egyetem Kerámia és Szilikátmérnök Tanszék) berendezéssel mérték az Intézet dolgozói. A berendezés módosított tranziens sík forrás módszer elven működő eszköz [140], amely alkalmas folyadékok, porok, és szilárd anyagok (kerámiák, műanyagok, fémek) hővezetési tényezőjének meghatározására, $(-50) - (+200) ^\circ\text{C}$ között. Mérési tartománya $0-120 \text{ W/mK}$, pontossága jobb, mint 1%. A mérőszenzor egyoldali mérést tesz lehetővé.

A különböző anyagtípusokhoz a vizsgálati leírás [140] eltérő mintaelőkészítést ad meg. Keramikus anyagok vizsgálatánál a minta minimális vastagsága 5 mm és szobahőmérsékleten kenőanyagként desztillált víz használata szükséges. A mérés lépései az alábbiak (26. ábra):

- a vizsgálandó anyag előkészítése, a felület ellenőrzése (szennyeződés, sérülés);
- kenőanyag felvitele a szenzorra (desztillált víz);
- a minta ráhelyezése a szenzorra, a súlyterhelés ráhelyezése;
- a vizsgálat elindítása.



26. ábra. A hővezetési tényező vizsgálat előkészítésének lépései

A kompozit minták esetén a grafén adalékolásának jelentős hatása lehet a hővezetési tényező értékére, mivel a grafén jobb hővezetési tényezővel rendelkezik ($k_{\perp\text{grafén}, \text{in plane}} \geq 1000 \text{ W/mK}$ [141]), mint a Si_3N_4 ($k_{\perp\text{Si}_3\text{N}_4} = 15-30 \text{ W/mK}$ [90]), ugyanakkor növeli a minták porozitását, csökkenti azok sűrűségét.

Az SPS gyártású próbatestek hővezető képessége az α -Si₃N₄ módosulat jelenléte miatt kisebb. HIP gyártás esetén kialakuló β -Si₃N₄ módosulat hővezető képessége nagyobb, de a grafén szerkezeti degradációja miatt a kompozitok hővezető képesség romolhat.

A vizsgálatok típusonként 1-1 próbatesten történtek. Az eredmények alapján (6. táblázat) elmondható, hogy azok összhangban vannak az irodalmi adatokkal [1, 142], vagyis a HIP gyártású minták hővezetési tényezője 12–13 W/mK érték körül változott. A grafén adalékolás a várákozással ellentétben – egy kivételtől eltekintve – nem javította a hővezetési együttható felületre merőleges irányban mérhető értékét, valószínűleg a grafén jelenlétében jelentősen megnövekvő porozitás miatt. Ezt igazolja, hogy a hővezetési tényező és a sűrűség értékek a grafén tartalommal azonos módon változnak. Az SPS gyártású minták hővezetési tényezője a 60% α -Si₃N₄ fázis jelenléte miatt sokkal kisebb, de szintén azonos módon változik, mint a minták sűrűsége.

6. táblázat. A vizsgált minták hővezetési tényezője

Szint. eljárás	MLG, tömeg%	Hővezetési tény., k_L , W/mK
HIP	0	12,77
	1	13,11
	3	9,21
SPS	0	7,19
	1	5,84
	3	5,26

4.1.5. A mintadarabok felületének előkészítése

Kutatómunkámhoz két különböző technológiával (HIP és SPS) előállított Si₃N₄ mátrixú monolitikus, illetve grafént (1% és 3%) tartalmazó minták felületelőkészítését terveztem meg és hajtottam végre.

ú143]. A csiszoló és polírozó anyagokkal foglalkozó Struers cég által elkészített felületelőkészítési programok ezért jó kiindulási alapnak tekinthetők a próbatestek felületelőkészítésének megtervezésekor [144]. Az ajánlás szerint 1 db csiszolási és további 4 db polírozási műveletet kell alkalmazni a Si₃N₄ felületelőkészítés esetén. A csiszolás lépéséhez 125 μ m szemcse-átmérőjű gyémántot tartalmazó tárcsát kell használni víz kenőanyaggal. Ebben a lépésben a cél az egyenletes felületi minőség elérése, amelyhez a szükséges idő függ a kiinduló felületi érdességtől, valamint az alapanyag mechanikai tulajdonságaitól. A polírozás lépéseihez szintén gyémánttárcsát ajánlanak, amelynek szemcseméretét lépésenként csökkenteni kell. Ezeknél a fázisoknál már gyémánt szemcsét tartalmazó abrazív szuszpenzió alkalmazását is javasolják, hűtő-kenő folyadék alkalmazása mellett.

Tanulmányoztam továbbá egy szilíciumnitrid/többrétegű szén nanocső kopásvizsgálatával foglalkozó doktori disszertációt [56], amely szintén ajánl egy felületelőkészítési tervet, ugyancsak a fentiekben bemutatott termékek használatával.

Mivel ehhez a felületelőkészítési tervhez szükséges korongok, szuszpenziók a kísérletek elvégzésekor rendelkezésemre álltak, továbbá a hivatkozott munkában szereplő a mátrixanyag megegyezik az általam vizsgálandó próbatestek mátrixanyagával, ezért ennek alapján az intézetünkben rendelkezésre álló polírozó eszközök felhasználásával egy saját felületelőkészítési programot (7. táblázat) állítottam össze. Fontos megjegyezni, hogy a gyártó által javasolt 180 N terhelőerőt nem lehetett megvalósítani, ugyanis a polírozó berendezésünk (Struers LaboPol2) csak 40 N terhelőerőt képes kifejteni.

A felületelőkészítés műveletsora több lépcsőből épül fel, amelyben csiszolási és polírozási lépcsők követik egymást különböző korongokon, különböző kenőanyagokat és szuszpenziókat alkalmazva. A szuszpenziók és kenőanyagok megfelelő adagolásához csöpögtető berendezést készítettünk, amely a viszonylag hosszú – esetenként több órás nagyságrendű – felületelőkészítési idők miatt nagyban megkönnyítette a munkámat.

A csiszoláshoz és a polírozáshoz Struers korongok és adalékok kerültek felhasználásra. A felületelőkészítéshez használt programot a 7. táblázat foglalja össze. A program befejezésekor tökéletesen sima, egyenletes felületet kapunk, amely már megfelelő a kopásvizsgálatok elvégzéséhez [56, 145].

7. táblázat. A minták felületelőkészítésére kidolgozott (I. típusú, kötött szemcsés) program ($F = 40 \text{ N}$, a tárcsa fordulatszáma: $n_t = 300 \text{ 1/min}$, minta fordulatszáma: $n_m = 240 \text{ 1/min}$)

Művelet ssz.	Fázis	A felületelőkészítéshez használt eszközök*				Felületelőkészítési idő, óra			
		Korong típusa	Szemcse-átmérő, μm	A szuszpenzió abrazív adaléka	Hűtő-kenő folyadék	HIP (bármely összetételű mintára)	SPS		
							MLG tartalom		
							0%	1%	3%
1.	Csiszolás	Diamond Pad 40		—	Víz	—	2980	300	60
2.		MD Piano 80	200	—	Víz	—	—	—	240
3.		MD Piano 220	60	—	Víz	290	330	60	30
4.		MD Piano 500	30	—	Víz	60	90	90	90
5.	Polírozás	MD Allegro		φ9 μm gyémánt szemcse	Struers „Green” lubricant	50	50	50	50
6.		MD Largo		φ3 μm gyémánt szemcse		40	40	40	40
7.		MD NAP		φ0,04 μm ZrO ₂ szemcse	-	10	10	10	10
Összes idő, óra						7,5	58,3	9,2	8,6

*Struers eszközök

A felületelőkészítési program többségében megfelelő minőségű sík felületet eredményezett elfogadható idő (egy műszak) alatt mind a hagyományos meleg izosztikus sajtolással készült, mind a szikraplazma szinterelt kompozit minták esetén. A legnagyobb érdekességű és keménységű próbatestek azonban csak igen hosszú idejű csiszolást követően érték el az egyenletes felületminőséget.

A hosszú felületelőkészítési program az időigényesség mellett olyan problémát is okozott, hogy az egyébként is rendkívül vékony ($v = 2 \text{ mm}$) minták túlzottan elvékonyodtak, emiatt a kopásvizsgálat során egyes minták idő előtt eltörték.

Ezeknek a legdurvább felületeknek a megmunkálását hatékonyabban például köszörüléssel lehetett volna megoldani, de az ehhez szükséges mintabefogást (gyantába öntést) nem vállaltuk, mivel a beágyazó gyanta eltávolítása a minták ridegtörésével járhatott volna, amelyek utólagos pótlására nem volt lehetőség.

Az SPS próbatestekhez új, hatékonyabb felületelőkészítési programot keresve megismerkedtem az ásványok felületelőkészítésénél használt szabadszemcsés módszerrel. Ennek kipróbálásához az SPS monolitikus próbatestekből egy második sorozatot kellett készíteni. A második gyártási sorozatban előállított SPS minták az első sorozathoz képest némileg eltérő, kisebb kiinduló felületi érdekességgel készültek el.

A II. típusú felületelőkészítési programot az Ásvány- és Földtani Intézet laboratóriumának munkatársai segítségével hajtottam végre. A jellemző eltérések az I. típusú felületelőkészítési programhoz viszonyítva a következők voltak (8. táblázat):

- A nagyoló megmunkálás során nem gyémánt, hanem különböző szemcsenagyságú SiC port használtam;
- A csiszolás nem automatában, hanem kézi erővel történt, amelynek során a nyomóerő körülbelül háromszoros volt a gépi csiszoláshoz képest;
- Az ezt követő polírozás lényegében a kötött szemcsés programhoz hasonló módon, automata polírozó berendezésen történt.

Összehasonlítva a kétféle felületelőkészítő eljárást a legfontosabb megfigyelésem a következő volt: Az I. típusú, vagyis a kötött szemcsés tárcsával történő megmunkálásnál a gyémánt szemcséket beágyazó Ni kötőanyag anyag egy filcalátéten van rögzítve, amely a terhelés hatására alakváltozhat, így a gyémánt szemcsék a korong rugalmas alakváltozását követve hozzásimulnak a próbatesthez, felvéve annak egyenetlenségeit és ily módon nem végeznek hatékony anyagleválasztást a nagy keménységű, és MLG részecskéket nem tartalmazó, azaz a kompozitokhoz képest jóval homogénebb monolitikus SPS mintákon.

A II. típusú, azaz a szabadszemcsés felületelőkészítési technika során (8. táblázat), egy kemény üvegből készült alaplapot használtam, amelyre folyadékot, illetve szabad szemcséket vittem fel, majd rányomtam a munkadarabot és szabálytalan pályán kézzel mozgattam. Ez a kemény alaplappal gyakorlatilag nem képes alakváltozásra, ezért az

anyagleválasztás is hatékonyabb lett. Ez a módszer alkalmasabb az SPS próbatestek előkészítésére, mint a fejezet első részében bemutatott csiszolótárcsás módszer [146].

8. táblázat.

Felületelőkészítési program (szabadszemcsés, II. típus) (Kézi nyomóerő: $F \sim 100-150$ N)

Művelet ssz.	Fázis	A felületelőkészítéshez használt eszközök						Műveleti idő, óra
		Tárcsa/ vászon	Az abrazív adalék típusa	Szemcse- átmérő, µm	A por jelölése*	Az abrazív adalék anyaga	Kenő- anyag	
1.	Csiszolás (kézi)	Üveglap	Szabad szemcse (por)	58,5	P240	SiC	Víz	90
2.				40,5	P400			60
3.				25,8	P600			45
4.				18,3	P1000			15
5.		Struers csiszoló vászon 1200	Kötött- szemcse	15,3	—	—	10	
6.				6,5	—	—	10	
7.	Polírozás (gépi)	Struers Rondo	Viaszba ágyazott por	6	—	Poli- kristályos gyémánt	Zöld hűtő- kenő folya- dék	90
8.				3	—			60
9.				1	—			40
10.				0,25	—			30
Összes idő, óra:								7,5

*Gyártó: Buehler (Németország)

4.2. Kiegészítő vizsgálatok

4.2.1. Keménységmérés

A Vickers keménység értékeit Mitutoyo HVK-berendezéssel határoztam meg 5 N nagyságú terhelőerővel, amelyeket a sűrűséghez hasonló tendenciát mutatnak, vagyis a grafén mennyiségének növelésével csökkennek. A mérési eredményeket részletesen az 1. melléklet tartalmazza, a mintákra jellemző átlagértékeket a 9. táblázat tünteti fel.

A vizsgálatok eredményeit statisztikai módszerekkel elemeztem. Két különböző összetételű minta keménységvizsgálata során kapott eredmények eltérésének szignifikanciáját, ahol a mérések száma ezt lehetővé tette, Wilcoxon-próba segítségével ellenőriztem. A számításokat a 2. melléklet tartalmazza. Amennyiben a vizsgálatok során

az $R_a < R_1 < R_f$ feltétel nem teljesül, az eltérés szignifikáns ($\varepsilon=0,05$) [147]. R_1 jelöli az első minta rangösszegét.

Wilcoxon próba alkalmazásával szignifikáns eltérést kapunk a különböző minták keménységértékei között, kivéve a HIP G1 és az SPS G3 minták esetében, így ez a két mintának a keménysége azonosnak tekinthető.

Az SPS eljárással szinterelt minták általánosságban nagyobb keménységűek, mint a HIP módszerrel előállított társaik (11. táblázat). Ez a különbség valószínűleg annak köszönhető, hogy az SPS-sel előállított próbatestek döntően kemény, α - Si_3N_4 -et tartalmaztak (65–66%).

4.2.2. Vickers lenyomatos törési szívósság meghatározása

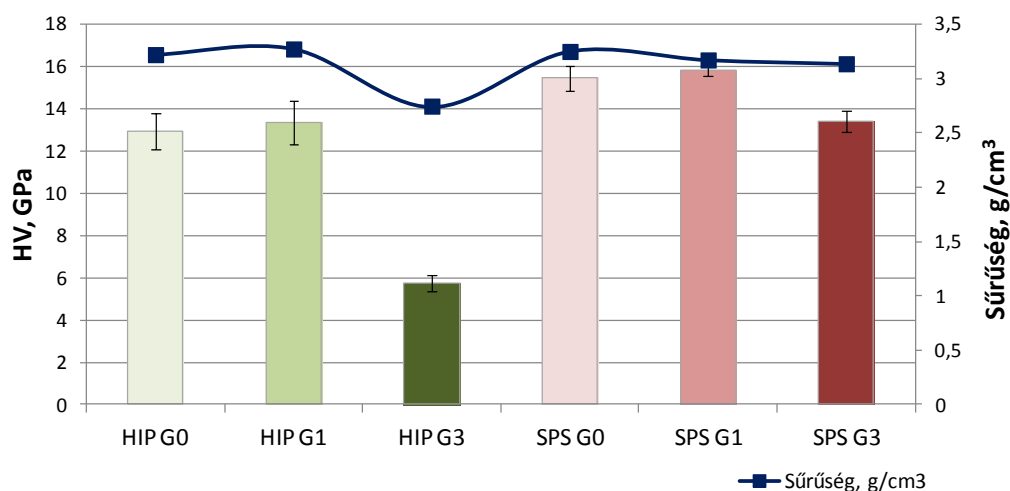
A Vickers lenyomatos törési szívósság (Vickers Indentation Fracture Toughness, VIF) meghatározásához szükséges lenyomatokat és repedéseket a Wolpert Wilson UH250 univerzális keménységmérő berendezéssel 200 N terhelőerővel hoztam létre, illetve mértem meg azok méretét. Ezek ismeretében az (6) egyenlet segítségével kiszámítottam a Vickers lenyomatos törési szívósság értékeit, amelyek szintén a 9. táblázatban láthatók. A mérési eredmények kis száma miatt ebben az esetben nem volt lehetőség Wilcoxon-próba elvégzésére.

9. táblázat. A mechanikai vizsgálatok és a sűrűségmérés eredményei

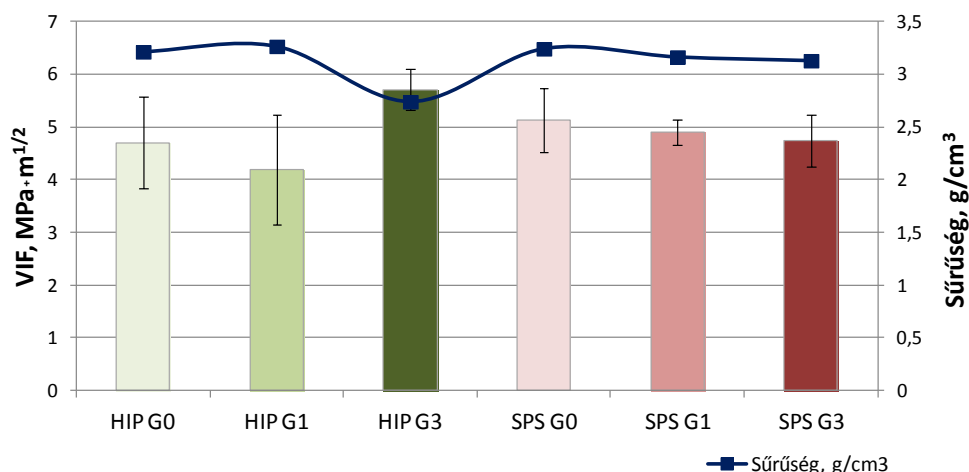
Szint. eljárás	MLG, tömeg%	HV GPa	HV szórás	HV var. eh. %	VIF, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	VIF, szórás	VIF, var. eh. %
HIP	0	12,94	0,87	6,72	4,70	0,38	8,00
	1	13,34	1,05	7,85	4,19	0,14	3,25
	3	5,76	0,39	6,78	5,71	0,28	4,87
SPS	0	15,45	0,61	3,93	5,12	0,47	9,24
	1	15,80	0,23	1,48	4,90	0,72	14,78
	3	13,40	0,49	3,67	4,74	0,37	7,81

A mért VIF szívóssági értékek és azok változásának iránya az MLG tartalom függvényében korlátozottan egyezik meg a szakirodalomban hasonló kerámia nanokompozitokra található ilyen jellegű adatokkal [138, 148, 149, 150, 151]. Ennek értékelésekor fontos tudni, hogy még ha hasonló összetételt és gyártási eljárást választunk is, számos egyéb befolyásoló tényező módosíthatja a szívóssági viselkedést. Ezeknek a tényezőknek az elemzése jelen disszertációnak nem célja, ezért csak néhány idevonatkozó munkát említek meg [152, 153, 154, 155, 156, 157].

A mechanikai vizsgálatok eredményeit szemléletesen a 27. és 28. ábrák mutatják be, feltüntetve az 5. táblázatban közölt sűrűség értékeket is. Ezek alapján megállapítható, hogy az alkalmazott grafén adalék mennyiségének növelésével mindkét gyártási eljárás esetén porózusabb és kisebb keménységű lett a kompozit, HIP gyártás esetén nőtt, SPS esetén csökkent a szívósság.



27. ábra. A keménység- és sűrűségmérés eredményei grafikusán ábrázolva



28. ábra. A törési szívósság- és sűrűségmérés eredményei grafikusán ábrázolva

4.2.3. A polírozott minták érdességi jellemzői és azok információ tartalma

Az érdességi jellemzők meghatározására Altisurf 520 típusú felületgeometriai vizsgálóberendezés szolgált, amely a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetében működő háromdimenziós felülettopográfiai mérőrendszer.

A nagyfelbontású CCD kamerával felszerelt berendezés háromféle módon képes felületgeometriai vizsgálatok elvégzésére: érintkezésmentesen CL2 jelű konfokális optikai fejjel, vagy LK-G32 jelölésű lézeres érzékelővel, valamint érintkezéssel üzemeltetve gyémánt tapintócsúcsos induktív fejjel. Az első esetben a felületre merőleges irányú felbontás max. 0,012 μm , a második üzemeltetési módban 1-3 μm , míg a harmadik esetben 0,2–0,4 μm . Ezek közül én a konfokális mikroszkóppal végzett érdesség mérést alkalmaztam, tehát az elérhető legfinomabb felbontást használtam.

A felületelőkészítést követően meghatároztuk a kopásvizsgálat előtti, eredeti érdességi jellemzőket, amelyek segítségével képet kaphatunk a kiinduló felületminőségről. A

különféle összetételű és szinterelési eljárású próbatesteken a felületelőkészítést követően kapott mikrogeometriai jellemzőket a 10. táblázat tartalmazza.

A nyers mintákat csiszolással, illetve polírozással a kívánt felületminőségűre ($R_a = 0,1 \mu\text{m}$) kellett lemunkálni. A polírozás megkezdése előtt profilométer segítségével meghatároztuk a minták kiinduló felületi érdességét, valamint azok keménységét (10. táblázat). Erre azért volt szükség, mert a polírozási lépések megtervezésekor figyelembe kellett venni ezt a két tényezőt.

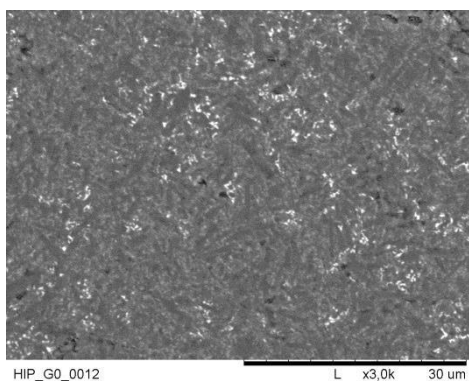
Mint, ahogy a 9. és 10. táblázatokból is látszik, hogy a monolitikus SPS mintáknak nemcsak a felületi érdessége ($R_a = 5,11 \mu\text{m}$), hanem a keménysége ($HV = 15,8 \text{ GPa}$) is kiemelkedően nagy volt, ezért felületelőkészítésük számos problémát okozott (4.1.5. fejezet).

10. táblázat. A vizsgálati minták kiinduló és polírozás utáni felületi érdessége

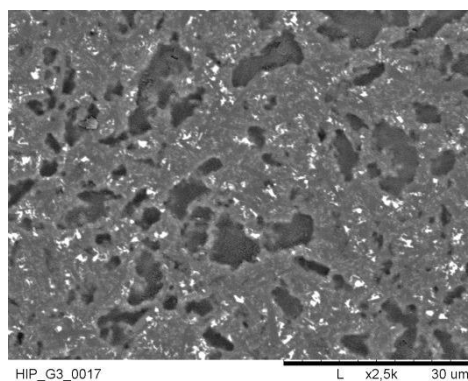
Szint. elj.	MLG, tömeg%	Kiinduló érdesség, R_a , μm	A polírozott felület érdessége, R_a , μm
HIP	0	0,84	0,029
	1	0,97	0,049
	3	0,78	0,203
SPS	0	5,11	0,025
	1	4,47	0,057
	3	3,21	0,172

Összehasonlítva a próbatestek kiinduló és polírozott felületének érdességi adatait megállapítható, hogy a felületelőkészítést követően a legfinomabb felületet mindkét gyártási eljárás esetén az adalékolatlan próbatestek esetén értük el, amikor is a kopásvizsgálatokhoz előírt felületi érdesség egyharmada ($R_a = \sim 0,03 \mu\text{m}$) lett az átlagos érdesség.

A grafén hozzáadásakor és mennyiségének növekedésével a nyers (kiinduló) felületek érdessége jellemzően csökkent, míg a polírozottaké nőtt. A polírozott mintákról készített SEM felvételeket a 29. és 30. ábra szemlélteti. Az 1 tömeg% grafént tartalmazó próbatestek polírozott felületének érdessége az előírt érték alatt maradt – $R_a = 0,049$ és $0,057 \mu\text{m}$ a HIP és SPS mintáknál –, azonban a 3% grafén tartalmú próbatestek esetében nem sikerült az előírt felületi finomságot biztosítani ($R_a = 0,203$ és $0,172 \mu\text{m}$). A grafén adalékolásával tehát növekedett a polírozott minták érdessége, ami vélhetően csökkenti az abrazív kopással szembeni ellenállást.



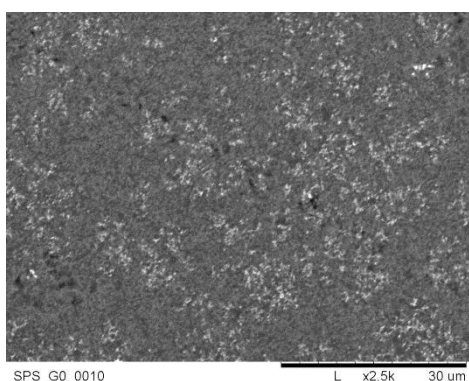
a)



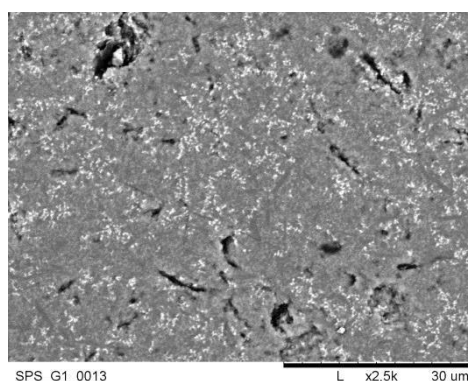
b)

29. ábra. A HIP eljárással előállított próbatestek polírozott felületének SEM felvétele

a) monolitikus Si_3N_4 ; b) Si_3N_4 3 tömeg% MLG



a)



b)

30. ábra. A SPS eljárással előállított próbatestek polírozott felületének SEM felvétele

a) monolitikus Si_3N_4 ; b) Si_3N_4 1 tömeg% MLG

Ezzel kapcsolatosan a következőket érdemes megjegyezni. A minták keménysége a grafén adalékolásával csökkent, ami egyrészt abból következik, hogy a grafén keménysége kisebb, mint a Si_3N_4 -é, másrészt a grafén hozzáadása különösen a hosszú idejű szintereléssel készülő HIP gyártású mintákban porozitást okozhat.

A valódi sűrűség értékei (5. táblázat) a 3% MLG tartalmú HIP minták esetén valóban jelentős csökkenést mutattak, míg az SPS minták sűrűsége a grafén mennyiségének növelésével kevésbé csökkent. Mindezek eredményeképpen az SPS gyártású 3% MLG tartalmú mintáknál a polírozás végén finomabb felület volt elérhető, mint az azonos összetételű HIP gyártású mintáknál.

A mért érdességi értékek egyúttal azt is jellemzik, hogy az abrazív koptatást megtestesítő felületelőkészítés során kitöredező grafén szemcsék jelentős mértékben rontják a monolitikus mintáknál hasonló műveletekkel elérhető kedvezőbb felületi finomságot.

4.2.4. A kísérleti minták maradó feszültsége

A maradó feszültség értékeinek meghatározására a röntgen diffrakciós elven működő Bruker D8 Advance berendezést használtuk (Miskolci Egyetem, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet). A vizsgálatok paraméterei a következők: vizsgálati elv: $\sin^2\psi$; detektor típusa: szcintillátor; $U=40$ kV; $I=40$ mA; $v_{\text{scan}}=20$ s; $0,05^\circ$; Sugárzás típusa: Co K_α ; diffrakciós sík: Si_3N_4 {611}; besugárzási szögek: HIP: $2\Theta = 140,75^\circ$; SPS: $2\Theta = 140,57^\circ$, besugárzott terület: $20 \text{ mm} \times \sim 4 \text{ mm}$.

A mért maradó feszültség értékeket a 11. táblázat tartalmazza. A mérések során többféle felületminőségű mintát vizsgáltunk meg: egy „nyers” felületű (szinterelt) mintát, egy nyers felületen koptatott mintát, vagyis nem történt felületelőkészítés a kopásvizsgálat előtt, valamint mértünk csiszolt, köszörült, polírozott mintán, továbbá egy polírozást követően koptatott próbatesten. Számos felületminőségű mintát sikerült megvizsgálni, azonban a vizsgálat időigényessége miatt nem volt lehetőség mindegyik összetételű és gyártású próbatesten az összes felületminőséget tanulmányozni.

11. táblázat. A vizsgálati minták maradó feszültségének értékei

Szinterelési eljárás	MLG, tömeg%	Szinterelt	Szinterelés után koptatott	Köszörült	Csiszolt	Polírozott	Polírozás után koptatott
HIP	0				15 ± 13	-14 ± 9	-125 ± 13
	1		-68 ± 17			-57 ± 12	
	3	26 ± 11				-34 ± 5	
SPS	0	38 ± 14					
	1			++			4 ± 15 ;
	3	55 ± 30					-368 ± 28

A szinterelt állapotú mintákban jellemzően húzó maradó feszültségeket találtunk, míg a polírozott mintákban nyomó maradó feszültségeket mértünk. A koptatáskor fellépő nagy mechanikai feszültségek jellemzően nagy nyomó feszültségeket hoztak létre. A koptatott SPS 1% MLG-t tartalmazó mintákban mért húzófeszültség létrejöttét, intenzív anyagleválasztással járó köszörülés és feltehetően jelentősen nagyobb húzófeszültség kialakulása előzte meg, amelynek értéke koptatáskor csökkenhetett. A mérési eredmény legfőbb befolyásoló tényezői az E és ν értékek bizonytalansága, valamint a szerkezeti anizotrópia különösen az egyirányú sajtolással készült SPS–grafén kompozitokban.

4.3. Tribológiai vizsgálatok

4.3.1. Ball-on-disc elvű tribológiai vizsgálatok

A vizsgálatokhoz a CETR gyártmányú UNMT-1 típusú kopásvizsgáló berendezést (31. ábra) alkalmaztam.



31. ábra. UNMT-1 komplex felületvizsgáló berendezés (gyártó: CETR)

A berendezés a vizsgálat teljes időtartama alatt online módon rögzíti a normál irányú terhelőerőt, a tangenciális erőt, valamint e két érték alapján számítható súrlódási együttható értékeit a megtett távolság függvényében, alkalmas mind száraz, mind kenőanyaggal történő kopásvizsgálatokra, egyenes vonalú, illetve körpályán elmozduló próbatest egyirányú, ill. váltakozó irányú vizsgálatára. Legfontosabb adatai a következők:

- Terhelőerő tartomány: 10 nN–100 N;
- Fordulatszám tartománya: 0,001–5000 1/min;
- Szabályozható vizsgálati körülmények: hőmérséklet ($T_{\max} = 350\text{ °C}$)
- Mintavételi frekvencia: max. 100 kHz.

A mérésekhez a próbatesteket a vizsgálatokhoz készített speciális befogó készülékben rögzítettem (32. ábra), ügyelve arra, hogy a próbatest vízszintesen helyezkedjen el, illetve, hogy a vizsgálatához használt ellentest, vagyis a golyó ne érjen hozzá a befogóhoz. A ball-on-disc vizsgálat során a szerszám többször halad át ugyanazon a nyomon, tehát az igénybevétel ciklikus jellegű.



a)

b)

32. ábra. Az excentrikus mintabefogó (a) és a benne rögzített minta (b) a vizsgálat előtt

A befogó sajátossága, hogy egyrészt benne a tárcsa alakú próbatestek helyzete excentrikus, ami lehetővé teszi, hogy egy adott próbatesten több kopásnyomot is létre tudjak hozni, vagyis a drága és korlátozott számú próbatestet hatékonyabban tudjam felhasználni. Másrészt anyagtakarékossági okokból ugyanazon befogólap szolgált a nagyobb méretű HIP és a kisebb méretű SPS próbatestek rögzítésére a mérés során.

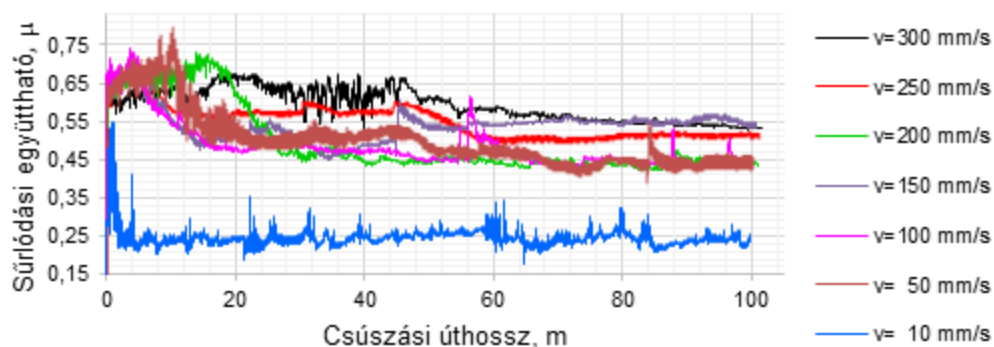
A vizsgálat során az első lépés a próbatest előkészítése/megtisztítása, majd befogása a befogóba. Ezt követi a csúszási sugár beállítása és az ellentest befogása. A csúszási sugár határozza meg a keletkezett kopásnyom átmérőjét. Beállítása a szerszám nullpontból való eltolásával történik. A következő lépés a vizsgálati paraméterek, vagyis a terhelőerő, az idő és a fordulatszám beállítása. Az előkísérleteim során a $v = 10; 50; 100; 150; 200; 250; 300$ mm/s csúszási sebességgel, $F = 40$ N terhelőerővel végeztem vizsgálatokat.

A csúszási úthossz minden esetben 100 m volt 3 mm csúszási sugár mellett. Az ellentest anyaga SiC golyó volt, átmérője 5,953 mm. Az adatrögzítés frekvenciája: 40 Hz. A normál irányú terhelőerő 40 N volt.

A kísérletek megkezdése előtt előkísérletek során egy hagyományos (HIP) gyártású adalékolatlan (0% MLG tartalmú) mintán hét különböző sebességgel kopásnyomokat vettem fel. A választott $F = 40$ N-os terhelőerő mellett profilometriai vizsgálattal kiértékelhető kopásnyomokat kapjunk, valamint a vizsgálatok időszükségelete ne legyen túl nagy. Lehetőség lett volna kisebb terhelőerő mellett a csúszási úthossz növelésére, amely ugyancsak a vizsgálatok időszükségletét növeli, valamint nagy terhelőerejű vizsgálatok esetén fennállt volna sajátfrekvenciájú rezgések keletkezésének lehetősége, amely akár a kopásvizsgáló berendezés és a próbatest tönkremeneteléhez is vezethet.

A kapott regisztrátumokat közös diagramban a 33. ábra mutatja. A különböző sebességgel felvett súrlódási együttható-csúszási úthossz diagramokat a berendezés online módon rögzítette. Ezeket összehasonlítva jól látszik, hogy a legkisebb, azaz a $v = 10$ mm/s sebességgel végzett vizsgálatok esetén jellegzetesen kisebb, kb. 0,25 volt az állandósult súrlódási együttható, mint az ennél nagyobb sebességek alkalmazásakor. Az 50–300 mm/s

sebességtartományban növelve a sebességet az állandósult súrlódási együttható értéke a 0,45–0,55 értéktartományban mozgott.



33. ábra. Az előkísérletek során különböző csúszási sebességek esetén felvett súrlódási együttható csúszási úthossz diagramok, (0% MLG; SiC ellentest)

4.3.2. A kopásvizsgálatok előkészítése

Az előzetes vizsgálatok alapján tekintettel arra, hogy a kopási térképeken a vizsgálati paraméterek minél szélesebb tartománya legyen lefedve, kiválasztottam a következő paramétereket: $F = 10; 40; 80$ N normálirányú terhelőerő és $v = 10; 20; 50; 100; 150$ és 200 mm/s csúszási sebesség. Az esetek többségében próbatest típusonként 3 db kopásvizsgálatot végeztem el egy adott paraméterkombinációval, azonban esetenként előfordulhat, hogy csak 2 vagy 1 darab vizsgálatot tudtam elvégezni a próbatestek korlátozott darabszáma miatt. A [56] PhD értekezés szerint már kettő mérés elvégzése reprezentatív lehet.

A hőmérsékletet és a relatív páratartalmat csak korlátozottan tudtam szabályozni, ezért ellenőrzésükre a vizsgálatok során TESTO 175 H1 típusú hőmérséklet adatgyűjtőt használtam, ami percenként rögzítette a hőmérséklet és a páratartalom értékeit. A mért átlagos hőmérséklet $(27 \pm 3) ^\circ\text{C}$ és a relatív páratartalom $R_h = (45 \pm 6)\%$ volt. A teljes csúszási úthossz 100 m volt, mivel a legkisebb terhelőerő és csúszási úthossz kombináció esetén ekkor már profilométer segítségével mérhető kopásnyomot kaptam, valamint elkerültük a nagy terhelések esetén jelentkező vibrációkat, amelyek hosszabb vizsgálati úthossz esetén a mérőgép öngerjesztését okozták, és a súrlódási együttható értéke is minden esetben állandósult a vizsgálatok végére.

Az SPS próbatestek kopásvizsgálata során felmerült problémák

A kompozit SPS gyártású próbatestekből sajnos csak kevés darab állt a rendelkezésemre, mindösszesen típusonként 3–3 darab, amelyek 2–2 oldalára 4–4 kopásnyomot tudtam elhelyezni. A vizsgálatok gondos előkészítése ellenére, különböző fel nem tárt okok miatt a vizsgálatok során ezeken a próbatesteken számos sikertelen mérés történt. Ennek oka többféle lehet: eredhet a gyártásból, a felületelőkészítés hibáiból, valamint a próbatest vizsgálat előtti helytelen rögzítéséből.

A tapasztalt hibajelenséget és a hiba kiküszöbölésére javasolt módszereket a 12. táblázat összegzi.

12. táblázat. Az SPS próbatestek kopásvizsgálata során felmerült problémák

Lépés	Fellépő hiba	A hiba kiküszöbölése
Gyártás	A kézi tömörítés egyenetlensége	Gépi előtömörítése alkalmazása
Felületelőkészítés	Ferdeség Maradó feszültség bevitele	Kézi felületelőkészítés alkalmazása Maradó feszültségek mérése
Próbatest befogása	A leszorításra használt alkatrész ferdesége A leszorító erő egyenetlensége Excentrikus befogás, kiegyensúlyozatlanság	Más anyag választása, ami kevésbé lágy (például szilárdabb acél) Nyomatékkulcs alkalmazása Nagyobb méretű próbatestek gyártása, más típusú próbatest befogó tervezése
Szerszám rögzítése	Egy csavar rögzíti csak a szerszámot	Több ponton történő rögzítés
Gép konstrukciója	A próbatest befogót szorító csavar kilazulása	Több ponton történő rögzítés

A felsorolt problémák és azok halmozódása miatt számos vizsgálat végződött a kompozit SPS mintákon sikertelenül. Mivel a próbatestek nem voltak reprodukálhatók, dönteni kellett, hogy kevesebb triborendszerben azonos terhelési kombinációval, de adott paraméterek esetében több mérést, vagy szélesebb vizsgálati tartományban vizsgálunk, azonban csak egy-egy mérést végzünk el, vállalva azt, hogy csak tájékoztató jellegű eredményt kapunk. Az utóbbi mellett döntöttem, mivel a kopási térképek felvétele ezt igényelte.

4.3.3. A kopási károsodás kvantitatív jellemzése

A kopási viselkedés számszerű jellemzésére a már korábban is említett (2.9.1 fejezet) három mérőszámot használtam: az állandósult súrlódási együtthatót (μ_{ss}), a fajlagos kopási tényezőt (k) és a dimenzió nélküli kopási tényezőt (K). A kopásvizsgálatok során készített jegyzőkönyvet, amely a vizsgálatok legfontosabb körülményeit rögzíti, a 3. melléklet tartalmazza.

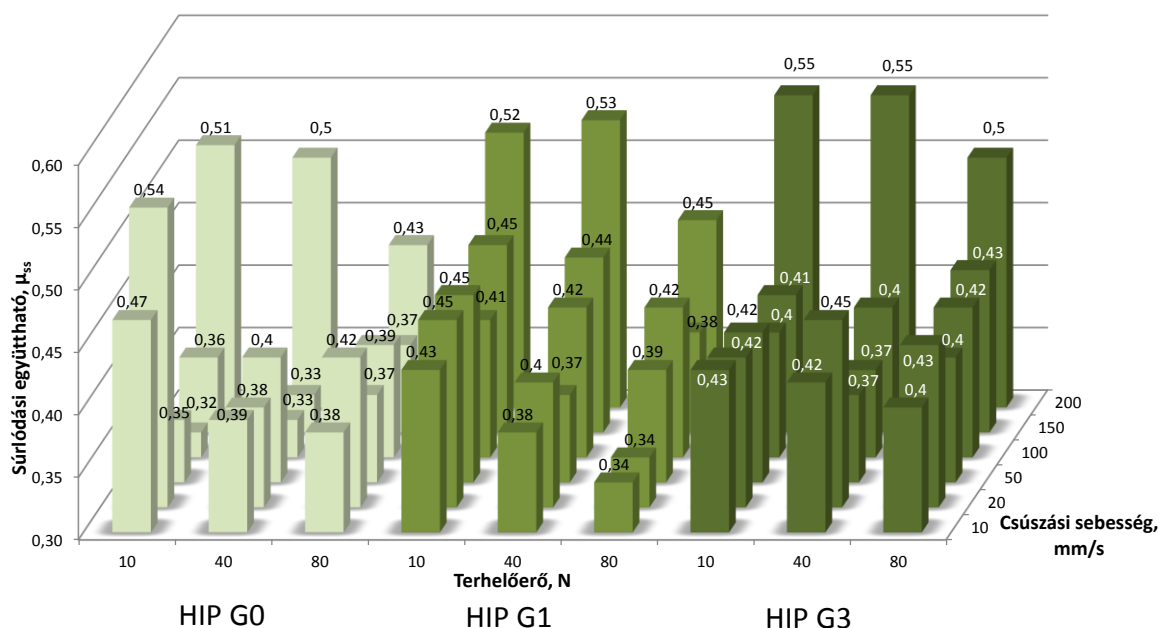
Súrlódási együttható

A súrlódási együttható az egyik legfontosabb jellemző, ami az anyag a kopási viselkedéséről információt ad. Általában nagyobb súrlódási együtthatóhoz nagyobb mértékű kopási anyagvesztés társul. A súrlódási együttható átlagértékei helyett, amelyet a kezdeti bekopási szakasz és a véletlenszerű hatások is befolyásolnak, a kopási viselkedés jellemzésére alkalmasabb a súrlódási együttható állandósult tartománya. Az erre jellemző állandósult súrlódási együttható, μ_{ss} értékét, amelyet a legtöbb esetben már az úthossz 60%-ánál elértünk, egységesen a csúszási úthossz utolsó 20%-án mért értékek számtani közepeként határoztam meg (34. és 35. ábra). A különféle triborendszerekben mért értékek a μ_{ss} 0,32–0,55 tartományba estek.

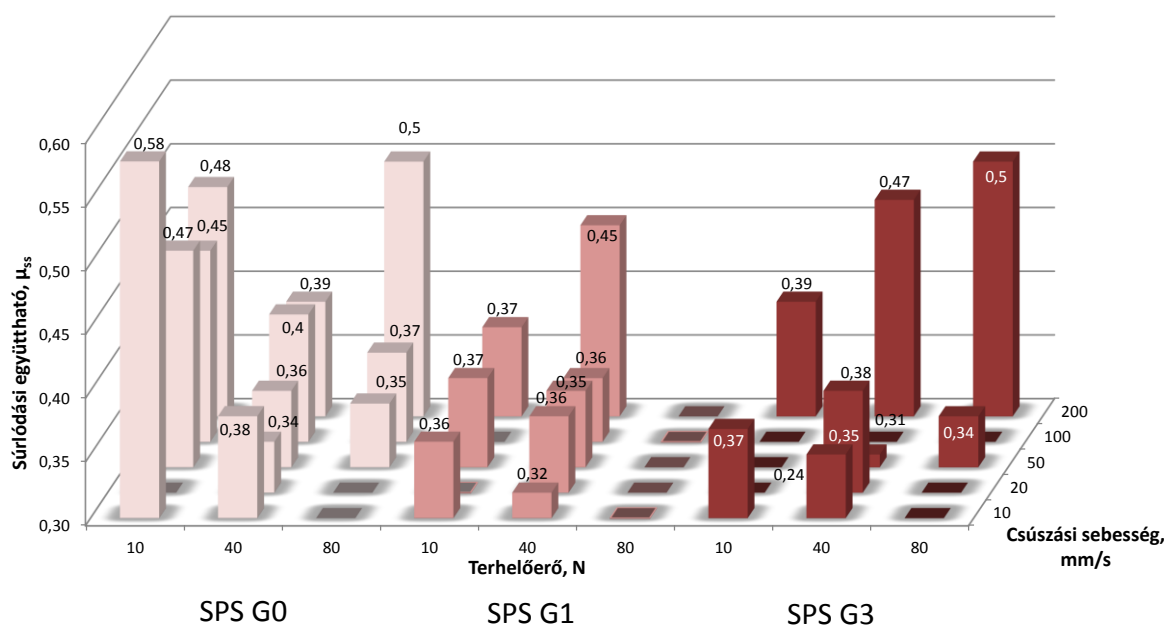
Az összetétel hatását elemezve megállapítható, hogy a HIP mintáknál a grafén adalékolásával jellemzően nőttek a súrlódási együttható értékei, az SPS mintáknál viszont

bizonyos esetben állandósult ez az érték, vagy csökkent. A hőmérséklet és a páratartalom értékeit a csúszási úthossz függvényében a 4. melléklet tartalmazza.

A terhelőerő hatását vizsgálva a HIP próbatestek esetén (36. ábra), elmondható, hogy $v = 10\text{--}50\text{ mm/s}$ csúszási sebességeknél a terhelőerő növelésével csökkent az állandósult súrlódási együttható értéke. Ezt követően a sebesség növelésével $v = 100\text{--}150\text{ mm/s}$ -nál 40 N terhelőerőnél lokális minimum értékeket figyelhettem meg, kivéve a HIP G1-es esetében, ahol ez a minimum érték 80 N -nál jelentkezett. A $v = 200\text{ mm/s}$ -nál viszont már a terhelőerő növelésével csökkent a súrlódási együttható.



34. ábra. Az állandósult súrlódási együttható (μ_{ss}) értékei az HIP gyártású mintákon



35. ábra. Az állandósult súrlódási együttható (μ_{ss}) értékei az SPS gyártású mintákon

Az SPS mintákon (35. ábra) sajnos csak néhány esetben tudtam a terhelőerő hatását vizsgálni a korlátozott számú minták miatt. A referencia anyagon $v = 50\text{--}100\text{ mm/s}$ csúszási sebességgel végzett vizsgálatoknál elmondható, hogy a terhelőerő növelésével csökkent a súrlódási együttható. A sebesség további növelésével ($v = 200\text{ mm/s}$) már növekedés volt megfigyelhető. A 3% grafén tartalmú minták esetén azonban már 50 mm/s -nál elkezdődött a súrlódási együttható növekedése a terhelőerő növekedésével.

A csúszási sebesség növelését vizsgálva elmondható, hogy a sebesség $v = 10$ -ről $v = 100\text{ mm/s}$ -ra való növelése minden esetben a súrlódási együttható csökkenését eredményezte, kivéve a HIP gyártású 1% grafén tartalmú minták 80 N terhelőerejű vizsgálatainál, ahol a súrlódási együttható nőtt. A sebesség további növelésével a súrlódási együttható tovább növekedett minden vizsgált minta és terhelőerő érték esetén (36. ábra).

Az SPS minták esetében a monolitikus mintákon a $F = 10\text{ N}$ terhelőerőnél mért kezdeti kiugró értéket követően közel azonos súrlódási együttható értékeket határoztam meg, akárcsak 40 N esetében. $F = 80\text{ N}$ -nál a sebesség növelése növelte a súrlódási együtthatót is. Az 1 % grafén tartalmú mintáknál kis terhelőerőnél ($F = 10\text{ N}$) nem figyelhettem meg sebességfüggést, a terhelőerő növelésével ($F = 40\text{ N}$), viszont kismértékű sebességfüggés látható. A 3 % grafén tartalmú minták esetén jellemzően minden terhelőerőnél nőtt a súrlódási együttható értéke a sebesség növelésével (37. ábra).

Összegezve a súrlódási együttható értékek elemzésekor leírtakat, elmondható, hogy a HIP gyártású próbatestek esetén számos esetben figyelhettem meg lokális minimum értékeket a terhelő erő és a csúszási sebesség függvényében, míg az SPS mintákon a rendkívül korlátozott számú mérést figyelembe véve az anyag kopási viselkedéséről a bemutatott adatok nem nyújtanak teljeskörű képet.

A változások mögött rejlő anyagszerkezeti sajátosságok és a kopási folyamatot irányító károsodási mechanizmusok a továbbiakban kerülnek elemzésre.

A kikopott térfogat, V

Az ISO 20808 szabványban leírt módon (2.9.1. fejezet) profilometriai vizsgálatok segítségével, a kopásnyom mentén 4 egymásra merőleges síkban meghatároztam a kikopott keresztmetszet értékeit, amelyekből az (2) egyenlet alapján kiszámítottam a kikopott térfogat értékeit (13. és 14. táblázat). Ezt követően a (4) és (5) egyenletek alkalmazásával kiszámítottam a fajlagos kopási sebesség (k) és a dimenzió nélküli kopási tényező (K) értékeit is. A számításokhoz felhasznált profilometriai adatokat és részszámításokat az 5. melléklet tartalmazza.

13. táblázat. A kikopott térfogat (V , mm^3) értékei a HIP gyártású mintákon

v, mm/s	Vizsgált anyagok								
	Si ₃ N ₄ + 0 % MLG			Si ₃ N ₄ + 1 % MLG			Si ₃ N ₄ + 3 % MLG		
	Terhelőerő, N								
	10	40	80	10	40	80	10	40	80
10	0,0046	0,0726	0,2730	0,0059	0,0776	0,0776	0,0119	0,1736	0,6000
20	0,0104	0,1041	0,3554	0,0107	0,1045	0,2924	0,0124	0,1911	0,6813
50	0,0116	0,1243	0,5368	0,0127	0,0933	0,3172	0,0212	0,2057	0,9511
100	0,0029	0,1235	0,5871	0,0096	0,3569	0,7731	0,0323	0,1707	1,9588
150	0,0078	0,1038	0,7288	0,0141	0,3192	0,8961	0,0342	0,2280	3,1130
200	0,0099	0,4347	1,2942	0,0189	0,2865	7,8776	0,0382	0,5066	5,2796

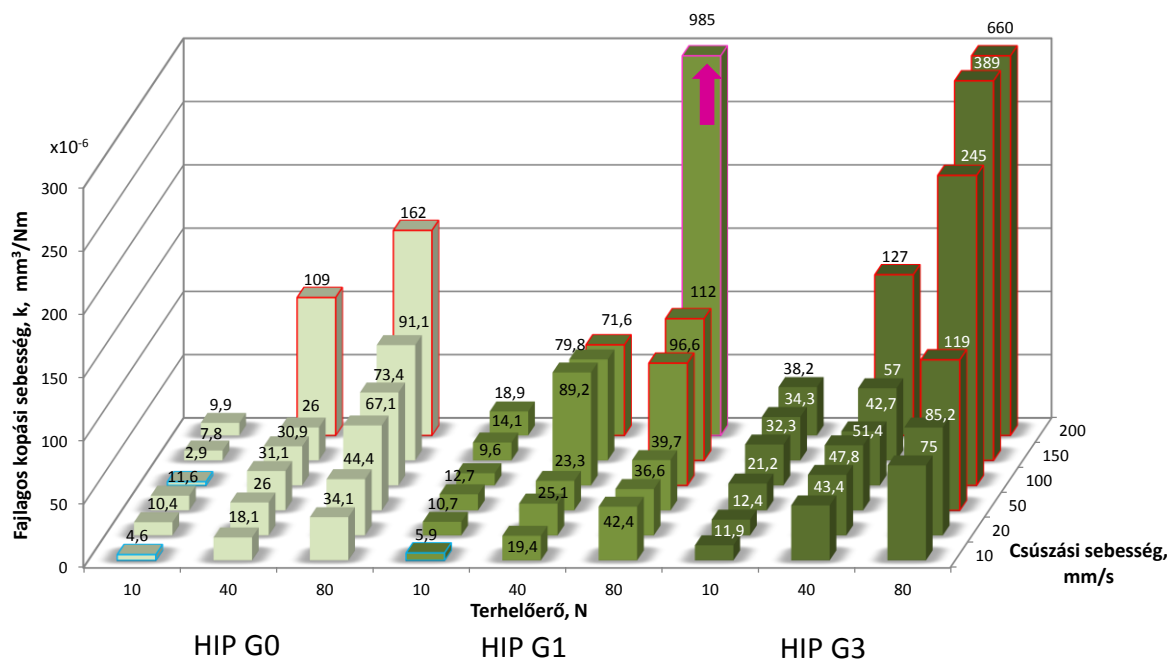
14. táblázat. A kikopott térfogat (V , mm^3) értékei az SPS gyártású mintákon

v, mm/s	Vizsgált anyagok								
	Si ₃ N ₄ + 0 % MLG			Si ₃ N ₄ + 1 % MLG			Si ₃ N ₄ + 3 % MLG		
	Terhelőerő, N								
	10	40	80	10	40	80	10	40	80
10	0,0132	0,0630	—	0,0017	0,0776	—	0,0008	0,0334	—
20	—	0,0638	—	—	0,0627	—	—	1,7453	—
50	0,0146	0,2085	0,7301	0,0016	0,1611	—	0,0008	0,0740	0,3107
100	0,0152	0,4483	1,4431	—	0,5709	—	—	—	—
200	0,0455	0,2446	0,5596	0,354	0,2135	—	0,0379	0,2323	0,5331

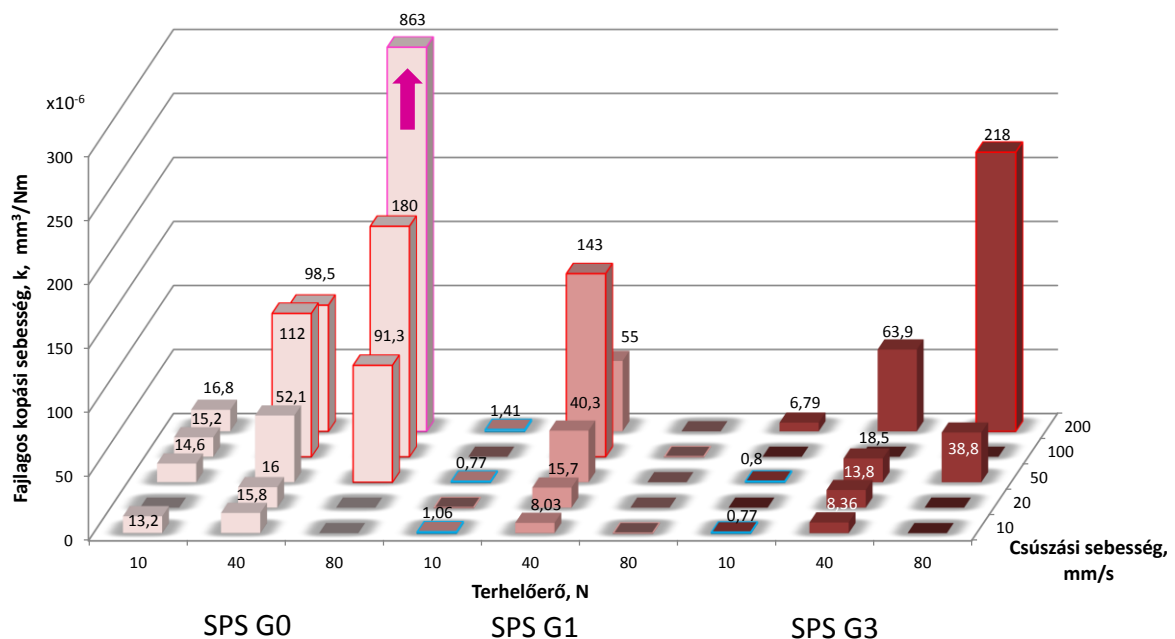
A kikopott térfogat értékek felhasználásával meghatározhatók a különféle kopási tényezők.

Fajlagos kopási sebesség, k

A fajlagos kopási tényező értékeit a 38. és 39. ábra szemlélteti a vizsgált triborendszerek esetén. Kato és Adachi meghatározta az erős és gyenge kopás tartományait: gyenge kopásról beszélhetünk, ha a k értéke 10^{-9} – 10^{-6} mm^3/Nm közötti, erős kopásról, pedig ha 10^{-6} – 10^{-2} mm^3/Nm közötti értéket vesz fel. Az ábrákon a különböző vonalak színei az ultra erős (lila), erős (piros), gyenge (kék) és átmeneti kopás (nincs vonal) tartományait jelölik. A kisebb kopási tényező értékek ($k = 2,9$ – $5,9 \times 10^{-6}$ mm^3/Nm) enyhe kopásnak tekinthetők és csak a HIP G0 (F10/v10; 100), HIP G1 (F10/v10) és az SPS G1 (F10/v10; 100; 200) minták esetében figyelhetők meg. A legtöbb esetben a kopás jellemzően az átmeneti kopás tartományában található ($7,8$ – $91,1 \times 10^{-6}$ mm^3/Nm). Az erős kopás fellépését a $96,6$ – 985×10^{-6} mm^3/Nm tartományba eső értékek jellemzik.



36. ábra. A fajlagos kopási sebesség (mm^3/Nm) értékei HIP gyártású monolitikus, illetve 1 és 3 tömeg% grafénnal adalékolt szilícium-nitrid kerámiáknál



37. ábra. Fajlagos kopási sebesség (mm^3/Nm) értékei SPS gyártású monolitikus és 1 és 3 tömeg% grafénnal adalékolt szilícium-nitrid kerámiáknál

Az összetétel hatását elemezve a HIP minták esetén elmondható, hogy a monolitikus minták esetén fordultak elő átlagosan a legkisebb kopási sebesség értékek, amelyek a grafén adalékolásával nőttek. Az SPS gyártású minták esetén fordított tendencia figyelhető meg, ugyanis ezeknél a mintáknál a monolitikus próbatesteken számos esetben nagyobb k értéket mértem, mint a kompozit mintákon (például F40/v50; F10/v10). A monolitikus

meleg izosztatikusan sajtolt próbatestekenél kis terhelőerő ($F = 10\text{N}$) esetén enyhe kopás volt megfigyelhető, ami a grafén mennyiségének növelésével átmeneti tartományba vált át, továbbá az erős kopás tartománya a grafén mennyiségének növelésével egyre kiterjedtebbé válik. Az SPS a monolitikus mintáknál a k értékek átmeneti és erős kopásra utalnak, viszont a kompozit SPS mintáknál az erős kopás tartománya a grafén mennyiségének növelésével csökken, kevésbé lesz kiterjedt a HIP gyártású mintákhoz képest.

A terhelőerő növelése minden minta esetében egyértelműen növelte a kopási sebesség értékét. Mindkét gyártási eljárás és minden összetétel esetén megfigyelhető volt, hogy a kopási sebesség növekedésének mértéke a nagyobb sebességeknél általában erőteljesebb volt, míg kis terhelések mellett kevésbé nőtt.

A csúszási sebesség növelésével a kopás mértéke nem egyformán változott a különböző terhelési szinteken. Az $F = 10\text{ N}$ terhelés esetén a sebességnövelés alig növelte a kopási sebesség értékét. $F = 40\text{--}80\text{ N}$ terhelések esetén az összes összetétel és gyártási eljárás esetén megállapítható, hogy a sebességnövelés az esetek többségében növelte a kopási károsodást mértékét, kivéve az SPS G0 F40/v200 és az SPS G1 F40/v200 esetekben. Nagyon fontos kérdés lehet annak a tisztázása, hogy mi okozta a kedvezőbb kopási sebesség értéket ezen két esetben. A vizsgált esetekben jellemzően a terhelés növelésével a kopási sebesség növekedése erőteljesebb volt.

A fajlagos kopási sebesség megváltozását a grafén adalékolás hatására egy Δk értékkel jellemeztem:

$$\Delta k_{0 \rightarrow 1} = \frac{k_{0\%MLG} - k_{1\%MLG}}{k_{0\%MLG}} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$\Delta k_{0 \rightarrow 3} = \frac{k_{0\%MLG} - k_{3\%MLG}}{k_{0\%MLG}} \cdot 100\% \quad (11)$$

A HIP gyártású Si_3N_4 minták mátrix anyagához adott 1% MLG fázis hatására a fajlagos kopási sebesség a vizsgált 18 triborendszerben (15. táblázat) 5 esetben ugyan csökkent (átlagosan 24%-kal), 13 esetben viszont nőtt (átlagosan 83%-kal), szélső esetben elérte az 508%-ot, míg 3% MLG hozzáadásakor mind a 18 vizsgált triborendszerben jelentősen nőtt a kopási sebesség az adalékolatlan HIP mintákon mért értékekhez képest. A kopásállóság romlásának (k növekedésének) mértéke széles, 17–1014 % tartományban változott, az összes vizsgált esetre vetítve átlagosan 207% volt.

SPS gyártású mintáknál 1% MLG fázis jelenlétében a vizsgált 8 triborendszerben (16. táblázat) 6 esetben csökkent a fajlagos kopási sebesség a referencia anyaghoz képest, a csökkenés mértéke 23–94% között változott, átlagosan 43% volt, míg 3% MLG hozzáadásakor mind a 9 vizsgált triborendszer esetén kisebb volt a fajlagos kopás sebesség az adalékolatlan mintákhoz viszonyítva. A csökkenés mértéke az 50–96% tartományba esett, és átlagosan 75% volt. A javulás hátterében az MLG adalék anyagszerkezetre és a

kopást befolyásoló tulajdonságokra (keménység, szívósság, sűrűség, porozitás, hővezetési tényező stb.) gyakorolt komplex hatása áll.

15. táblázat. A grafén adalékolásának hatása a k értékének %-os csökkenésére (HIP)

v , mm/s	$\Delta k_{0 \rightarrow 1}$			$\Delta k_{0 \rightarrow 3}$		
	0 % MLG vs. 1 % MLG			0 % MLG vs. 3 % MLG		
	10	40	80	10	40	80
10	-28,3	-7,2	-24,3	-158,7	-139,8	-119,9
20	-2,9	3,5	17,6	-19,2	-83,8	-91,9
50	-9,5	25,1	40,8	-82,8	-65,3	-77,3
100	-231,0	-188,7	-31,6	1013,8	-38,2	-233,8
150	-80,8	-206,9	-22,9	-339,7	-119,2	-327,0
200	-90,9	34,3	-508,0	-285,9	-16,5	-307,4

16. táblázat. A grafén adalékolásának hatása a k értékének %-os csökkenésére (SPS)

v , mm/s	$\Delta k_{0 \rightarrow 1}$			$\Delta k_{0 \rightarrow 3}$		
	0 % MLG vs. 1 % MLG			0 % MLG vs. 3 % MLG		
	10	40	80	10	40	80
10	92,0	49,2	n.a.	94,2	47,1	n.a.
20	n.a.	1,9	n.a.	n.a.	13,8	n.a.
50	94,7	22,6	n.a.	94,5	64,5	57,5
100	n.a.	-27,7	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
200	91,6	44,2	n.a.	59,6	35,1	74,7

A szinterelési eljárás megváltozásának a fajlagos kopási sebességre gyakorolt hatását a (12-14) összefüggésekkel számítható Δk eltérésekkel értékeltem:

$$\Delta k_{0,HIP \rightarrow SPS} = \frac{k_{0\%MLG,HIP} - k_{0\%MLG,SPS}}{k_{0\%MLG,HIP}} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$\Delta k_{1,HIP \rightarrow SPS} = \frac{k_{1\%MLG,HIP} - k_{1\%MLG,SPS}}{k_{1\%MLG,HIP}} \cdot 100\% \quad (13)$$

$$\Delta k_{3,HIP \rightarrow SPS} = \frac{k_{3\%MLG,HIP} - k_{3\%MLG,SPS}}{k_{3\%MLG,HIP}} \cdot 100\% \quad (14)$$

Összehasonlítva a két különböző gyártástechnológiát (17. táblázat), elmondható, hogy a 12 vizsgált monolitikus triborendszerből 9 esetben nagyobb kopási sebességet kaptam az SPS mintákon, mint a HIP gyártásúakon. Az SPS technológia alkalmazása azonban 1% grafén jelenlétében egyértelműen kedvezőbb kopást eredményezett (8 esetből 6 triborendszerben volt előnyösebb), valamint 3% MLG tartalmú mintáknál minden esetben kedvezőbb volt, azaz kisebb kopási sebességet eredményezett, mint a HIP szinterelés.

17. táblázat. A gyártástechnológia hatása a k értékének %-os csökkenésére

v, mm/s	$\Delta k_{0,HIP \rightarrow SPS}$			$\Delta k_{1,HIP \rightarrow SPS}$			$\Delta k_{3,HIP \rightarrow SPS}$		
	Terhelőerő, N								
	10	40	80	10	40	80	10	40	80
10	-187,0	12,7		82,0	58,6		93,5	80,7	
20		38,5			37,5			71,1	
50	-25,9	-67,5	-36,1	93,9	-73,0		96,2	64,0	67,4
100	-424,1	-262,5	-145,2		-60,3				
150									
200	-69,7	9,6	-432,7	92,5	23,2		82,2	49,7	67,0

Összefoglalóan elmondható, hogy a grafén mennyiségének növelése a HIP minták esetén rontotta a kopással szembeni ellenállást, növelte a kopási sebesség értékét, míg az SPS minták esetén javította. Vélhetően ez utóbbi esetekben sem funkcionál a grafén szilárdfázisú kenőanyagként, de a grafén és a technológia együttes hatása olyan kedvező anyagtulajdonságokat eredményezett, amelyek összhatása csökkentette a kopás mértékét.

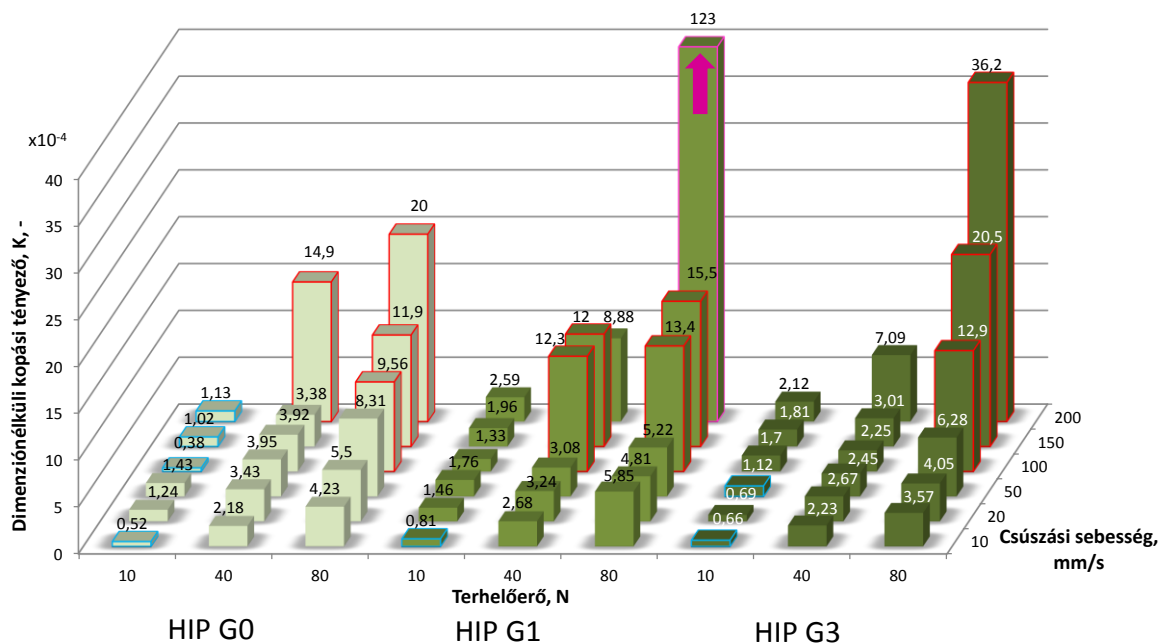
Dimenzió nélküli kopási tényező, K

A dimenzió nélküli kopási tényező értékeit a 38. és a 39. ábrák foglalják össze. Ebben az esetben az erős és a gyenge kopás közötti átmenet határát a $K = 10^{-4}$ érték képviseli.

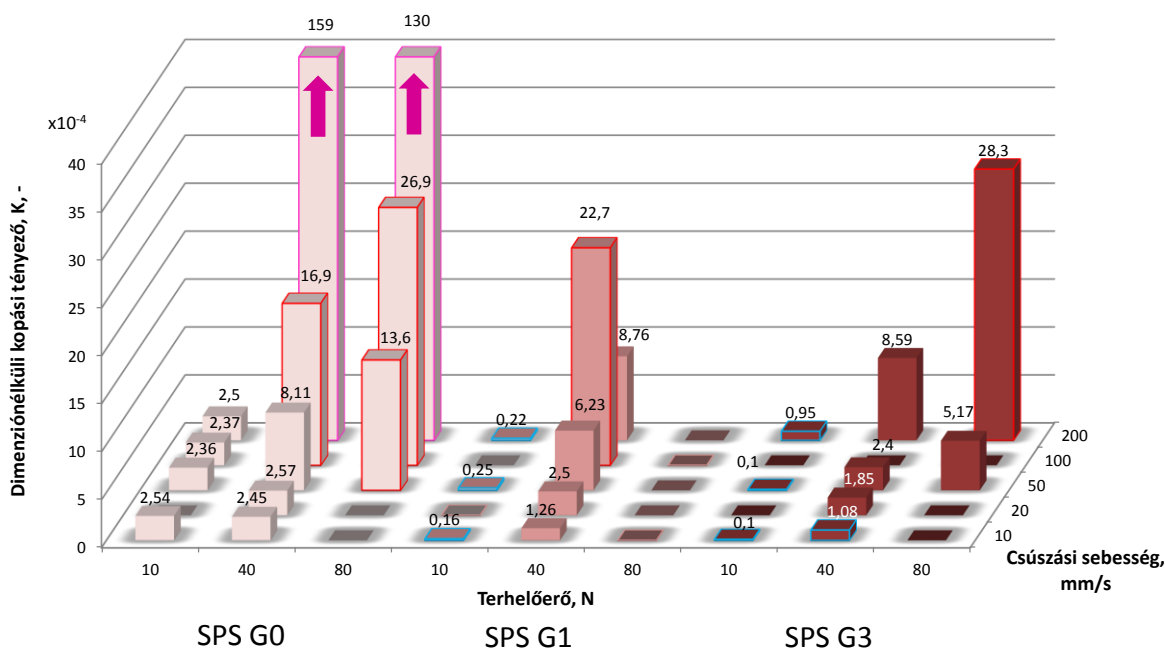
A táblázatokban a különböző vonalszínek itt is a különböző kopáserősségű tartományokat jelölik: ultraerős kopás: lila; erős kopás: piros; gyenge kopás: kék; átmeneti kopás: nincs jelölő vonal.

Összehasonlítva a különböző gyártású mintákat látható, hogy míg a monolitikus HIP minták (38. ábra) esetén $F = 10 \text{ N}$ terhelőerőnél enyhe kopást figyelhetünk meg, az SPS monolitikus mintáknál (39. ábra) ugyanezen terhelőerő esetén az átmeneti tartományba sorolható értékeket mértem. Az erős kopásra jellemző értékek a monolitikus mintáknál mindkét gyártástechnológia esetén közel azonos sebesség és terhelőerő kombinációknál jelentkeztek ($F40/v100$; $v200$).

Az 1% grafénnal adalékolt minták esetén viszont a monolitikus mintáknál említett jelenség fordítottját figyelhetjük meg: az SPS gyártású mintákon $F = 10 \text{ N}$ terhelőerő esetén mért K értékek az enyhe kopás tartományába sorolhatók, míg HIP eljárás esetén a nagyobb kopást képviselő átmeneti tartományba. A HIP G1 mintákon $F = 80 \text{ N}$ és $v = 200 \text{ mm/s}$ terhelésnél ultra-erős kopásra utaló értéket határoztam meg, amely a HIP mintákon vizsgált összes triborendszer esetén mért legnagyobb érték volt. Az SPS minták esetén $F = 80 \text{ N}$ -nal nem volt lehetőségem vizsgálatot végezni, de vélhetően a nagy terhelőerő és nagy sebesség kombinációknál itt is, akárcsak a HIP mintáknál, jellemzően erős kopásra jellemző értékeket mértem volna.



38. ábra. A dimenzió nélküli kopási tényező értékei HIP gyártású monolitikus és 1 és 3 % grafénnal adalékolt szilícium-nitrid kerámiáknál



39. ábra. A dimenzió nélküli kopási tényező értékei SPS gyártású monolitikus és 1 és 3 % grafénnal adalékolt szilícium-nitrid kerámiáknál

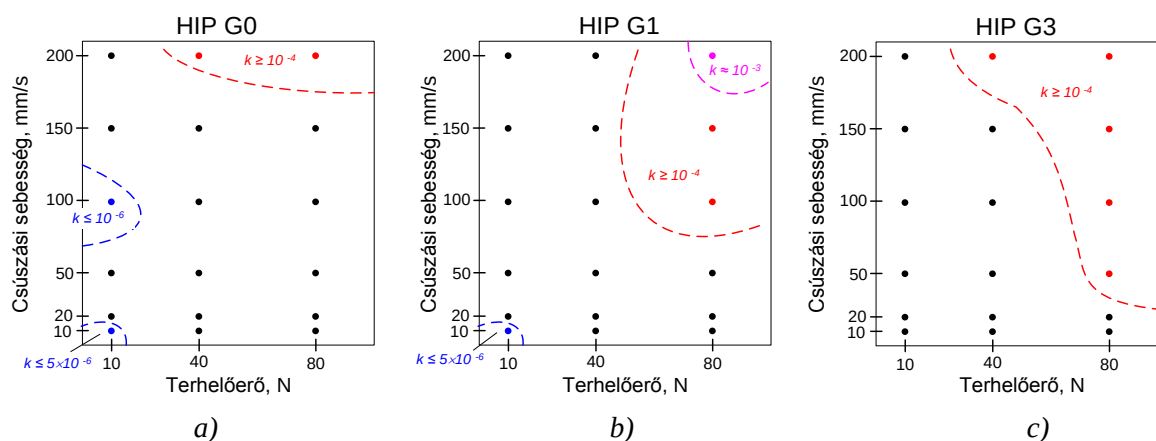
A 3% grafénnal adalékolt SPS gyártású minták esetén megfigyelhettem, hogy bizonyos F - v paraméterkombinációk esetén jellemzően kis terhelőerőnél ($F = 10$ N) még a legnagyobb csúszási sebességek mellett is enyhe volt a kopás, míg a HIP mintáknál ennél a terhelésnél már az átmeneti tartományba esett a K értéke.

Az eredményeket összegezve elmondható, hogy Si_3N_4 kerámiák esetén az SPS technológia alkalmazása, a grafén adalékolásával együttesen kedvezően módosítja az anyag kopási viselkedését kis terhelőerők esetén. Az erős kopás tartománya az SPS gyártású kompozitoknál a vizsgált terhelőerő és sebesség tartományban nem jellemző (csak az $F = 80 \text{ N}$, $v = 200 \text{ mm/s}$ esetben fordult elő).

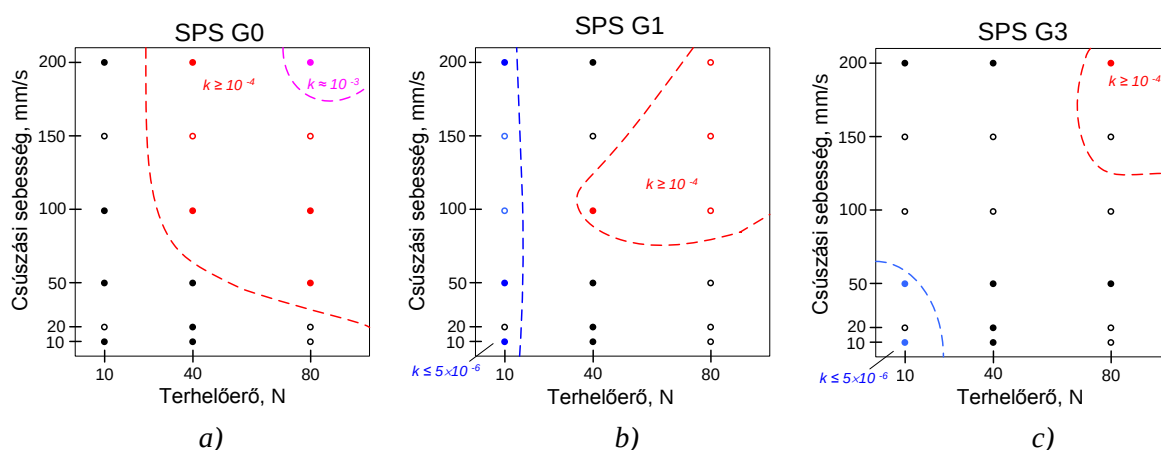
4.3.4. A kopási károsodás kvalitatív jellemzése: kopási térképek

2 dimenziós kopás térképek

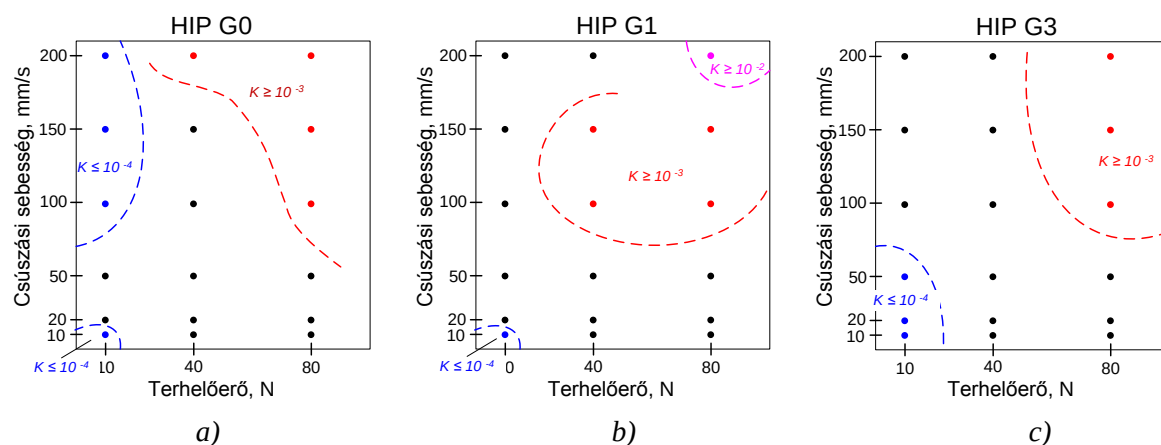
A fajlagos kopási sebesség és a dimenzió nélküli kopási tényező nagyon jól alkalmazható a kopás jellemzésére és a kopási viselkedés becslésére, különösen akkor, ha szemléletes kopásátmenet térképek formájában jelenítjük meg ezeket a kopási jellemzőket (40-43. ábrák). A K mérőszám használatát az indokolja, hogy olyan anyagok viselkedése is összehasonlítható, amelyek jelentősen eltérő keménységűek.



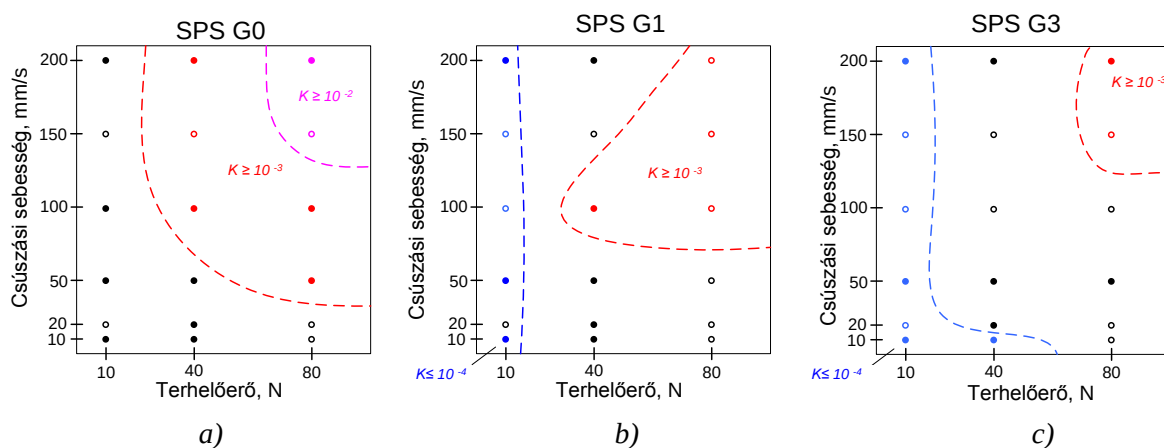
40. ábra. Kopásátmenet térképek a fajlagos kopási sebesség alapján HIP gyártású monolitikus (a) 1% (b) és 3 % (c) töbrétegű grafénnal adalékolt Si_3N_4 minták esetén



41. ábra. Kopásátmenet térképek a fajlagos kopási sebesség alapján SPS gyártású monolitikus (a) 1% (b) és 3 % (c) töbrétegű grafénnal adalékolt Si_3N_4 minták esetén



42. ábra. Kopásátmenet térképek a dimenzió nélküli kopási tényező alapján HIP gyártású monolitikus (a) 1% (b) és 3% (c) többretegű grafénnal adalékolt Si_3N_4 minták esetén



43. ábra. Kopásátmenet térképek a dimenzió nélküli kopási tényező alapján SPS gyártású monolitikus (a) 1% (b) és 3% (c) többretegű grafénnal adalékolt Si_3N_4 minták esetén

A 2 dimenziós térképek elemzésével – mind a k , mind a K esetében – egyszerűbben megállapítható, hogy az enyhe kopás tartománya HIP gyártású minták esetén csak a monolitikus, míg SPS gyártású minták esetén pedig a grafénnal adalékolt kompozitoknál jelenik meg. A jelenség okának keresésekor áttekintettem a minták különböző anyagjellemzőit és megállapítottam, hogy e különbség kialakulásában szerepet játszhat a monolitikus HIP minták nagyobb törési szívóssága, valamint a kopási mechanizmusok megváltozása, amelyet egy későbbi fejezetben fogok elemezni.

Ugyancsak szembevetendő a kopásátmenet térképek alapján az SPS gyártású monolitikus minták kedvezőtlen kopási viselkedése a HIP mintákhoz képest, például az erős kopás jóval kiterjedtebb tartománya, vagy az ultra-erős kopás tartományának megjelenése (43. a) ábra). A HIP és SPS kompozitokra vonatkozó kopásátmenet térképek alapján pedig egyértelmű az SPS gyártású kompozitok jobb kopásállósága, az enyhe kopás a HIP mintákhoz képest jóval kiterjedtebb tartomány alapján, vagy annak tükrében, hogy az erős kopásra utaló tartományok a nagyobb F és v értékek felé tolódnak el, azaz nagyobb teherbírásra utalnak a kopási igénybevételek tekintetében.

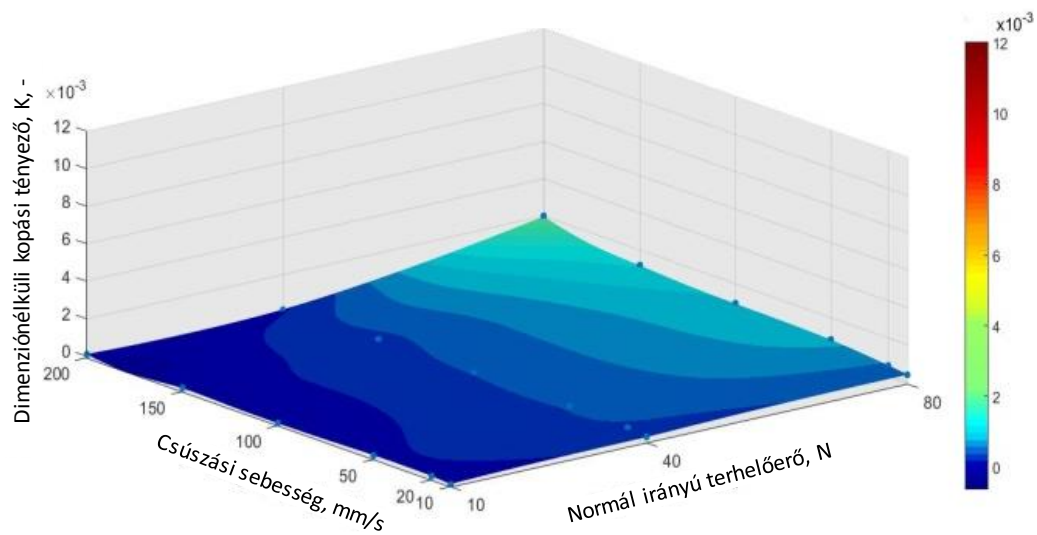
3 dimenziós kopási térképek

A 3 dimenziós kopási sebesség térképek előnye a 2D kopásátmenet térképekkel szemben, hogy a kopást befolyásoló tényezők és a kopási viselkedés jellemzői közötti kapcsolatok bemutatásakor nemcsak az egyes különböző erősségű kopási károsodást képviselő terhelési tartományokat jelölik ki szemléletesen, hanem adott nagyságú károsodást reprezentáló szintek (adott színű zónák) megjelenítésével arról is tájékoztatnak, hogy a vizsgált anyag mennyire érzékeny az ábrázolt terhelési jellemzők (F , v) változására.

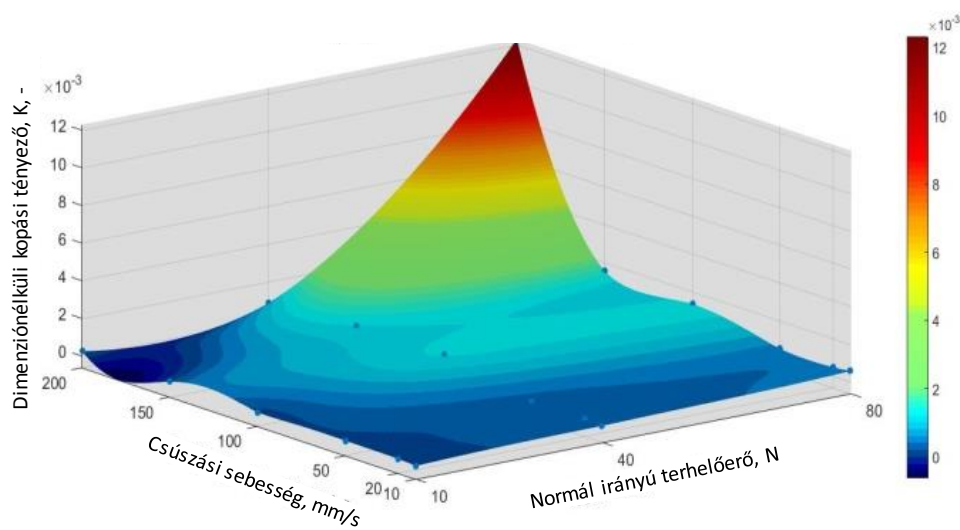
Számos, a kopási károsodással összefüggő számszerű adatot ábrázolhatunk ilyen térkép formájában, példaként a 45. ábra a dimenzió nélküli kopási tényező értékeit szemlélteti az erő és a csúszási sebesség függvényében a vizsgált kerámia mintákon. A térképeket MATLAB program segítségével készítettem. A program közelítésének sajátossága, hogy a mérési pontokra illesztett felületet reprezentáló közelítő függvény meghatározásakor azt feltételezi, hogy két mért érték között nincsenek kiugró értékek. A különböző színek a térképeken a különböző erősségű kopási régiókat jelölik, akárcsak a 2D térképeken.

A 44. és 45. ábrákon bemutatott 3D kopási térképek az eddigiekhez képest további új információt szolgáltatnak, például a HIP gyártású minták K kopási tényezője a grafén nélküli mintákon alig mutat változást a terhelőerő és a csúszási sebesség változtatásakor, 1% grafén jelenlétében viszont a HIP gyártású minták érzékenyen reagálnak a terhelőerő és a csúszási sebesség növelésére, de csak $F > 40$ N és $v > 150$ mm/s terhelési tartományban (44. b) ábra). A 3% graféntartalom esetén pedig ismét csökken a dimenziótlán kopási tényező érzékenysége a F és a v növelésére, de az érzékenység nagyobb, mint a monolitikus minták esetén (44. c. ábra)

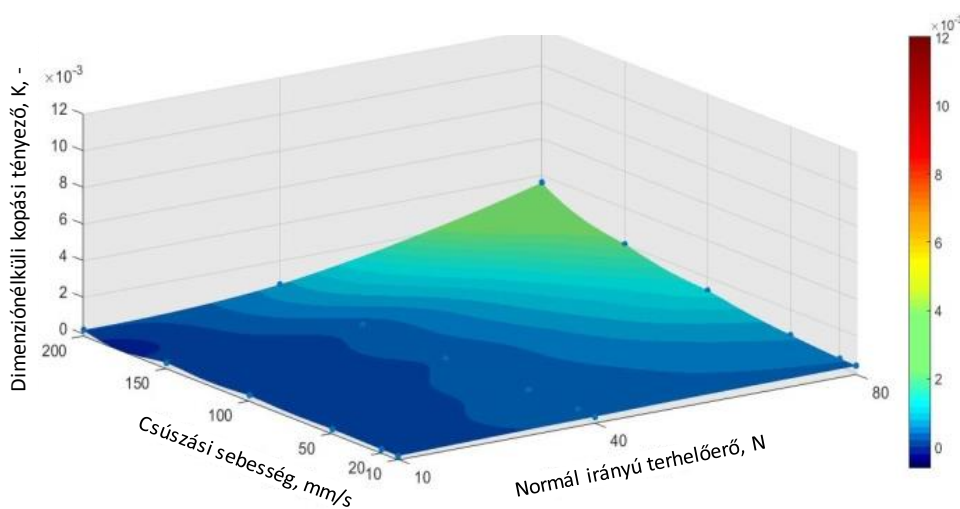
Az SPS gyártású monolitikus próbatesteknél jellemzően jóval nagyobbak a K értékek, mint a HIP gyártású referencia mintáknál és a terhelési paraméterekre sokkal érzékenyebb ez az anyag, $F \geq 40$ N és $v \geq 100$ m/s terheléseknél a kopás károsodás intenzíven megnő (45. a. ábra). Ezzel szemben az 1% grafén tartalmú mintáknál – a vizsgált feleakkora terhelési tartományban – ez egyáltalán nem jelentkezik, 3% MLG tartalmú mintáknál pedig némileg kisebb az F és a v iránti érzékenység, mint a HIP gyártású 3% MLG tartalmú kompozitokban.



a) Monolitikus Si_3N_4 , HIP G0

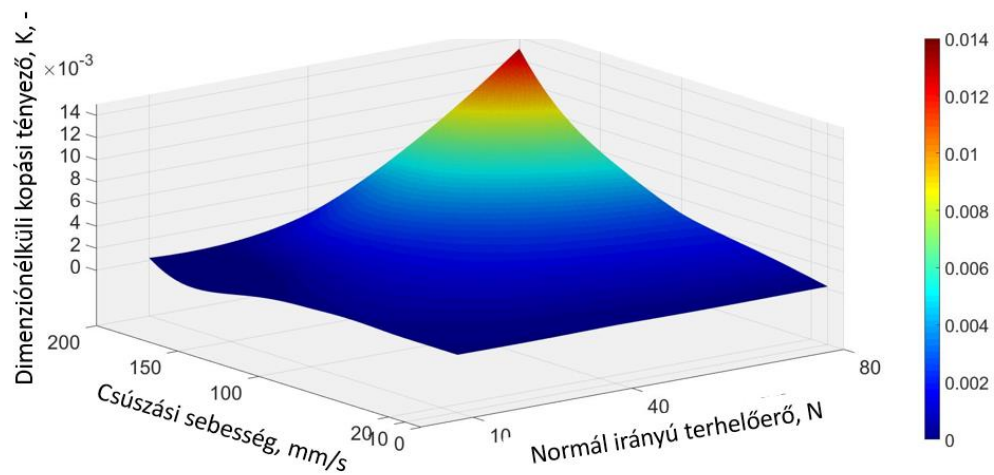


b) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 1\% \text{ MLG}$, HIP G1

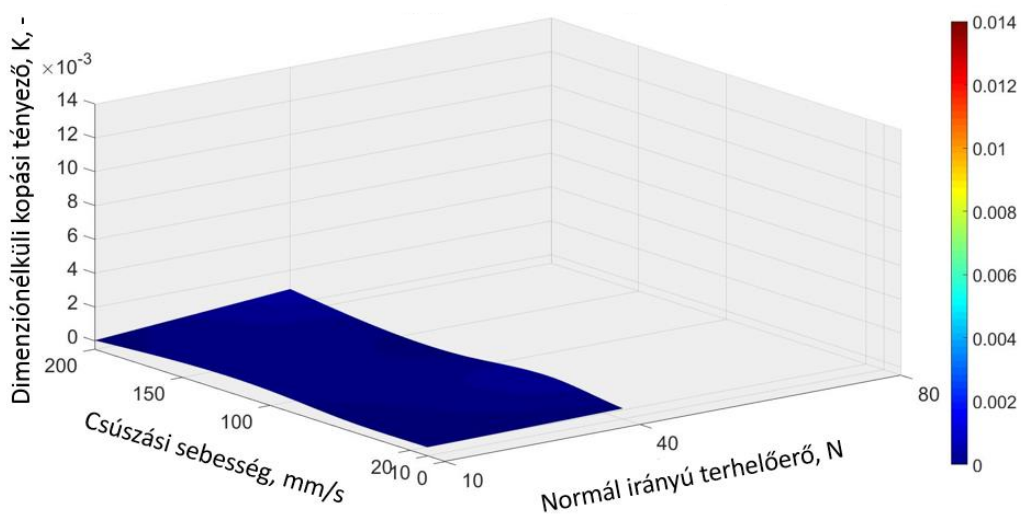


c) $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3\% \text{ MLG}$, HIP G3

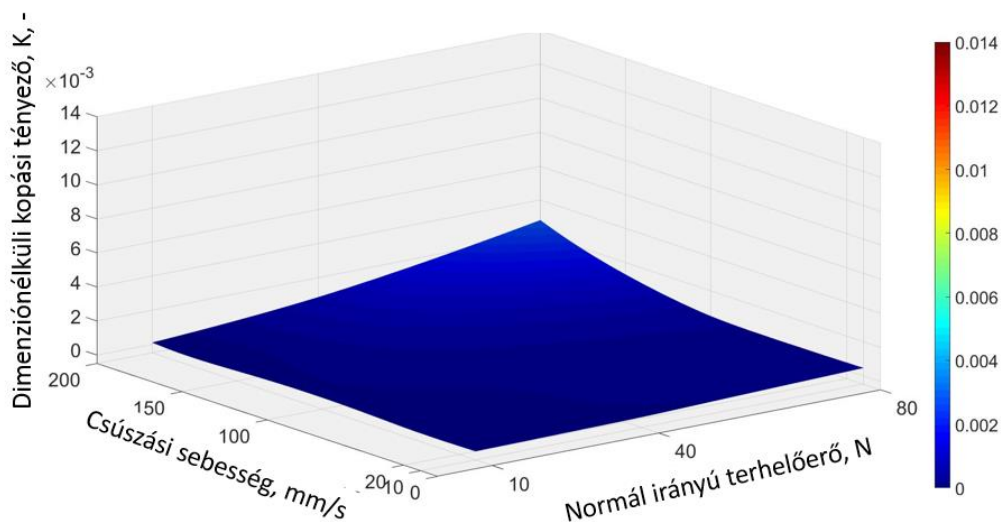
44. ábra. 3D kopási sebesség térképek a HIP gyártású minták dimenzió nélküli kopási tényezői alapján



a) Monolitikus Si_3N_4 , SPS G0



b) Si_3N_4 + 1% MLG, SPS G1



a) Si_3N_4 + 3% MLG, SPS G3

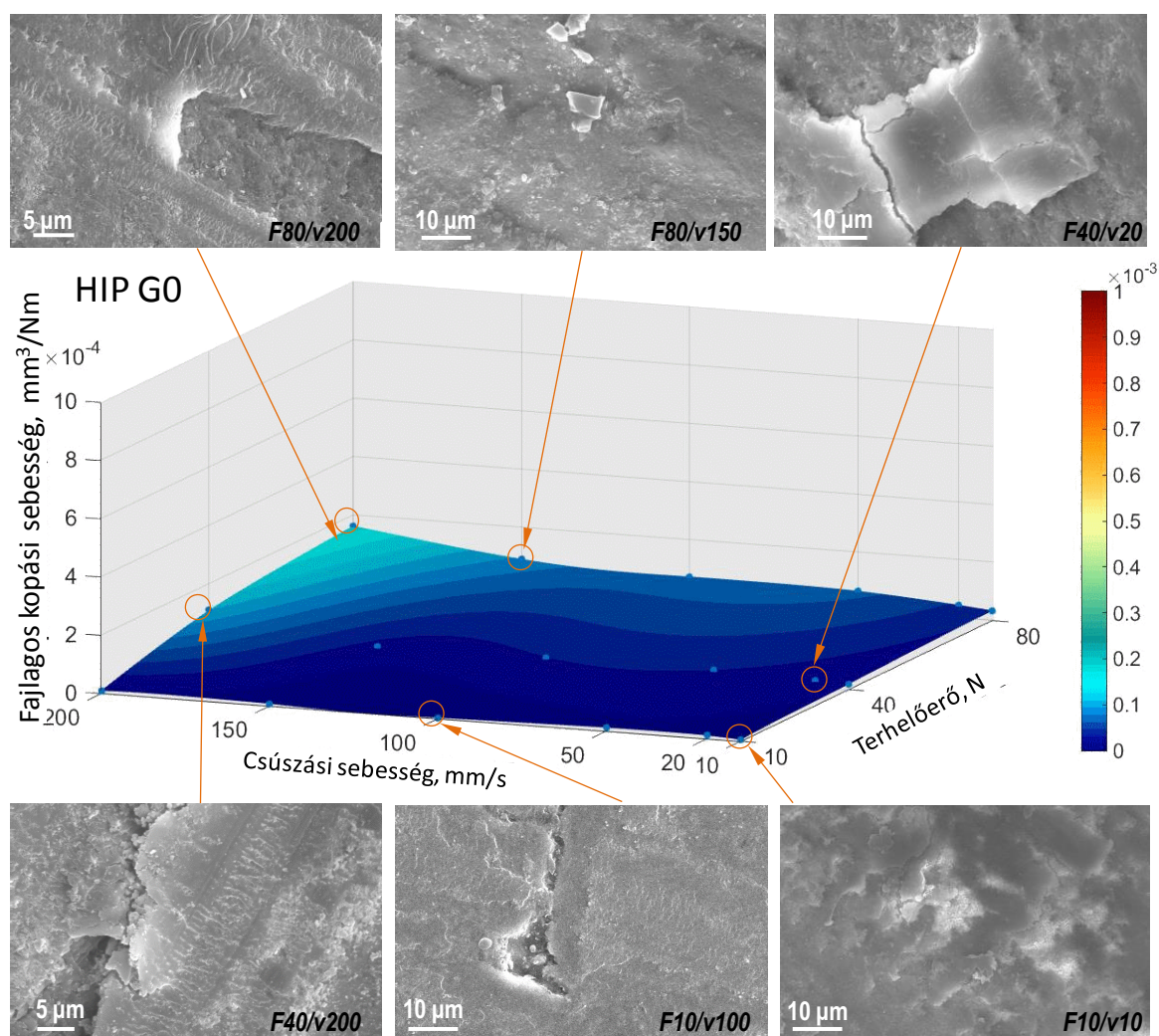
45. ábra. 3D kopási sebesség térképek az SPS gyártású minták dimenzió nélküli kopási tényezői alapján

4.3.5. *A kopási viselkedés minőségi és morfológiai elemzése SEM felvételekkel kombinált 3D kopástérképek segítségével*

A kopástérképek segítségével széles terhelési spektrumban is egyszerűen elemezhetők és összevethetők a különböző kerámiák kopási tulajdonságai.

A legkomplexebb információt az anyagok kopási viselkedéséről a kopásnyomok nagy felbontású SEM képeivel kombinált 3D kopási térképek adják. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek az uralkodó kopási mechanizmusok azonosítására adnak lehetőséget. Az 46-51. ábrákon a HIP és az SPS gyártású minták fajlagos kopási sebességére vonatkozó 3D kopási térképei és egy-egy jellemző terhelési esetben fellépő tipikus kopási mechanizmusokat bemutató SEM felvételek komplex diagramjai láthatók. A 46. ábra a HIP gyártású monolitikus minták kopási viselkedéséről ad átfogó képet. A legkisebb terhelőerőnél és csúszási sebességnél ($F = 10\text{ N}$ és $v = 10\text{ mm/s}$) a kopási károsodás mikroabrázió, amit annak a tribofilmnek a károsodása okozott, ami az előkészítési műveletek során (csiszolás, polírozás) keletkezett a minta felületén. A próbatest előtörténete, vagyis az, hogy milyen előkészítési lépéseken ment keresztül – volt-e köszörülve, hogyan és mennyi ideig tartott a felületelőkészítés – kiemelt jelentőségű a kis sebességű és terhelésű vizsgálatok esetén. A referencia anyag polírozott felületét egyenletes tribofilm borította. Ebben ZrO_2 szemcsék voltak, amelyek egyrészt az alappor őrlésekor kerülhettek az anyagba, mivel ZrO_2 őrlőgolyókat alkalmaztak, másrészt származhattak a felületelőkészítés során alkalmazott polírozó szuszpenzióból is. Az előzetes csiszolás-polírozás során kialakult tribofilm réteg mikrotöréses mechanizmussal feltört a SiC golyó alatt a kopásvizsgálat során, ami finom törmeléket eredményezett.

Az előbb bemutatottaktól eltérő morfológiát megfigyelhettem meg a SEM felvételeken az $F = 10\text{ N}$ és a $v = 100\text{ mm/s}$ vizsgálati paraméterekkel koptatott felületen. Ennek a csúszási sebességnek az elérésekor masszív tribofilm képződés indult el, ami döntően szilícium-hidroxidból áll. Ez a mechanizmus kombinálódott a tribofilm képlékeny deformációjával, aminek következtében felszakadt és levált a tribofilm azokon a helyeken, ahol az adhézió a tribofilm és az alapanyag között gyengébb volt. Az anyagvesztéség ebben az esetben kismértékű volt.



46. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (HIP gyártású, monolitikus minták)

A normálirányú terhelőerő növelésével ($F = 40 \text{ N}$) kis ($v = 20 \text{ mm/s}$) csúszási sebességnél a képlékeny deformációt delamináció követi, amikor is a tribofilm ridegen leválk a felületről a ciklikus terhelés hatására.

$F = 80 \text{ N}$ és $v = 150 \text{ mm/s}$ terhelési paraméterek mellett – vagyis nagy csúszási sebességnél és terhelőerőnél – elérjük azt a kritikus terhelési értékeket, amikor a tribokémiai reakciók és a képlékeny deformáció egyidejűleg lép fel.

A vizsgálat során a nagy terhelőerő és nagy csúszási sebesség kombinációja ($F80/v200$) nagy lokális hőmérsékletet eredményez az érintkezési zónában. A kopásnyomot olvadt, gélszerű, összefüggő tribofilm borítja, amibe a tribofilmből és a próbatest felületi rétegeiből keletkezett törmelék beágyazódott. Az uralkodó kopási mechanizmus ebben az esetben tribofilm képződés és olvadás. Nagy érintkezési feszültségek és sebesség esetén ($F = 40\text{--}80 \text{ N}$, $v = 200 \text{ mm/s}$) együttesen lép fel mechanikai és tribokémiai kopás.

$F = 40 \text{ N}$ és $v = 200 \text{ mm/s}$ paraméterek esetén a tribofilmképződés és a képlékeny alakváltozás kombinációja a jellemző. A nagy érintkezési feszültségek hatására nagy

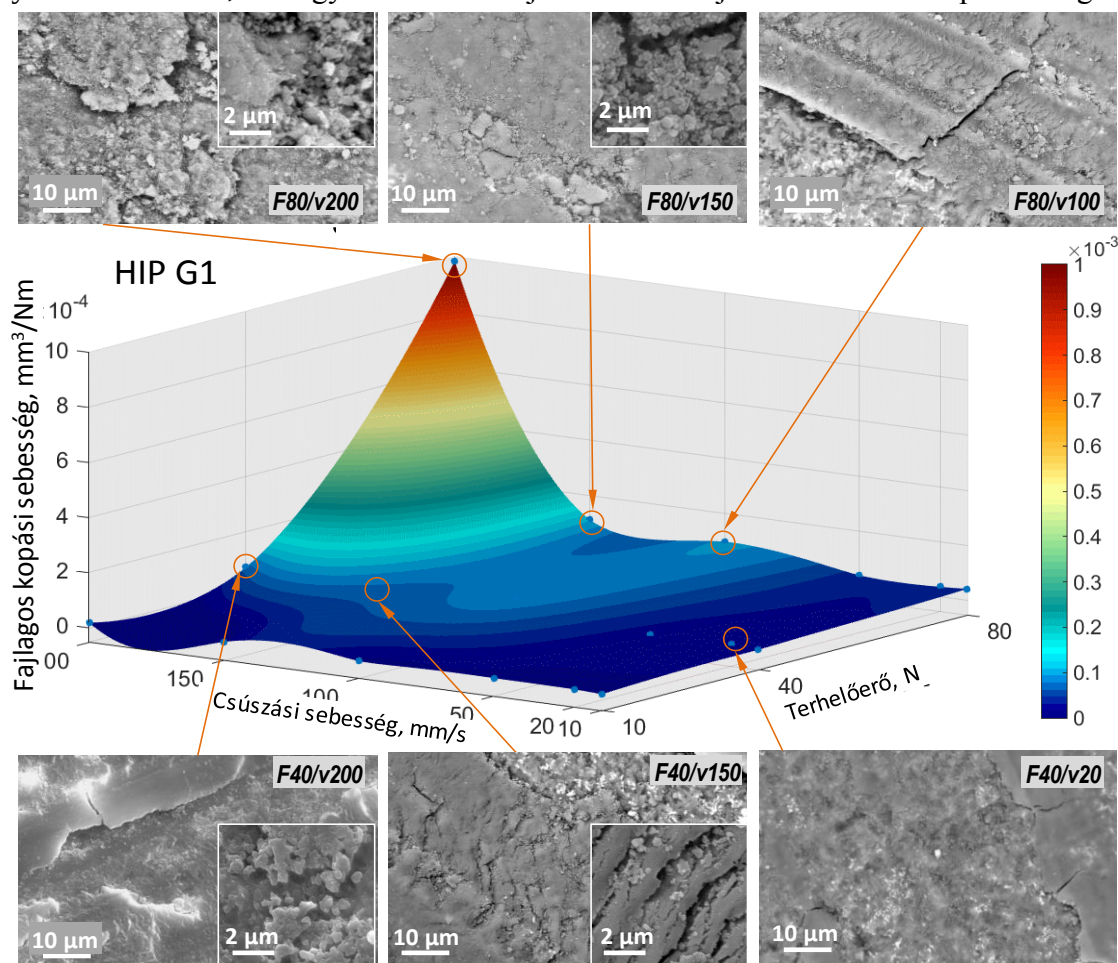
menyiségű repedés keletkezik a felületen. Az $F = 80 \text{ N}$ és $v = 200 \text{ mm/s}$ terhelésnél az anyagba bevott nagy súrlódási energia hatására lokális olvadás lép fel. A referenciaanyag kopási viselkedésére ennél a terhelésnél kevert mechanikai és tribokémiai kopás jellemző, valamint ezek olvadással való kombinációja. Mindkét esetben a nagy terhelőerő hatására a felületi oxidréteg feltöredezik és a keletkező szemcsék beborítják az érintkező felületeket. A törmelék az ismétlődő terhelés hatására tovább aprózódik és ez a finom törmelék belenyomódik a kopásnyomba, valamint ezzel egyidejűleg részt vesz a tribokémiai reakciókban is.

Az 1 % és 3% MLG-vel adalékolt minták fajlagos kopási sebesség térképei és a károsodott felületekről készült felvételek a 47. és 48. ábrán láthatók. Az 1% grafén tartalmú kompozitok nagyobb érzékenységet mutatnak a terhelési paraméterek változására és a k értékének lokális minimuma is van $F = 40 \text{ N}$ és $v = 150 \text{ mm/s}$ terhelésnél. A grafén mennyiségének növelésével nagyobb a kopási tényező értéke az $F = 80 \text{ N}$, és $v = 200 \text{ mm/s}$ triborendszerben.

A fajlagos kopási tényező elemzésekor megállapítottam, hogy a HIP gyártású kompozit anyagok viselkedése kis terhelőerőnél ($F = 10 \text{ N}$) nagyon hasonló volt a monolitikus minta viselkedéséhez, valamint $v = 150 \text{ mm/s}$ és $v = 200 \text{ mm/s}$ csúszási sebességnél is alig voltak nagyobbak a k értékek, az 1 % MLG-vel adalékolt kompozit minták esetében a monolitikus mintákhoz képest. Nagyon hasonló volt az eset $F = 40 \text{ N}$ terhelésnél és $v = 20 \text{ mm/s}$ sebességnél. A SEM felvételeken (47. ábra, F40/v20 részlet) is látható a vékony, képlékenyen alakváltozott tribofilm a felületen, ami delamináció következtében levált. Ugyanennél a terhelőerőnél $v = 100 \text{ mm/s}$ csúszási sebesség felett megváltozik az anyag viselkedése. A visszaszórt elektronokkal készült SEM felvétel (47. ábra F40/v150 részlete) az előbbiektől eltérő összetételű, de homogén oxidréteget mutat (a kép bal oldalán), továbbá a jobb oldali nagyított részleten jól látható a ZrO_2 szemcséket is tartalmazó szubsztrát anyaga. A kopási törmelék jellemzően összetömörödött tribofilmet tartalmaz, amely a nagy sebességű ciklikus terhelés következtében képlékeny alakváltozással levált a felületről. A 47. ábra F80/v150 és F80/v200 részleteinek jobb felső sarkában látható nagy nagyítású részleten tisztán látható, hogy a triboréteg feldarabolódott szemcseszerű elemekből áll. A kopási károsodást a tribokémiai kopás kontrollálja mechanikai kopással együttesen.

A sebesség és ezáltal a hőmérséklet további növelésével (F40/200) növekszik az összekompaktálódott törmelékből álló tribofilm képlékenysége. A legnagyobb alkalmazott terhelőerő esetén ($F = 80 \text{ N}$) a mechanikai kopás válik dominánssá. Az F80/v100 mm/s terheléskor is láthatjuk, hogy a képlékenyen deformált tribofilmen hosszú, radiális repedések figyelhetők meg. A sebesség növelésekor ($v = 150\text{--}200 \text{ mm/s}$ -ra) erős repedésképződés, a tribofilm feltöredezése figyelhető meg, valamint interkrisztallin törés. Ez utóbbi finom porképződéshez vezet a kopásnyomban. A nagy nagyítású képek (47. ábra, F80/150; F80/200) részletein is látható az interkrisztallin kitöredezés. Ezt a

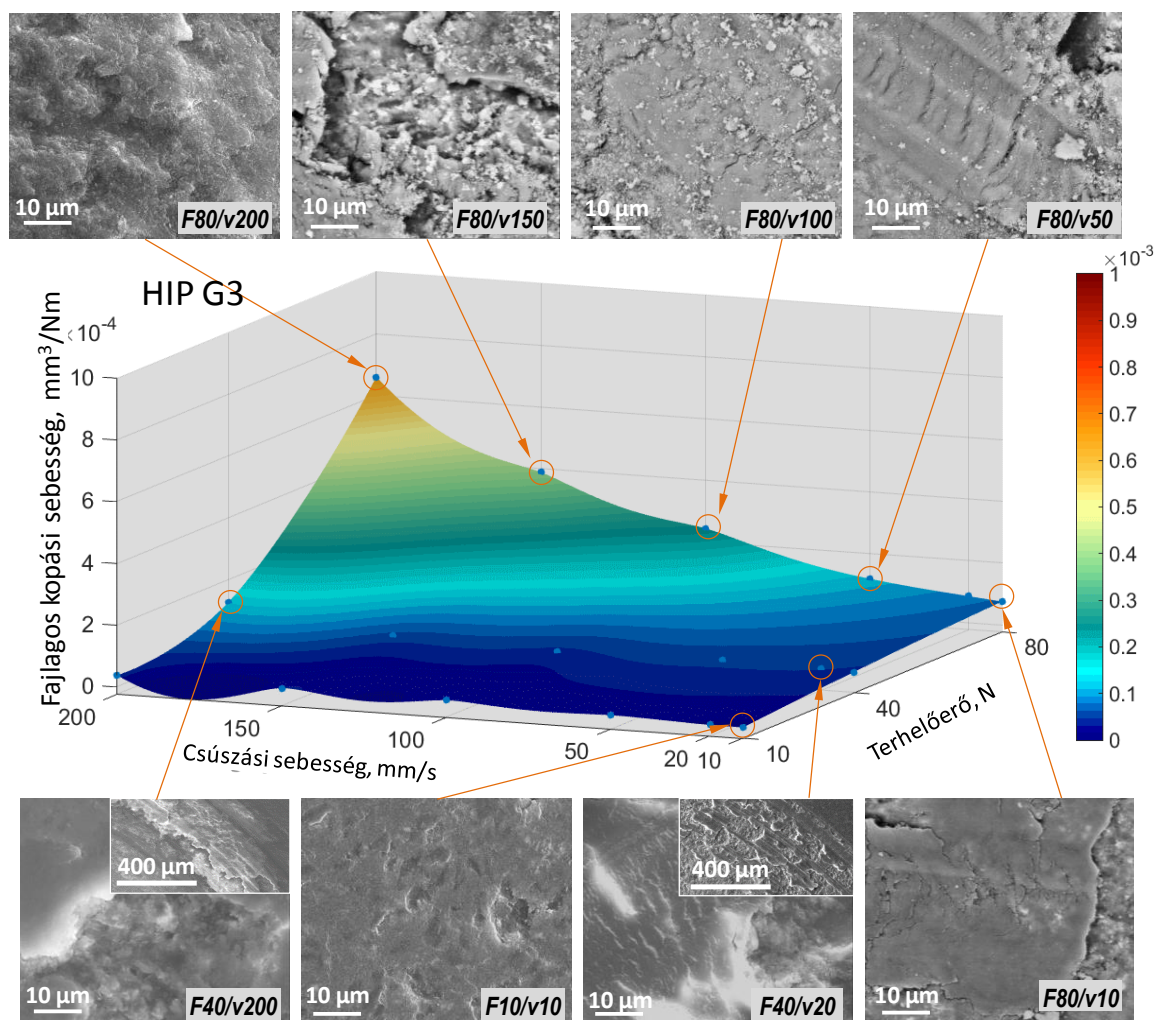
viselkedést nagyban befolyásolják a felületi kitöredezések és pórusok, amelyek kialakulásához hozzájárul az MLG jelenléte. A grafén adalékolása növeli a kompaktálódott porból és hidroxid filmből felépülő tribokémiai réteg repedésre való hajlamát. Ha megvizsgáljuk az MLG-nek a kopási viselkedésre gyakorolt hatását, elmondhatjuk, hogy 1% grafén adagolás kis sebességeknél és kis terhelés mellett nem változtatja meg a kopási viselkedést, nagyon hasonló a viselkedés a referenciaanyagéhoz. Továbbá a karbon nem vesz részt ilyen terhelési feltételek mellett kenőfilm kialakulásában és kenési folyamatokban sem, de nagy terheléseknél jelentősen rontja a HIP minták kopásállóságát.



47. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (HIP gyártású, 1% MLG tartalmú minták)

A 48. ábrán látható, hogy a 3% MLG tartalmú kompozit esetén kiterjed a sebességérzékenység a kisebb $F = 40\text{ N}$ terhelőerő irányába. A fajlagos kopási sebesség értékek sebességfüggése az $F = 10\text{ N}$ normál erőnél minimális. A polírozott felület számos lyukat és gödröt tartalmaz (29. ábra), ami a polírozásnál kitört vagy kiesett grafén részecskének tudható be és kis terhelés után is látható a kopásnyomban (48. ábra F10/v10 részlete). Kis normál irányú terhelőerőnél és csúszási sebességnél az uralkodó károsodási mechanizmus a mikrotöredezés és a tribofilm rideg, hasadásos törése a „lyukak” feszültséggyűjtő hatásának következtében. A terhelés kismértékű növelését

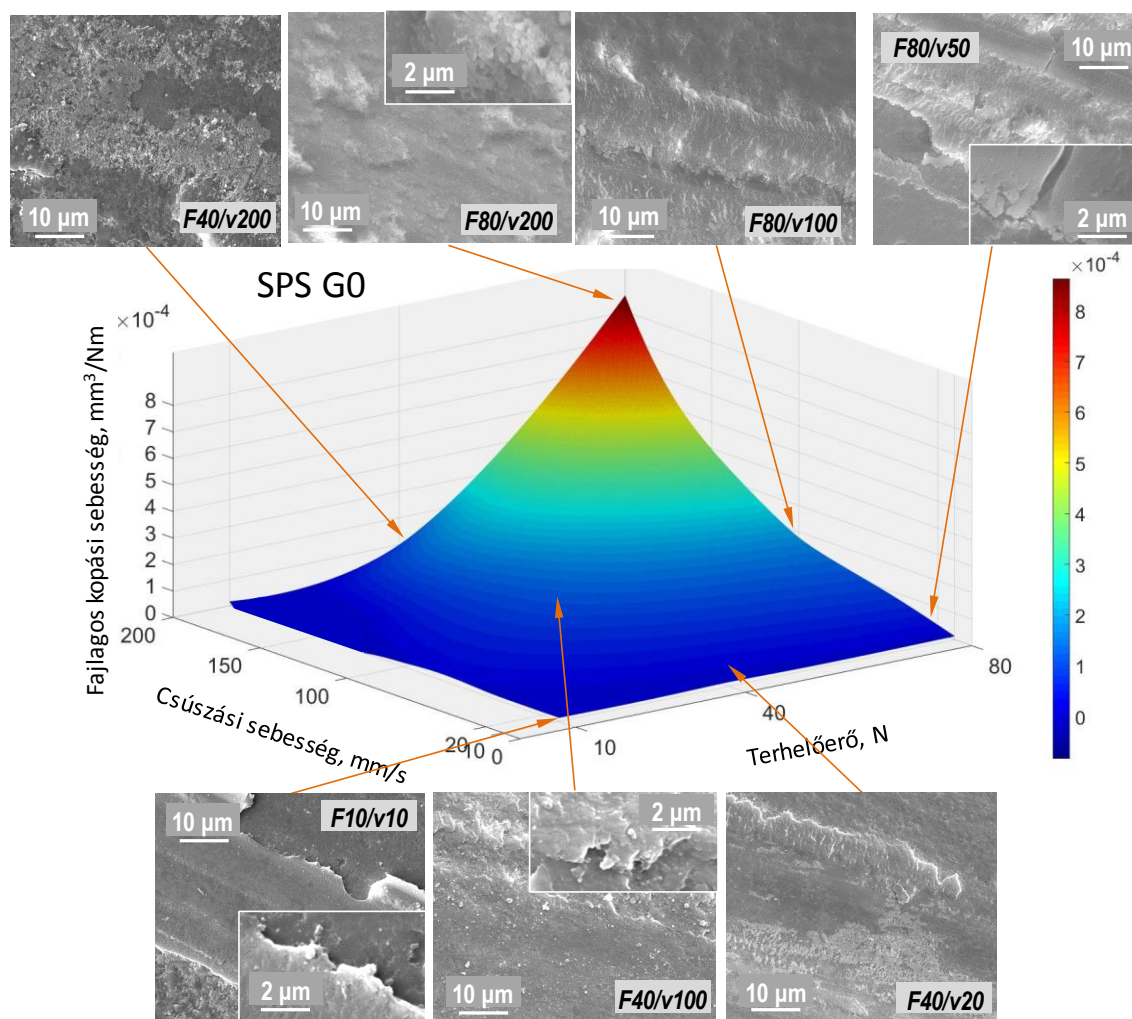
követően a kopási mechanizmus megváltozik és a kompaktálódott porból új tribofilm képződik (48. ábra, F40/v20 részlete). Ebben az esetben a tribofilm képlékenyen alakváltozik és a ciklikus terhelésnek köszönhetően fáradásos repedések jelennek meg a csúszási irányra merőlegesen. Ez delaminációt okoz vagy a tribofilm hasadását idézi elő.



48. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (HIP gyártású, 3% MLG tartalmú minták)

A csúszási sebesség növelésével nő a tribofilm képlékenysége és intenzívebb a porképződés, a mechanikai kopás válik dominánssá. Nagy normálirányú terhelőerőnél ($F = 80\text{N}$) a kopás mechanizmusa erősen függ a sebességtől. Kis csúszási sebesség esetén intenzív mikrotöredezés jellemzi a frissen kialakult tribofilm károsodását, ami leválik a felületről, ahogy az a 48. ábrán is látható (F80/v10 részlet). A sebesség növelésével növekszik a mechanikai kopás aránya, ahogyan a képlékenysége is növekszik a súrlódási hő növekedésével. A 48. ábrán a F80/v50-es triborendszerben a vékony deformált tribofilmen számos károsodást jelző repedés látható. A $v = 200\text{ mm/s}$ sebességnél mechanikai kopás jelentkezik olvadással, ami a károsodási mechanizmus megváltozását is jelenti (48. ábra, F80/v200 részlet).

Az SPS próbatesteken keletkezett kopásnyomokon is elvégeztem azok morfológiai elemzését a fajlagos kopási sebességgel összefüggésben vizsgálva (49. ábra). A monolitikus minták esetén a legkisebb terhelőerőnél és csúszási sebességnél ($F = 10\text{ N}$ és $v = 10\text{ mm/s}$) tribofilm képződés és leválás (delamináció) volt megfigyelhető, míg a monolitikus HIP minták esetében ugyanezen vizsgálati paraméter kombinációnál mikroabrázió volt a jellemző. A referenciaanyag felületét ebben az esetben is egyenletesen tribofilm borította. A terhelőerő és a csúszási sebesség további növelésével ($F = 40\text{ N}$ és $v = 20\text{ mm/s}$) a kopási mechanizmusok változatlanok, de a tribofilm képződés intenzitása növekszik, ami a súrlódási együtthatót jelentősen csökkenti és összességében változatlan mértékű kopási károsodást okoz.



49. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (SPS gyártású, monolitikus minták)

A sebesség további növelésével ($F = 40\text{ N}$, $v = 100\text{--}200\text{ mm/s}$) a kopási sebesség értéke eléri az erős kopás tartományát. Mindkét sebességértéknél intenzív tribofilmképződés figyelhető meg, azonban ezekben az esetekben a tribofilm erőteljes képlékeny alakváltozást követően leválik a felületről, majd összetöredezik, porszerű törmeléket hagyva a kopásnyomban, ami 3 testes abrazív kopást eredményez. A terhelőerő további

növeledésekor, de viszonylag kis sebességnél ($F = 80 \text{ N}$, $v = 50 \text{ mm/s}$) akárcsak az előző esetekben tribofilmképződés és annak képlékeny alakváltozása figyelhető meg, a tribofilm belevasalódik a kopásnyomba, benne hosszú, radiális irányú fáradásos repedések jelennek meg, amelyek a későbbi delaminációt előidéznek. A súrlódási együttható értéke (0,35) kisebb, mint az $F = 40 \text{ N}$ / $v = 100\text{--}200 \text{ mm/s}$ paraméterkombinációnál mértek (0,40; 0,39), mivel eltérő a kopási mechanizmus, az abrazív kopás itt még nem jelentkezik.

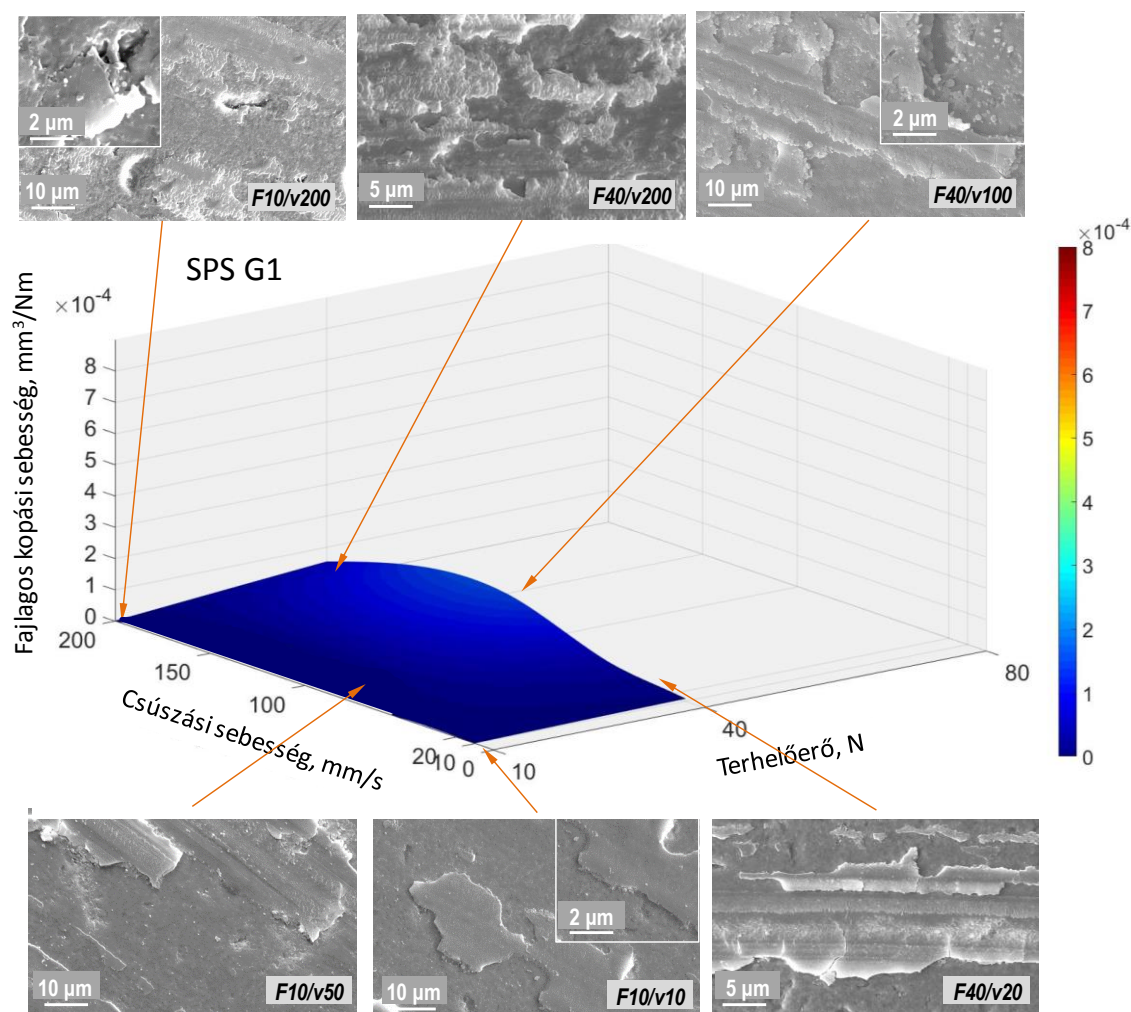
Nagyobb érintkezési feszültségek esetén ($F = 80 \text{ N}$, $v = 100 \text{ mm/s}$) az intenzív tribofilmképződést annak szemcsés törése kíséri, amely növeli a fajlagos kopási sebesség értékét. A legnagyobb vizsgált terhelőerő és csúszási sebesség ($F = 80 \text{ N}$, $v = 200 \text{ mm/s}$) esetén a tribokémiai kopás még erőteljesebb mechanikai kopással egészül ki és jelentős porképződéssel társul, akárcsak a meleg izosztatikusan sajtolt minták esetében. Fontos megjegyezni, hogy az SPS gyártású monolitikus minták esetében a fajlagos kopási tényező értékei nem mutatnak lokális minimum értéket. A monolitikus minták kézi polírozással, míg a grafénnal adalékoltak (50. és 51. ábra) gépi polírozással lettek előkészítve. Ha megvizsgáljuk mind a monolitikus, mind a grafénnal adalékolt SPS próbatestek $F = 10 \text{ N}$ és $v = 10 \text{ mm/s}$ terhelésnél kialakult kopásnyomainak SEM felvételeit, jól láthatjuk, hogy a HIP mintákkal ellentétben nemcsak a polírozás során keletkezett tribofilm vett részt a kopásban, hanem új tribofilm is keletkezett. Ennek delaminációja a monolitikus mintáknál intenzívebb volt és az MLG jelenlétében annak növekvő mennyiségével csökken, ami jelentősen kisebb k értékhez vezetett.

Az 1% MLG tartalmú minták esetén az $F10/v10$ paraméter kombinációval vizsgált próbatestek esetén tehát tribofilmképződés volt megfigyelhető, akárcsak a további kis terhelésű tartományokban (50. ábra, $F = 10 \text{ N}$, $v = 50 \text{ mm/s}$ részlete). Az utóbbi esetben már a tribofilm képlékeny alakváltozása azaz barázdálódása is észlelhető. A legnagyobb sebességgel végzett kis terhelésű vizsgálatnál ($F10/v200$) a tribofilm feltöredezik, a finom por belesimul a kopásnyomba, kompaktálódik, így nem növeli érdemben a kopási tényező értékét. Mindegyik esetben jóval több tribofilm keletkezése figyelhető meg, mint a monolitikus próbatesteknél, csökken a súrlódási tényező és a fajlagos kopási sebesség értékét.

Az $F40/v20$ paraméterkombináció esetében szintén jelentős a tribofilmképződés. A tribofilm felülete a ciklikus terhelés következtében radiális irányban feltöredezik, illetve bizonyos régiókban leválik.

Az $F40/v100$ terhelési esetben lokális maximumértéket vesz fel a kopási tényező értéke. A SEM felvételen is látható, hogy jelentős mennyiségű tribofilm képződik, amelyik leválik, valamint a nagyobb nagyítású részleten vélhetően alapanyagból kitört szemcséket is megfigyelhetjük, ami már mechanikai kopásra utal. Ebben az esetben már az erős kopás tartományáról beszélünk. A csúszási sebesség növelésével ($F40/v200$), a HIP és a monolitikus SPS mintákon megfigyelttől eltérően, a kopási tényező csökkenését figyelhetjük meg, amelynek értéke körülbelül fele az előző paraméterkombinációval

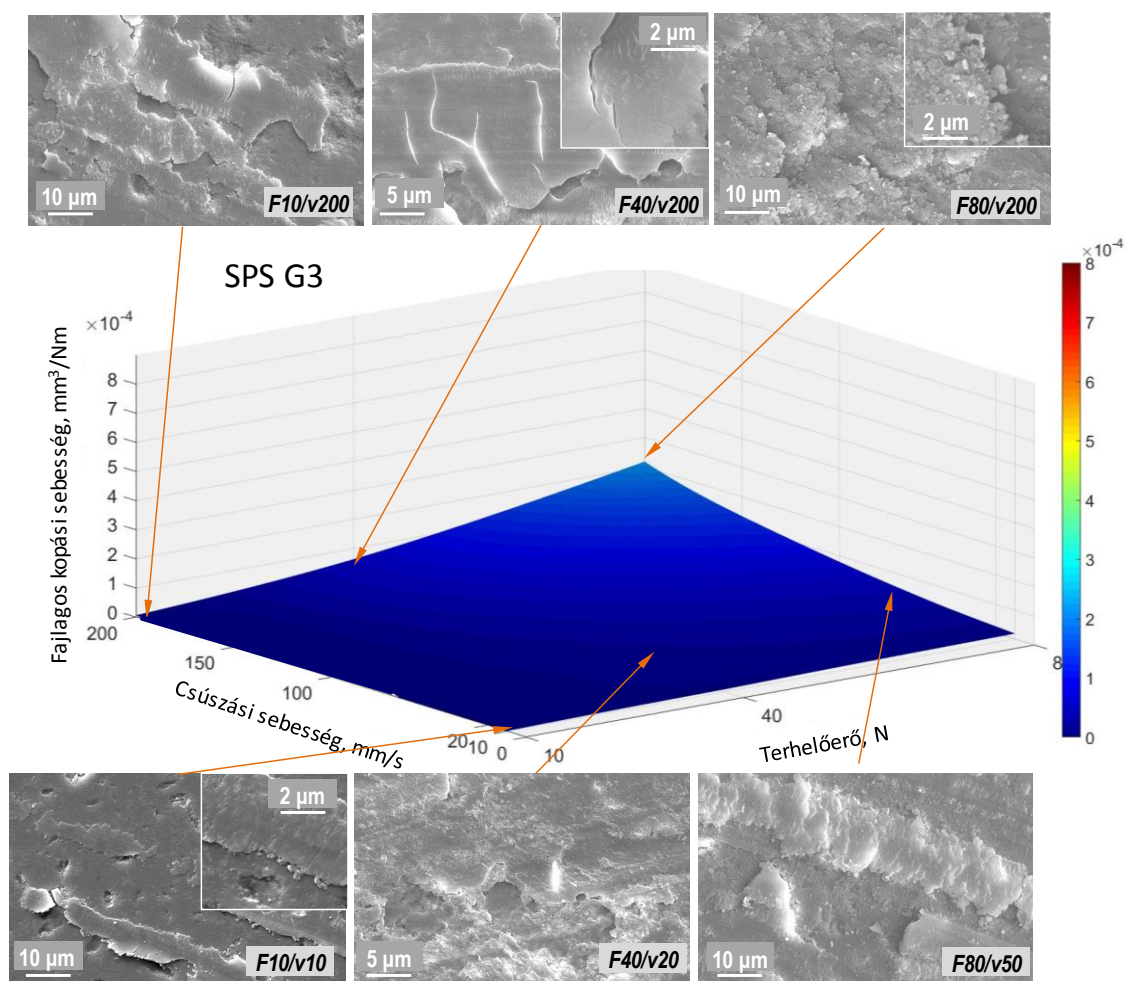
(F40/v100) mért értéknek. Mechanikai kopásra utaló nyomokat ebben az esetben nem látunk, csak a tribofilmképződésre utaló nyomokat, a tribofilm berepedését, amely azonban foltokban le is válik a felületről és a levált tribofilm alatti alapanyagon barázdás kopásra utló jelek figyelhetők meg. Jól látható, hogy a grafénnal adalékolt minták esetében a mechanikai kopás kevésbé domináns, helyette a tribokémiai kopás a jellemző. A megfigyelték alapján arra következtethetünk, hogy nagy csúszási sebességek esetén különösen kis terhelőerőnél a tribofilm képződés dominánsabb, mint a leválás.



50. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (SPS gyártású, 1% MLG tartalmú minták)

A 3% MLG tartalmú mintáknál (51. ábra) kis terhelési tartományokban (F10/v10) látható, hogy a polírozáskor keletkezett tribofilm tetején újabb tribofilm képződött, ami feltöredezett, majd levált. Összehasonlítva a 3% és 1% MLG tartalmú SPS minták (50. és 51. ábra, F10/v10), kopásnyomait a nagyobb MLG tartalmú mintán összefüggőbb, koherensebb a tribofilm, azt sugallva, hogy a kritikus filmvastagság az MLG tartalom növelésével nőtt. Az F10/v200 paraméterkombinációval vizsgált kopásnyomról készített felvételeket összehasonlítva az 1% grafén tartalmú mintán mértekkel, látható, hogy a tribofilm feltöredezett, a delamináció erőteljesebb. A terhelőerő növelésével (F40/v20)

masszív, feltöredezett, összekompaktálódott tribofilm figyelhető meg, valamint jelentős porképződés. Ez utóbbi belevasalódik a kopásnyomba és nem növeli nagy mértékben a kopás mértékét.



51. ábra. 3D fajlagos kopási sebesség térképek kiegészítve a jellegzetes kopásnyomok SEM felvételeivel (SPS gyártású, 3% MLG tartalmú minták)

A F40/v200 terhelési esetben összefüggő tribofilm figyelhető meg, radiális irányú repedésekkel. A tribofilm delaminációja is látható. A fajlagos kopási sebesség értéke ekkor az erős kopás tartományába esik és közel azonos az SPS G1 és G3 mintákon, míg az SPS G0 mintákon $1,5\times$ nagyobb. Az F80/v50-es paraméterekkel vizsgált mintákon akárcsak az előbbi esetben masszív tribofilmképződés látható, amelynek felülete repedezett, barázdálódott, valamint fáradásra utaló nyomok is megfigyelhetők. A felvételeket összehasonlítva a monolitikus SPS mintákon mértekkel, látható, hogy a tribofilm képlékenysége és kritikus filmvastagsága nagyobb, ezért a kopási tényező jóval kisebb. A legnagyobb terhelésnél (F80/v200) végzett vizsgálatoknál már erős kopásra utaló kopásnyomot láthatunk, kitöredezett szemcséket és jelentős porképződést. Nincs nyoma a többi esetben látható összefüggő tribofilm rétegnek, helyette a tribofilm feltöredezése látható. A mechanikai kopás válik dominánssá.

Grafén bázisú tribofilmet nem fedeztem fel a SEM vizsgálatok során, de más szerzők hasonló adalékokkal végzett vizsgálataik során sem tapasztaltak hasonlót. Ahhoz, hogy a grafén kenőhatása érvényesüljön kevesebb, mint 10 rétegből kell felépülnie, míg az általam vizsgált grafén adalékanyag 30–300 rétegből áll (10–100 nm). Ezek a nagyméretű lemezek képtelenek rétegekre szétválni és szilárd fázisú kenőanyagként funkcionálni az általunk alkalmazott terhelési tartományban. A súrlódási együtttható diagramoknál sem figyeltem meg csökkenést, vagyis ez azt igazolja, hogy a kenőhatás sem érvényesül.

4.3.6. Kopástípusok és mechanizmusok vizsgálata

A kopásnyomok pásztázó elektronmikroszkópos felvételei alapján meghatároztam a különböző terhelési esetekben fellépő jellemző kopás típusokat és kopási mechanizmusokat.

A kopásnyomokról készített felvételeket teljes terjedelemben a 6. melléklet tartalmazza. A különböző csúszási sebességeknél és terhelőerőknél megfigyelt 4.3.5. fejezetben is tárgyalt kopási módokat és mechanizmusokat a HIP próbatestekre vonatkozóan a 18-20. táblázat foglalja össze, míg az SPS mintákra vonatkozóan a 21-23. táblázat az alábbi jelölésrendszert alkalmazva:

Kopás módok:

1. Abrázív kopás (A)
2. Tribokémiai kopás (T)
3. Fáradásos kopás (F)

Kopási mechanizmusok:

- I. Mikroabrázio
- II. Intenzív tribofilm-képződés
- III. Repedések kialakulása a tribofilm felületén (fáradás)
- IV. A tribofilm képlékeny deformációja
- V. A tribofilm delaminációja
- VI. Interkristallin vagy szemcsés törés (3 testes kopás)
- VII. Olvadás

18. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (HIP, monolitikus) kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	A + (T)	I.	—	—	—	—
20	—	—	T + F	II. + III. + IV. + V.	—	—
50	—	—	—	—	—	—
100	F + T	II. + IV.	—	—	—	—
150	—	—	—	—	T.	II. + IV. + VII.
200	—	—	T	II. + III. + IV. + V.	T.	II. + IV. + VII.

19. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (HIP, 1% MLG)
kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	—	—	—	—	—	—
20	—	—	A	IV. + V. + VI.	—	—
50	—	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	T	II. + III + V.
150	—	—	A + T	IV. + V. + VI.	A + T	II. + VI.
200	—	—	A + T	IV. + V. + VI.	A + T	II. + VI.

20. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (HIP, 3% MLG)
kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	A + (T)	I.	—	—	A	I.
20	—	—	T + F	II.	—	—
50	—	—	—	—	T + F	II. + III.
100	—	—	—	—	A + T	II. + VI.
150	—	—	—	—	A + T	II. + VI.
200	—	—	A + T	II. + IV. + VI.	A + T	II. + VI.

A felvételek alapján az SPS mintákon is meghatároztam a különböző kopási mechanizmusokat és módokat (21. táblázat, 22. táblázat,

23. táblázat):

21. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (SPS, monolitikus)
kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	T	II. + IV. + V.	—	—	—	—
20	—	—	T	II. + IV. + V.	—	—
50	—	—	—	—	T + F	II. + III. + IV. + V.
100	—	—	T	II. + IV. + V.	T + (A)	II. + IV. + VI.
200	—	—	T	II. + IV. + V.	A + T	II. + IV. + VI.

22. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (SPS, 1% MLG)
kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	T	II. + V.	—	—	—	—
20	—	—	T + F	II. + III. + IV. + V.	—	—
50	T	II. + IV. + V.	—	—	—	—
100	—	—	A + T	II. + IV. + V. + VI.	—	—
200	T	II. + IV. + V.	T	II. + IV. + V.	—	—

23. táblázat. Jellemző kopás típusok és kopási mechanizmusok (SPS, 3% MLG)
kenésmentes vizsgálat, ellentest: SiC golyó

Csúszási seb., mm/s	Terhelőerő, N					
	10		40		80	
	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.	Kopástípus	Kopási mech.
10	T	II. + IV. + V.	—	—	—	—
20	—	—	T	II. + IV. + V.	—	—
50	—	—	—	—	T + F	II. + III. + IV. + V.
100	—	—	—	—	—	—
200	T	II.	T + F	II. + III. + IV. + V.	A + T	II. + VI.

Összehasonlítva a monolitikus HIP és SPS gyártású mintákat, megállapítható, hogy jelentős különbségek vannak a különböző gyártású próbatesteken megfigyelhető kopási mechanizmusok és módok között. Az SPS gyártású próbatesteknél a tribokémiai kopás volt a jellemző, míg a HIP gyártásúaknál 3 testes abrazív kopás is megjelenik bizonyos esetekben. Mechanizmusok tekintetében az SPS gyártású próbatesteknél uralkodó a II. típusú kopási mechanizmus. Ezen túlmenően mind az SPS, mind a HIP gyártású mintáknál leggyakrabban a tribokémiai kopással összefüggő különböző mechanizmusok (II., III., IV., V.) jelentkeztek keverten. Lényeges különbség, hogy a HIP gyártású mintáknál F80/v200 terhelés mellett megjelenik az olvadásos kopás, ami az SPS próbatesteknél nem jelentkezett.

A HIP gyártású próbatesteknél a grafén mennyiségének növelésével az abrazív kopás nagyobb mértékben volt jellemző. Az 1% MLG tartalmú próbatesteknél nagy terhelések mellett ($F = 40\text{--}80\text{ N}$, $v = 100\text{--}150\text{ mm/s}$) a II., IV., V. és VI. típusú kopási mechanizmus az uralkodó, ugyanezen terhelési feltételek mellett a 3% MLG tartalmú mintáknál II. és VI. típusú kopási mechanizmus volt domináns. Az eredmények alapján látható, hogy a grafén adalékolása nem csak a jellemző kopási módot változtatta meg, de a mechanizmusokat is.

Az SPS gyártású grafén tartalmú kompozit próbatestek esetében minden vizsgált triborendszerben a tribokémiai kopás jóval dominánsabb és abrazív kopás sokkal kevesebb esetben, csak a legnagyobb terheléseknél $F = 80\text{ N}$, $v = 100\text{--}200\text{ mm/s}$ jelentkezik. A fő különbség a monolitikus és a grafén tartalmú minták között nem a mechanizmusok típusában, hanem a tribokémiai reakciók intenzitásában és az azzal járó filmképződés súrlódás és kopás csökkentő hatásában nyilvánul meg a grafén tartalmú minták javára.

További sajátosság, hogy a HIP mintáknál az abrazív kopás jóval dominánsabban lép fel a nagy terheléseknél, mint az SPS mintáknál.

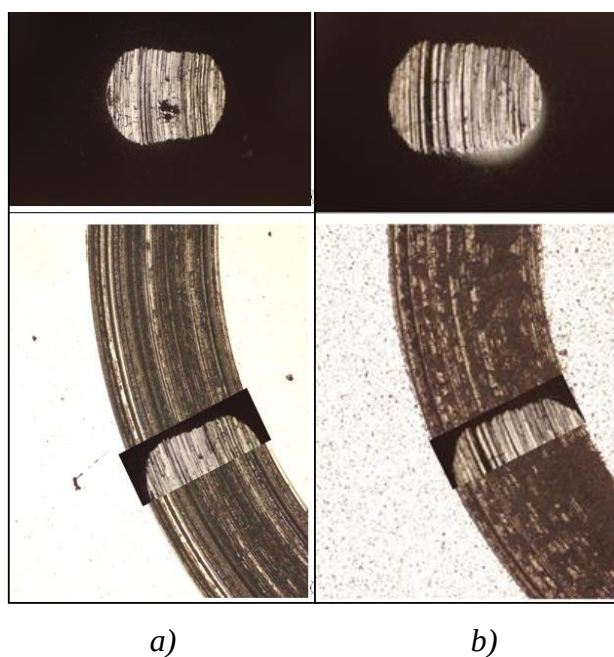
Az elvégzett vizsgálatok eredménye a modellalkotás során jól használható, mivel a különböző modellek alkalmazási tartományát befolyásolják a kopási viselkedést jellemző kopási módok és mechanizmusok. A modellalkotás szempontjából a tribokémiai kopás mellett az abrazív (mechanikai) kopás figyelembe vétele javasolható.

4.3.7. Kopásnyomok morfológiai vizsgálata optikai mikroszkóppal

Optikai mikroszkóppal lehetőség van a kopásnyomok szabad szemmel nem látható alakjait elemzésre, amelyek alapján a kopási viselkedésre vonatkozóan értékes megfigyelések tehetők.

A kopásnyomok morfológiai vizsgálatához az Axio Observes D1m (Zeiss) inverz optikai mikroszkópot alkalmaztam, amely segítségével mind a tárcsán lévő, mind a golyón lévő kopásnyomok tanulmányozhatók, a jellemző károsodási és kopási módok meghatározhatók. A tárcsa és bizonyos esetekben a golyók kopásnyomairól készített felvételeket a 7. melléklet tartalmazza.

Mivel a disszertáció tartalmi korlátai miatt nincs lehetőségem a felvételek mélyreható elemzésére, ezért csak egyetlen jellemző példát szeretnék kiragadni a sok közül: az 52. ábrán azonos terhelési paraméterek mellett látható két azonos gyártástechnológiájú, de különböző összetételű minta kopásnyomának azonos nagyítású felvétele. Jól látható, hogy a grafén mennyiségének növelésével a kopásnyom szélesebb lett, mind a tárcsán, mind a golyón. Ez összhangban van a profilometriai vizsgálatok eredményeivel. A golyó felületén a SiC-ra jellemző barázdás kopásnyom is megfigyelhető.



52. ábra. A golyó és a próbatest kopásnyomairól inverz mikroszkóppal készült felvételek 0% (a) és 3% (b) MLG tartalmú HIP gyártású minták esetén ($F = 40 \text{ N}$, $v = 20 \text{ mm/s}$)

4.4. Fél-fizikai kopási modell a kikopott térfogat becslésére

A kerámiák tribológiai elemzésére az irodalomban számos fizikai vagy matematikai kopási modell létezik, amely a kopási károsodás becslésére alkalmas. Kísérleti munkám befejezéseként célul tűztem ki egy olyan kopási modell megalkotását, amellyel prognosztizálható a kikopott térfogat értéke és ezáltal a kopási károsodás mértéke. A kopási modellek alkalmazhatósága korlátozott, mivel általánosságban elmondható, hogy a keramikus triborendszerek nagyon érzékenyek a vizsgálati paraméter (például terhelőerő, páratartalom, hőmérséklet, csúszási sebesség stb.) változására, azaz a károsodást kontrolláló kopási mechanizmus azok függvényében változik.

A pásztázó elektronmikroszkópi elemzések során megállapítottam, hogy a vizsgált minták domináns kopási mechanizmusai az abrazív, valamint a tribokémiai kopás. Így az általam vizsgált mintákra egy olyan modellt alkalmaztam, amelyben a kerámiák tribokémiai kopására nemrég kifejlesztett, szakirodalomban publikált modellt kombináltam egy mechanikai kopásra érvényes összefüggéssel. A mechanikai tagot a klasszikus Evans-Marshall modelltől vettem át [125] (3. táblázat. 4. modell) egyszerűsített formában, figyelembe véve, hogy az E/H arány nem változik nagymértékben a különböző kerámiák esetén [158]. A modellt az alábbi formában alkalmaztam:

$$V_M = c_2 \cdot \frac{F_n^{9/8}}{K_c^{1/2} \cdot HV^{5/8}} \cdot l \quad [mm^3] \quad (15)$$

ahol:

- V_M : a mechanikai kopás okozta anyagvesztés, kikopott térfogat, mm^3 ;
- c_2 : anyagtól független konstans, amely jellemzi a kopási rendszert;
- F_n : a normálirányú terhelőerő, N;
- $K_c=VIF$: a Vickers lenyomatos törési szívósság, $MPa \cdot m^{1/2}$;
- HV: a Vickers keménység;
- l : a csúszási úthossz, m.

Ez az egyenlet nem számol a rugalmassági modulussal, az érintkezési geometriával és az anyag hővezetési tulajdonságaival, amelyek fontos szerepet töltenek be egy adott anyag kopási viselkedésének kialakulásában.

A (15) egyenletet kiegészítettem egy rugalmas-termikus taggal (16), amelyet a tribokémiai aktivált folyamatok esetére Tewari [159] által javasolt modell tartalmaz. Ez az összefüggés figyelembe veszi az abszolút környezeti hőmérsékletet (T_a), a súrlódó pár komplex rugalmassági modulusát (E^*), a tárcsa hővezetési tényezőjét ($k_\perp$) és a vizsgálat során alkalmazott komplex sugarat (R^*), a súrlódási együtthatót (μ) és a csúszási sebességet (v). A felsorolt paraméterek a tribokémiai folyamatot leginkább befolyásoló

tényezők, tehát a tribokémiai folyamatokkal összefüggő kikopott térfogat (V_T) arányos az (16) összefüggéssel:

$$V_T \approx \exp \left[- \frac{B}{\left(T_a + 2,25 \mu F_n^{2/3} (E^* / R^*)^{1/3} v / 8k_{\perp} \right)} \right] [mm^3], \quad (16)$$

ahol a komplex modulus (E^*) és a komplex rádiusz (R^*) az alábbiak szerint számítható:

$$a) \frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad \text{és} \quad b) \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_d} \quad (17)$$

ahol:

- E_1, E_2 : a súrlódó testek anyagának rugalmassági modulusa;
- ν_1, ν_2 : a tárcsa (Si_3N_4) és a golyó (SiC) Poisson tényezője;
- R_b : az alkalmazott súrlódópár, azaz a golyó sugara;
- R_d : a vizsgált minta, azaz a tárcsa sugara.

A B paraméter arányos a tribokémiai folyamat aktiválási energiájával (Q_{tr}):

$$B = -2Q_{tr} / R, \quad (18)$$

ahol: R : univerzális gázállandó.

A tribokémiai reakció aktiválási energiája szilícium-nitrid esetén 30 kJ/mol [132]. A munkám során vizsgált kerámiák kopásvizsgálatakor két domináns kopási mód jelentkezik, a mechanikai és tribokémiai kopás. Ezek jelenlétét SEM felvételekkel igazoltam (4.3.4. fejezet). Mivel ez a két kopási mód a kopás során legtöbbször egyszerre, egymással párhuzamosan jelentkezik a két modellt (15, 16) célszerűen kombinálva képeztem az összetett mechanikai/tribokémiai modellt az alábbi formában:

$$V_{T+M} = c_s \cdot \frac{F_N^{9/8}}{K_{Ic}^{1/2} \cdot H^{5/8}} \cdot l \cdot \exp \left[- \frac{B}{\left(T_a + 2,25 \mu F_n^{2/3} (E^* / R^*)^{1/3} v / 8k_{\perp} \right)} \right] [mm^3], \quad (19)$$

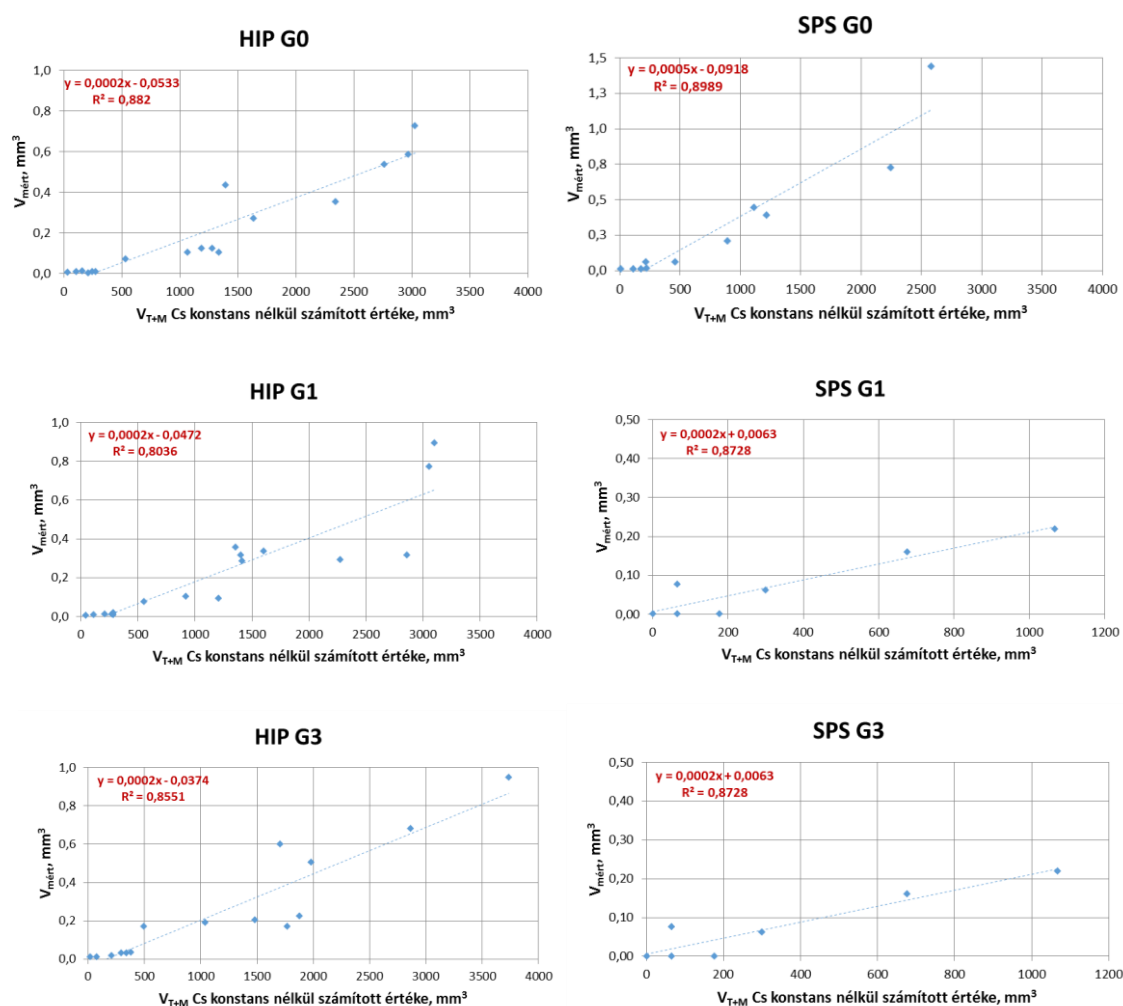
ahol: c_s : egy anyagtól független konstans.

A komplex rugalmassági modulust a (17/a) egyenlet segítségével számítottam ki a referencia és a kompozit minták esetén egyaránt. A számításhoz szükséges jellemzőket a 24. táblázat tartalmazza. A tárcsa Poisson tényezője szakirodalmi adat [2], a tárcsa a rugalmassági modulusát műszerezett keménységméréssel határoztuk meg (BAY-LOGI, BME, Gépjárművek és Járműgyártási Tanszék; ÓE, Anyag- és Gyártástudományi Intézet). A golyó keménységét és rugalmassági modulusát annak gyártója tette közzé [160].

24. táblázat. A komplex rugalmassági modulus (E^*) és a Poisson tényező értékei

Szint. eljárás	MLG, tömeg%	Tárcsa rug. modulusa, E_1 , MPa	Golyó rug. modulusa, E_2 , MPa	Komplex rugalmassági modulus, E^* MPa	Tárcsa Poisson tényezője, –	Golyó Poisson tényezője, –
HIP	0	252000	400000	161048	0,23	0,12
	1	296000		176496	0,22	
	3	142000		109261	0,22	
SPS	0	220000		147732	0,23	
	1	120000		97309	0,25	
	3	115000		94195	0,25	

A különböző gyártási eljárású és MLG tartalmú mintahalmazokra meghatározott c_s konstans értéke minden esetben jó közelítéssel 0,0002 volt, tehát független a szinterelési eljárástól, valamint grafén tartalomtól, kivéve a monolitikus SPS próbatestek esetét, amikor a konstans értéke 0,0005-re adódott (53. ábra).



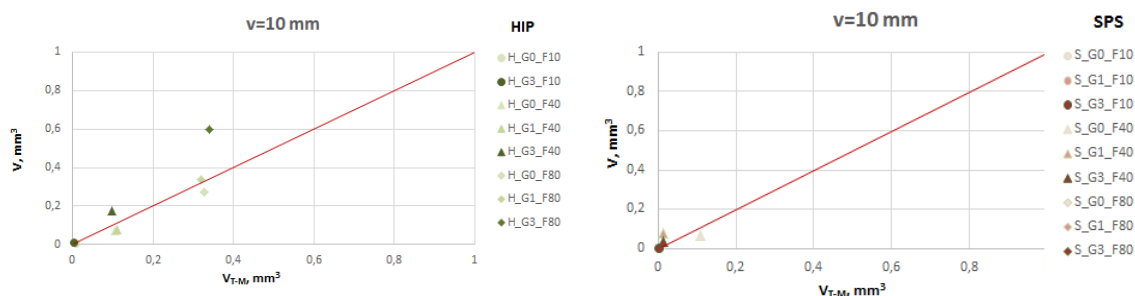
53. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell c_s konstans nélküli tagjával becsült értékének összehasonlítása

A c_s konstans értékének meghatározására elvégzett lineáris regresszió során a vizsgálati halmaztól nagymértékben elkülönülő pontokat figyelmen kívül hagytam. Ez a HIP gyártású minták esetében a monolitikus, 1 és 3% graféntartalmú 18 elemű halmazokra

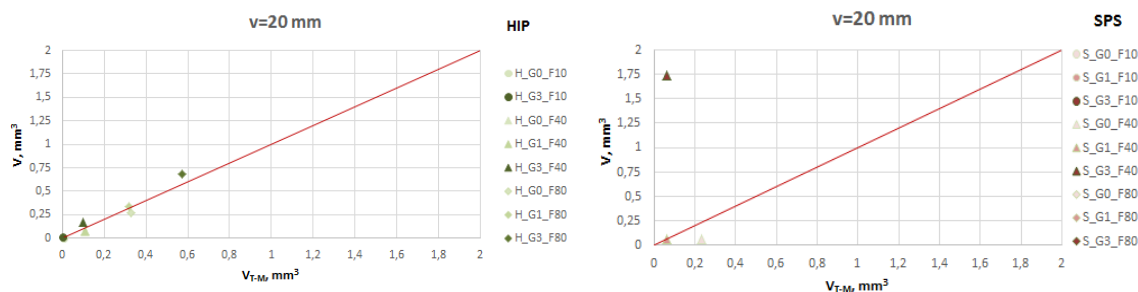
vonatkozóan 1, 1 és 3 mérési pontot jelentett, azaz a pontok 6; 6 és 17%-ának elhanyagolását, míg az SPS gyártású 8, 8 és 9 elemű mintahalmazokra minden esetben 1-1 pontot jelentett, ami a jóval kisebb mintaelemszám miatt 12,5; 12,5 illetve 11,5 %-os elhanyagolást jelent. Természetesen az érintett triborendszereket minden esetben egyedileg meg kell vizsgálni, hogy az eltérést az egyes mérési pontok esetén mi okozta, és amennyiben a mérési körülmények vagy egyéb befolyásoló tényezők tekintetében megtalálható az eltérés oka, akkor az elhanyagolás jogosan megtehető és a modell használata az adott formában javasolható. Ha az eltérés oka nem tárható fel, akkor meg kell fontolni, hogy a közelítő függvény alakját milyen formában célszerű módosítani.

Összességében az elvégzett elemzések alapján a HIP gyártású mintákra vonatkozóan a modell megbízhatósága a javasolt alakban igen jónak mondható, míg SPS gyártású mintáknál további mérések szükségesek a c_s konstans értékének pontosítására.

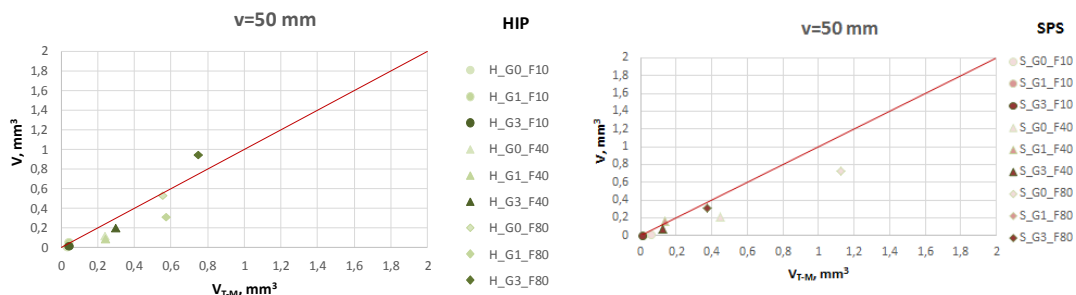
A HIP és SPS minták esetén a kikopott térfogat (19) modell alapján becsült (V_{T+M}) és a mért (V) értékeinek ellenőrzése az 54-59. ábrán látható, a számszerű értékeket teljeskörűen a 8. melléklet tartalmazza. A diagramokból láthatjuk, hogy a mechanikai/tribokémiai egyesített modell jó közelítéssel becsli a kikopott térfogat értékeit (100 mm/s csúszási sebességig), kivéve azokban az esetekben, amikor a terhelőerő és a csúszási sebesség egyaránt nagy. Ezekben a triborendszerekben megváltozik a domináns kopási mechanizmus (erős abrazív kopás), aminek a becslésére ez a modell már nem alkalmas.



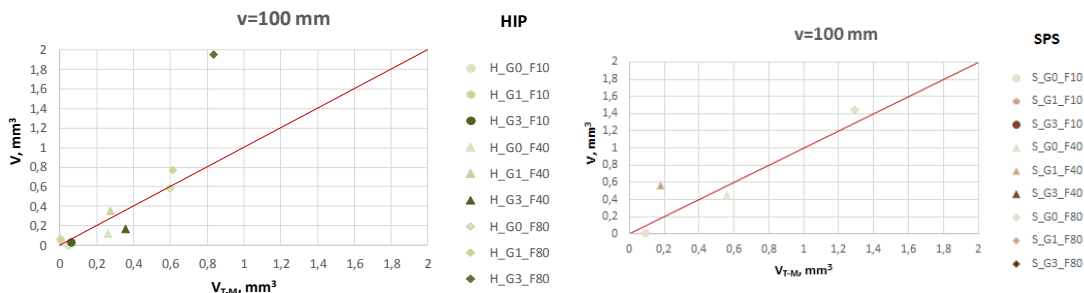
54. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 10$ mm/s csúszási sebesség)



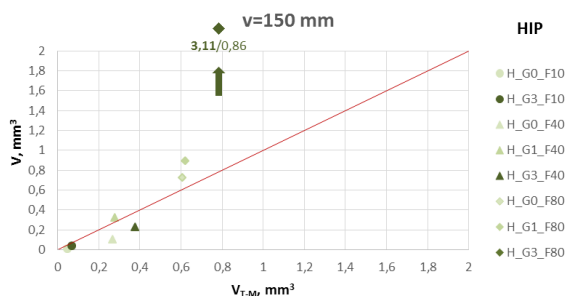
55. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 20$ mm/s csúszási sebesség)



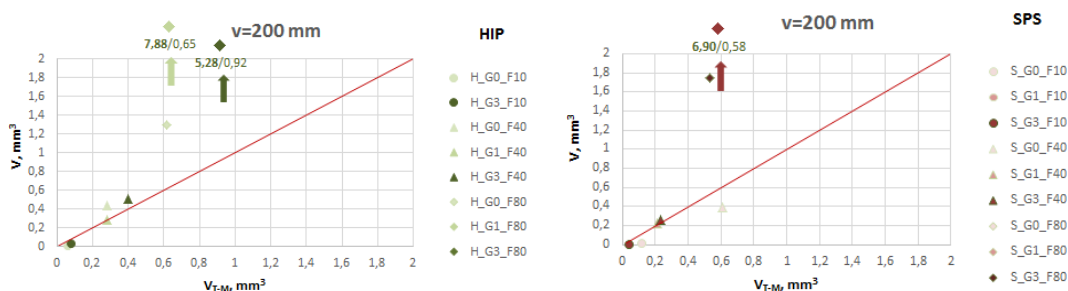
56. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 50$ mm/s csúszási sebesség)



57. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 100$ mm/s csúszási sebesség)



58. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 150$ mm/s csúszási sebesség)



59. ábra. A kikopott térfogat kísérleti úton mért illetve a (19) modell szerint becsült értékeinek összehasonlítása ($v = 200$ mm/s csúszási sebesség)

A megfigyelt eltérések fizikai hátterében a minták különböző sűrűsége, keménysége, törési szívóssága, rugalmassági modulusa és a domináns kopási viselkedés megváltozása, továbbá az MLG adalékanyagok helyi feszültséggyűjtő hatása állhat [135, 136, 158].

4.5. *A vizsgálati eredményekből levonható legfontosabb következtetések, megállapítások*

Monolitikus, illetve 1 és 3 % többretegű grafént tartalmazó szilícium-nitrid kerámia kompozitok tribológiai és más mechanikai tulajdonságait vizsgálva az alábbi következtetéseket tettem:

- A két különböző gyártási eljárással előállított próbatestek esetén nem hatékony ugyanazon felületlőkészítési módszer alkalmazása, ezért kidolgoztam egy-egy a vizsgált kerámiákra alkalmasabb új felületlőkészítési tervet. A HIP gyártású minták esetén kötött szemcsés módszerrel, az SPS gyártású próbatesteknél szabadszemcséket alkalmazó módszerrel történt a felületlőkészítés.
- Az alkalmazott grafén adalék jelenlétében és mennyiségének növelésével mindkét gyártási eljárás esetén csökkent a minták sűrűsége, keménysége. Az SPS minták keménysége jellemzően nagyobb volt, mint a HIP mintáké. A HIP gyártási eljárás esetén nőtt, míg SPS esetén csökkent a szívósság értéke az MLG adalék hatására.
- A minták felületre merőlegesen mért hővezetési tényezője összhangban van a szakirodalmi adatokkal és a grafén mennyiségének növelésével csökkent a hővezetési együttható értéke a minták porozitása miatt.
- A ball-on-disc elvű tribológiai vizsgálat alapján a következő megállapításokat tettem:
 - Monolitikus minták esetén, azaz MLG fázis hozzáadása nélkül az alkalmazott SPS gyártástechnológia hatására a Si_3N_4 kerámiák kopásállósága jelentősen romlott a HIP gyártású mintákéhoz képest, a fajlagos kopási sebesség a vizsgált 12 különböző triborendszer közül 9 esetében nőtt, a növekedés mértéke a 10–433% közötti tartományba esett, átlagosan 145% volt.
 - Kompozit minták esetén, azaz a vizsgált MLG adalék 1 ill. 3% mennyiségű hozzáadásakor viszont az SPS gyártású minták kopásállósága egyértelműen jobb volt, mint a HIP gyártású mintáké, a vizsgált 17 triborendszer közül 15 esetben jelentősen javult. A kopási sebesség mértéke függött a terhelési (F , v) paraméterektől és az MLG tartalomtól. Az elért javulás mértéke 23–96% között változott és a kedvezőtlen esetekkel együtt is átlagosan 59% volt.
 - A vizsgált Si_3N_4 kerámiák kopásállóságát az SPS gyártási eljárás MLG alkalmazása nélkül tehát jelentősen rontja, míg 1 és 3% MLG hozzáadása mellett jelentősen javítja az azonos összetételű HIP gyártású mintákhoz képest a vizsgált széles terhelési tartományban.
 - HIP gyártási eljárás esetén MLG hozzáadásakor a fajlagos kopási sebesség (k) növekedett az adalékmentes, monolitikus mintákon mért értékekhez képest, azaz HIP minták esetén az alkalmazott grafén adalék tehát nem javítja a

kopásállóságot. Ennek oka egyrészt az MLG fázis környezetében a hosszú idejű szintereléskor kialakuló pórusos szerkezet és annak feszültséggyűjtő hatása, másrészt az, hogy a karbon az alkalmazott terhelési feltételek esetén nem vesz részt transzferfilm kialakításában és nem képes szilárd fázisú kenőanyagként viselkedni (8) (16).

- A HIP gyártású Si_3N_4 minták mátrix anyagához adott 1% MLG fázis hatására a fajlagos kopási sebesség a vizsgált 18 triborendszerben 5 esetben ugyan csökkent (átlagosan 24%-kal), 13 esetben viszont nőtt (átlagosan 83%-kal), szélső esetben elérte az 508%-ot, míg 3% MLG hozzáadásakor mind a 18 vizsgált triborendszerben jelentősen nőtt a kopási sebesség az adalékoltalan HIP mintákon mért értékekhez képest. A kopásállóság romlásának (k növekedésének) mértéke széles, 17–1014% tartományban változott, az összes vizsgált esetre vetítve átlagosan 207% volt.
- Az alkalmazott HIP gyártási eljárással készült Si_3N_4 kerámiák kopásállósága az MLG fázis jelenlétében a vizsgált terhelési spektrumban jelentősen romlott, a fajlagos kopási sebesség növekedése 3% MLG tartalom esetén nagyobb, mint 1% MLG hozzáadásakor.
- SPS gyártású mintákban 1% MLG fázis jelenlétében a vizsgált 8 triborendszerben 6 esetben csökkent a fajlagos kopási sebesség a referencia anyaghoz képest, a csökkenés mértéke 23–94% között változott, átlagosan 43% volt, míg 3% MLG hozzáadásakor mind a 9 vizsgált triborendszer esetén kisebb volt a fajlagos kopási sebesség az adalékoltalan mintákhoz viszonyítva. A csökkenés mértéke az 50–96% tartományba esett, és átlagosan 75% volt. A javulás hátterében az MLG adalék anyagszerkezetre és a kopást befolyásoló tulajdonságokra (keménység, szívósság, sűrűség, porozitás, hővezetési tényező stb.) gyakorolt komplex hatása áll.

Az MLG fázis jelenléte tehát SPS gyártási eljárás alkalmazásakor jelentősen és előnyösen befolyásolja a kopásállóságot, amit az alábbiakkal igazolok:

- Fajlagos kopási sebességre és dimenzió nélküli kopási tényezőre alapozott 2D kopásátmeneti térképek, továbbá 3D kopási sebesség térképek elemzésével megállapítható, hogy a vizsgált Si_3N_4 kerámiák kopását az alábbiak jellemzik:
- A HIP gyártású monolitikus minták kopása az alkalmazott terhelési tartományban döntően a gyenge és erős kopás közötti átmeneti tartományba esik, az MLG fázis hozzáadásával – annak növekvő (1 és 3%) mennyiségével – az átmeneti tartomány rovására az erős kopás tartománya kiszélesedik.
- Az SPS gyártású monolitikus mintáknál a vizsgált terhelési spektrumban az erős kopás tartománya dominál, sőt a legnagyobb terhelésnél – $F = 80 \text{ N}$, $v = 200 \text{ mm/s}$ – megjelenik az ultra-erős kopás tartománya is. Ezzel szemben

MLG II. fázis hozzáadásakor az SPS gyártású kompozit kerámiák kopásátmenete jelentősen megváltozik, a gyenge kopás jelentős – 1% MLG adalék tartalmú minták esetén nagyobb, 3% MLG adalék esetén kisebb – terhelési tartományra kiterjedően megjelenik, ami a HIP gyártású, azonos összetételű kompozit mintákhoz képest az SPS gyártású vizsgált kompozitok kopásállóságának javulását igazolja.

- A 3D kopástérképek segítségével a kopási sebesség terhelőerő- és sebességfüggése szemléletesen megítélhető, például a HIP gyártású monolitikus minták kopása a sebesség és terhelőerő változásra nem érzékeny, míg 1% MLG tartalmú HIP minták fajlagos kopási sebessége $v \geq 150$ mm/s és $F > 80$ N terhelésnél jelentős erőfüggést mutat.
- A terhelőerő és a csúszási sebesség változásával a domináns kopási módok és kopási mechanizmusok jellegzetesen megváltoznak. HIP minták esetén a tribokémiai kopás legtöbb esetben az abrazív és fáradásos kopással keverten jelentkezik, a kopási mechanizmusok tekintetében a HIP gyártású kerámiáknál a tribofilm képlékeny deformációja és delaminációja mellett a tribofilm fáradásos tönkremenetele a jellemző, nagy terheléseknél pedig interkristallin törés és olvadás lép fel. SPS gyártású kompozit minták esetén döntően intenzív tribokémiai kopás lép fel, amely nagyobb terhelések esetén mechanikai kopással egészül ki. A domináns kopási mechanizmus a tribofilm képződése és képlékeny alakváltozása, ami megmagyarázza az SPS gyártású kompozit minták jelentősen kedvezőbb kopási viselkedését.
- Kidolgoztam egy olyan fél-fizikai kopási modellt, amely egyidejűleg képes figyelembe venni a mechanikai kopás és a tribokémiai kopás okozta kopási anyagvesztéséget. A modellel számított kikopott térfogat értékek jó közelítéssel egybeesnek a kísérleti úton azonos triborendszerre meghatározott értékekkel 100 mm/s csúszási sebességig terhelőertől függetlenül. Ez a tartomány egybeesik a vizsgált kerámia leggyakrabban alkalmazott terhelési tartományával.

5. TÉZISEK, ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Monolitikus, valamint 1% és 3% többretegű grafénnal (MLG-vel) adalékolt HIP és SPS gyártású Si_3N_4 kerámiák széles ($F = 10; 40; 80 \text{ N}$; $v = 10; 20; 50; 100; 150; 200 \text{ mm/s}$) terhelési spektrumban végrehajtott ball-on-disc típusú vizsgálatai alapján az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg:

- T1. A többretegű grafén adalék kopásállóságra gyakorolt hatása komplex módon függ a gyártási eljárástól és a kerámiák összetételétől. **A vizsgált Si_3N_4 kerámiák kopásállóságát az SPS gyártási eljárás MLG alkalmazása nélkül jelentősen rontja, míg 1 és 3% MLG hozzáadása mellett jelentősen javítja** az azonos összetételű HIP gyártású mintákhoz képest a vizsgált terhelési tartományban. A javulás hátterében az MLG adalék anyagszerkezetre és a kopást befolyásoló tulajdonságokra (keménység, szívósság, sűrűség, porozitás, hővezetési tényező stb.) gyakorolt összetett és komplex hatása áll (8) (13) (15).
- T2. HIP gyártási eljárás alkalmazásakor a kopásállóságot az alkalmazott többretegű grafén jelenléte és mennyisége egyértelműen befolyásolja. **A HIP eljárással készült Si_3N_4 kerámiák kopásállósága az MLG fázis jelenlétében az vizsgált terhelési spektrumban jelentősen romlik, azaz az alkalmazott grafén adalék nem javítja a kopásállóságot.** Ennek oka egyrészt az MLG fázis környezetében a hosszú idejű szintereléskor kialakuló pórusos szerkezet és annak feszültséggyűjtő hatása, másrészt az, hogy a karbon az alkalmazott terhelési feltételek esetén nem vesz részt transzfer-film kialakításában és nem képes szilárd fázisú kenőanyagként viselkedni (8) (16).
- T3. **Fajlagos kopási sebességre és dimenzió nélküli kopási tényezőre alapozott 2D kopásátmeneti térképeket, továbbá 3D kopási sebesség térképeket dolgoztam ki** a vizsgált háromféle összetételű és kétféle gyártási eljárással készült Si_3N_4 kerámiákra, **amelyek elemzése alapján megállapítom, hogy a HIP gyártású monolitikus minták kopása az alkalmazott terhelési tartományban döntően a gyenge és erős kopás közötti átmeneti tartományba esik, az MLG fázis hozzáadásával az átmeneti tartomány rovására az erős kopás tartománya kiszélesedik.** Az SPS gyártású monolitikus mintáknál az erős kopás tartománya dominál, **ezzel szemben MLG II. fázis hozzáadásakor az SPS kompozitoknál nemcsak megjelenik a gyenge kopás tartománya, de az erős kopás tartománya is szűkül,** és az MLG tartalom növelésével egyre kisebb területre terjed ki a legnagyobb F és v értékek irányában, **ami a HIP gyártású, azonos összetételű kompozit mintákhoz képest az SPS kompozitok kopásállóságának javulását igazolja.** Megállapítom továbbá, hogy a HIP gyártású monolitikus minták kopása a

sebesség és terhelőerő változásra nem érzékeny, míg a kompozitoknál bizonyos terhelési tartományokban jelentős erőfüggést mutat. (8) (13) (15) (16).

- T4. **A kopásnyomok optikai és elektronmikroszkópos morfológiai vizsgálata, valamint a kopási károsodást irányító uralkodó kopástípusok és kopási mechanizmusok meghatározása alapján megállapítom, hogy a terhelőerő és a csúszási sebesség változásával a domináns kopási módok és kopási mechanizmusok jellegzetesen megváltoznak. HIP minták esetén a tribokémiai kopás legtöbb esetben az abrazív és fáradásos kopással keverten jelentkezik, uralkodóvá csak nagyobb terhelési sebességek esetén válik. Az SPS gyártású kompozit minták esetén a vizsgált esetek többségében intenzív tribokémiai kopás lép fel, amely nagyobb terhelések esetén az erős kopás tartományára jellemző mechanikai kopással egészül ki. A kopási mechanizmusok tekintetében HIP minták esetén a tribofilm képlékeny deformációja és delaminációja mellett a tribofilm fáradásos tönkremenetele a jellemző, nagy terheléseknél pedig interkrisztallin törés és olvadás lép fel, míg az SPS minták esetén a tribofilm képződése és képlékeny alakváltozása dominál, ami az SPS gyártású kompozit minták jelentősen kedvezőbb kopási viselkedését igazolja (7) (8) (13) (15) (16).**
- T5. A szakirodalomban található, Si_3N_4 kerámiákra kidolgozott kopási modellek felhasználásával – figyelembe véve a vizsgált kerámiák esetén az általam kidolgozott kopási térképek segítségével feltárt domináns kopástípusokat és mechanizmusokat – **egy fél-fizikai kopási modellt állítottam fel, amely egyidejűleg képes figyelembe venni a mechanikai kopás és a tribokémiai kopás okozta kopási anyagvesztéseket.**
- A (19) összefüggés szerinti modell $v = 100 \text{ mm/s}$ csúszási sebességig terhelertől függetlenül jól közelíti a kopási kísérletek során meghatározott kikopott térfogat értékét (5) (7) (12) (13).**

6. A KUTATÓMUNKA SORÁN KAPOTT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kopási károsodások elemzése napjainkban kiemelkedő jelentőségű mérnöki feladat, mivel szinte minden műszaki berendezésben találhatók súrlódó elemek. Kopásálló alkalmazásokban (pl. gépkocsi turbófeltöltőjének forgórésze, gázturbina alkatrészek, csapágyak) elterjedten használják az általam is vizsgált Si_3N_4 műszaki kerámiát, mivel kiváló mechanikai, termikus és tribológiai tulajdonságkombinációval rendelkezik. A Si_3N_4 alkatrészek kopásállóságának további növelése jelentős gazdasági megtakarításokkal járhat, ezért számos ipari és kutatási program célkitűzése hazánkban és világszerte egyaránt.

Doktori munkám témája két különböző gyártástechnológiával előállított – azaz meleg izosztatikusan sajtolt (HIP) és szikraplazma szinterelt (SPS) – 1 és 3 m%-nyi többrétegű grafénnal (MLG) adalékolt Si_3N_4 nanokompozitok tribológiai viselkedésének elméleti és kísérleti vizsgálata.

Az értekezés elméleti részében áttekintem a mátrixanyag (Si_3N_4) és az erősítőanyag (grafén) sajátosságait, a vizsgált anyag gyártástechnológiáját, a műszaki kerámiák kopási viselkedését és a tribológia viselkedésének jellemzésére szolgáló különféle vizsgálatokat.

Az értekezés kísérleti fejezetének fő témája a vizsgált kerámia kompozitok tribológiai viselkedésének jellemzése. A vizsgálatokat ball-on-disc típusú kopásvizsgáló berendezésen végeztem el, mindkét anyagminőségen többféle terhelési paraméter kombinációval, kenőanyag nélkül, szobahőmérsékleten. A vizsgált széles terhelési spektrumban a HIP gyártási eljárással készült mintákon a tanulmányozott háromféle anyagösszetételt figyelembe véve összesen 54 triborendszerben, míg a jóval korlátozottabb darabszámú SPS gyártású minták esetén összesen 28 triborendszerben végeztem kopásvizsgálatokat, amelyekhez a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetének CETR-UNMT1 multifunkciós felületvizsgáló berendezését használtam. A tribológiai vizsgálatok mellett számos kiegészítővizsgálatot végeztem, például meghatároztam a minták keménységét, Vickers-lenyomatos törési szívósságát, maradó feszültségét, sűrűségét és hővezetési tényezőjét.

A vizsgált anyagok kopási viselkedését részben számszerű jellemzőkkel – súrlódási együttható, kikopott térfogat, fajlagos kopási sebesség, dimenzió nélküli kopási tényező – részben a károsodott felület mikroszkópi elemzésére alapozott morfológiai sajátosságok és az egyes terhelési tartományokban uralkodó kopástípusok és mechanizmusok meghatározásával jellemeztem.

A keramikus anyagokra a szakirodalomban fellelhető különböző kopási modellek áttekintésével és kritikai értékelésével, valamint a kísérleti eredmények birtokában

megalkottam egy olyan fél-fizikai mechanikai/tribokémiai modellt, amely egyidejűleg képes figyelembe venni a mechanikai kopás és a tribokémiai kopás okozta kopási anyagvesztést és jó közelítéssel becsli a kikopott térfogat értékét a vizsgált HIP és SPS gyártású monolitikus és MLG adalékolású kompozit kerámiákra terhelőerőtől függetlenül 100 mm/s csúszási sebességig. E fölötti csúszási sebesség tartományban ($v = 100\text{--}200\text{ m/s}$ esetén) pedig $F \leq 40\text{ N}$ terhelőerők esetén, azaz a kisebb terhelések tartományában. Mivel ez a tartomány képviseli a vizsgált kerámia leggyakoribb üzemi terheléseit, ezért a modell a gyakorlati alkalmazásokban hasznos eszköz lehet az üzemi terhelések optimalizálása szempontjából.

Az disszertációban bemutatott eredmények lehetőséget adnak vizsgált keramikus anyagok alkalmazási körének kibővítésére, továbbá alapul szolgálhatnak a további anyagtechnológiai fejlesztésekhez. A kopási térképek az anyagkiválasztásban nyújthatnak hasznos segítséget. A kopási jellemzők és az anyagtulajdonságok közötti kapcsolatok meghatározásával kidolgozott modell pedig a kopási károsodás egyszerű gyors prognosztizálását teszi lehetővé hasonló összetételű és gyártási eljárással készült keramikus anyagok és kompozitok esetén.

7. SUMMARY

Nowadays the wear damage analysis is a high importance engineering task, since frictional elements found in almost every engineering equipment. Si_3N_4 engineering ceramics that are the subject of my research work, are commonly used in wear resistant applications (e. g. as rotor of cars turbo charger, gas turbine parts, bearing) due to their excellent combination of the mechanical and thermal properties and tribological properties. Continuous improvement of the wear resistance of Si_3N_4 parts has a significant economic benefit, therefore it is one of the main objectives of many industrial and research programmes both in our country and worldwide.

In my PhD thesis I put the focus on the tribological behaviour of monolithic Si_3N_4 ceramics and their nanocomposites containing 1 and 3 m% multi-layer graphene (MLG) produced by two different sintering technologies: hot isostatic pressing (HIP) and spark plasma sintering (SPS). My research work involved theoretical and experimental aspects, as well.

In the theoretical part of my thesis I provided a comprehensive literature overview on the properties of the matrix material (Si_3N_4) and the applied reinforcing material (graphene), as well as on the processing methods, furthermore on the wear behaviour of the ceramics and test methods generally applied for the characterization of their tribological behaviour.

The main objective of the experimental chapter of the dissertation is the complex tribological characterization of the investigated Si_3N_4 ceramics. The wear tests were carried out using the ball-on-disc method without any lubricant, at room temperature, applying a wide range of loading parameters ($F = 10 - 80 \text{ N}$, $v = 10 - 200 \text{ mm/s}$), using a CETR-UNMT-1 multifunctional surface testing equipment at the University of Miskolc, Institute of Materials Science and Technology. The number of the investigated tribosystems in the applied wide range of loading parameter were as follows: in case of ceramics, produced by hot isostatic pressing a total of 54 different tribosystems (F - v pairing), while in case of spark plasma sintered ceramics due to a much more limited number of specimens altogether as much as 28 tribosystems has been investigated regarding the 3 different compositions, i.e. monolithic ceramics and composites with 1% and 3% MLG additive. Besides the wear tests several additional measurements were also carried out: preceding the wear tests I determined the density, phase composition, microstructure, hardness, Vickers indentation fracture toughness, surface geometry characteristics, thermal conductivity, elastic modulus and subsurface residual stresses of the samples. Having the wear test results I determined numerous quantitative and qualitative characteristics of the wear damage.

I characterised the wear behaviour of the examined materials on the one hand by quantitative characteristics – friction coefficient, worn volume, specific wear rate, dimensionless wear coefficient –, on the other hand by determining the morphological features of the damaged surface, and with the dominant wear types and mechanisms in the given loading ranges (based on the microscopy evaluation).

Based on a comprehensive literature overview and critical evaluation about the currently existing wear models presented in the theoretical chapter of the thesis I have created a mechanical/tribochemical model, which provides a good approximation of the experimentally obtained wear volume, caused by the combined mechanical and tribochemical wear processes. The model provides a good approximation of the experimentally obtained worn volume for HIP and SPS produced monolithic and composite ceramics up to 100 mm/s sliding speed, regardless the applied normal load. For higher sliding rates ($v = 100 - 150$ mm/s) the validity of the model is $F \leq 40$ N, i.e. slightly narrows. Since this loading range represents the most usual operational conditions for ceramics in tribological applications, the model provides a useful mean in practical applications for optimizing the applied tribological loadings.

The results presented in my PhD thesis give the opportunity to widen the application area of the tested ceramics and serve as a basis for the further material technology developments. The wear maps could help in the material selection processes and during defining the optimal loading range of a given tribological material. The model – developed by determining the correlation between the wear characteristics and the material properties – makes possible a quick, simple and quantitative estimation of the wear damage.

8. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSÁNAK ÉS A KUTATÁSI TÉMA TOVÁBBFEJLESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

1. A disszertációban bemutatott felületelőkészítési módszerek alkalmasak nagy keménységű műszaki kerámiák szabvány által előírt felületi finomságának biztosítására.
2. A vizsgált anyagokra megalkotott két- és háromdimenziós kopási térképek nagy információtartalmú, hasznos segédletként alkalmazhatók anyagfejlesztési- és kiválasztási folyamatokban, valamint segítségükkel megválasztható a vizsgált anyag optimális terhelési tartománya.
3. A meghatározott kopási mechanizmusok eredményesen alkalmazhatók a kopási károsodás modellezésekor, valamint hiánypótló eszközök lehetnek a vizsgált anyag tönkremeneteli folyamatainak megértésében.
4. A javasolt modell segítségével jól becsülhető a vizsgált műszaki kerámia minták kikopott térfogat értéke költséges és hosszadalmas kopásvizsgálatok nélkül.
5. A kutatások jövőbeli iránya a kopási viselkedés minél széleskörűbb feltárására irányul:
 - A vizsgálati paraméterek további bővítése, mind köztes pontok felvétele, mind a terhelőerő és a csúszási sebesség tartományának kiszélesítésével, mind a kisebb, mind a nagyobb terhelések irányában;
 - A környezeti körülmények (páratartalom és hőmérséklet) befolyásoló hatásának vizsgálata;
 - A kopási törmelékek elemzése;
 - További anyagszerkezeti vizsgálatok;
 - A kopási modell továbbfejlesztése.

Miskolc, 2019. 05. 03.

Németh Alexandra Kitti

okleveles gépészmérnök

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőmnek. Dr. Marosné Dr. Berkes Máriának a sokéves témavezetői munkájáért, szakmai irányításáért, tanácsaiért, támogatásáért, építő kritikai megjegyzéseiért, valamint a több éves aktív közös publikációs tevékenységért.

Köszönettel tartozom Dr. Tisza Miklós Professzor Úrnak, aki tanszékvezetőként és a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola vezetőjeként szakmai tanácsaival és pályázati források biztosításával is aktívan segítette a munkámat.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Lukács János Professzor Úrnak a szakmai támogatásért, valamint a tribológiai vizsgálatok megvalósításához szükséges infrastruktúra biztosításáért.

Köszönöm a segítséget Dr. Nagy Gyula és Dr. Koncsik Zsuzsanna kollégáimnak, akik számos hasznos tanáccsal és szakmai észrevétellel segítették munkámat.

Köszönettel tartozom továbbá:

- Az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet minden tagjának a szakmai és baráti támogatásért;
- Az SPS technológiával készült próbatestekért és a szakmai konzultációért: Dr. Károly Zoltánnak és Dr. Bódis Eszternek (MTA, Anyag- és Környezetkémiai Intézet)
- A HIP technológiával készült próbatestekért és a szakmai konzultációért: Dr. Balázs Csabának (MTA, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet Kerámia és Kompozitok Osztály), Dr. Tapasztó Orsolyának (MTA, Energiatechnológiai Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet) és Dr. Balázs Katalinnak (MTA, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Természettudományi Kutatóközpont)
- A szakmai konzultációért és a hasznos tanácsokért: Dr. Jan Dusza, Frank Lofaj és Pavol Hvizdos kutatóknak (Szlovák Tudományos Akadémia, Anyagtudományi Kutatóintézete, Kassa, Szlovákia)
- A SEM felvételekért: Prof. Dr. Roósz Andrásnak és Kovács Árpádnak (ME, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet) és a BAY-Nano Intézet munkatársainak;
- A kopási térképek szerkesztésében nyújtott segítségért: László Noémi kolléganőmnek és Dr. Hegedűs Györgynek (ME, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke);

- Az XRD spektrumok felvételében és kiértékelésében nyújtott segítségért: Prof. Dr. Mertinger Valériának és Dr. Nagy Erzsébetnek (ME, Fémtani Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet)
- A hővezetési tényező meghatározásában nyújtott segítségért: Dr. Kocserha Istvánnak és Dr. Simon Adreának (ME, Kerámia és Polimermérnöki Intézet)
- A kerámiák műszerezett keménységmérési vizsgálataiért Rózsahegyi Péternek, Jónás Szabolcsnak, (BAY-LOGI) Dr. Weltsch Zoltánnak, Trencsényi Balázsnak (BME, Gépjárművek és Járműgyártási Tanszék) és Dr. Mucsi Andrásnak (Óbudai Egyetem, Anyag- és Gyártástudományi Intézet);
- Az előkísérletek során a felületelőkészítésért, a tribológiai vizsgálatokért, és szakmai konzultációért a Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Intézet munkatársainak;
- A mérési adatok feldolgozásában nyújtott technikai segítségért: Dr. Maros Zsoltnak, Dr. Felhő Csabának (ME, Gépgyártástudományi Intézet), Nagy Nóra kolléganőmnek és Vass Zoltánnak (BorsodChem Zrt.);
- A felületelőkészítésben nyújtott segítségért: Csurilláné Balogh Ágnes kolléganőmnek, Márkus Zoltánnénak (ME, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet), Dr. Zajzon Norbertnek és Debus Déliának (ME, Ásványtani-Földtani Intézet);
- A próbatestek és szerszámbefogók elkészítésében nyújtott segítségért: Dr. Gál Gaszton és Kecskés-Kristóf Sándor kollégáimnak.

És végül, de nem utolsó sorban köszönöm családom minden tagjának, páromnak és barátaimnak, hogy doktori képzésem és munkám során mellettem álltak és mindenben támogattak.

Az ismertetett kutatómunka az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának, valamint az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, valamint szakmailag kapcsolódik a Járműipari Anyagfejlesztések c. TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekthez.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN RELEVÁNS SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

Konferencia előadások

- (1) Németh, A. K.: *Si₃N₄/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, Országos Tudományos Diákköri Konferencia Szekció, Anyagtudomány - Fémteni, fizikai jellemzők meghatározása, Szekció: II. hely Budapest, Óbudai Egyetem, 2015. 3. 25-27.
- (2) Németh, A. K.: *Grafénnal adalékolt HIP és SPS gyártású szilícium-nitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2015. 11. 18-19.
- (3) Németh, A. K.: *Si₃N₄/MLG kerámia nanokompozitok ball-on-disc vizsgálati tapasztalatai különös tekintettel a mikrogeometria és súrlódás kérdéseire*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2016. 11. 15.
- (4) Németh, A. K., Marosné Berkes, M., Felhő, Cs., Benke, M.: *Monolitikus és grafénnal adalékolt Si₃N₄ kerámiák felület előkészítésének hatása a mikrogeometriai jellemzőkre és a feszültségi réteg maradó feszültségi állapotára*, Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, "G" szekció, Anyagtudomány-Anyagvizsgálat, I. Miskolci Egyetem 2016. 5. 25.
- (5) Németh, A. K.: *Kopási térképek és modellek alkalmazása Si₃N₄/MLG nanokompozitok tribológiai viselkedésének jellemzésére*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2017. november 16.
- (6) Németh, A. K., Maros Berkes, M.: *Wear maps of Si₃N₄/MLG nanocomposites for self-mated and unlike paired tribosystems under ball-on-disc sliding condition*, Fractography of Advanced Ceramics (poszter előadás), Smolenice, Szlovákia, 2016. 10. 9-12.
- (7) Németh, A. K., Maros Berkes, M.: *Wear maps and models in tribological damage analysis of Si₃N₄ ceramics with special attention to tribochemical wear*, MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 2017. 4. 20-21.
- (8) Németh, A. K., Maros, B. M., László, N.: *Wear maps of SPS produced Si₃N₄/MLG nanocomposites*, XXXII. microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, 5-6 September 2018.

Tudományos közlemények konferencia kiadványban

- (9) Németh, A. K.: *Si₃N₄/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, Diáktudomány VIII. kötet, Miskolci Egyetem 2015, pp. 117-123. ISSN 2062-07-21 lektorált
- (10) Németh, A. K.: *Grafénnal adalékolt HIP és SPS gyártású szilícium-nitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2016, Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekció Kiadványa, (ed: Kovács László) pp. 47-54. ISBN 978-963-358-109-4
- (11) Németh, A. K.: *Monolitikus és grafénnal adalékolt Si₃N₄ kerámiák felületelőkészítésének gyakorlati tapasztalatai*, Doktoranduszok Fóruma konferencia kiadványa, 2017, pp. 65-72. ISBN 978-963-358-127-8
- (12) Németh, A. K.: *Kopási modellek alkalmazása Si₃N₄/MLG nanokompozitok tribológiai viselkedésének jellemzésére*, Doktoranduszok Fóruma 2017: GÉIK szekciókiadványa, 2018 pp. 69-75. ISBN 978-963-358-166-7

- (13) Németh, A. K., Marosné, B. M.: *Wear maps and models in tribological damage analysis of Si₃N₄ ceramics with special attention to tribochemical wear*, microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, Hungary, 20-21 April 2017 ISBN 978-963-358-132-2 *lektorált*

Folyóiratcikkek

- (14) Marosné Berkes, M., László, N., Németh, A. K.: *Műszaki kerámiák alkalmazása fémek kenőanyagmentes alakító eljárásainak szerszámanyagaként*, Multidiszciplináris tudományok, 6. kötet. 1 sz. 2016, Miskolci Egyetem Közleményei, pp. 95-104. ISSN 2062-9737
- (15) Maros, B. M., Németh, A. K., Károly, Z. Bódis, E., Maros, Zs., Tapasztó, O., Balázs, K.: *Tribological characterization of silicon nitride/multilayer graphene nanocomposites produced by HIP and SPS technology*, Tribology International, Volume 93, Part A, 2016, pp. 269–281 doi:10.1016/j.triboint.2015.08.041; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X15003837> *lektorált IF: 2,903 (2016)*
- (16) Maros Berkes, M., Németh, A. K.: *Wear maps of HIP sintered Si₃N₄/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions*, Journal of the European Ceramic Society Volume 37, 2017, Issue 14, pp. 4357-4369.

Könyvrészlet

- (17) Beleznai, R., Belina, K., Dogossy, G., Fülep, D., Hargitai, H., Hatos, I., Kozma, I., Kovács, J. G., László, I., Marosné Berkes, M., Németh, A. K.: *Fejezetek nemfémek anyagok legújabb járműipari kutatási területeiből*, 2015, Széchenyi István Egyetem, Győr, ISBN 978-615-5391-36-1, pp. 142-212

Tudományos Diákköri dolgozatok és előadások

- (18) Németh, A. K.: *Grafénnel adalékolt Si₃N₄ nanokompozitok kopási viselkedésének jellemzése*, Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolci Egyetem, Anyagtudomány, Gépgyártástudomány és Gépterveztudomány szekció, 2013, nov. 22. pp. 1-55.
- (19) Németh, A. K.: *Si₃N₄/MLG kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, Tudományos Diákköri Konferencia, Miskolci Egyetem, 2014. november 18. Anyagszerkeztani és Anyagtudományi Szekció, pp. 1-84.

Diplomaterv

- (20) Németh, A. K.: *Grafénnel adalékolt szilíciumnitrid nanokompozitok tribológiai vizsgálata*, Diplomaterv, Gépészmérnök MSc, Miskolci Egyetem, 2015. pp. 1-120

Kutatási jelentések

- (21) Marosné Berkes, M., Németh, A. K.: *A szikraplazma szinterelés sajátosságai és alkalmazása kerámiák előállításakor*, p1-30. 2013
- (22) Marosné Berkes, M., Maros, Zs., Németh, A. K., Vass, Zs., Szilágyiné Bíró, A.: *Kerámia nanokompozitok mikro-makro szintű integrált tribológiai vizsgálata*, p1-35, 2014.
- (23) Marosné Berkes, M., Maros, Zs., Németh, A. K., Vass, Zs., Szilágyiné Bíró, A.: *Nanofázissal erősített szilíciumnitrid kerámia kompozitok komplex vizsgálata*, p.1-80 + mellékletek, 2014.

MELLÉKLETEK

1. melléklet: A vizsgálati próbatestek keménysége
2. melléklet: A keménységértékek matematikai statisztikai elemzése
3. melléklet: A ball-on-disc típusú kopásvizsgálatok jegyzőkönyve
4. melléklet: Súrlódási együtttható-csúszási úthossz diagramok
5. melléklet: A kikopott keresztmetszet és a származtatott kopást jellemző mérőszámok számszerű értékei
6. melléklet: Pásztázó elektronmikroszkópi felvételek a tárcsák kopásnyomairól
7. melléklet: Optikai mikroszkópi felvételek a tárcsák és a golyók kopásnyomairól
8. melléklet: A mért és a különböző modellekkel számított kikopott térfogat értékek

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Marosné Berkes M., Koncsik Zs.: *Nemfém anyagok a járműiparban: Motivációk, fejlesztési trendek, következmények*, Miskolc, 2013
- [2] Riley, F. L.: *Silicon Nitride and Related Materials*, Journal of the American Ceramic Society 83, Vol. 2, 2000.
- [3] Hamano, Y.: *Progress in structural applications of silicon nitride*, in Silicon-Based Structural Ceramics, edited by: B.W. Sheldon, S.C. Danforth, The American Ceramic Society, USA, ISBN 0-944904-76-9, 1994.
- [4] Berroth, K.: *Silicon Nitride Ceramics for Product and process Innovations*, Advances in Science and Technology Vol. 65, 2010. pp. 70-77.
- [5] Vajdovich, I., Tóth, Zs.: *A cirkónium-oxid biokerámiáról a dentális implantáció kapcsán*, Implantológia, 2006; 3(1), pp. 18-22.
- [6] Totten, G. E.: *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*, 2017, pp. 112-120.
- [7] Sajgalik, P., Hnatko, M., Lofaj, F., Hvizdos, P., Dusza, J., Warbichler, P., Hofer, F., Riedel, R., Lecomte, E., Hoffmann, M.J.: *SiC/Si₃N₄ nano/micro-composite - processing, RT and HT mechanical properties*, Journal of the European Ceramic Society 20, 2000, pp. 453- 462.
- [8] Kovalcikova, A., Balázs, Cs., Dusza, J., Tapasztó, O.: *Mechanical properties and electrical conductivity in a carbon nanotube reinforced silicon nitride composite*, Ceramics International 38, 2012. pp. 527–533,
- [9] Balázs, C., Kónya, Z., Wéber, F., Biró, L. P., Arató, P.: *Preparation and characterization of carbon nanotube reinforced silicon nitride composites*, Materials Science and Engineering: C, 23(6-8), 2003, pp. 1133-1137.
- [10] Koncsik, Z., Maros, M. B., Kuzsella, L., Kovács, A.: *Wear mechanisms maps of Si₃N₄/carbon nanotube nanocomposites*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 123, No. 1, p. 012033, 2016, IOP Publishing.
- [11] Koncsik, Zs., Marosné Berkes, M., Kuzsella, L.: *Tribological characterisation of carbon nanotube added Si₃N₄ ceramic composites*, 2015, Forrás: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop422b/2010-0008_kotet33_01_koncsik_zs_maros_b_m_kuzsella_l_tribological_characterisation/01_koncsik_zs_maros_b_m_kuzsella_l-tribological_characterisa_1_1.html, Letöltés ideje: 2019. 03. 11.
- [12] Kvetková, Á, Lenka, et al. *Fracture toughness and toughening mechanisms in graphene platelet reinforced Si₃N₄ composites*, Scripta Materialia, 66.10. 2012, pp. 793-796.
- [13] Hvizdos, P., Dusza, J., Balázs, Cs.: *Tribological properties of Si₃N₄-graphene nanocomposites*, Journal of the European Ceramic Society, 33.12. 2013, pp. 2359-2364.
- [14] Balko, J., Hvizdoš, P., Dusza, J., Balázs, C. Gamcová, J.: *Wear damage of Si₃N₄-graphene nanocomposites at room and elevated temperatures*, Journal of the European Ceramic Society, 34(14), 2014, pp. 3309-3317.
- [15] Biró, L. P.: *Nanovilág: A szén nanocsőtől a kém lepkeszárnyig*, Fizikai Szemle, 2003/11. pp. 385-396.
- [16] Riedel, R.: *Handbook of Hard Ceramic Materials*, 2008, WILEY-VCH Verlag GmbH, ISBN: 9783527299720
- [17] Geim, A. K., Novoselov, K. S.: *The rise of graphene*, Nature Materials 6, 2007, doi:10.1038/nmat1849 pp. 183-191.
- [18] *Graphene (definition)*, Cambridge Dictionary, Forrás: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/graphene>, Letöltés ideje: 2018. 07. 31.
- [19] Lee, Ch., Wei, X., Kysar, J. W.: *Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene*, J. Hone, Science 321, 2008, pp. 385.
- [20] Balandin, A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., Lau, C. *Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene*, Nano Lett., 8(3) 2008, pp. 902-907.

- [21] Geim, A. K., Novoselov, K. S.: *The rise of graphene*, In Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals, 2010, pp. 11-19.
- [22] Son, Y. W., Cohen, M. L., Louie, S. G.: *Half-metallic graphene nanoribbons*, Nature, 444(7117), 2006, p. 347.
- [23] Wang, X., Li, X., Zhang, L., Yoon, Y., Weber, P. K., Wang, H., Dai, H.: *N-doping of graphene through electrothermal reactions with ammonia*, Science, 324(5928), 2009, pp. 768-771.
- [24] Zhang, Y., Tang, T. T., Girit, C., Hao, Z., Martin, M. C., Zettl, A., Wang, F.: *Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene*, Nature, 459(7248), 2009, p. 820.
- [25] Wang, X., Zhi, L., Müllen, K.: *Transparent, conductive graphene electrodes for dye-sensitized solar cell*, Nano letters, 8(1), 2008, pp. 323-327.
- [26] Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Ruoff, R. S.: *Graphene-based composite materials*. nature, 442(7100), p. 282.
- [27] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov and A. K. Geim, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 102, 10451, 2005
- [28] Takamura, T., Endo, K., Fu, L., Wu, Y., Lee, K. J., Matsumoto, T.: *Identification of nano-sized holes by TEM in the graphene layer of graphite and the high rate discharge capability of Li-ion battery anodes*, Electrochimica Acta, 53(3), 2007, pp. 1055-1061.
- [29] Hu, W., Peng, C., Luo, W., Lv, M., Li, X., Li, D., Fan, C.: *Graphene-based antibacterial paper*, ACS nano, 4(7), 2010, 4317-4323.
- [30] *The structure of monolayer and multilayer graphene, carbon nanotubes, and buckyballs*, Forrás: <http://www.nature.com/nmat/journal/v14/n3/full/nmat4170.html>, Letöltés ideje: 2017. 12. 24.
- [31] Kun, P., Wéber, F., Balázs, C.: *Preparation and examination of multilayer graphene nanosheets by exfoliation of graphite in high efficient attritor mill*. Central European Journal of Chemistry, 9(1), 2011, pp. 47-51.
- [32] *A meleg izosztatikus sajtolás elvi vázlata*, <http://www.kobelco.co.jp/english/products/ip/technology/hip.html> Letöltés ideje: 2019. 12. 24.
- [33] Perera, D. S., Tokita, M., Moricca, S.: *Comparative Study of Fabrication of Si₃N₄/SiC Composites by Spark Plasma Sintering and Hot Isostatic Pressing*, Journal of the European Ceramic Society, Vol.18, Issue 4, 1998, pp. 401-404.
- [34] Grasso, S., Saunders, T., Mckinnon, R., Castle, E., Tatarko, P., Du, B., Reece, M.: *Spark plasma sintering in a flash*, American Ceramic Society Bulletin, 2016
- [35] Tapasztó, O., Kun, P., Wéber, F., Gergely, G., Balázs, K., Pfeifer, J., Arató, P., Kidari, A., Hampshire, S., Balázs, C.: *Silicon nitride based nanocomposites produced by two different sintering methods*, Ceramics International 37, 2011, pp. 3457-3461
- [36] Inoue, K.: *Electric Discharge Heat Treatment of Metals in Electrolytes*, US Patent No. 3, 1965, pp. 188-245.
- [37] Tokita, M.: *Mechanism of spark plasma sintering*, Sumitomo Coal Mining Company Ltd., pp.1-13.
- [38] Belmonte, M., González-Julián, J., Miranzo, P., Osendi, M.I.: *Spark plasma sintering: A powerful tool to develop new silicon nitride-based materials*, Volume 30, Issue 14, October 2010, pp. 2937-2946 Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.025> Letöltés ideje: 2017. 01. 10.
- [39] Groza J., Zavaliangos A.: *Sintering activation by external electrical field*, Materials Science and Engineering A, Vol. 287, Issue 2, 2000, pp. 171-177.
- [40] Tomino, H., Watanabe, H., Kondo, Y.: *Electric current path and temperature distribution for spark sintering*, Funtai Oyobi Fumatsu Yakin/Journal Japan Soc. Powder Powder Metall., Vol. 44, no. 10, 1997. pp. 974-979.
- [41] Xie, G., Ohashi, O., Yoshioka, T., Song, M., Mitsuishi, K., Yasuda, H., Noda, T.: *Effect of interface behavior between particles on properties of pure Al powder compacts by spark plasma sintering*, Materials transactions, 42(9), 2001, pp. 1846-1849.
- [42] Hulbert, D. M., Anders, A., Andersson, J., Lavernia, E. J., Mukherjee, A. K.: *A discussion on the absence of plasma in spark plasma sintering*, Scr. Mater., vol. 60, no. 10, 2009. pp. 835-838.
- [43] Suárez, M., Fernández, A., Menéndez, J. L., Torrecillas, R., Kessel, H. U., Hennicke, J., Kirchner, R., Kessel, T.: *Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New*

- Generation of Materials*, Sintering Applications, Chapter 13., Ed. Burcu Ertuğ, 2013, . ISBN 978-953-51-0974-7 pp. 319-342 DOI: 10.5772/53706,
- [44] Aalund, R.: *Spark Plasma Sintering, Thermal Technology LLC*, Elgin, Ill. Forrás: <https://www.thermaltechnology.com/pdf/SPS%20Reprint%20may08.pdf> Letöltés ideje: 2014. 01. 10.
- [45] Tiwari D., Basu B., Biswas K.: *Simulation of thermal and electrical field evolution during spark plasma sintering*, *Ceramics International*, Vol. 35, Issue 2, 2009, pp. 699-708.
- [46] You, G., Bi, J., Chen, Y., Yin, C., Wang, C. A.: *Effect of diatomite additive on the mechanical and dielectric properties of porous SiO₂-Si₃N₄ composite ceramics*, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 31(3), 2016, pp. 528-532
- [47] Ye, F., Zhang, L., Yin, X., Zuo, X., Liu, Y., Cheng, L.: *Fabrication of Si₃N₄-SiBC composite ceramic and its excellent electromagnetic properties*, *Journal of the European Ceramic Society*, 32(16), 202, pp. 4025-4029.
- [48] *Crystal structures of Si₃N₄*, *Hardmaterials.de*. Forrás: http://www.hardmaterials.de/html/alpha-si3n4_beta-si3n4.html, Letöltés ideje: 2017. 12. 24.
- [49] Nygren, M., Shen, Z.: *Novel Assemblies via Spark Plasma Sintering*, *Silic. Ind. Spec.* 69, 2004, pp. 211-218.
- [50] Tapasztó, O.: *Szén nanoszerkezetekkel adalékolt szilícium-nitrid nanokompozitok*, PhD értekezés, Budapest, 2012. pp. 1-89.
- [51] Bakos F.: *Idegen szavak és kifejezések szótára*, *Akadémiai kiadó*, 1984. ISBN 9630538415 pp. 1-949.
- [52] Valasek I.: *Tribológiai kézikönyv*, *Tribotechnika kft*, 1996, ISBN 0669001325927 pp. 1-480.
- [53] Marosné Berkes, Mária: *Anyagtudomány, GEMTT0001M, elektronikus előadásanyag*, 2011, Miskolci Egyetem, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet, e-learning portál, <http://edu.uni-miskolc.hu/moodle/course/view.php?id=63> Letöltés ideje: 2016. 12. 01.
- [54] Stachowiak W., Gridon: *Wear Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons Ltd. 2005, ISBN 9780470016282 pp. 1-480.
- [55] Stachowiak W., Gridon: *Wear Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons Ltd. 2005, ISBN 9780470016282 pp. 1-480.
- [56] Kuzsella Lászlóné Koncsik, Zs.: *Si₃N₄ műszaki kerámiák tribológiai és mechanikai vizsgálata*, PhD értekezés, Sályi István Gépészet-tudományok Doktori Iskola, Miskolc, 2014, 10.14750/ME.2014.001. pp. 1-122.
- [57] Kato, K., Adachi, K.: *Wear Mechanisms*; in *Modern Tribology Handbook*, Vol. 1. Principles of Tribology, ed.: Bushan, B., CRC Press LLC, 2001. ISBN 0-8493-8403-6 pp. 273-300.
- [58] Zsoldos, I. (szerk): *Fejezetek nemfém anyagok legújabb járműipari kutatási területeiből*, Győr, 2015, Széchenyi István Egyetem, ISBN 978-615-5391-36-1 pp. 142-212.
- [59] *ASM Handbook: Metals Properties and Performance Collection*, 1998 ASM International
- [60] Fisher, T E., Tomizawa, H.: *Wear of Materials*, 1985, ASME, 1985, pp. 22-32.
- [61] Koncsik, Zs.: *Si₃N₄ nano-kompozitok tribológiai vizsgálata*, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc, diplomamunka, 2007.
- [62] Cameron, A.: *Principles of Lubrication*, Longmans, London, 1966.
- [63] Nishida, S. I.: *Failure analysis in engineering application*, Butterworth Heinemann, Oxford, 1986.
- [64] Jahanmir, S., Deckman, D. E.: *Wear Test Methodology for Lubricated Ceramics*, DOE-ECUT Tribology Program, US Department of Energy, Report No. TRIB-ECUT 88-1, 1988. pp. 163-172.
- [65] Warsaw, C. K., Furey, M. J., Ritter, A. L., Molina, G. J.: *Triboemission as a basic part of the boundary friction regime: a review*, *Lubrication Science*, 14(2), 2002, pp. 223-254.
- [66] Kim, M., Langford, S. C., Dickinson, J. T.: *Electron and photon emission accompanying the abrasion of MgO with diamond*, *Tribology Letters*, Vol. 1., 1995, pp. 147-157.
- [67] Molina, G. J., Furey, M. J., Kajdas, C.: *Proc. 11th Nordic Symposium on Tribology Nordtrib 2004*, Tromsø, Harstad, Hurtigruten, Norway, 2004, p. 249.
- [68] Kajdas, C. K.: *Importance of the Triboemission Process for Tribochemical Reaction*, *Tribology International* 2005, Vol. 38. Issue 3. pp. 337-353. DOI:10.1016/j.triboint.2004.08.017
- [69] Kajdas, C.: *ITC Proceedings*, Yokohama, Satellite Forum on Tribochemistry Tokyo 28. Oct 1995, p. 31.

- [70] Kajdac, C. K.: *Tribochemistry of Selected Materials*, Solid State Phenomane, Trans. Tech. Publ. Vol. 113.. 2006, pp. 339-347.
- [71] Mizuhara, K., Hsu, S. M.: *Wear Particles*, D. Dowson et. al. (eds). Elsevier Science Publishers B. V., 1992, p. 323.
- [72] Minewitsch, A. A.: *Some Developments In Triboanalysis Of Coated Machine Components*, Tribology in industry, Volume 33, No. 4, 2011. pp. 153-158.
- [73] ISO 20808:2004: *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics: Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method*, 2004.
- [74] ISO 4287: *Geometrical Product Specifications (GPS) Surface texture: Profile method; Terms, definitions, and surface texture parameters*, 1997.
- [75] Huq, M. Z., Celis, Jean-Pierre. *Reproducibility of friction and wear results in ball-on-disc unidirectional sliding tests of TiN-alumina pairings*, Wear, 1997, 212.2. pp. 151-159.
- [76] Cunningham, J. M., Marirrodridge, G. C.: *A practical assessment of data repeatability and reproducibility in tribometer tests for space applications*. In: 6th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. 1995. p. 35.
- [77] Fischer, T. E. Tomizawa, H.: *Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction wear of silicon nitride*, Wear, 105, 1985, pp. 29-45.
- [78] Thompson, J. M., Thompson, M. K.: *A Proposal for the Calculation of Wear*, In Proceedings Of The 2006 International Ansys Users Conference & Exhibition, Pittsburgh, Pa., 2006
- [79] Maros, Zs., Felhö, CS., Vass, Z., Maros B., M.: *Application of 2D-3D Surface Geometrical Features in Tribological Analysis of Ceramics and Ceramic Layers*, Materials Science Forum, 2015, Vol. 812 pp. 435-440, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.812.435
- [80] *FELMI-ZFE céghonlap, SEM leírás*, <http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/felmi/research/Scanning%20Electron%20Microscopy/Principles%20of%20SEM> Letöltés ideje: 2017. 12. 24.
- [81] Marosné Berkes, M., Szilágyiné Biró, A., Kerekes, G., Koncsik, Zs.: *Mikroszkópos vizsgálatok*, gyakorlati segédlet, Miskolci Egyetem, 2013.
- [82] *The principles of SEM and Microanalysis*, FELMI-ZFE <http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/felmi/research/Scanning%20Electron%20Microscopy/Principles%20of%20SEM> Letöltés ideje: 2017. 12. 24.
- [83] Marosné Berkes, M., Kocsisné Baán, M.: *Nemfémek anyagok mechanikai anyagvizsgálatának tapasztalatai*, Anyagok Világa elektronikus folyóirat, ISSN: 1586-0140, III. évfolyam, 1. szám 2002. szeptember, p. 23.
- [84] Marosné Berkes, M.: *Si₃N₄ kerámiák tribológiai viselkedésének jellemzése*, szóbeli előadás, OATK 2013. október 13-15. Balatonkenese, szóbeli előadás
- [85] Quinn, G. D., Bradt, R. C.: *On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test*, Journal of the American Ceramic Society, 90. 2007, pp. 673–680. doi: 10.1111/j.1551-2916.2006.01482.x
- [86] Hirao, K., Watari, K., Brito, M. E., Toriyama, M., Kanzaki, S.: *High thermal conductivity in silicon nitride with anisotropic microstructure*, Journal of the American Ceramic Society, 79(9). 1996, pp. 2485-2488.
- [87] Hirosaki, N., Okamoto, Y., Ando, M., Munakata, F., Akimune, Y.: *Thermal conductivity of gas-pressure-sintered silicon nitride*, Journal of the American Ceramic Society, 79(11), 1996, pp. 2878-2882.
- [88] Hirao, K., Watari, K., Hayashi, H., Kitayama, M.: *High thermal conductivity silicon nitride ceramic*, MRS Bulletin, 26(6), 2001, pp. 451-455.
- [89] Zhou, Y., Hyuga, H., Kusano, D., Yoshizawa, Y. I., Hirao, K.: *A tough silicon nitride ceramic with high thermal conductivity*, Advanced Materials, 23(39), 2001, pp. 4563-4567.
- [90] Watari, K., Seki, Y., Ishizaki, K.: *Thermal properties of HIP sintered silicon nitride*, Journal of the Ceramic Society of Japan, 1989, 97(1121), pp. 56-62.
- [91] Okoshi, M., Sakai, H.: *Researches on the mechanism of abrasion*, Report III, mechanism of abrasion of cast iron and steel, Trans. JSME 7, 1941, pp. 29-47.
- [92] Marciniak, J., Otimianowski, T.: *An interpretation of the sliding speed effect on the wear of low carbon steel based on the theory of oxidation*, Proc. Eurotrib. Vol. 81, 1981, pp. 241–256.

- [93] Lim, S.C.: *Recent developments in wear mechanism maps*, Tribol. Int. 31 (1–3), 1998, pp. 87–97.
- [94] Hsu, S., Shen, M.: *Wear prediction of ceramics*, Wear, Vol. 256. Issue 9, 2004, pp. 867–878.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.11.002>
- [95] Hsu, S. M., Wang, Y.S., Munro, R.G.: *Quantitative wear maps as a visualisation of wear mechanism transitions in ceramic materials*, Wear., Vol. 134, Issue 1, 1989, pp. 1–11.
- [96] Maros Berkes, M., Németh, A. K.: *Wear maps of HIP sintered Si₃N₄/MLG nanocomposites for unlike paired tribosystems under ball-on-disc dry sliding conditions*, Journal of the European Ceramic Society Volume 37, Issue 14, 2017 pp. 4357-4369.
- [97] Welsh, N. C.: *The dry wear of steel. Part I. The general pattern of behaviour*, Proc. Roy. Soc., A257, 1965, pp. 31–50.
- [98] Eyre, T. S.: *Wear mechanisms*, Powder Metall., Vol. 24, 1981, pp. 57–63.
- [99] Egawa, K.: *Effects of the hardness of hardened steel on frictional wear (3rd report)— cubic model form of region of different forms of wear*, J. JSLE Int. Edn, 3, 1982, pp. 27– 30.
- [100] Lim, S. C., Ashby, M. F., Brunton, J. H.: *Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms*, Acta Metall., Vol. 35, 1987, pp. 1343–1348.
- [101] He, C., Wang, Y.S., Wallace, J.S., Hsu, S.M.: *The effect of microstructure on the wear transition of zirconia toughened alumina*, Wear, Vol. 162, 1994, pp. 314-321.
- [102] Liu, H. and Hsu, S.M.: *Modeling of micro-fracture-induced wear and wear transition of polycrystalline alumina under sliding*, Wear, Vol. 195, 1996, pp. 169-177.
- [103] Wang, Y.S., Hsu, S.M.: *Wear and wear transition modeling of ceramics*, Wear, Vol. 195, 1996, pp. 35-46.
- [104] Wang, Y.S., Hsu, S.M.: *The effects of operating parameters and environment on the wear and wear transition of alumina*, Wear, 1996, Vol. 195, pp. 90-99.
- [105] Cho, S.J., Moon, H., Hockey, B.J., and Hsu, S.M.: *Wear transition mechanism in alumina during sliding*, Acta Metall. Mater. Vol. 40, Issue 1, 1992, pp. 185-192.
- [106] Wang, Y.S., He, C., Hockey, B.J., Lacey, P.I., and Hsu, S.M.: *Wear transitions in monolithic alumina and zirconia-alumina composites*, Wear, 1995, Vol. 181, pp. 156-164.
- [107] Kim, S. S., Kato, K., Hokkirigawa, K., Abe, H.: *Wear mechanism of ceramic materials in dry rolling friction*, ASM Journal of Tribol., Vol. 108, 1986, pp. 522-526.
- [108] Ramsey, P. M., Pag, T. F.: *A new approach to predicting the wear behaviour of ceramic surfaces*, Br. Ceram. Trans. J., Vol. 87, 1988, pp. 74–80.
- [109] Hsu, S. M., Wang, Y. S., Munro, R. G.: *Quantitative wear maps as a visualisation of wear mechanism transitions in ceramic materials*, Wear, 134, 1989, pp. 1–11.
- [110] Hsu, S. M., Limand, D.S., Munro, R.G., in V.J. Tennery (ed): *Ceramics wear maps*, Proc. of the 3rd Int. Symp. Ceramic Materials and Components for Engines, Am. Ceram. Soc. New York, 1989, pp. 1236-45.
- [111] Kato, K.: *Tribology of ceramics*, Wear, Vol. 136, 1990, pp. 117–133.
- [112] Bhuhsan, Bharat (ed.): *Modern Tribology Handbook*, Vol. 1., CRC Press, 2001, ISBN-13 978-0849384035 pp. 1-764.
- [113] Ling, F. F., Pan, C. H. T.: *Approaches to Modeling of Friction and Wear*, Springer-Verlag, 1988, New York.
- [114] Ludema, K. C., Bayer, R. G.: *Cultural impediments for practical modeling of wear rates*, in Tribological Modeling for Mechanical Designers, ASTM STP 1105, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, p.180.
- [115] Meng, H. C., Ludema, K. C.: *Wear models and predictive equations: their form and content*, Wear, 181-183, 1995, pp. 443-457.
- [116] Rabinowicz, E.: *Friction and Wear of Materials*, John Wiley & Sons, New York, 1965, p. 165
- [117] Hokkirigawa, K., Kato, K.: *Theoretical estimation of abrasive wear resistance based on microscopic wear mechanism*, in ASME Wear of Materials, Ludema, K.C. (Ed.), Vol. 1, 1989, pp.1-8.
- [118] Larsen-Basse, J.: *Success and failure of simple models for abrasive wear*, in Tribological Modeling for Mechanical Designers, ASTM STP 1105, Ludema, K.C. and Bayer, R.G. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, p. 51.

- [119] Komvopoulos, K., Suh, N. P., Saka, N.: *Wear of boundary-lubricated metal surfaces*, Wear, 107, 1986, pp. 107-119.
- [120] Dowson, D.: *History of Tribology*, 2nd Edition, 1998, ISBN:978-1-86058-070-3, pp. 1-768.
- [121] Larsen-Basse, J.: *Basic Theory of Solid Friction*, ASM Handbook, Vol. 18. Ed. Blau, pp. 12-40.
- [122] Archard, J. F.: *Contact and rubbing of flat surfaces*, J Appl Phys 1953; Vol. 24. pp. 981-988.
- [123] Quinn, T.F.J.: *Oxidational wear*, Wear 18, 1971, pp. 413-419.
- [124] Hornbogen, E.: *The role of fracture toughness in the wear of metals*, Wear, Vol. 33, 1975, pp. 251-259.
- [125] Evans, A. G., Wilshaw, T. R.: *Quasistatic particle damage in brittle solids, I. Observations, analysis and implacations*, Acta Metall., 24., 1976, pp. 939-956.
- [126] Moore, M. A., King, F. S.: *Abrasive wear of brittle solids*, Wear, Vol. 60, 1980, pp. 123-140.
- [127] Swain, M. V.: *Microfracture about scratches in brittle solids*, Proc. R. Soc., London A366, 1979, pp. 575-597.
- [128] Evans, A. G., Marshall, D. B.: *Wear mechanisms in ceramics*, in: Fundamentals of Friction and Wear of Materials; Rigney, D. A., ed., Materials Park, OH: ASM 1981. pp. 439-452.
- [129] Lim, S. C., Ashby, M.F.: *Wear-mechanism maps*, Acta Metallurgica, Vol. 35., Issue 1, 1987, pp. 1-15
- [130] Andersson, S., Olofsson, U.: *Towards a general model for wear simulation*, IRG-OECD meeting, Upsala, Sweden
- [131] Williams, J. A.: *Wear and wear particles – some fundamentals*, Trib. Int. Vol. 38, 2005, pp. 863-870.
- [132] Dante, R. C., Kajdas, C. K.: *A review and a fundamental theory of silicon nitride tribochemistry*, Wear, Vol. 288, 2012, pp. 28-38.
- [133] Tewari, A. Basu, B. Bordia, R. K.: *Model for fretting wear of brittle ceramics*, Acta Materialia, Vol. 57, 2009, pp. 2080-2087.
- [134] Tewari, A.: *Load dependence of oxidative wear in metal/ceramic tribocouples in fretting environment*, Wear 289, 2012, pp. 95-103.
- [135] Németh, A. K., Maros Berkes, M.: *Wear maps and models in tribological damage analysis of Si₃N₄ ceramics with special attention to tribochemical wear*, MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, University of Miskolc, 2017. 4. 20-21.
- [136] Németh, A. K.: *Kopási térképek és modellek alkalmazása Si₃N₄/MLG nanokompozitok tribológiai viselkedésének jellemzésére*, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2017. november 16.
- [137] Tapasztó, O., Kun, P., Weber, F., Gergely, G., Balázs, K., Pfeifer, J., Balázs, C.: *Silicon nitride based nanocomposites produced by two different sintering methods*, Ceramics International, Vol. 37, Issue 8, 2011, pp. 3457-3461.
- [138] Belmonte, M., Ramirez, C., Gonzalez-Julian, J., Schneider, J., Miranzo, P., Osendi, M. I.: *The beneficial effect of graphene nanofillers on the tribological performance of ceramics*, CARBON, 61 (2013) pp. 431-435, <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.102>
- [139] Kvetková, L., Duszová, A., Hvizdos, P., Dusza, J., Kun, P., Balázs, Cs.: *Fracture toughness and toughening mechanisms in graphene platelet reinforced Si₃N₄ composites*, Scripta Materialia, Vol. 66, 2012, pp. 793-796. doi: 10.1016/j.scriptamat.2012.02.009
- [140] *C-Therm TCi Operator Manual*, Forrás: [http://prg.ukzn.ac.za/docs/default-source/laboratory-documents/thermal-conductivity-analyser-\(tci-2-a\).pdf?sfvrsn=2](http://prg.ukzn.ac.za/docs/default-source/laboratory-documents/thermal-conductivity-analyser-(tci-2-a).pdf?sfvrsn=2) Letöltés ideje: 2019. 03. 28.
- [141] Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., Lau, C. N.: *Superior thermal conductivity of single-layer graphene*, Nano letters, 2008, 8(3), pp. 902-907.
- [142] Pop, E., Varshney, V., Roy, A. K.: *Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications*, MRS Bulletin, vol. 37, 2012, pp. 1273-1281 DOI 10.1557/mrs.2012.203
- [143] Blau P. J.: *Effects of surface preparation on the friction and wear behaviour of silicon nitride/silicon carbide sliding pairs*, Journal of materials science, 1992, 27.17: pp. 4732-4740.

- [144] *Metallogram*, Struers, Forrás, http://www.struers.com/default.asp?top_id=5&main_id=19&sub_id=25&doc_id=89, Letöltés ideje: 2017. 12. 24.
- [145] *Struers Honlap*, Forrás: <http://www.struers.com/> Letöltés ideje: 2017.09.11.
- [146] Németh. A. K.: *Monolitikus és grafénnal adalékolt Si₃N₄ kerámiák felületelőkészítésének gyakorlati tapasztalatai*, Doktoranduszok Fóruma konferencia kiadványa, 2017, ISBN 978-963-358-127-8, pp. 65-72.
- [147] Balogh, A., Dukáti, F., Sallay, L.: *Minőség-ellenőrzés és megbízhatóság*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980, p. 512.
- [148] Hvizdoš, P., Dusza, J., Balázs, Cs.: *Tribological properties of Si₃N₄-graphene nanocomposites*, Journal of the European Ceramic Society, Vol. 33, 2013 pp. 2359–2364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.03.035>
- [149] Dusza, J., Morgiel, J., Duszová, A., Kvetková, L., Nosko, M., Kun, P., Balázs, C.: *Microstructure and fracture toughness of Si₃N₄+graphene platelet composites*, Journal of the European Ceramic Society, Vol. 32, Issue 12, 2012, pp. 3389-3397.
- [150] Kun, P., Tapasztó, O., Wéber, F., Balázs, C.: *Determination of structural and mechanical properties of multilayer graphene added silicon nitride-based composites*, Ceramics International, Vol. 38, Issue 1, 2012, pp. 211-216.
- [151] Kvetková, L., Duszová, A., Hvizdos, P., Dusza, J., Kun, P., Balázs, Cs.: *Fracture toughness and toughening mechanisms in graphene platelet reinforced Si₃N₄ composites*, Scripta Materialia, Vol. 66, 2012, pp. 793-796. doi: 10.1016/j.scripta mat.2012.02.009
- [152] Ponton, C. B., Rawlings, R. D.: *Vickers indentation fracture toughness test. Part 2. Application and critical evaluation of standardized indentation toughness equations*. Materials, Science and Technology, Vol. 5, Issue 18, 1989, pp. 961–976
- [153] Kruzic, J. J., Ritchie, R. O.: *Comments on Measurement of the microstructural fracture toughness of cortical bone using indentation fracture*, Journal of Biomechanics, Vol. 41, Issue 6, 2008, pp. 1379-1380.
- [154] Ghosh, A., Li, Z., Henager, C. H., Kobayashi, A. S., Bradt, R. C.: *Vickers microtoughness of SiC in the median-crack regime*, Fracture Mechanics of Ceramics., 11, 1995, 219-231.
- [155] Li, Z., Ghosh, A., Kobayashi, A.S., Bradt, R.C., 1989. *Indentation fracture toughness of sintered silicon carbide in the Palmqvist crack regime*, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 72, Issue 6, 1989, pp. 904-911.
- [156] Kruzic, J. J., Kim, D. K., Koester, K. J., Ritchie, R. O.: *Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 2, 2009, pp. 384–395. doi:10.1016/j.jmbbm.2008.10.008
- [157] Quinn, G. D., Bradt, R. C.: *On the Vickers Indentation Fracture Toughness Test*, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 90, 2007, pp. 673–680. doi: 10.1111/j.1551-2916.2006.01482.x
- [158] Bhushan, B.: *Principles and Applications of Tribology*, Tribology in Practice Series, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2013, ISBN 9781118403013, pp.1- 1008.
- [159] Tewari, A.: *Load dependence of oxidative wear in metal/ceramic tribocouples in fretting environment*, Wear 289, 2012, pp. 95–103.
- [160] *SiC ellentest adatok*, Sintertechnik GmbH Forrás: <http://stage.sintertechnik.com/project/ceramic-ball-bearings/> Letöltés ideje: 2017.09.11.

		HV, GPa									
	Pt. Ssz.	Minta elem száma	1.	2.	3.	4.	5.	Statistikai jellemzők			
								Pt. Átl.	Minta átl.	Szórás	Variancia eh., %
HIP G0	1	7	14,48	13,46	13,37	14,17	13,46	13,70	12,94	0,87	6,72
	4		13,01	14,13	13,51	13,89	13,66	13,69			
	6		13,15	14,01	13,51	13,78	14,12	13,77			
	8		11,92	10,53	13,69	11,84	10,13	11,43			
	9		13,04	13,34	12,11	12,60	10,13	12,58			
	10		10,01	11,55	13,02	12,60	13,33	12,39			
	11		11,32	12,62	13,69	12,89	13,56	13,02			
HIP G1	1	6	14,66	15,79	13,29	13,45	13,22	13,80	13,34	1,05	7,85
	2		12,45	10,36	13,99	12,38	12,68	12,50			
	3		15,56	14,63	15,03	15,69	13,43	15,07			
	4		13,17	12,78	11,89	12,19	12,23	12,40			
	5		12,75	12,66	13,00	12,37	12,21	12,59			
	6		11,88	14,73	13,32	13,61	14,14	13,69			
HIP G3	1	6	4,63	5,56	5,74	5,15	5,38	5,49	5,76	0,39	6,78
	2		4,26	4,64	4,95	5,11	5,10	4,90			
	3		5,56	5,85	5,56	5,58	7,19	5,66			
	4		5,46	4,95	5,52	5,82	5,91	5,60			
	5		5,48	5,58	5,56	5,38	5,80	5,54			
	6		4,02	4,73	4,48	5,06	5,17	4,76			
SPS G0	5	5	14,59	14,62	15,77	14,49	15,54	14,92	15,45	0,61	3,93
	6		14,47	16,66	16,02	16,93	15,74	16,14			
	7		14,95	14,25	15,74	15,62	14,88	15,15			
	8		15,35	15,81	14,70	15,47	14,88	14,98			
	9		16,42	15,57	15,54	16,26	16,67	16,08			
SPS G1	1	3	15,90	15,85	15,78	15,80	15,01	15,81	15,80	0,14	0,85
	2		15,98	15,78	15,94	15,28	15,09	15,67			
	4		15,97	15,43	15,96	16,23	15,88	15,94			
SPS G3	2	3	12,09	13,12	13,74	13,36	13,42	13,30	13,40	0,49	3,67
	3		13,69	12,83	14,67	14,36	13,74	13,93			
	4		14,65	12,67	13,71	12,04	12,50	12,96			

Minták: HIP G0-HIP G1		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1143	1	
1239	2	
1240		3
1250		4
1258	5	
1259		6
1302	7	
1369	8	
1369		9
1370	10	
1377		11
1380		12
1507		13

R ₁	33	
R ₂		58
R _a	35	
R _f	63	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G0-HIP G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
476		1
490		2
549		3
554		4
560		5
566		6
1143	7	
1239	8	
1258	9	
1302	10	
1369	11	
1370	12	
1377	13	

R ₁	70	
R ₂		21
R _a	35	
R _f	63	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G0-SPSG G0		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1143	1	
1239	2	
1258	3	
1302	4	
1369	5	
1370	6	
1377	7	
1492		8
1498		9
1515		10
1608		11
1614		12

R ₁	28	
R ₂		50
R _a	33	
R _f	58	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G0-SPSG G1		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1143		1
1239		2
1258		3
1302		4
1369		5
1370		6
1377		7
1567	8	
1580	9	
1594	10	

R ₁	27	
R ₂		28
R _a	7	
R _f	24	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G0-SPSG G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1143		1
1239		2
1258		3
1302		4
1369		5
1370		6
1377		7
1330	8	
1393	9	
1296	10	

R ₁	27	
R ₂		28
R _a	7	
R _f	24	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G1-HIP G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
476		1
490		2
549		3
554		4
560		5
566		6
1240	7	
1250	8	
1259	9	
1369	10	
1380	11	
1507	12	

R ₁	57	
R ₂		21
R _a	26	
R _f	52	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G1-SPS G0		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1240	1	
1250	2	
1259	3	
1369	4	
1380	5	
1492		6
1498		7
1507	8	
1515		9
1608		10
1614		11

R ₁	23	
R ₂		43
R _a	25	
R _f	47	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G1-SPS G1		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1240		1
1250		2
1259		3
1369		4
1380		5
1507		6
1567	7	
1580	8	
1594	9	

R ₁	24	
R ₂		21
R _a	7	
R _f	23	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G1-SPS G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1240		1
1250		2
1259		3
1296	4	
1330	5	
1369		6
1380		7
1393	8	
1507		9

R ₁	17	
R ₂		28
R _a	7	
R _f	23	

$R_a < R_1 < R_f$ teljesül: nem
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G3-SPS G0		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
476	1	
490	2	
549	3	
554	4	
560	5	
566	6	
1498		7
1492		8
1515		9
1608		10
1614		11

R ₁	21	
R ₂		45
R _a	25	
R _f	47	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G3-SPS G1		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
476		1
490		2
549		3
554		4
560		5
566		6
1567	7	
1580	8	
1594	9	

R ₁	24	
R ₂		21
R _a	7	
R _f	23	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: HIP G3-SPS G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
476		1
490		2
549		3
554		4
560		5
566		6
1296	7	
1330	8	
1393	9	

R ₁	24	
R ₂		21
R _a	7	
R _f	23	

$R_a < R_1 < R_f$ nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között

Minták: SPS G0-SPS G1		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1492		1
1498		2
1515		3
1567	4	
1580	5	
1594	6	
1608		7
1614		8

R ₁	15	
R ₂		21
R _a	6	
R _f	11	

***R_a < R₁ < R_f nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között***

Minták: SPS G0-SPS G3		
Egyesített minta	R ₁	R ₂
1296	1	
1330	2	
1393	3	
1492		4
1498		5
1515		6
1608		7
1614		8

R ₁	6	
R ₂		30
R _a	6	
R _f	11	

***R_a < R₁ < R_f nem teljesül:
szignifikáns az eltérés a minták
keménysége között***

Ssz.	Próbatest jele	Oldal	Csúszási sebesség, v, mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnév	Profil	Dátum
1.	HIP G0 9	A	20	40	Rendben, túl kicsi a kikopott térfogat, újramérni!	v1	HIP_G0_9A_20_SiC_v1.tst	OK	2016.06.03
2.	HIP G0 9	A	20	40	Rendben	v2	HIP_G0_9A_20_SiC_v2.tst	OK	2016.06.03
3.	HIP G0 9	A	10	40	Kilazult az alsó csavar, elcsúszott a kopásnyom	v3	HIP_G0_9A_10_SiC_v1.tst	-	2016.06.07
4.	HIP G0 9	A	10	40	Rendben	v4	HIP_G0_9A_10_SiC_v2.tst	OK	2016.06.07
5.	HIP G0 8	A	10	40	Rendben	v1	HIP_G0_8A_10_SiC_v1.tst	OK	2016.06.08
6.	HIP G0 8	A	20	10	Rendben	p1	HIP_G0_8A_20_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.08
7.	HIP G0 8	A	10	10	Rendben	p2	HIP_G0_8A_10_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.08
8.	HIP G0 8	A	10	10	Rendben	p3	HIP_G0_8A_10_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.09
9.	HIP G0 8	A	200	10	Rendben	p4	HIP_G0_8A_200_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.09
10.	HIP G0 8	A	200	10	Rendben	p5	HIP_G0_8A_200_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.09
11.	HIP G0 8	A	20	10	Rendben	p6	HIP_G0_8A_20_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.09
12.	HIP G0 10	A	20	80	Rendben	pp1	HIP_G0_10A_20_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.10
13.	HIP G0 10	A	20	80	Rendben (mbm megjegyzései, megnéz, akusztikus emisszió)	pp2	HIP_G0_10A_20_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.10
14.	HIP G0 10	A	10	80	Rendben	pp3	HIP_G0_10A_10_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.10
15.	HIP G0 10	A	10	80	Rendben	pp4	HIP_G0_10A_10_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.13
16.	HIP G3 5	A	20	10	Rendben	p1	HIP_G3_5A_20_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.13
17.	HIP G3 5	A	20	10	Rendben, szép sima futás	p2	HIP_G3_5A_20_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.13
18.	HIP G3 5	A	200	10	Kicsit dőcögött az első pár percben, de amúgy rendben	p3	HIP_G3_5A_200_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.13
19.	HIP G3 5	A	200	10	Kicsit dőcögött az első pár percben, de amúgy rendben	p4	HIP_G3_5A_200_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.13
20.	HIP G3 5	A	10	10		p5	HIP_G3_5A_10_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.13
21.	HIP G3 5	A	10	10		p6	HIP_G3_5A_10_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.14
22.	HIP G3 5	A	10	40		v1	HIP_G3_5A_10_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.14
23.	HIP G1 6	A	200	40		v1	HIP_G1_6A_200_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.14
24.	HIP G1 6	A	200	10		p1	HIP_G1_6A_200_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.14
25.	HIP G1 6	A	200	10		p2	HIP_G1_6A_200_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.14
26.	HIP G0 10	A	200	80	Extra zaj, nagy rázkódás	pp5	HIP_G0_10A_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.14
27.	HIP G0 10	A	200	80	Extra zaj, nagy rázkódás	pp6	HIP_G0_10A_200_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.14
28.	HIP G1 6	A	10	10		p3	HIP_G1_6A_10_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.14
29.	HIP G1 6	A	20	10		p4	HIP_G1_6A_20_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.06.15
30.	HIP G1 6	A	20	10		p5	HIP_G1_6A_20_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.15

Ssz.	Próbatest jele	Oldal	Csúszási sebesség, v, mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnev	Profil	Dátum
31.	HIP G1 6	A	20	80	Enyhén meglazult a középső leszorítócsavar, újra kell mérni	pp1	HIP_G1_6A_20_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.15
32.	HIP G1 1	B	20	80	Extra erősségű, füllel elviselhetetlen zaj	pp1	HIP_G1_1B_20_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.15
33.	HIP G1 1	B	10	10	Rendben	p1(fp)	HIP_G1_1B_10_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.15
34.	HIP G1 1	B	10	80	Periodikus éles zaj	pp2	HIP_G1_1B_10_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.16
35.	HIP G1 1	B	10	80	Első pár percben éles "szilánkos" zaj. Kb. 10 perc után olyan hangot ad, ki mintha "csúszkálna" a kopásnyomon a tű. Periodikus csikorgás.	pp3	HIP_G1_1B_10_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.16
36.	HIP G1 1	B	10	40		v1	HIP_G1_1B_10_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.16
37.	HIP G3 6	A	20	80	Első két percben éles csikorgás, utána hangtalan.	pp1	HIP_G3_6A_20_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.17
38.	HIP G3 6	A	20	80		pp2	HIP_G3_6A_20_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.17
39.	HIP G3 6	A	10	80	Periodikus csikorgás	pp3	HIP_G3_6A_10_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.17
40.	HIP G3 6	A	10	80	Első 1-2 percben éles csikorgás, majd csend. Csend és még több csend.	pp4	HIP_G3_6A_10_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.06.17
41.	HIP G3 6	A	10	40		v1	HIP_G3_6A_10_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.17
42.	HIP G3 6	A	10	40	Csendes	v2	HIP_G3_6A_10_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.06.20
43.	HIP G1 2	B	20	80	31. mérés ismétléje. Nagyon éles csikorgás.	pp1	HIP_G1_2B_20_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.06.20
44.	HIP G0 10	A	20	10	Csendes	p1	HIP_G0_10A_20_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.06.29
45.	HIP G0 11	A	150	40	Hihetetlenül éles csikorgó hang, 6 perc után elhalkul!	v1	HIP_G0_11A_150_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.29
46.	HIP G0 11	A	100	80	hibás-mérés, pár másodperc után leállítva (80 N-nal indult el a gép, a beadott 40 N helyett!!!)	x	XHIP_G0_11A_100_SiC_f40_v1.tst	-	2016.06.29
47.	HIP G0 11	A	100	40		v2	HIP_G0_11A_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.29
48.	HIP G0 11	A	50	40	Állandó csikorgás	v3	HIP_G0_11A_50_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.06.29
49.	HIP G1 1	B	10	40		v2	HIP_G1_1B_10_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.06.29
50.	HIP G0 11	A	150	10	Rendben, csendes, nincs csikorgás	p1	HIP_G0_11A_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.04
51.	HIP G0 11	A	150	80	Az első másfél percben olyan fűsüketető zajjal járt, hogy fel kellett vennem a fülvédőt. Utána is hangos, de annyira nem. Védi van róla. Majd fémesen sűrűlő hang. Periodikus csikorgás. A golyó befogó forró!	pp1	HIP_G0_11A_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.04
52.	HIP G0 11	A	100	80	Állandó csikorgás	pp2	HIP_G0_11A_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.04
53.	HIP G0 11	A	100	10	Csendes	p2	HIP_G0_11A_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.04
54.	HIP G0 10	B	100	40	Első harminc másodpercben éles csikorgás, majd elhalkult.	v1	HIP_G0_10B_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.06
55.	HIP G0 10	B	50	40	Első harminc másodpercben éles csikorgás, majd elhalkult.	v2	HIP_G0_10B_50_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.06
56.	HIP G0 10	B	50	10	Csendes	p1	HIP_G0_10B_50_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.06
57.	HIP G0 10	B	50	10	Csendes	p2	HIP_G0_10B_50_SiC_f10_v2.tst	OK	2016.07.06
58.	HIP G0 10	B	50	80	Élesen csikorgó zaj	pp1	HIP_G0_10B_50_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.06
59.	HIP G0 10	B	50	80	Leállítva, mert elcsúszott a nyom	x	HIP_G0_10B_50_SiC_f80_v2.tst	X	2016.07.06
60.	HIP G0 10	B	50	80		pp3	HIP_G0_10B_50_SiC_f80_v3.tst	?	2016.07.06

Ssz.	Próbatest jele	Oldal	Csúszási sebesség, v, mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnév	Profil	Dátum
61.	HIP G3 6	A	50	40		v3	HIP_G3_6A_50_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.07
62.	HIP G3 2	A	50	80		pp1	HIP_G3_2A_50_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.07
63.	HIP G3 2	A	50	10		p1	HIP_G3_2A_50_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.07
64.	HIP G3 2	A	100	10	Csendes	p2	HIP_G3_2A_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.07
65.	HIP G3 2	A	100	80	Állandó csikorgás	pp2	HIP_G3_2A_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.07
66.	HIP G3 2	A	150	40	Nagyon éles csikorgás	v1	HIP_G3_2A_150_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.07
67.	HIP G3 2	A	80	80	Éles csikorgás, a nagy terhelőerő ellenére egész jó. Egyenletes.	pp3	HIP_G3_2A_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.07
68.	HIP G3 2	A	150	10		p3	HIP_G3_2A_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.07
69.	HIP G3 2	A	100	40		v2	HIP_G3_2A_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.07
70.	HIP G1 3	A	100	40	Nagymértékű portképződés (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	v1	HIP_G1_3A_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.07
71.	HIP G1 3	A	100	80	Nagymértékű portképződés (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	pp1	HIP_G1_3A_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.07
72.	HIP G1 3	A	100	10	(filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	p1	HIP_G1_3A_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.07
73.	HIP G1 3	A	150	40	Állandó csikorgás, sok por (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	v2	HIP_G1_3A_150_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.11
74.	HIP G1 3	A	150	40	Állandó csikorgás, nagyon sok por (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	v3	HIP_G1_3A_150_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.07.11
75.	HIP G1 3	A	150	80	Éles csikorgás, nagyon csökken a pára! (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	pp2	HIP_G1_3A_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.11
76.	HIP G1 3	A	150	10	Csendes (filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	p2	HIP_G1_3A_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.11
77.	HIP G1 1	A	50	80		pp4	HIP_G1_1A_50_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.11
78.	HIP G1 1	A	50	40		v3	HIP_G1_1A_50_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.11
79.	HIP G1 3	A	50	10	(filenév elírva, 4 helyett 3. próbatest)	p3	HIP_G1_3A_50_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.11
80.	SPS G0 6	A	20	40	Első három percben éles csikorgás, majd csendes	v1	SPS_G0_6A_20_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.12
81.	SPS G0 6	A	20	40	Első három percben éles csikorgás, majd csendes	v2	SPS_G0_6A_20_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.07.12
82.	SPS G0 6	A	200	40	első egy percben közepesen éles csikorgás, majd elhalkul. Kicsit magas a pára és a hőmérséklet	v3	SPS_G0_6A_200_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.13
83.	SPS G0 6	A	200	40	első egy percben közepesen éles csikorgás, majd elhalkul. Kicsit magas a pára és a hőmérséklet	v4	SPS_G0_6A_200_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.07.13
84.	HIP G1 5	A	150	10		p1	HIP_G1_5A_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.13
85.	HIP G1 5	A	150	80		pp1	HIP_G1_5A_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.13
86.	HIP G1 5	A	100	10		p2	HIP_G1_5A_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.13
87.	HIP G1 5	A	100	40	Éles csikorgás	v1	HIP_G1_5A_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.13
88.	HIP G1 5	A	100	80	Éles csikorgás	pp2	HIP_G1_5A_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.13
89.	HIP G1 5	A	50	40	Éles csikorgás	v2	HIP_G1_5A_50_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.13
90.	HIP G1 5	A	50	10		pp3	HIP_G1_5A_50_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.13

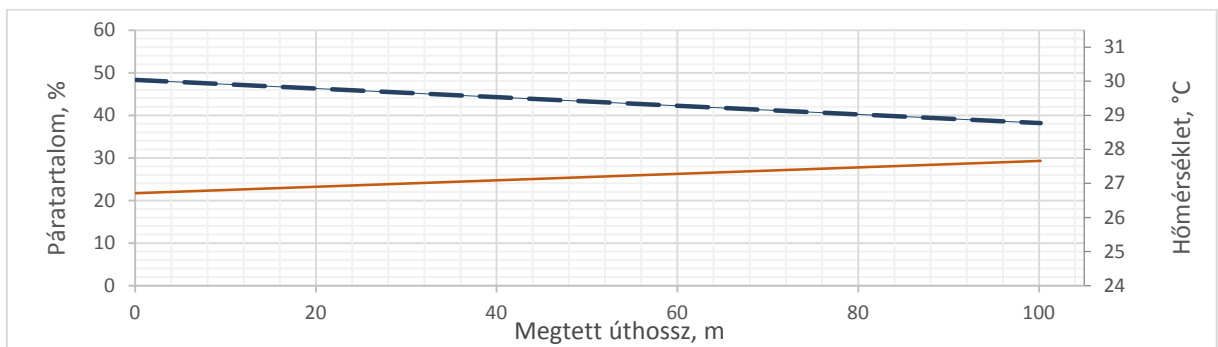
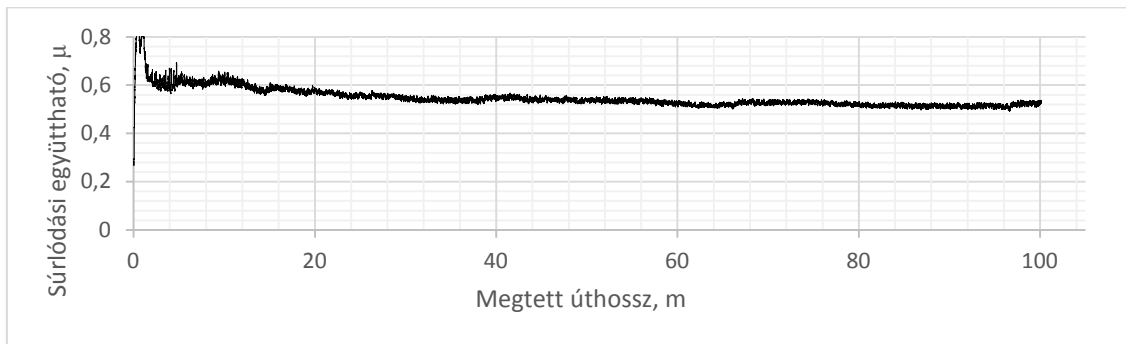
Ssz.	Próbatest jelle	Oldal	Csúszási sebesség, v , mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnév	Profil	Dátum
91.	HIP G3 3	A	150	40	első 30 mp éles csikorgás	v1	HIP_G3_3A_150_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.13
92.	HIP G3 3	A	150	80	éles csikorgás	pp1	HIP_G3_3A_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.13
93.	HIP G3 3	A	150	10	csendes	p1	HIP_G3_3A_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.13
94.	HIP G3 3	A	100	40	Elő 15 mp-ben éles csikorgás	v2	HIP_G3_3A_100_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.07.13
95.	HIP G3 3	A	100	80		pp2	HIP_G3_3A_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.13
96.	HIP G3 3	A	100	10		p2	HIP_G3_3A_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.13
97.	HIP G3 3	A	50	80		pp3	HIP_G3_3A_50_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.13
98.	HIP G3 3	A	50	10	Meleg van	p3	HIP_G3_3A_50_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.07.14
99.	HIP G3 3	A	50	40	Meleg van	v4	HIP_G3_3A_50_SiC_f40_v2.tst	OK	2016.07.14
100.	HIP G1 5	A	50	10		p4	HIP_G1_5A_50_SiC_f10_v2.tst	?	2016.07.14
101.	HIP G1 2	B	50	80		pp2	HIP_G1_2B_50_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.07.15
102.	HIP G0 11	B	100	10		p1	HIP_G0_11B_100_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.08.25
103.	HIP G0 11	B	150	10		p2	HIP_G0_11B_150_SiC_f10_v1.tst	OK	2016.08.25
104.	HIP G0 11	B	150	40	Éles csikorgás	v1	HIP_G0_11B_150_SiC_f40_v1.tst	OK	2016.08.25
105.	HIP G0 11	B	150	80	Nagyon éles csikorgás	pp1	HIP_G0_11B_150_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.08.25
106.	HIP G0 11	B	100	80		pp2	HIP_G0_11B_100_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.08.26
107.	HIP G1 2	B	200	80		pp3	HIP_G1_2B_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.08.30
108.	HIP G1 2	B	200	80		pp4	HIP_G1_2B_200_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.08.30
109.	HIP G3 1	B	200	80		pp1	HIP_G3_1B_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.08.30
110.	HIP G3 1	B	200	80	Elcsúszott a kopásnyom	pp2	HIP_G3_1B_200_SiC_f80_v2.tst	OK	2016.08.30
111.	HIP G3 1	B	200	80	A súrl eh. Diagram elveszett, de az v1-es éggével összehasonlítható az első és utolsó 20%. Annyi eltéréssel, hogy a hármas végű a kezdeti esés után egy folyamatosan növekvő tendenciát mutatott és rendkívül sima volt, kimértékű volt a súr. Eh ingadozása a v1 diagramhoz képest.	pp3	HIP_G3_1B_200_SiC_f80_v3.tst	OK	2016.08.30
112.	HIP G3 1	B	200	80		pp4	HIP_G3_1B_200_SiC_f80_v4.tst	OK	2016.08.30
113.	HIP G0 9	A	200	40	MBM mérés	v5	HIP_G0_9A_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
114.	HIP G1 2	B	200	40	MBM mérés	v1	HIP_G1_2A_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
115.	HIP G3 1	A	200	40	MBM mérés	v1	HIP_G3_1A_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
116.	HIP G0 2	B	200	40	Raman	v1	HIP_G0_2B_200_SiC_v1.tst		2016.09.20
117.	HIP G0 2	B	200	40	Raman	v2	HIP_G0_2B_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
118.	HIP G1 1	B	200	40	Raman	v1	HIP_G1_1B_200_SiC_v1.tst		2016.09.20
119.	HIP G1 1	B	200	40	Raman	v2	HIP_G1_1B_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
120.	HIP G3 5	B	200	40	Raman	v1	HIP_G3_5B_200_SiC_v1.tst		2016.09.20

Ssz.	Próbatest jele	Oldal	Csúszási sebesség, v , mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnév	Profil	Dátum
121.	HIP G3 5	B	200	40	Raman	v2	HIP_G3_5B_200_Si3N4_v1.tst		2016.09.20
122.	SPS G0 5	A	20	40	Raman	v3	SPS_G0_5A_20_Si3N4_v1.tst	OK	2016.09.20
123.	SPS G0 5	A	20	40		v4	SPS_G0_5A_20_Si3N4_v2.tst	OK	2016.09.21
124.	SPS G0 5	A	200	40		v1	SPS_G0_5A_200_Si3N4_v1.tst	OK	2016.09.20
125.	SPS G0 5	A	200	40	Erős csikorgás, recsegés. A golyó nem fordult el, a próbatest is rendben.	v2	SPS_G0_5A_200_Si3N4_v2.tst	OK	2016.09.20
126.	HIP G0 2	B	200	40	Kétszer ugyanazon a nyomon mérve, hogy legyen elég por (FTIR)		HIP_G0_2B_200_SiC_v2.tst	OK	2016.09.26
127.	HIP G0 2	B	200	40		p1	HIP_G0_2B_200_SiC_v3.tst	OK	2016.09.26
128.	HIP G0 2	B	200	80			HIP_G0_2B_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
129.	HIP G0 2	B	200	80		p2	HIP_G0_2B_200_Si3N4_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
130.	HIP G1 1	B	200	80		p1	HIP_G1_1B_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
131.	HIP G1 1	B	200	80	FTIR	p2	HIP_G1_1B_200_Si3N4_f80_v2.tst	OK	2016.09.26
132.	HIP G3 5	B	200	80	FTIR	p1	HIP_G3_5B_200_SiC_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
133.	HIP G3 5	B	200	80	FTIR	p2	HIP_G3_5B_200_Si3N4_v2.tst	OK	2016.09.26
134.	SPS G0 7	A	200	80	FTIR	p1	SPSG0_7A_sic_200_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
135.	SPS G0 7	A	200	80	FTIR	p2	SPSG0_7A_si3n_200_f80_v1.tst	OK	2016.09.26
134.	SPS G0 7	A	100	60		háromszög		OK	2017.05.25
135.	SPS G0 7	A	100	40	Intenzív csikorgás	v1	SPSG0_7A_sic_100_f40_v1.tst	OK	2017.05.25
136.	SPS G0 6	B	50	40		v1	SPSG0_6B_sic_50_f40_v1.tst	OK	2017.05.25
137.	SPS G0 6	B	10	40		v2	SPSG0_6B_sic_10_f40_v1.tst	OK	2017.05.25
138.	SPS G0 6	B	50	10	Halk	p1	SPSG0_6B_sic_50_f10_v1.tst	OK	2017.05.26
139.	SPS G0 6	B	100	10	Halk	p2	SPSG0_6B_sic_100_f10_v1.tst	OK	2017.05.26
140.	SPS G0 5	B	200	10	Halk	p1	SPSG0_5B_sic_200_f10_v1.tst	OK	2017.05.26
141.	SPS G0 5	B	50	80		pp1	SPSG0_5B_sic_50_f80_v1.tst	OK	2017.05.29
142.	SPS G0 5	B	100	80	Éles csikorgás	pp2	SPSG0_5B_sic_100_f80_v1.tst	OK	2017.05.29
143.	SPS G0 5	B	200	10		p2	SPSG0_5B_sic_200_f10_v2.tst	OK	2017.05.29
144.	SPS G0 7	B	10	10	Egyenletes és éles csikorgás, fura szag	p1	SPSG0_7B_sic_10_f10_v1.tst	OK	2017.05.29
145.	SPS G0 7	B	10	40	Enyhe asszimetria	v1	SPSG0_7B_sic_10_f40_v1.tst	OK	2017.05.29
146.	SPS G0 9	A	10	10		p1	SPSG0_9A_sic_10_f10_v1.tst	OK	2017.05.30
147.	SPS G0 7	B	10	80	Halk, elcsúszott a kopásnyom? Videofelvételt készítettem arról, hogy a próbatestet nehezen lehet kivenni a befogóból.	pp1	SPSG0_7B_sic_10_f80_v1.tst	OK	2017.05.30
148.	SPS G0 7	B	100	80	Megállítottam 270 másodperc után, mivel úgy tűnt, így két részletben van az excel. Minden elővigyázatosság ellenére, elcsúszott a kopásnyom	pp2	SPSG0_7B_sic_100_f80_v1.tst	OK	2017.05.30
149.	SPS G0 9	A	50	10		p2	SPSG0_9A_sic_50_f10_v1.tst	OK	2017.05.31
150.	SPS G0 8	A	10	80		pp1	SPSG0_8A_sic_10_f80_v1.tst	OK	2017.05.31

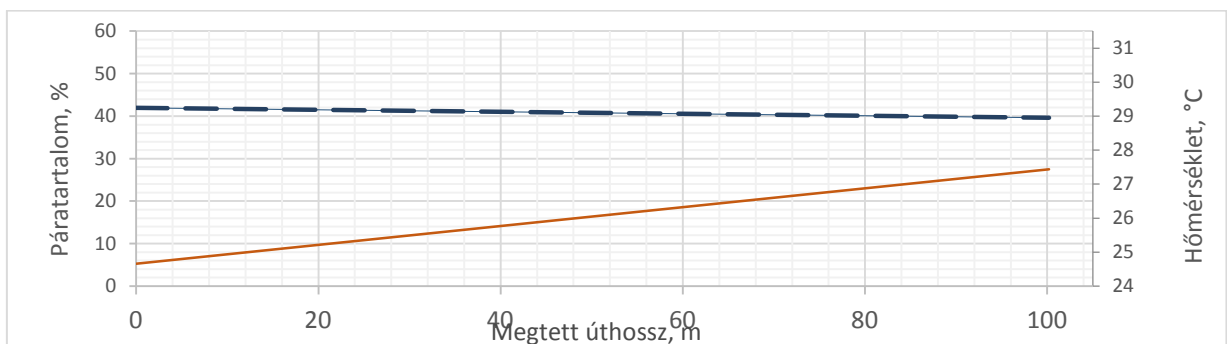
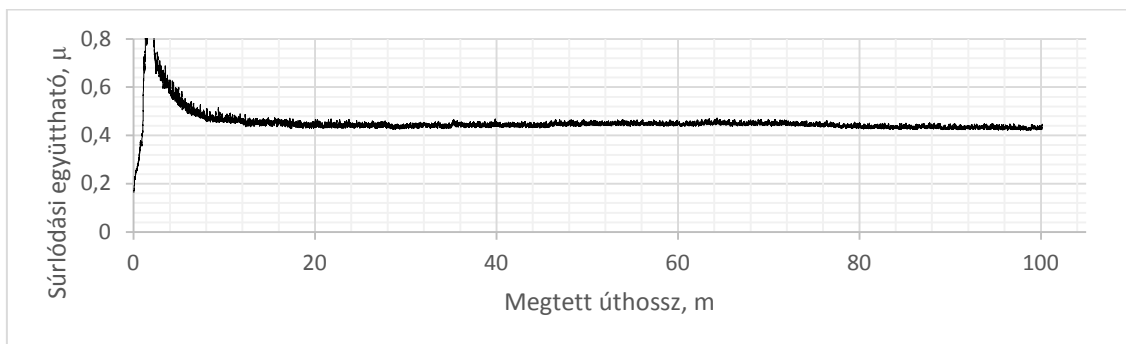
Ssz.	Próbatest jele	Oldal	Csúszási sebesség, v , mm/s	Erő	Megjegyzés	Jel	Fájlnev	Profil	Dátum
151.	SPS G0 8	A	100	10		p1	SPSG0_8A_sic_100_f10_v1.tst	OK	2017.05.31
152.	SPS G0 8	A	100	40	Éles csikorgás	v1	SPSG0_8A_sic_100_f40_v1.tst	OK	2017.05.31
153.	SPS G0 8	A	100	80	Elviselhetetlen zaj, éles csikorgás	pp1	SPSG0_8A_sic_100_f80_v1.tst	OK	2017.05.31
154.	SPS G0 8	B	50	80	elviselhetetlen zaj, éles csikorgás, sok törmelék és van benne sötétebb színű is	pp1	SPSG0_8B_sic_50_f80_v1.tst	OK	2017.05.31
155.	SPS G0 8	B	50	40	elviselhetetlen zaj, majd 13 perc után elhalkul, majd rá egy percre újra csikorgog, sötét színű törmelék, barnás, kissé aszimmetrikus nyom	v1	SPSG0_8B_sic_50_f40_v1.tst	OK	2017.05.31
156.	SPS G0 8	B	10	40	fura szag, halk	v2	SPSG0_8B_sic_10_f40_v1.tst	OK	2017.05.31
157.	SPS G0 8	B	200	80	Zajos, videó van	pp2	SPSG0_8B_sic_200_f80_v1.tst	OK	2017.05.31
158.	SPS G1 1	B	10	10	csendes	p1	SPSG1_1B_sic_10_f10_v1.tst	OK	2017.06.19
158.	SPS G1 1	B	10	40	csendes	v1	SPSG1_1B_sic_10_f10_v1.tst	OK	2017.06.19
159.	SPS G1 1	B	50	10	csendes	p2	SPSG1_1B_sic_50_f10_v1.tst	OK	2017.06.19
160.	SPS G1 1	A	50	40	csikorgás	v1	SPSG1_1A_sic_50_f40_v1.tst	OK	2017.06.19
161.	SPS G3 4	B	10	10	csendes	p1	SPSG3_4B_sic_10_f10_v1.tst	OK	2017.06.28
162.	SPS G3 4	B	10	40		v1	SPSG3_4B_sic_10_f40_v1.tst	OK	2017.06.28
163.	SPS G1 1	A	200	10		p1	SPSG1_1A_sic_200_f10_v1.tst	OK	2017.06.28
164.	SPS G1 1	A	200	80	Elcsúszott a kopásnyom, sikertelen	pp1	SPSG1_1A_sic_200_f80_v1.tst	X	2017.06.28
165.	SPS G1 1	A	50	80	150 sec után megállítva, 240 mp után megállítva, sikertelen	pp2	SPSG1_1A_sic_50_f80_v1.tst	X	2017.06.28
166.	SPS G3 4	B	50	10		p2	SPSG3_4B_sic_50_f10_v1.tst	OK	2017.06.29
167.	SPS G3 4	B	50	40		v2	SPSG3_4B_sic_50_f40_v1.tst	OK	2017.06.29
168.	SPS G3 3	A	200	10	törött darab	p1	SPSG3_3A_sic_200_f10_v1.tst	OK	2017.06.29
169.	SPS G1 4	B	10	40	150 mp után megállítva, majd folyt.	v1	SPSG1_4B_sic_10_f40_v1.tst	OK	2017.07.03
171.	SPS G1 4	B	100	40	rontott mérés	v2	SPSG1_4B_sic_100_f40_v1.tst	X	2017.07.04
172.	SPS G1 4	B	100	40	elcsúszott	v3	SPSG1_4B_sic_100_f40_v2.tst	X	2017.07.04
173.	SPS G1 4	B	100	40	MI profilhoz: a sugárirányú profil a szétcsúszott körök leginkább passzoló ívén menjen keresztül	v4	SPSG1_4B_sic_100_f40_v3.tst	OK	2017.07.04
174.	SPS G1 2	B	200	80	teljesen szét tört, darabokban	pp1	SPSG1_2B_sic_50_f80_v1.tst	X	2017.07.04
175.	SPS G3 2	B	50	80	csúszott	pp1	SPSG3_2B_sic_50_f80_v1.tst	X	2017.07.04
176.	SPS G3 2	B	50	80	csúszott	pp1	SPSG3_2B_sic_50_f80_v1.tst	X	2017.07.04
177.	SPS G3 2	B	50	80	Jól! Tettünk a kifílehez és az alsó tárcsához egy-egy plusz rugós alátétet	pp2	SPSG3_2B_sic_50_f80_v3.tst	OK	2017.07.04
178.	SPS G3 2	B	100	80	A felső kifíli nem volt megfelelően megszorítva, rontott mérés	pp3	SPSG3_2B_sic_100_f80_v3.tst	X	2017.07.05
179.	SPS G3 2	B	200	80		pp4	SPSG3_2B_sic_200_f80_v3.tst	OK	2017.07.05

HIP_G0_F10_v10

hip_g0_8A_10_sic_f10_v1

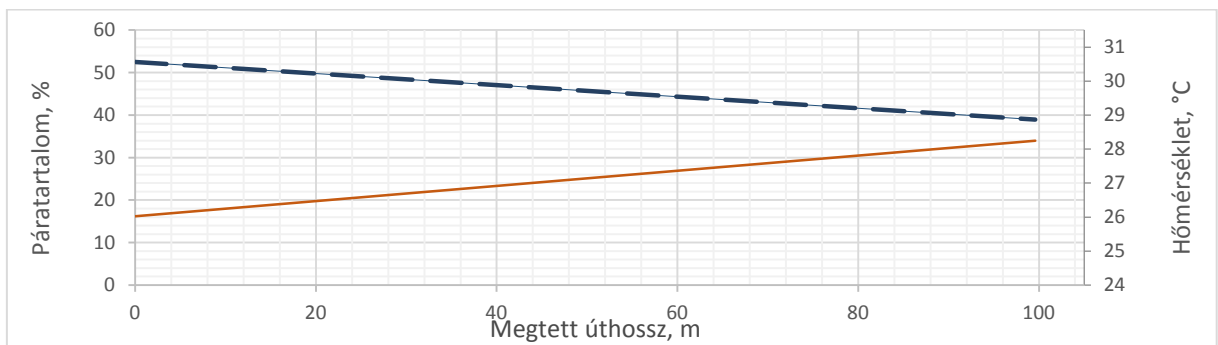
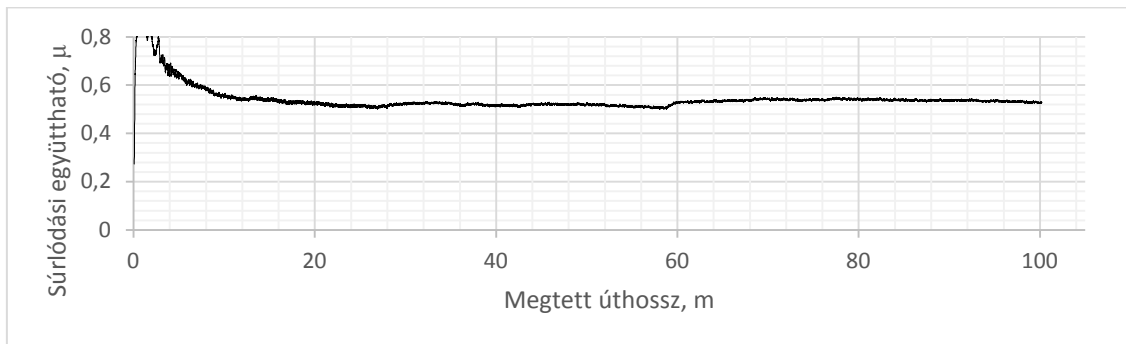


hip_g0_8A_10_sic_f10_v2

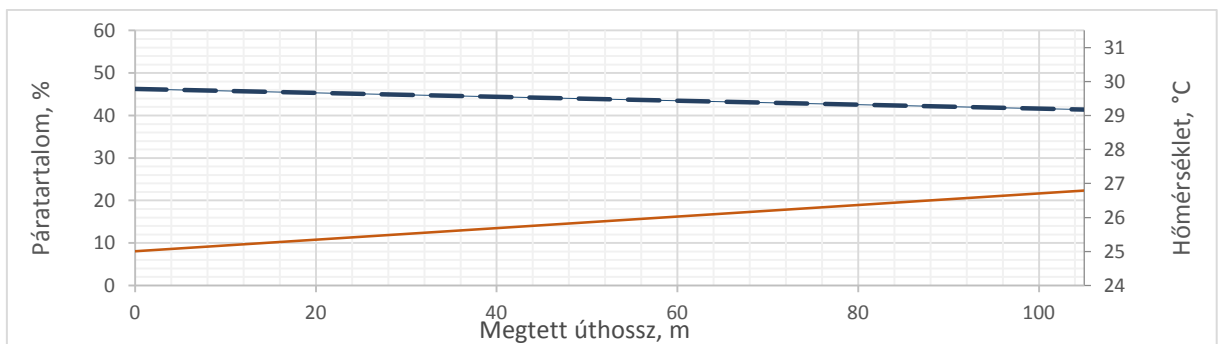
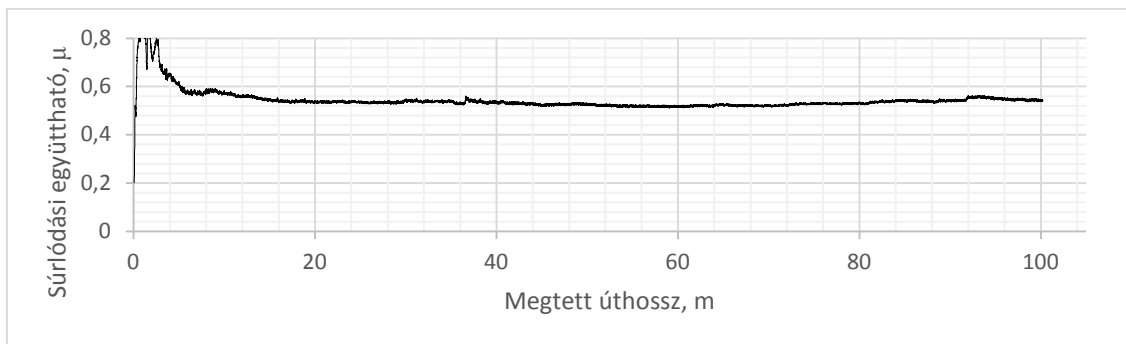


HIP_G0_F10_v20

hip_g0_8A_20_sic_f10_v1

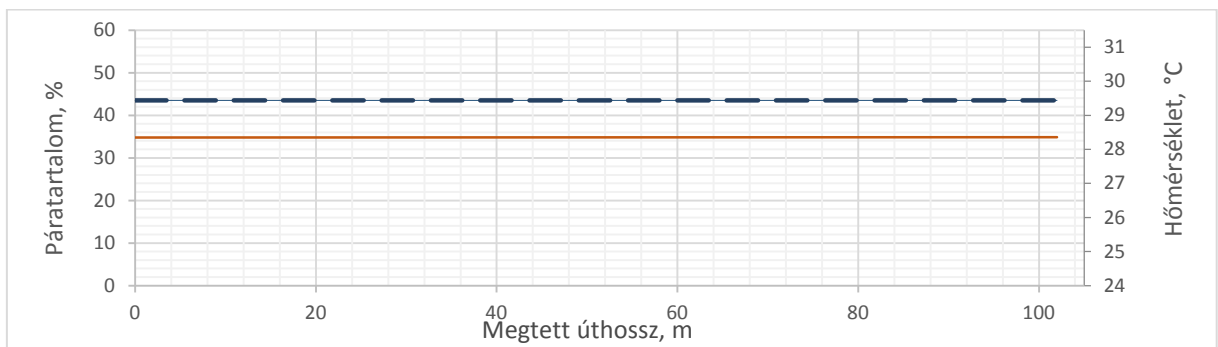
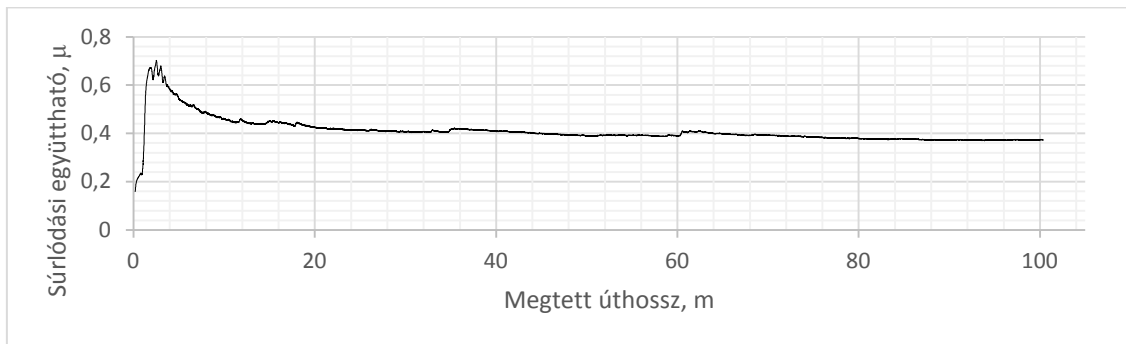


hip_g0_8A_20_sic_f10_v2

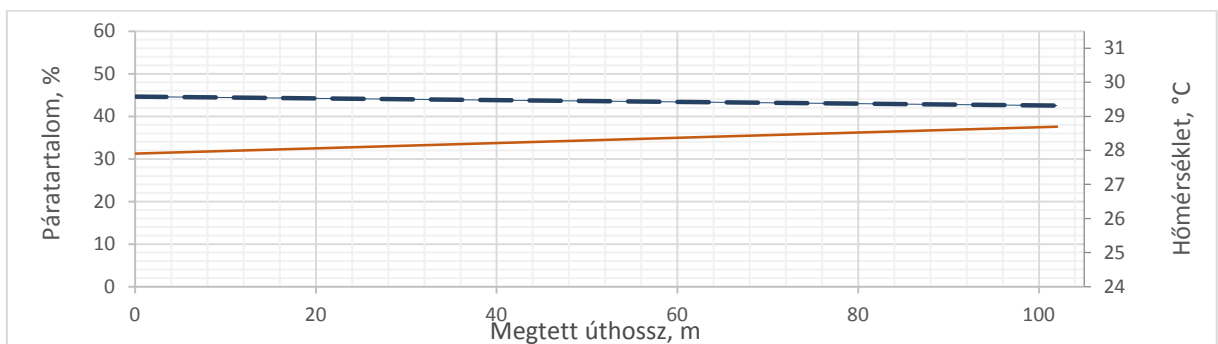
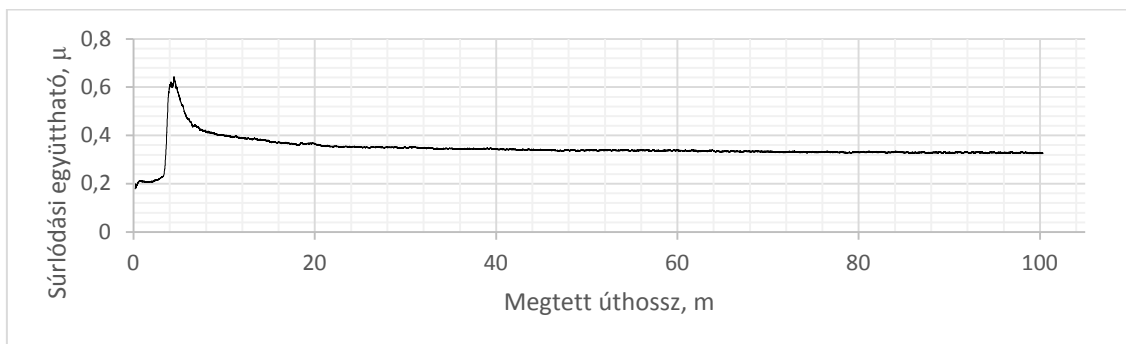


HIP_G0_F10_v50

hip_g0_10b_50_sic_f10_v1

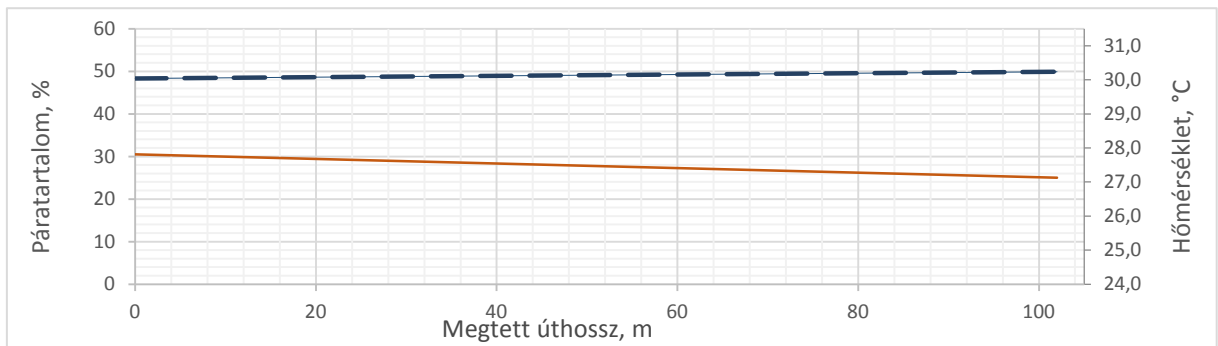
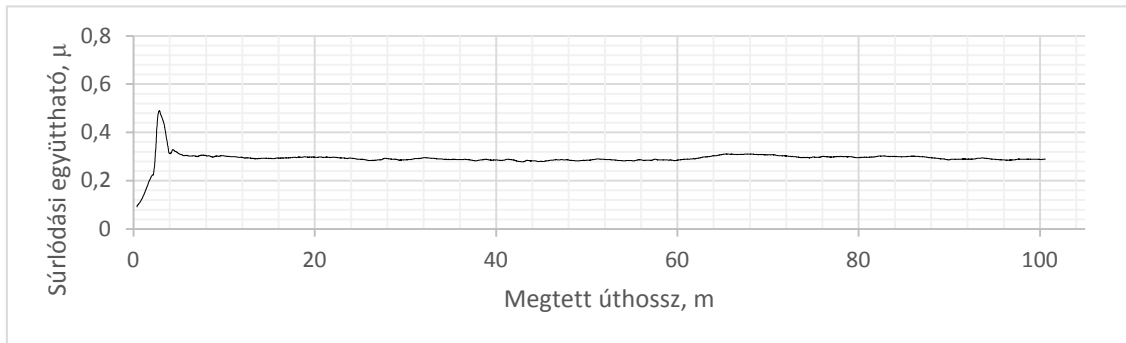


hip_g0_10b_50_sic_f10_v2

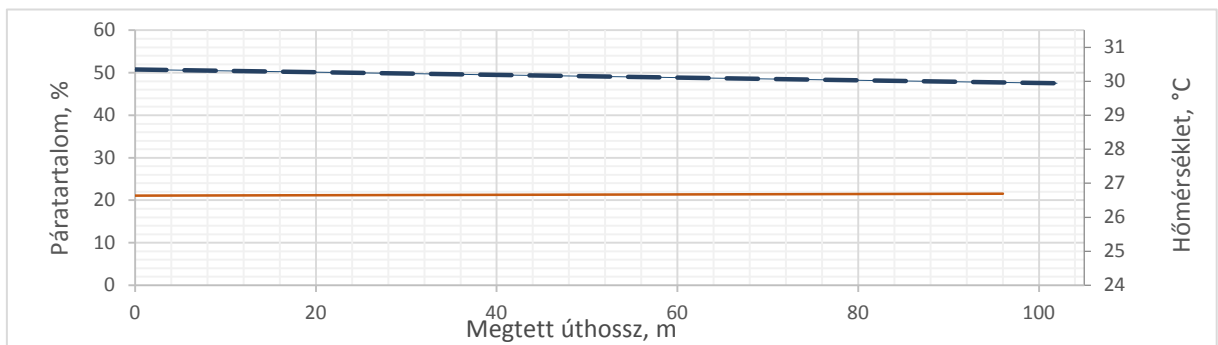
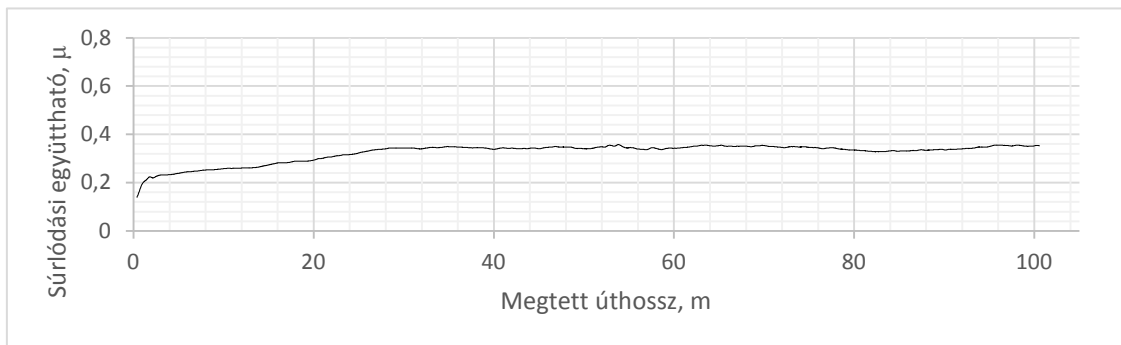


HIP_G0_F10_v100

hip_g0_11b_100_sic_f10_v1

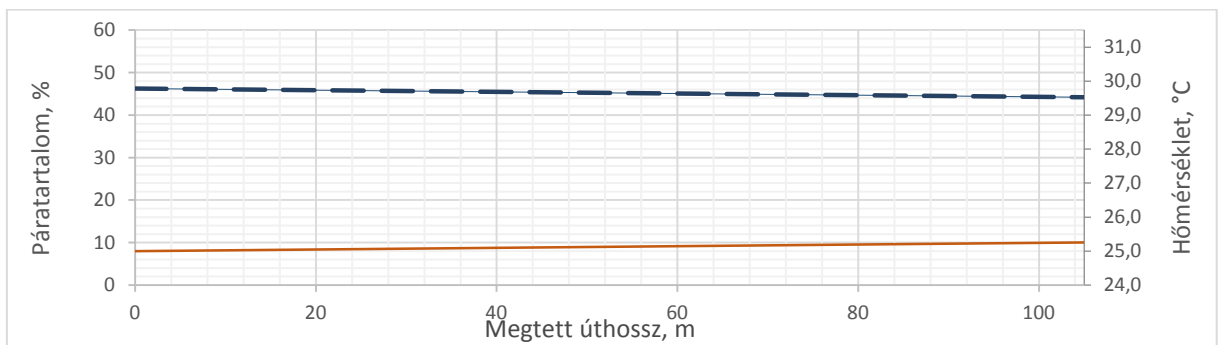
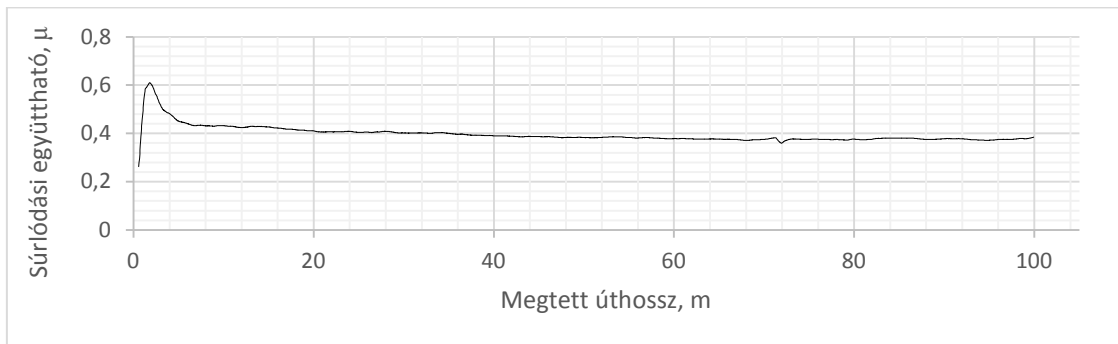


hip_g0_11a_100_sic_f10_v1

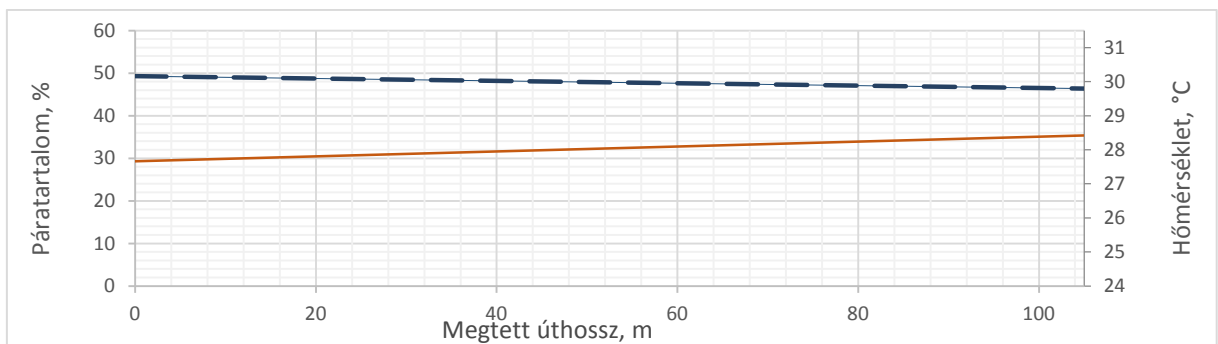
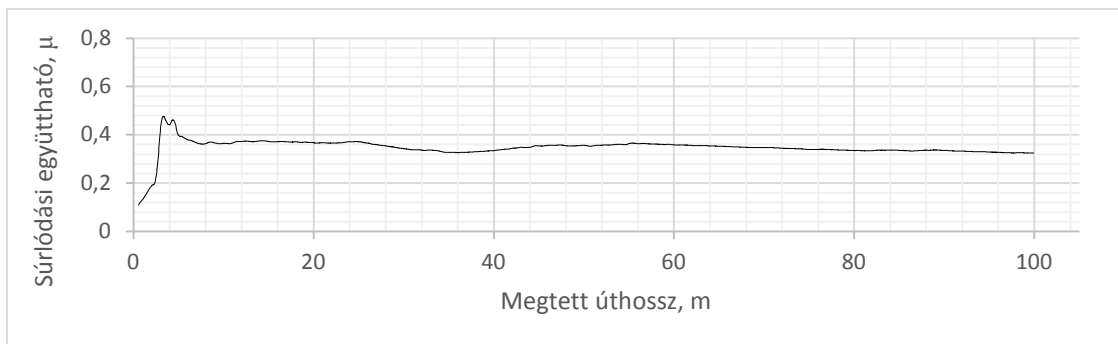


HIP_G0_F10_v150

hip_g0_11a_150_sic_f10_v1

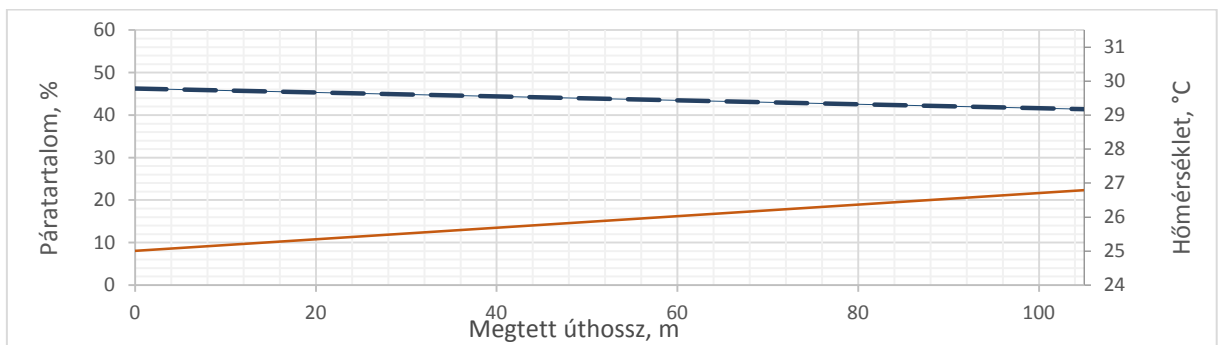
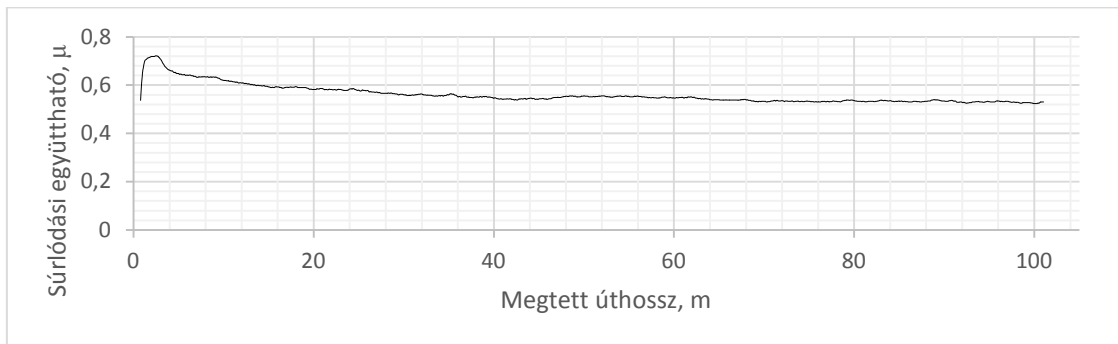


hip_g0_11b_150_sic_f10_v1

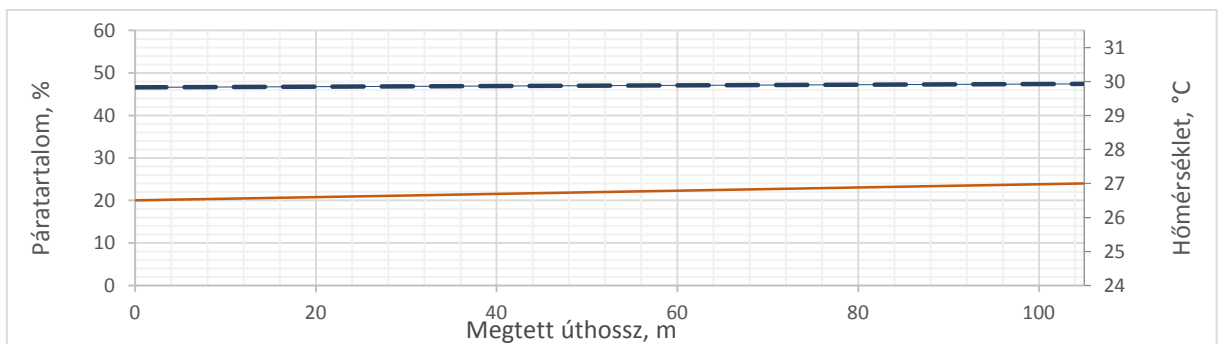
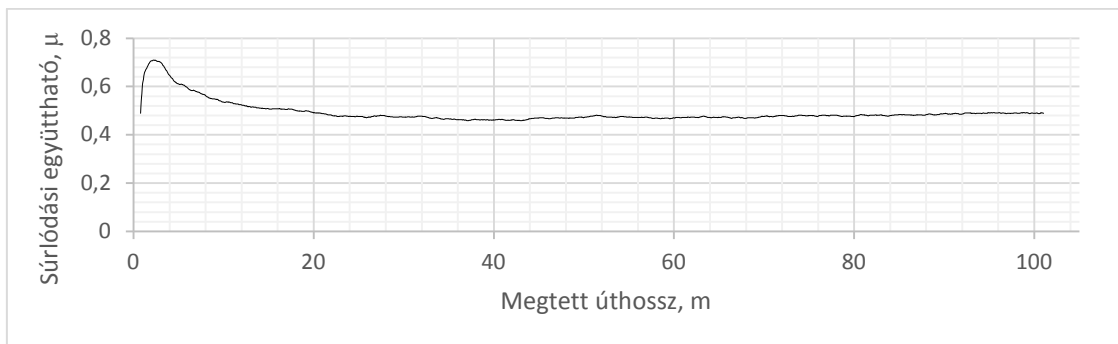


HIP_G0_F10_v200

hip_g0_8A_200_sic_f10_v1

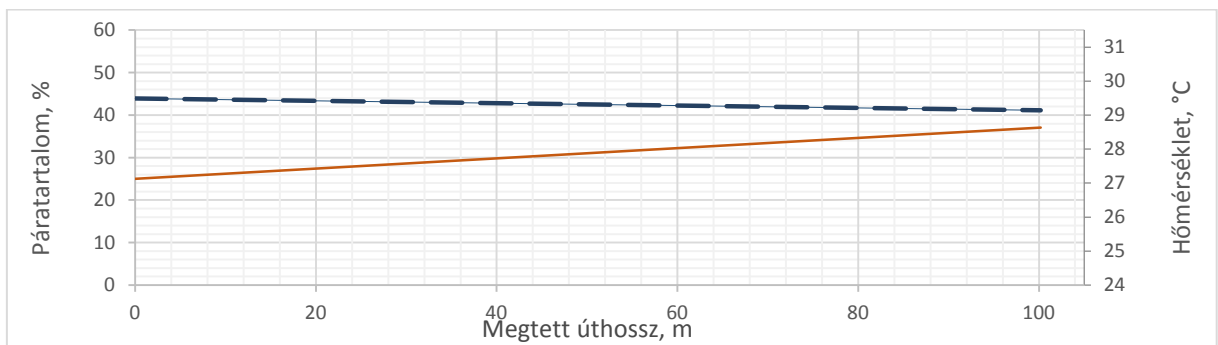
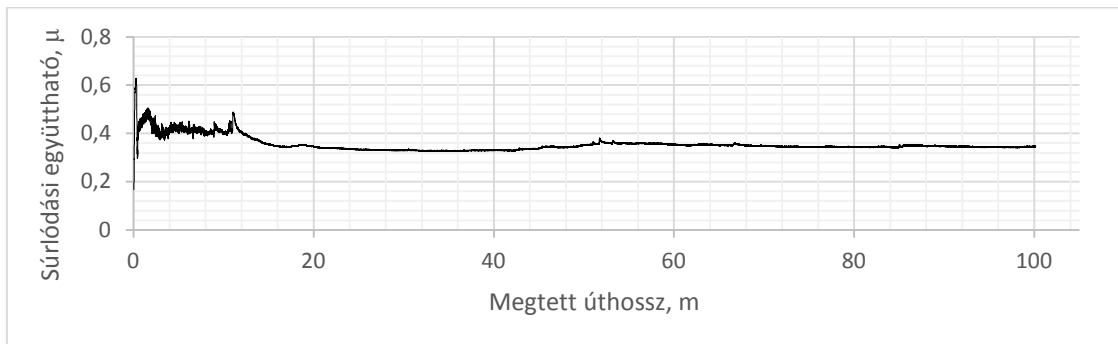


hip_g0_8A_200_sic_f10_v2

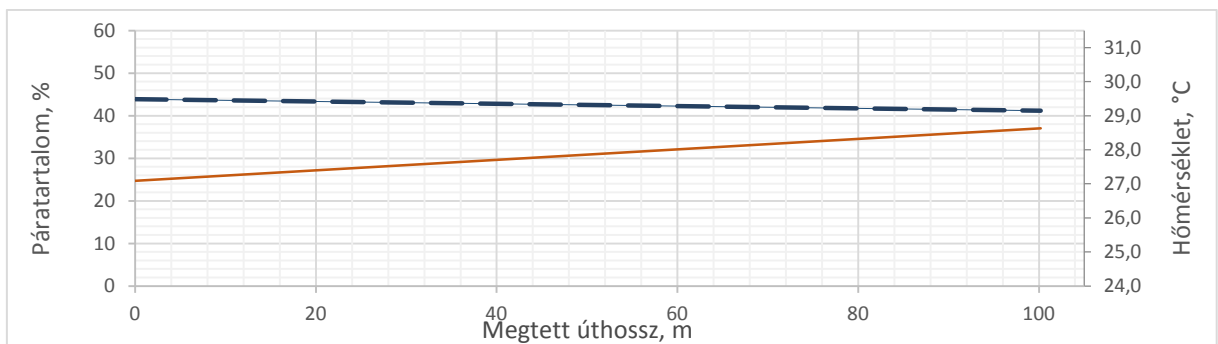
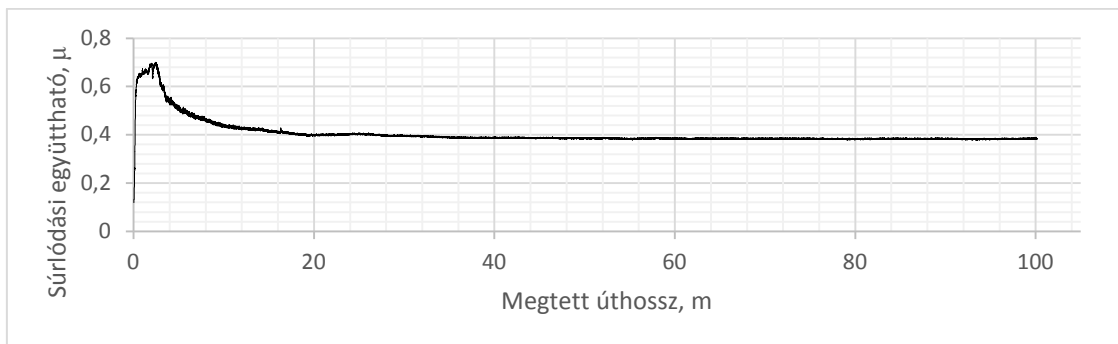


HIP_G0_F40_v10

hip_g0_9A_10_sic_v1

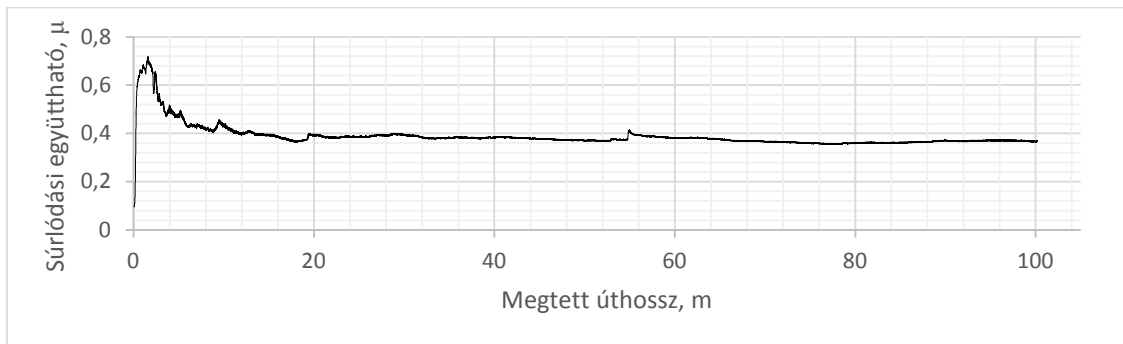


hip_g0_9A_10_sic_v2

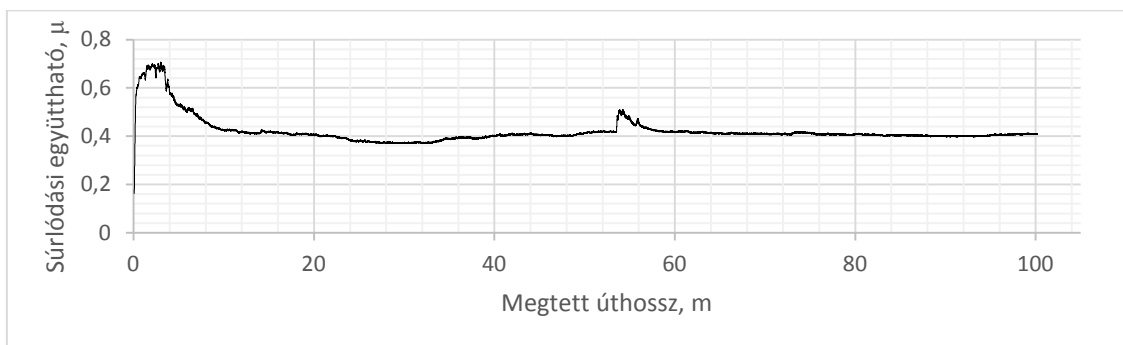


HIP_G0_F40_v20

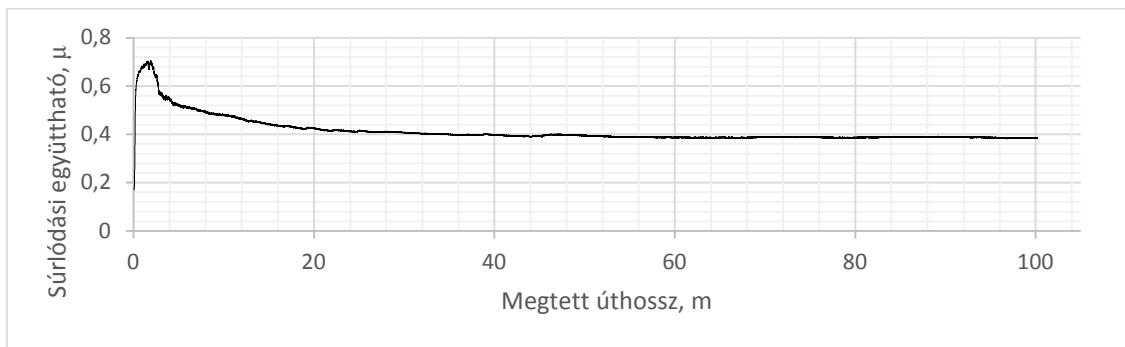
HIP_G0_2B_v20_1p_SiC golyó



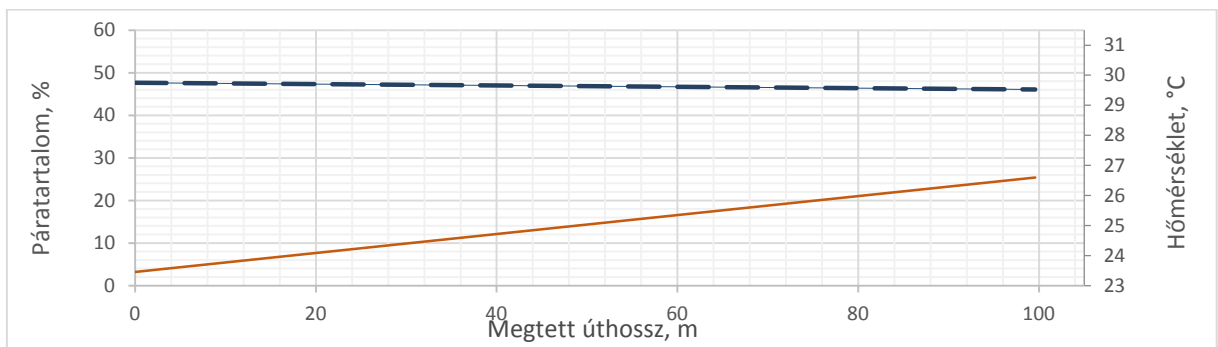
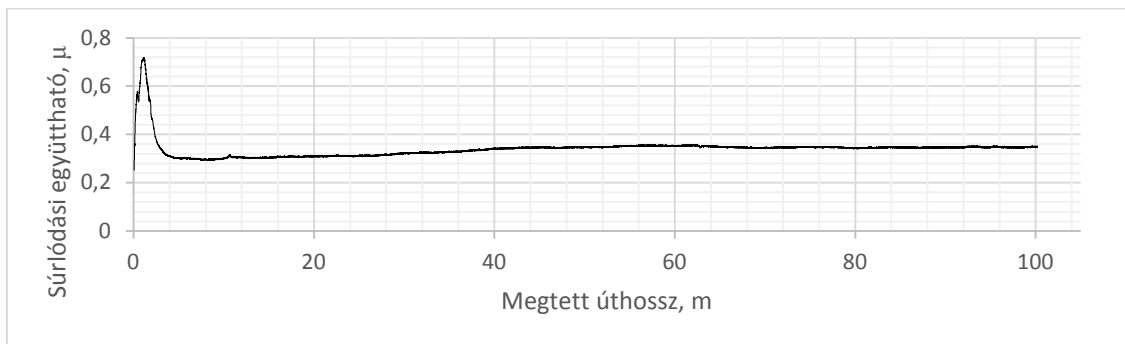
HIP_G0_6A_v20_k_SiC golyó



hip_g0_9A_20_sic_v2

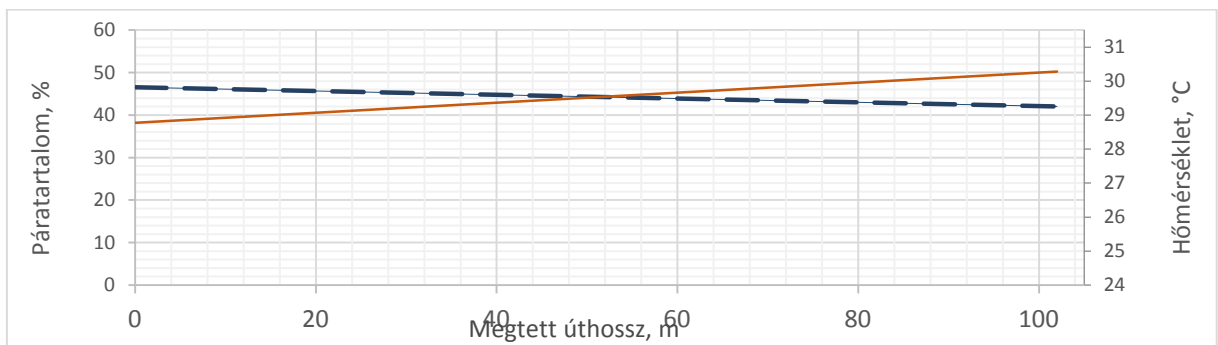
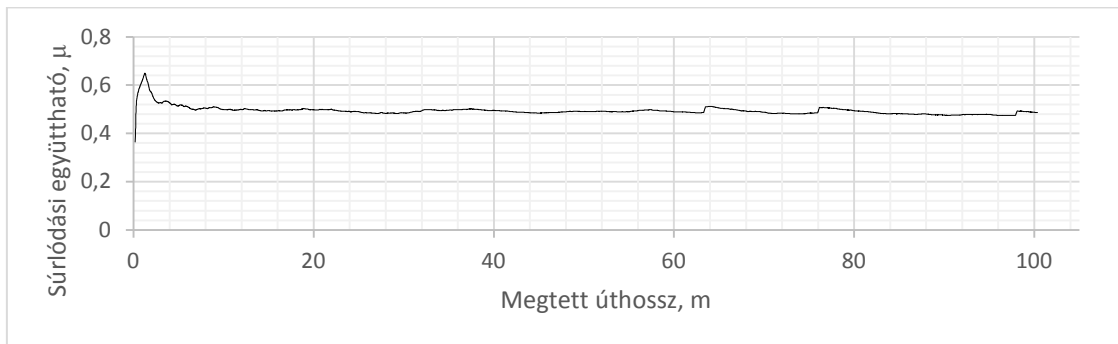


hip_g0_9A_20_sic_v1

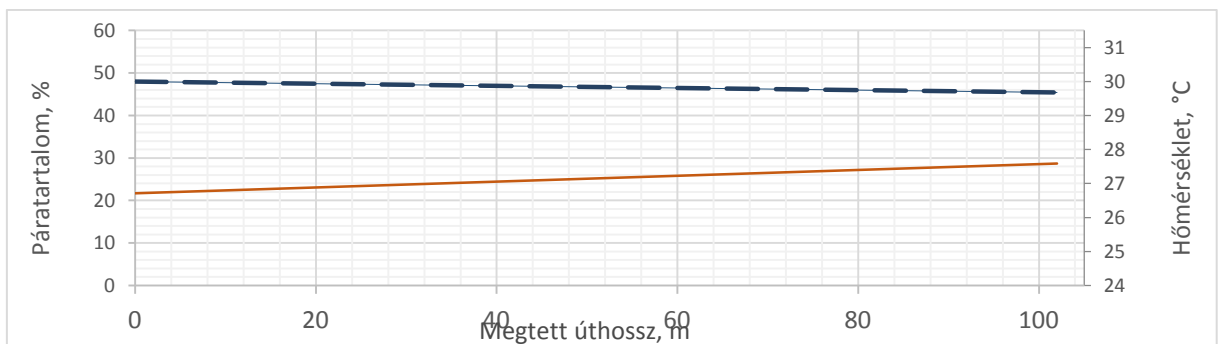
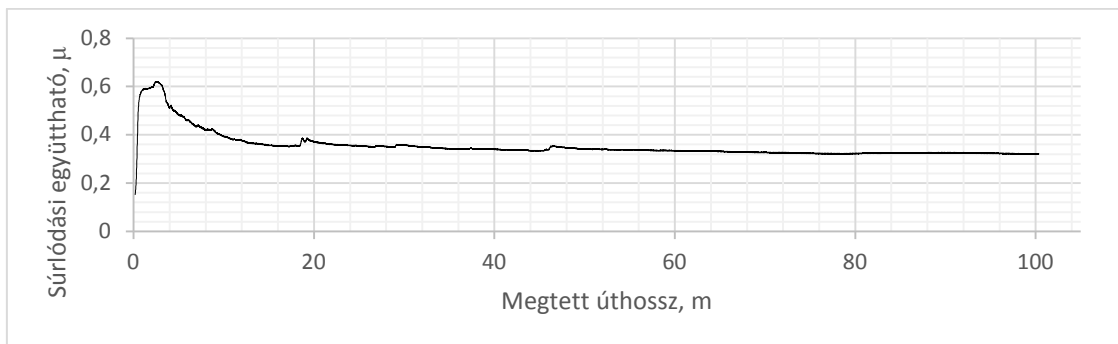


HIP_G0_F40_v50

hip_g0_11A_50_sic_f40_v1

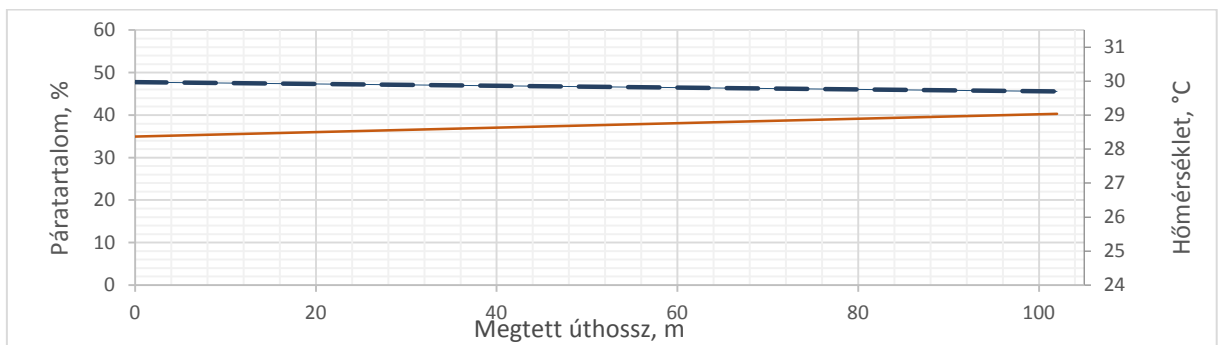
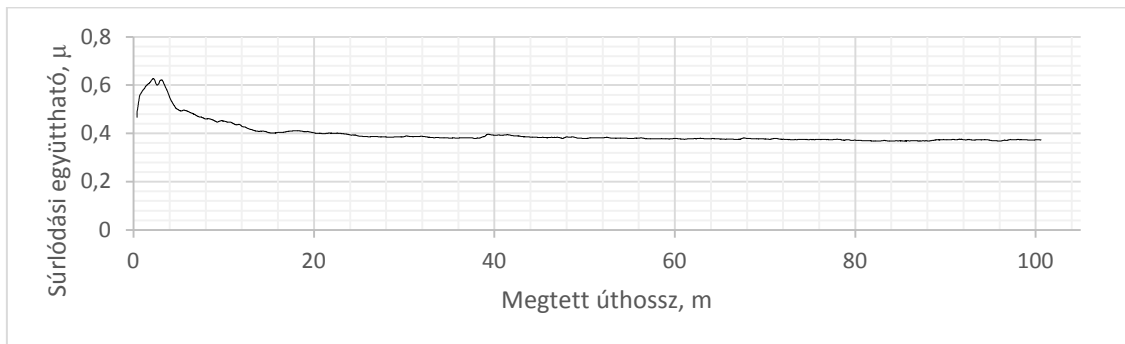


hip_g0_10b_50_sic_f40_v1

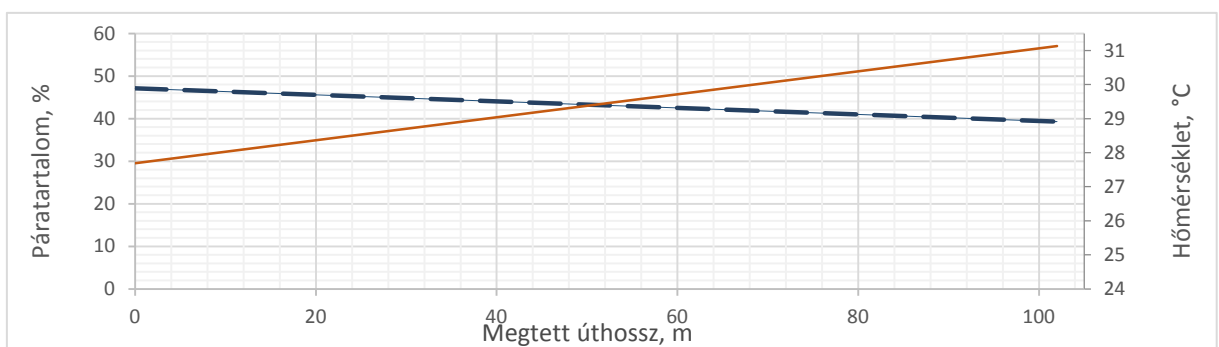
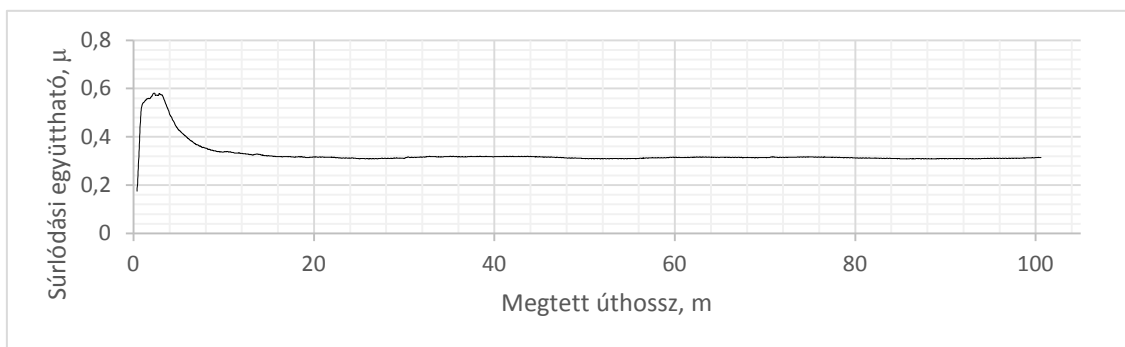


HIP_G0_F40_v100

hip_g0_11A_100_sic_f40_v1

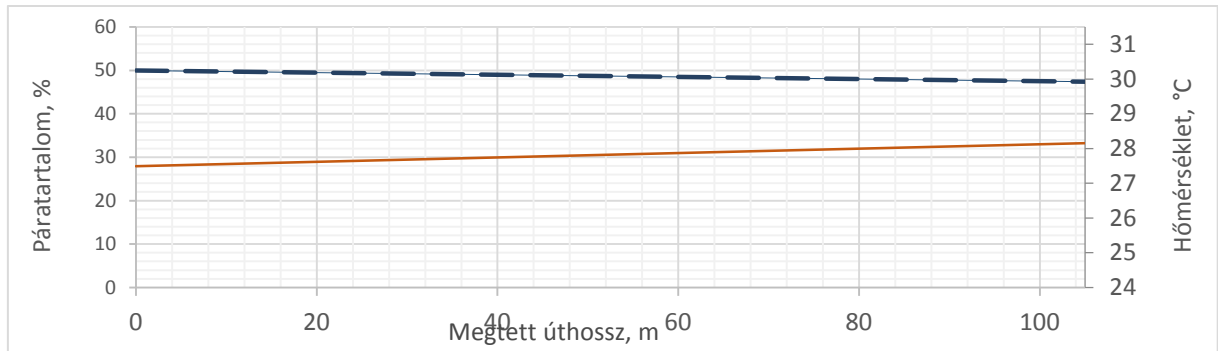
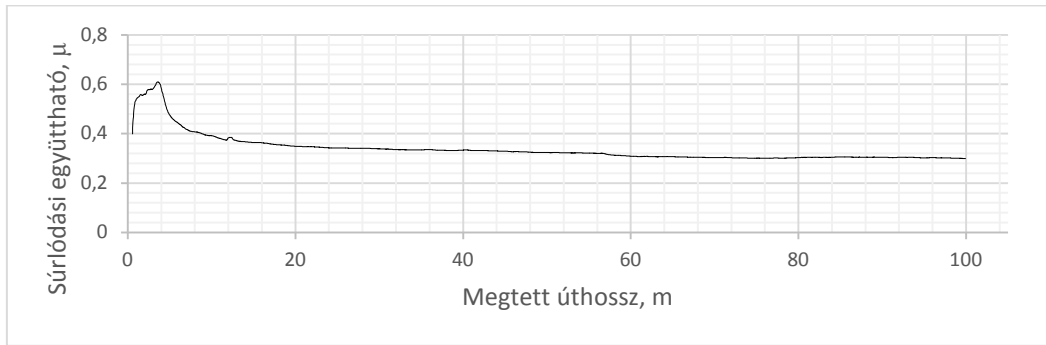


hip_g0_10b_100_sic_f40_v1

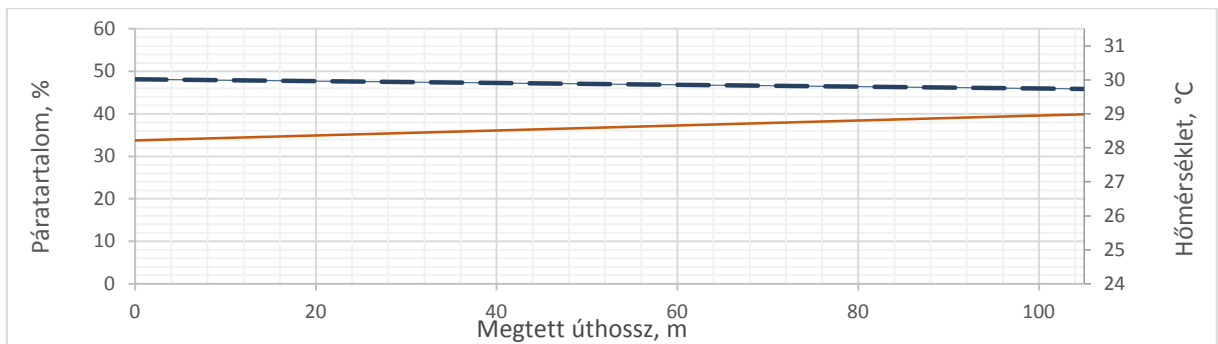
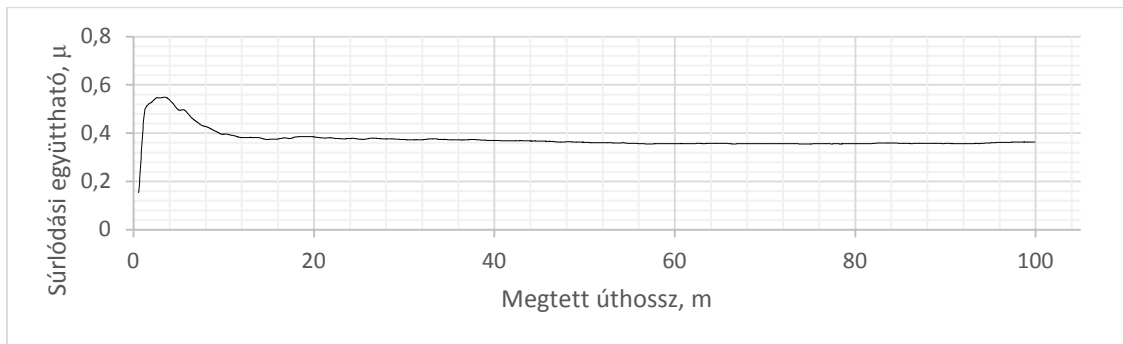


HIP_G0_F40_v150

hip_g0_11A_150_sic_f40_v1

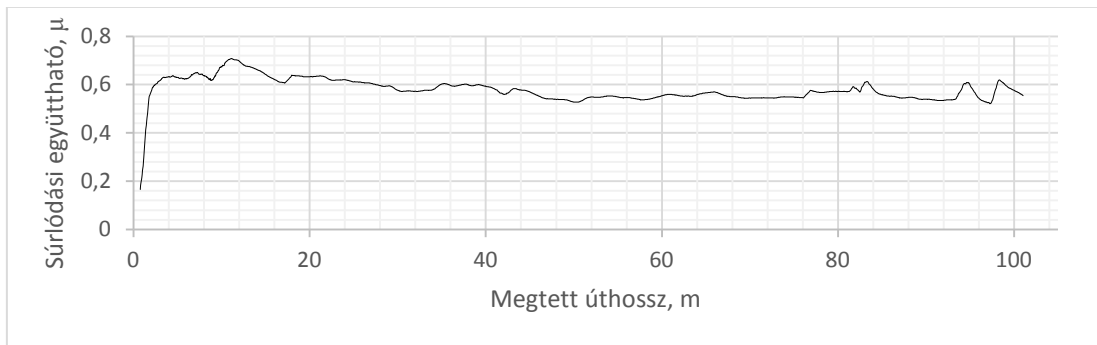


hip_g0_11b_150_sic_f40_v1

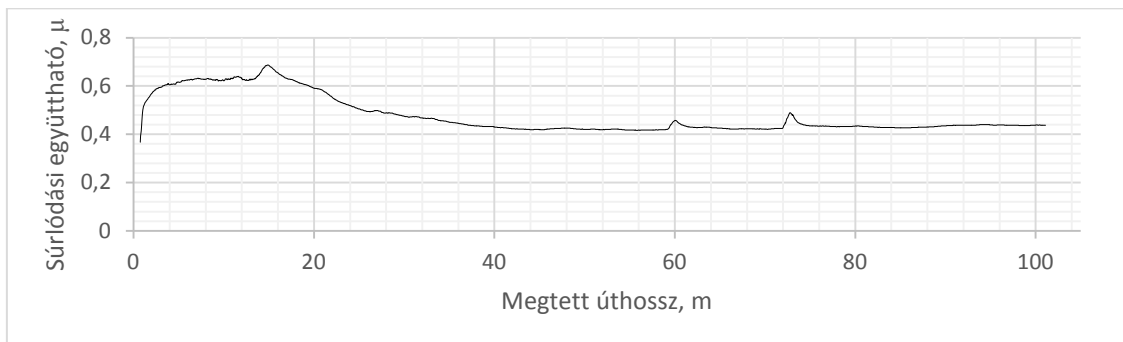


HIP_G0_F40_v200

HIP_G0_1A_v200_1v_SiC golyó

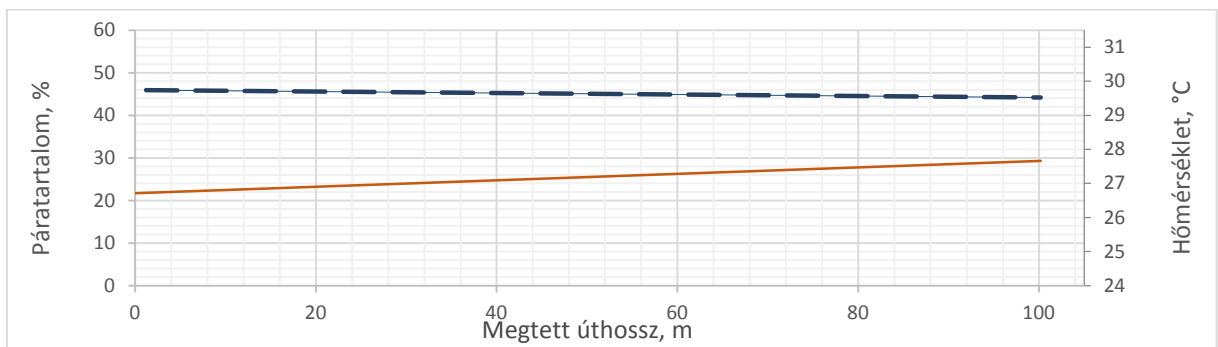
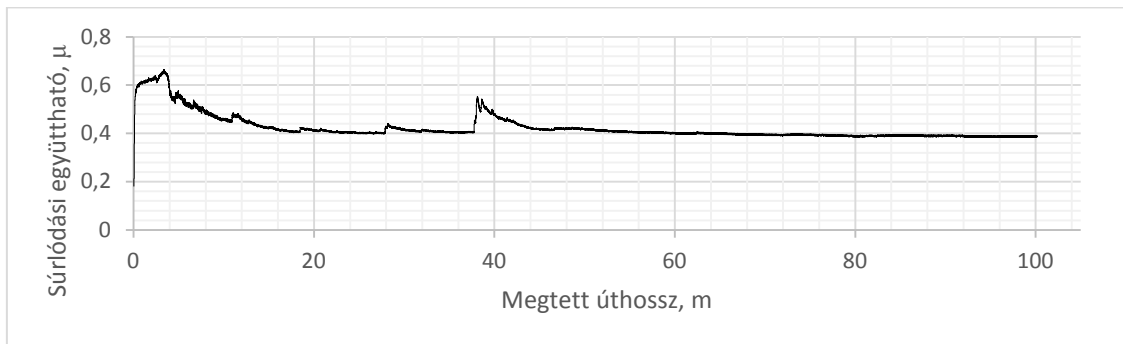


HIP_G0_4A_v200_2p_SiC golyó

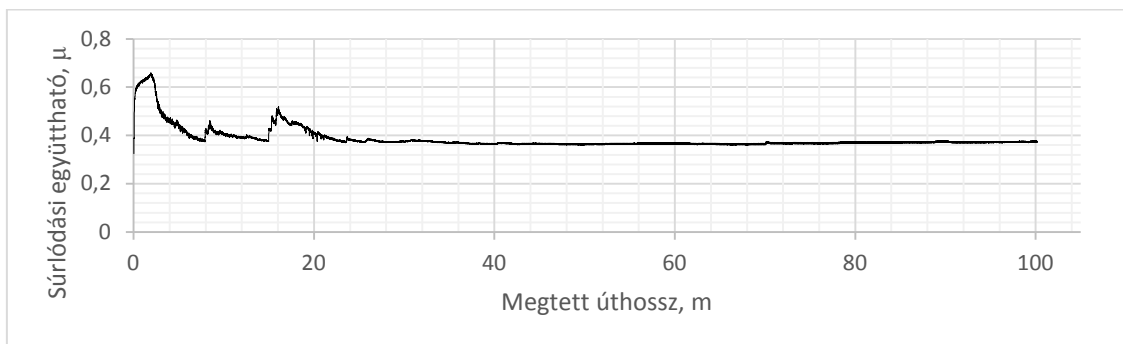


HIP_G0_F80_v10

hip_g0_10A_10_sic_f80_v1

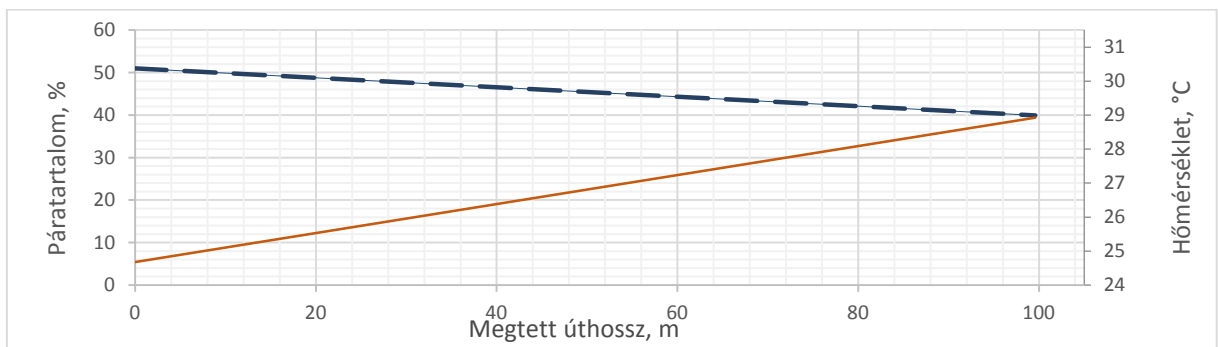


hip_g0_10A_10_sic_f80_v2

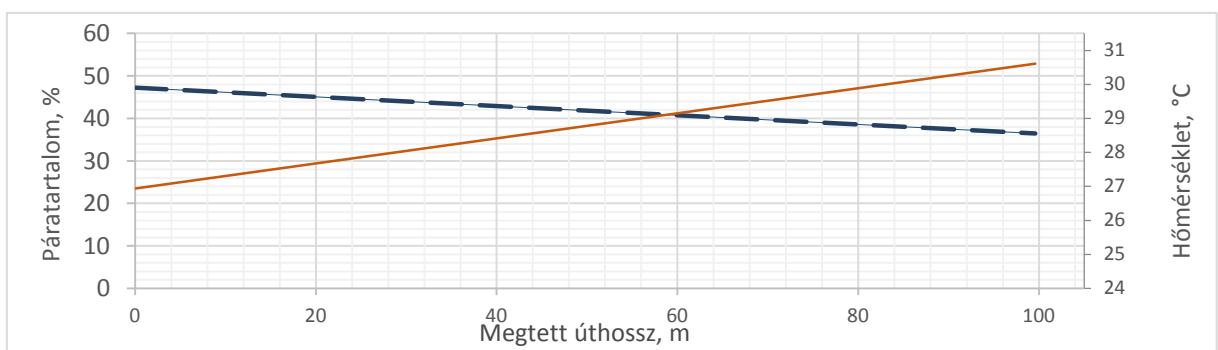
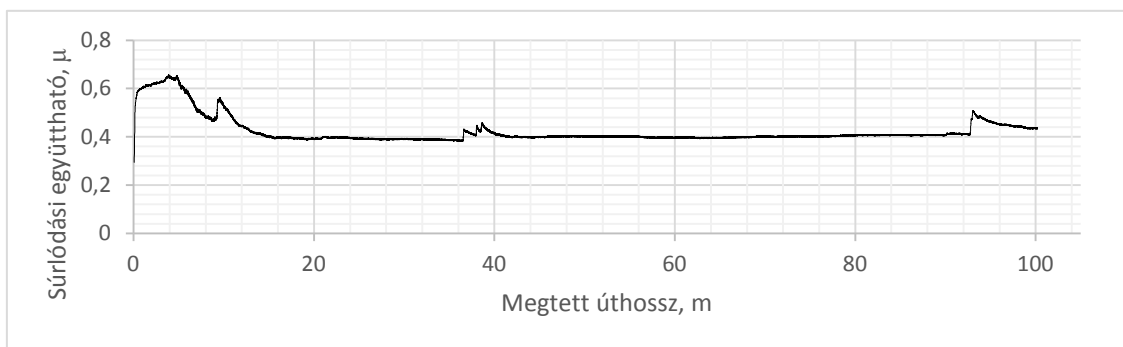


HIP_GO_F80_v20

hip_g0_10A_20_sic_f80_v1

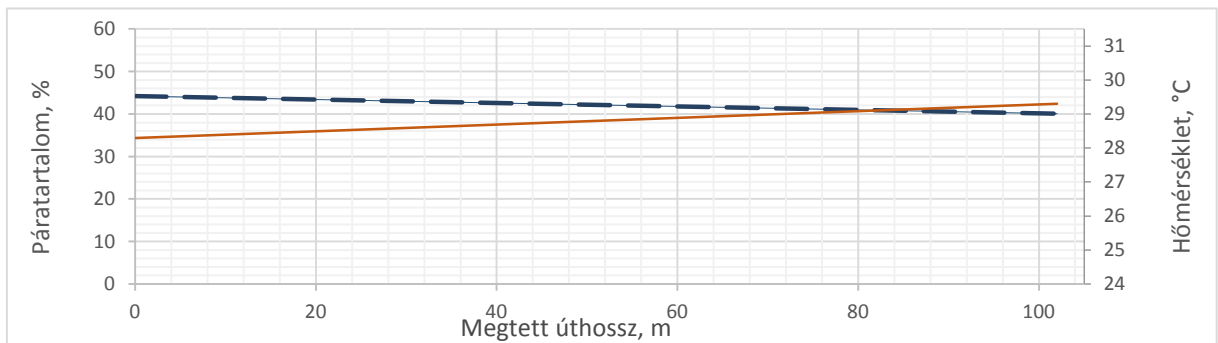
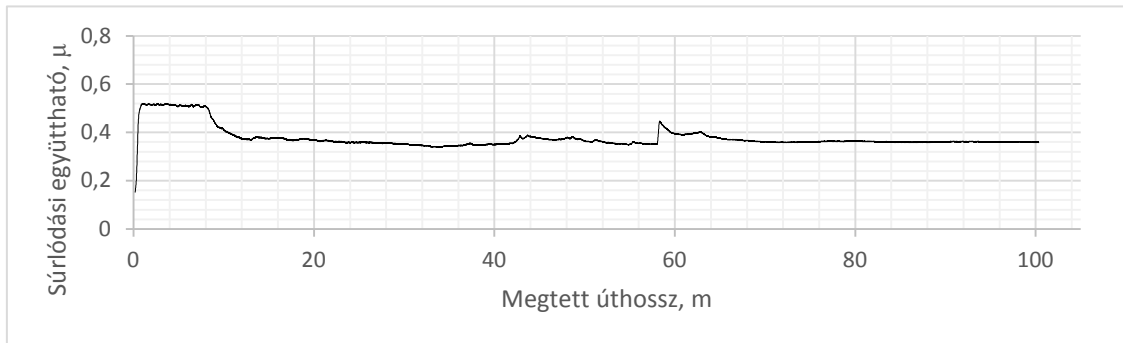


hip_g0_10A_20_sic_f80_v2

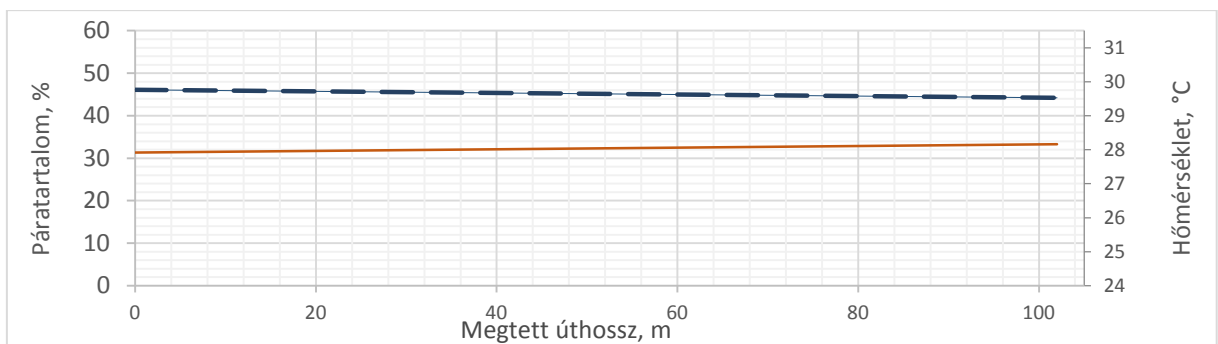
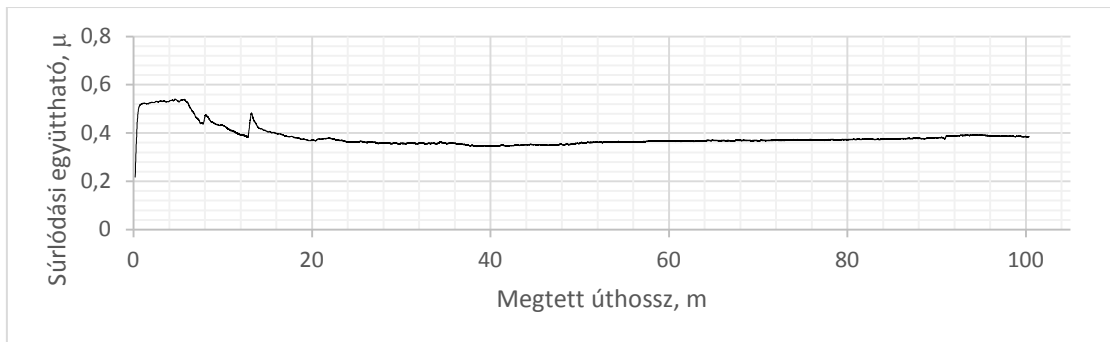


HIP_G0_F80_v50

hip_g0_10b_50_sic_f80_v1

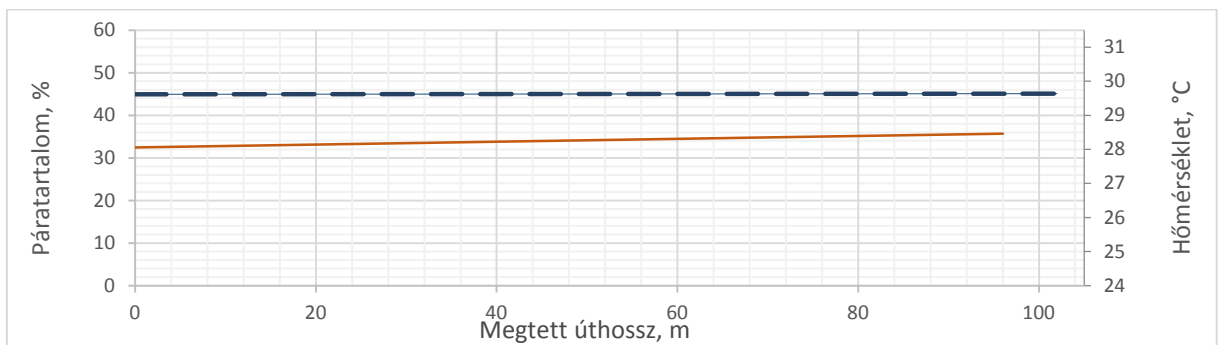
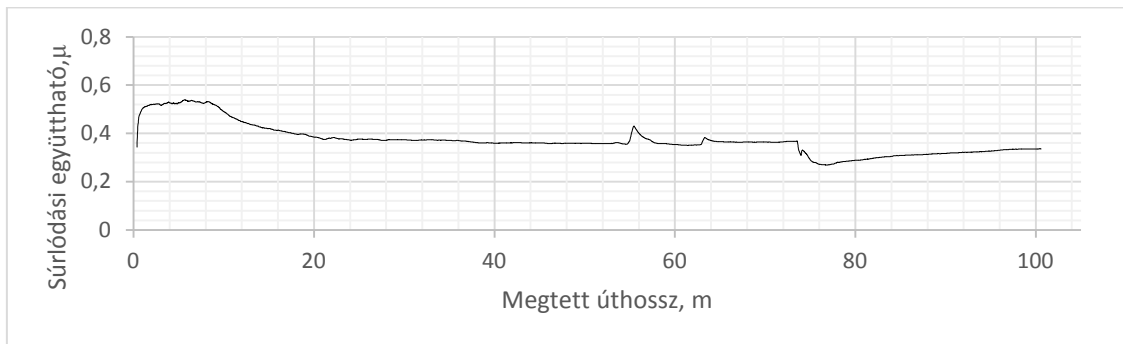


hip_g0_10b_50_sic_f80_v3

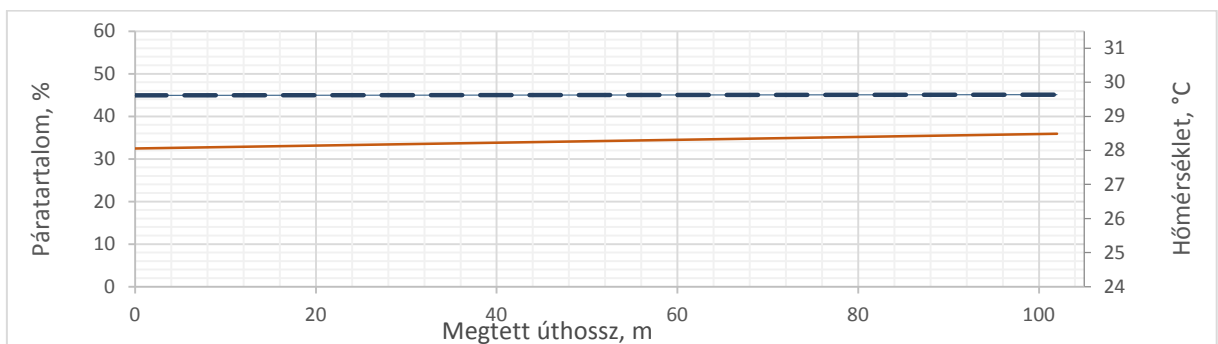
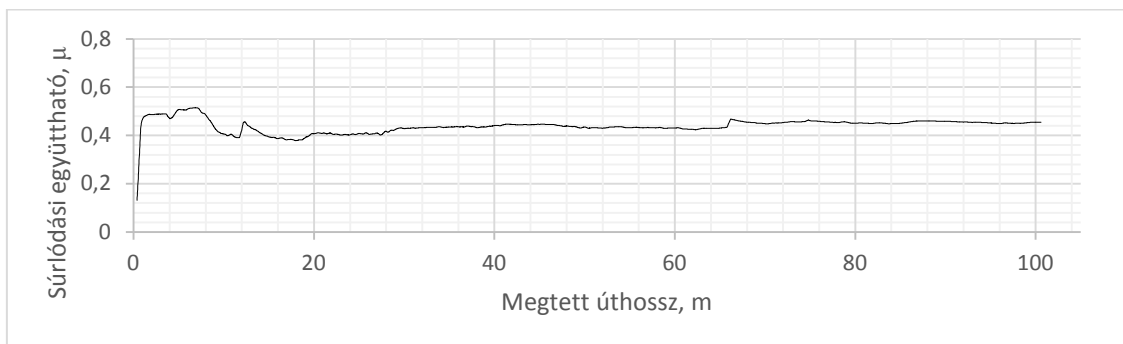


HIP_G0_F80_v100

hip_g0_11a_100_sic_f80_v1

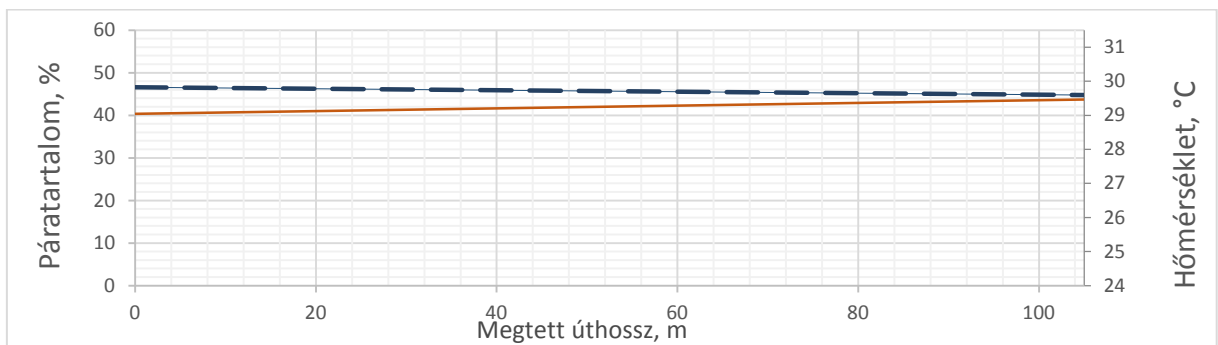
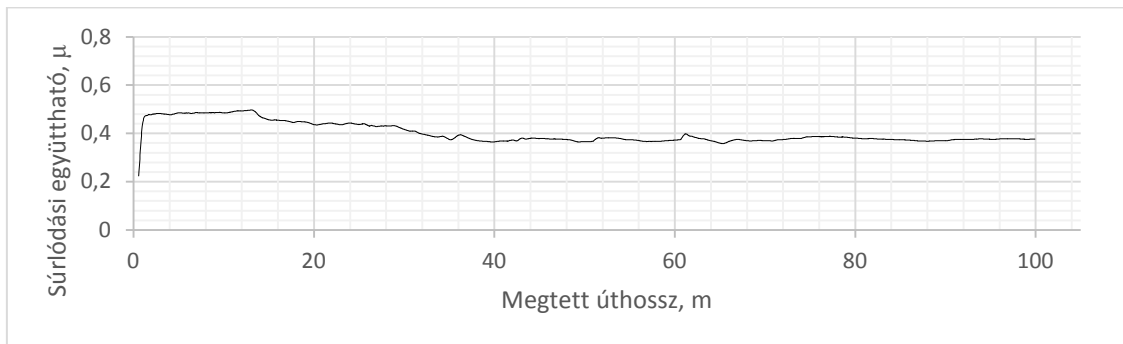


hip_g0_11b_100_sic_f80_v1

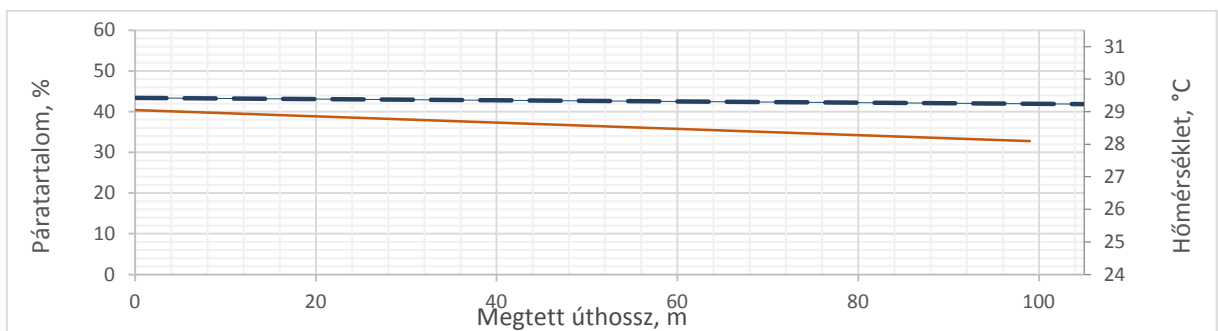
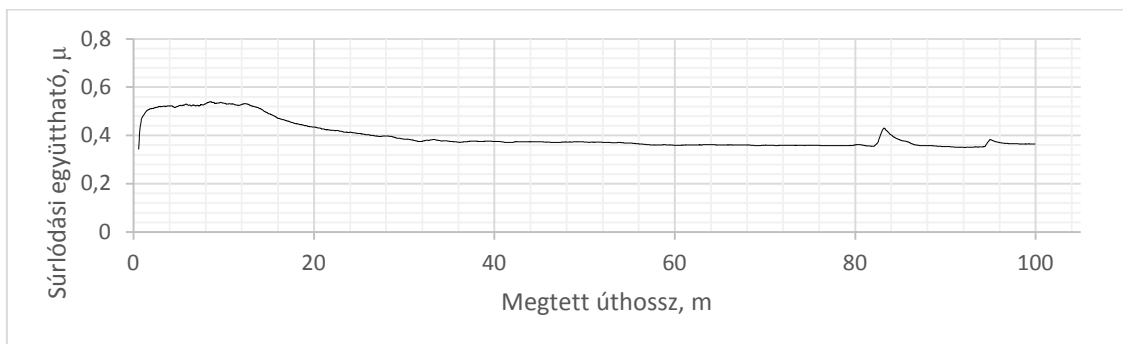


HIP_G0_F80_v150

hip_g0_11b_150_sic_f80_v1

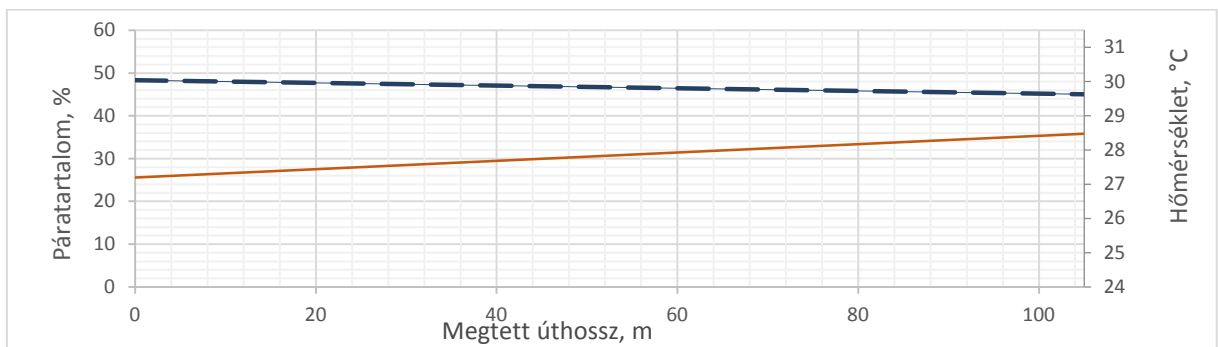
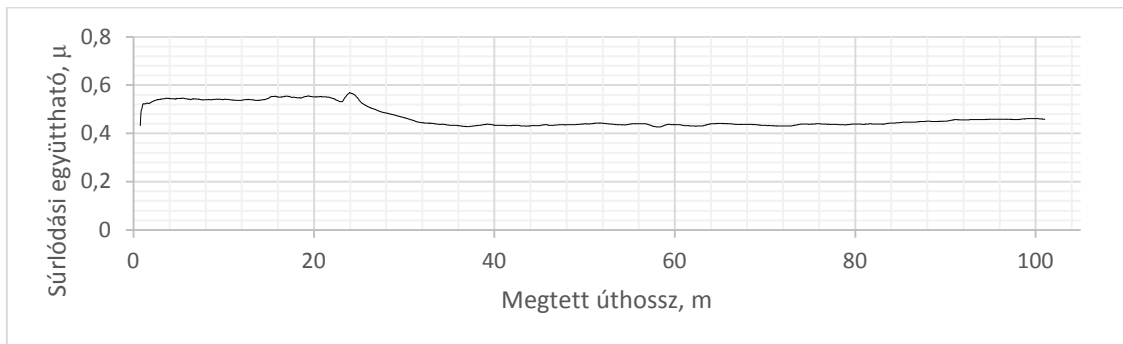


hip_g0_11a_150_sic_f80_v1

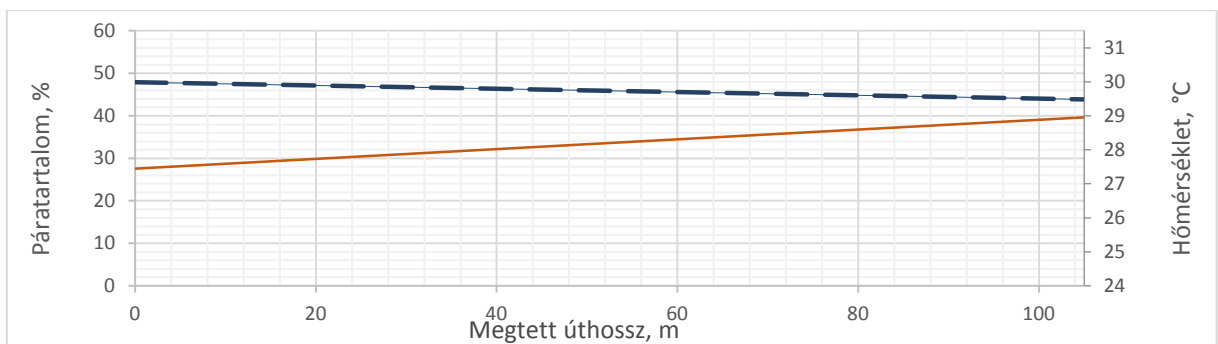
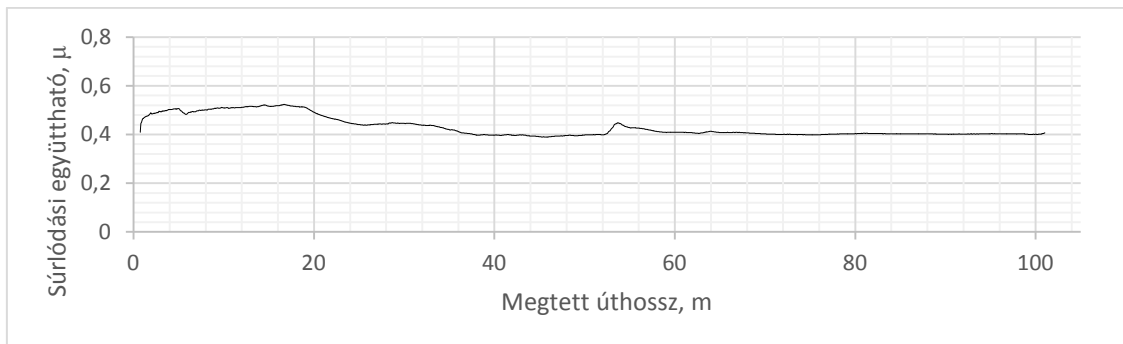


HIP_G0_F80_v200

hip_g0_10a_200_sic_f80_v1

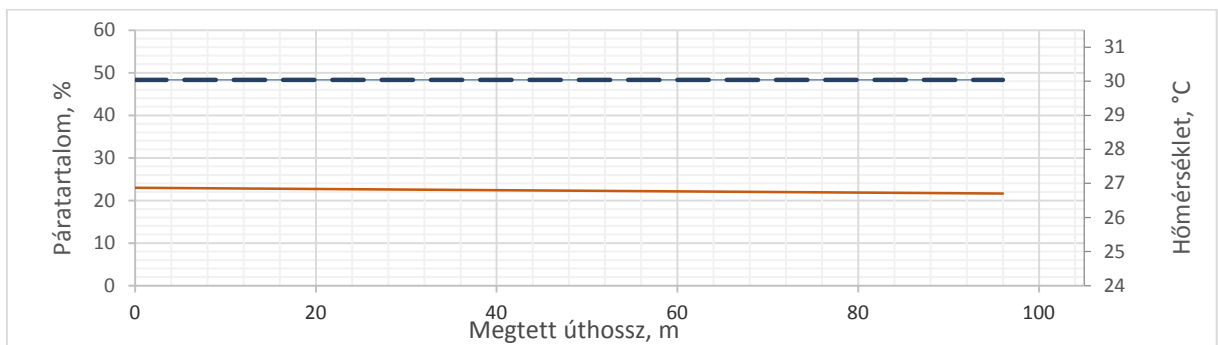
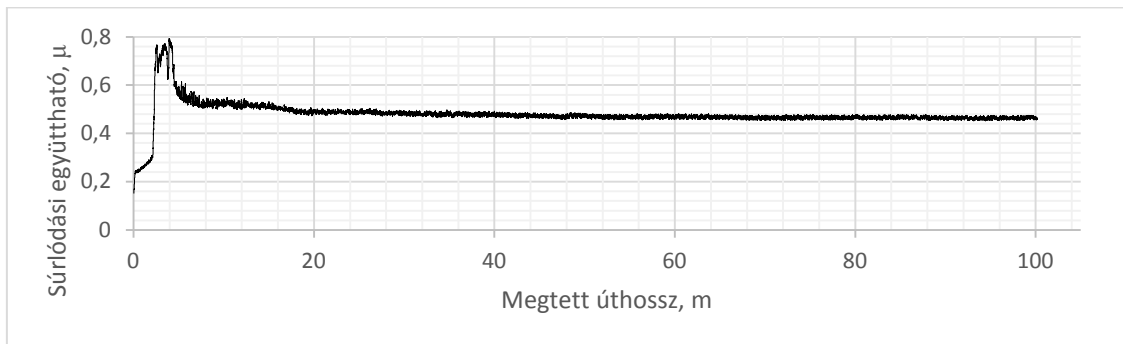


hip_g0_10a_200_sic_f80_v2

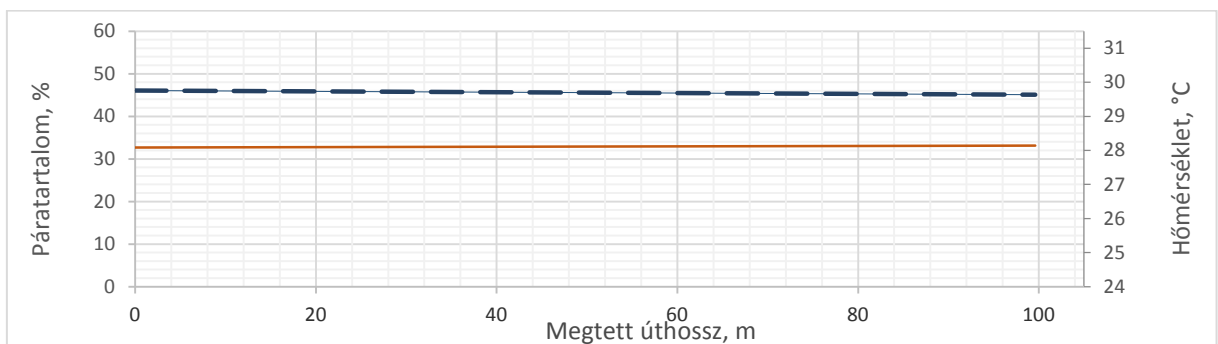
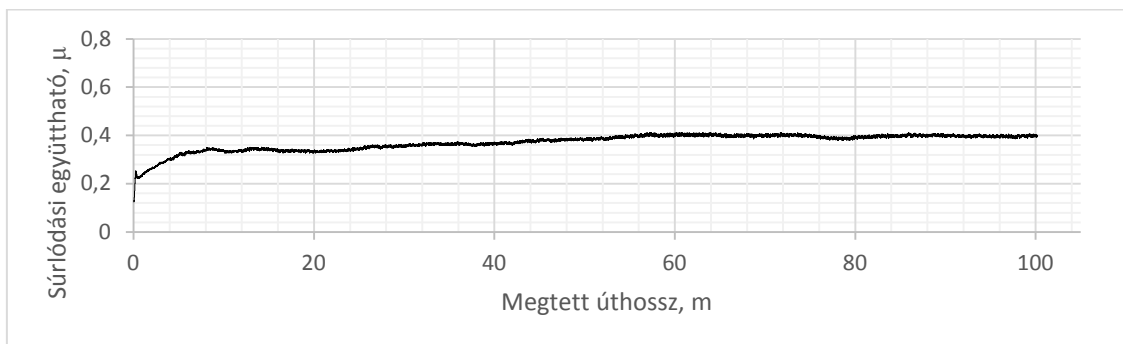


HIP_G1_F10_v10

hip_g1_1b_10_sic_f10_v2

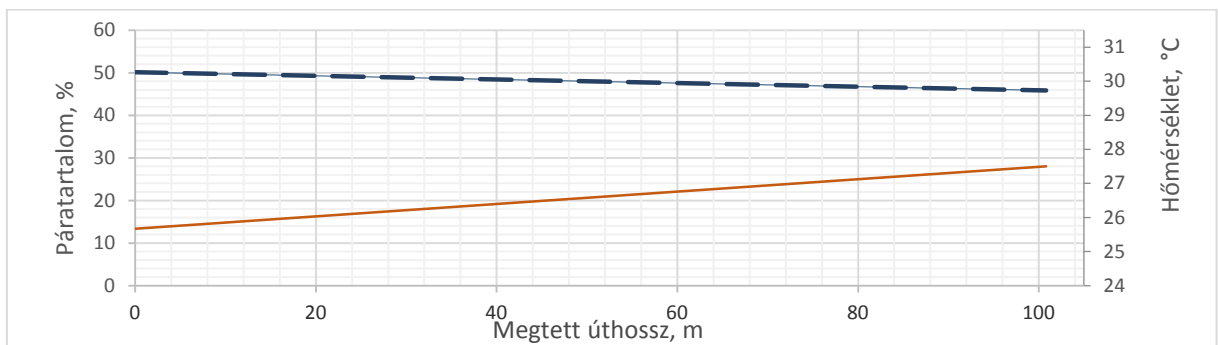
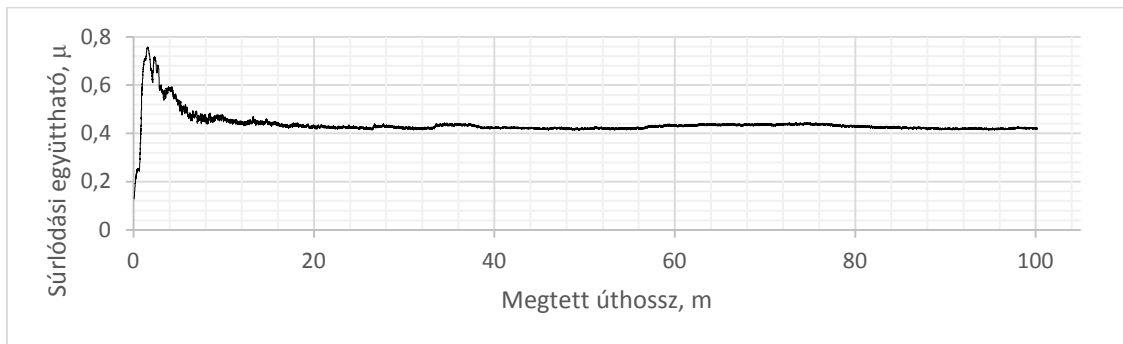


hip_g1_6a_10_sic_f10_v1

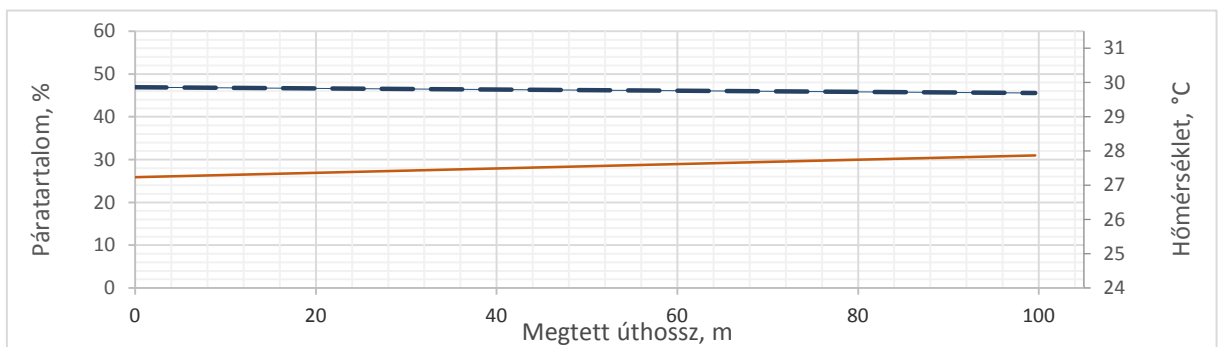
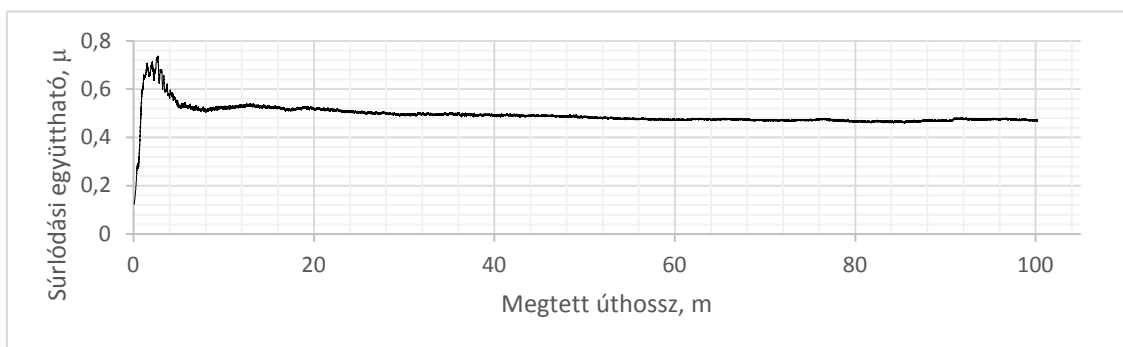


HIP_G1_F10_v20

hip_g1_6a_20_sic_f10_v1

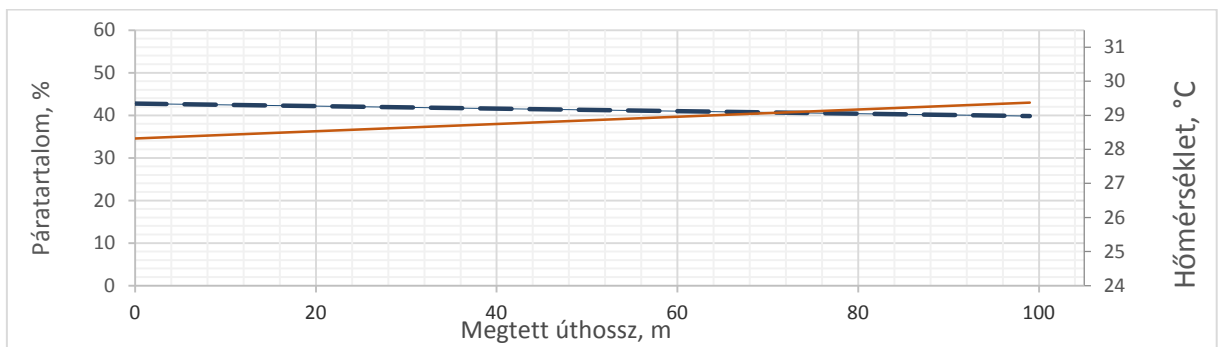
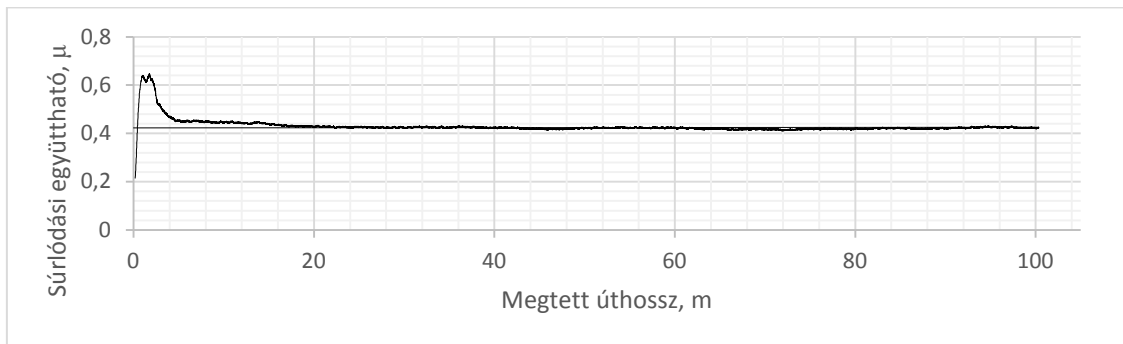


hip_g1_6a_20_sic_f10_v2

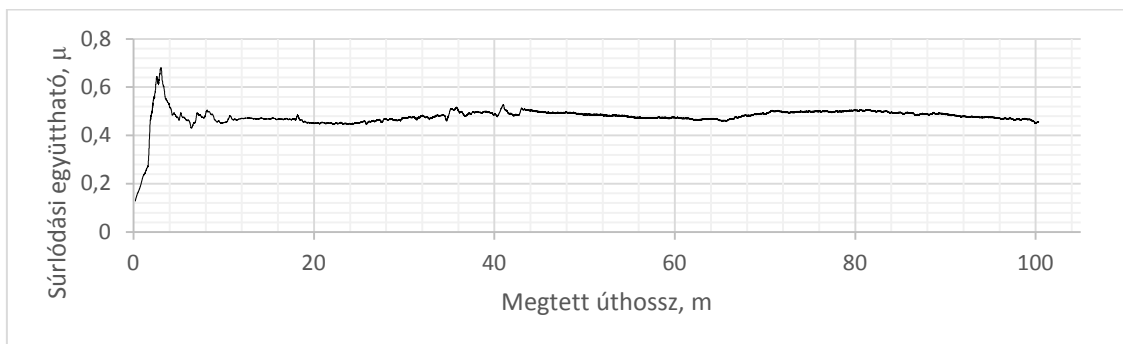


HIP_G1_F10_v50

hip_g1_3a_50_sic_f10_v1

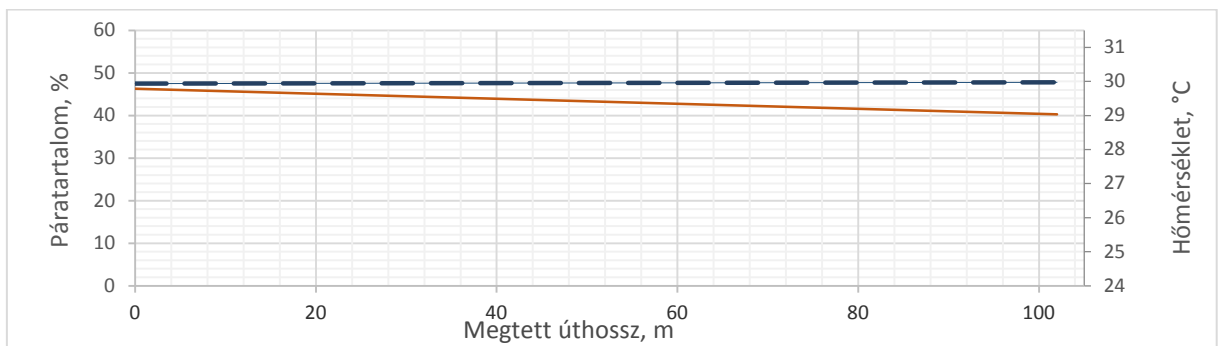
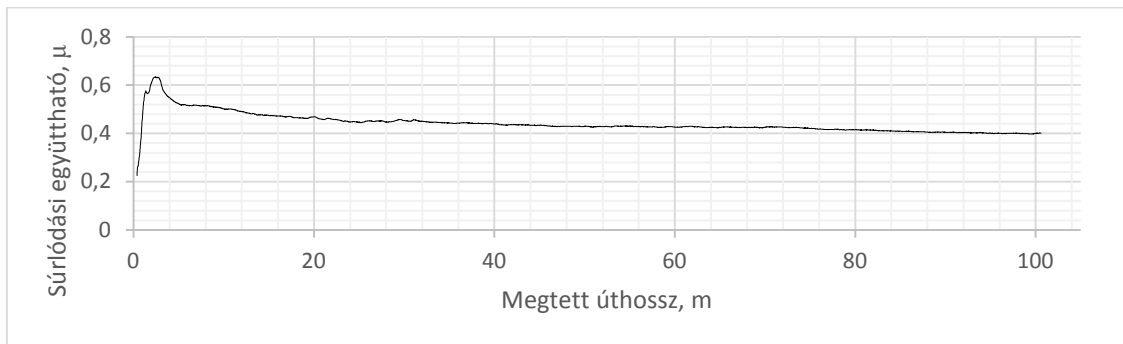


hip_g1_5a_50_sic_f10_v2

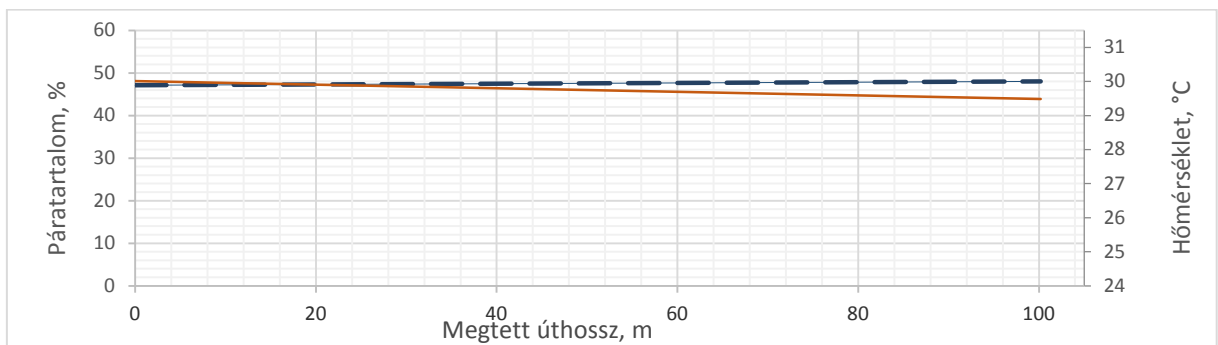
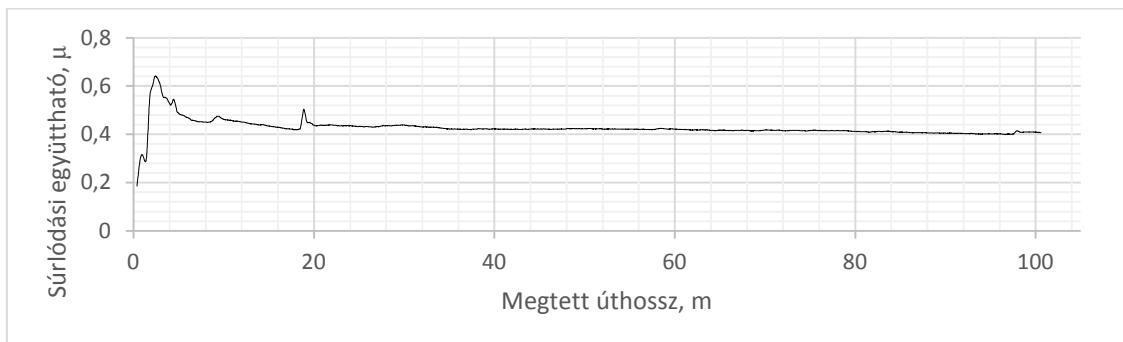


HIP_G1_F10_v100

hip_g1_3a_100_sic_f10_v1

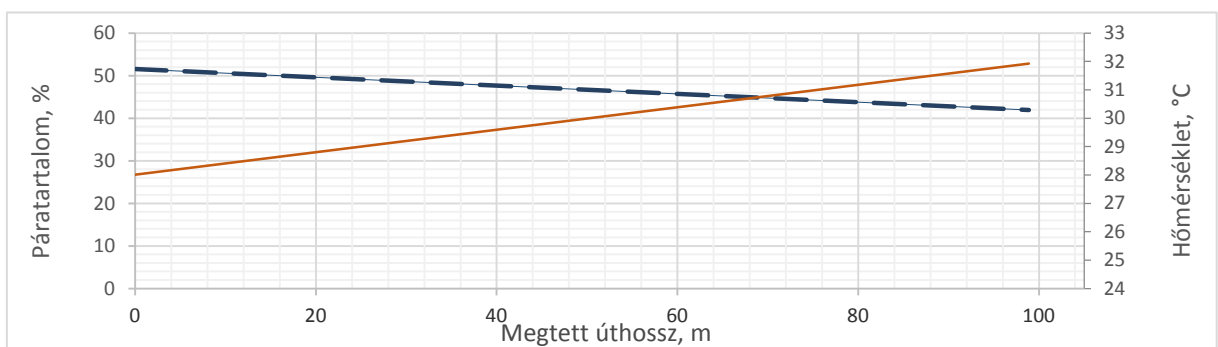
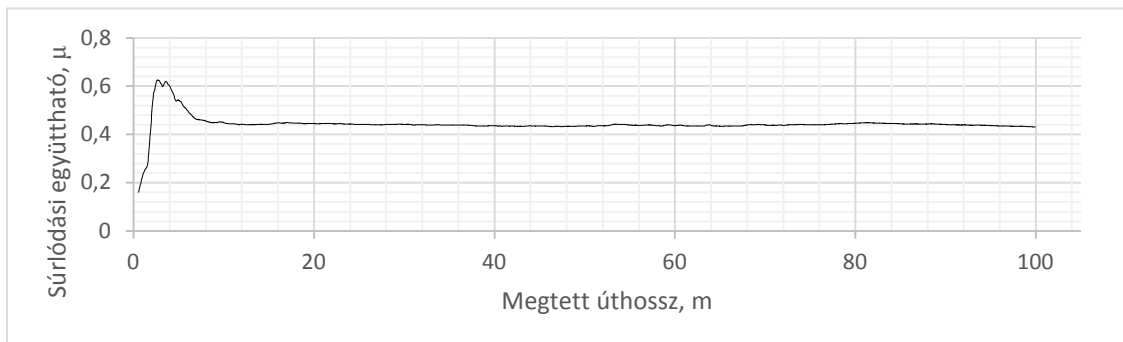


hip_g1_5a_100_sic_f10_v1

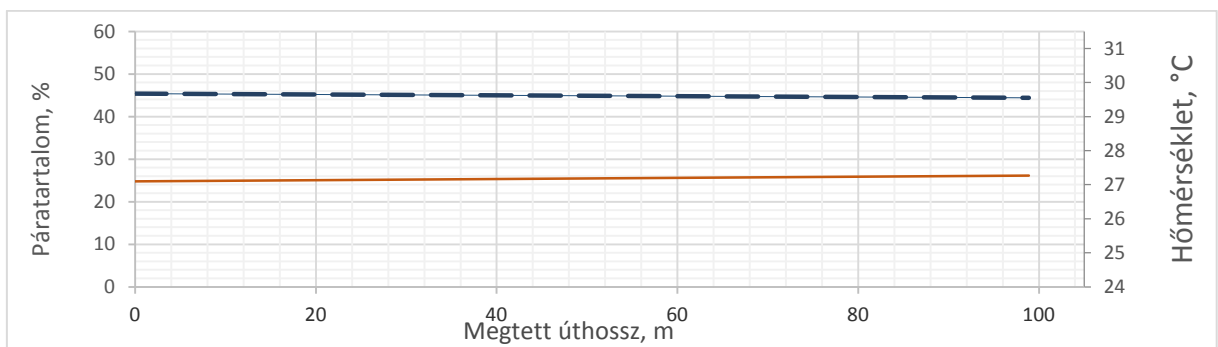
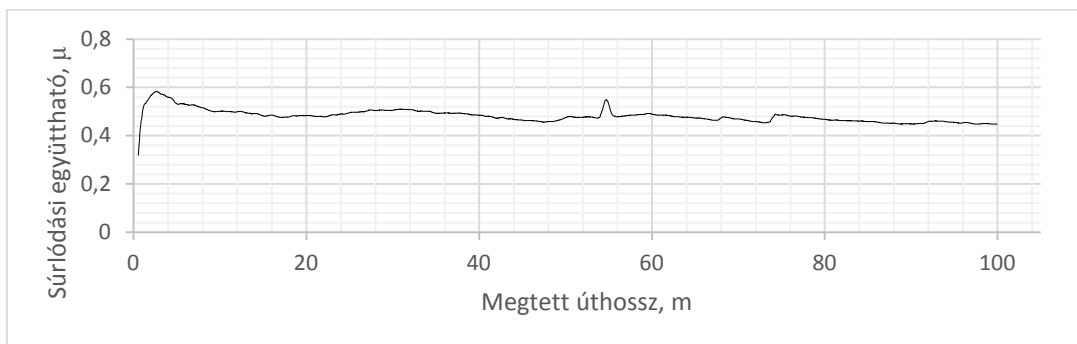


HIP_G1_F10_v150

hip_g1_5a_150_sic_f10_v1

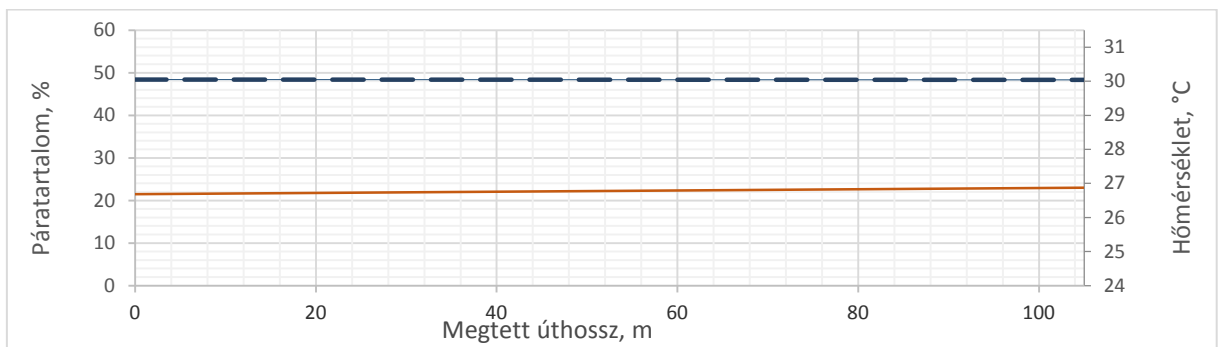
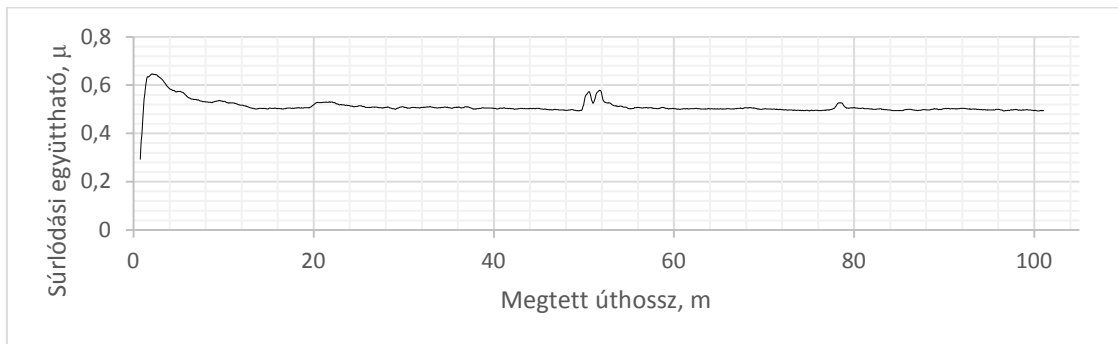


hip_g1_3a_150_sic_f10_v1

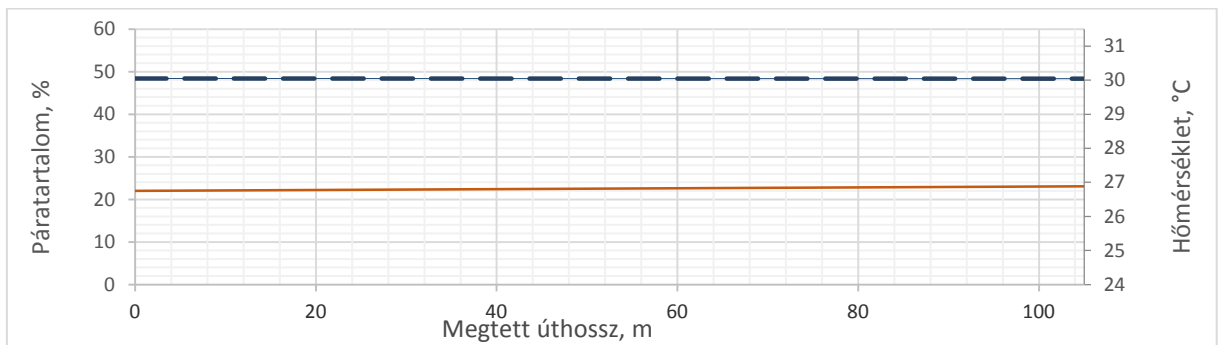
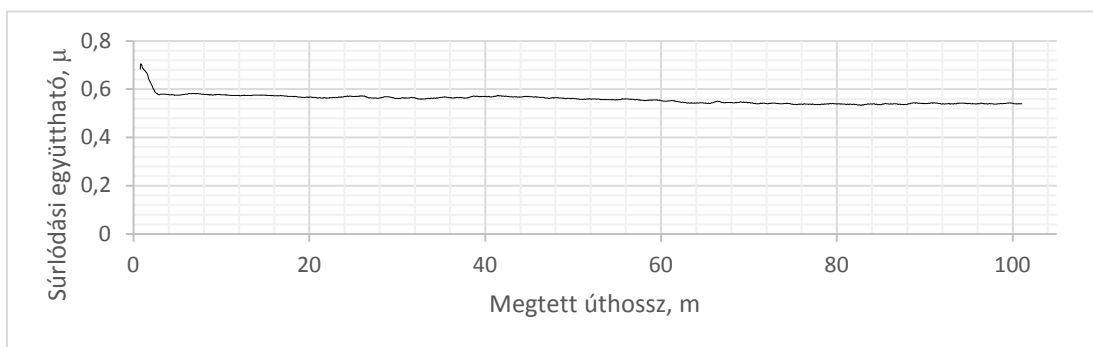


HIP_G1_F10_v200

hip_g1_6a_200_sic_f10_v2

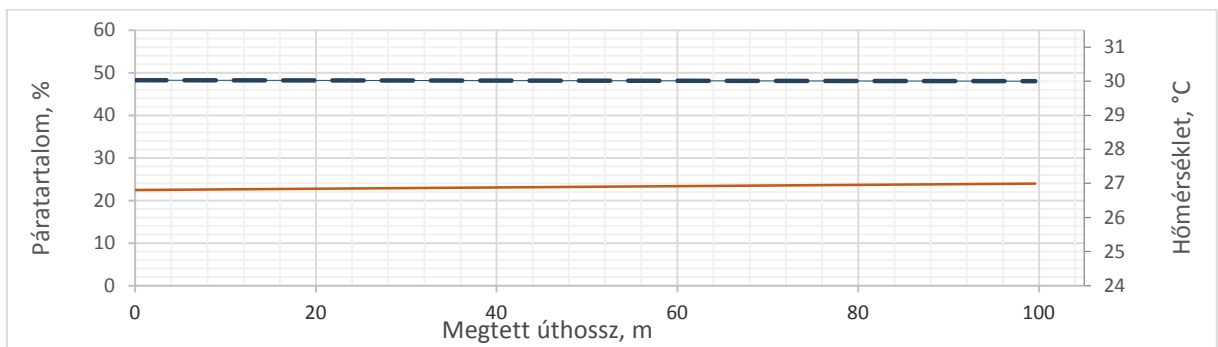
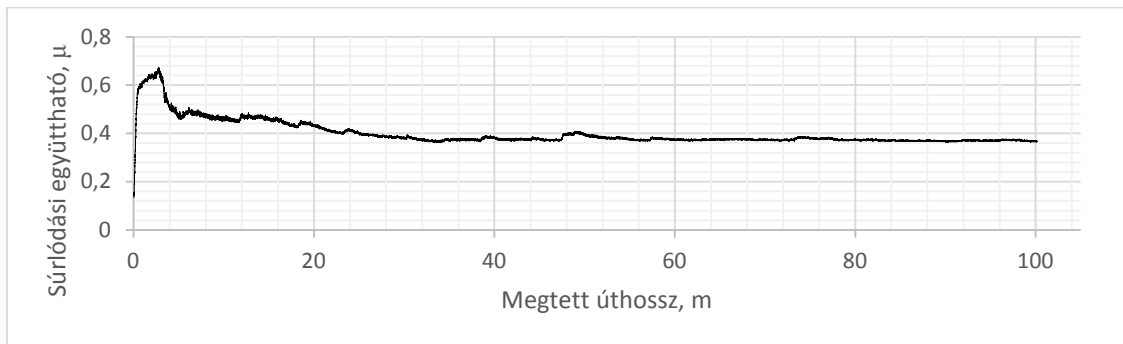


hip_g1_6a_200_sic_f10_v1

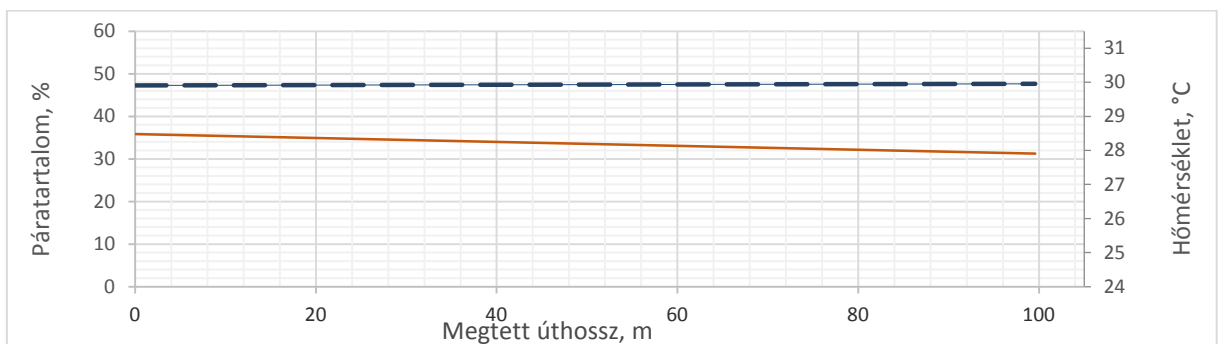
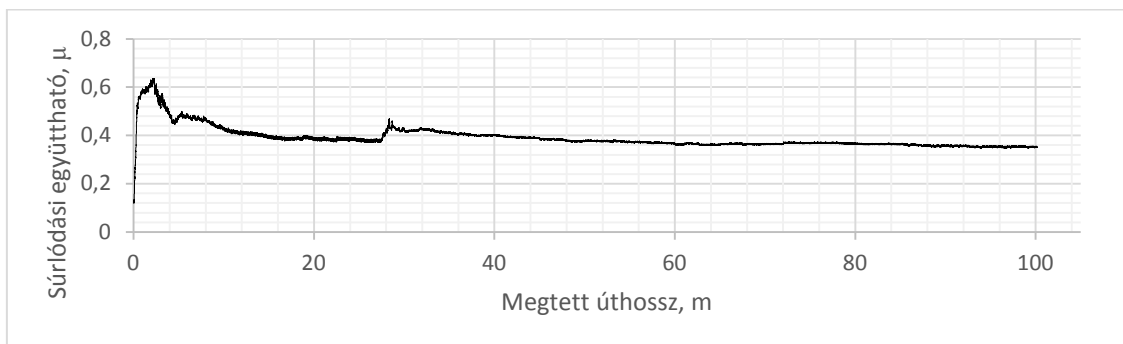


HIP_G1_F40_v10

hip_g1_1b_10_sic_f40_v1

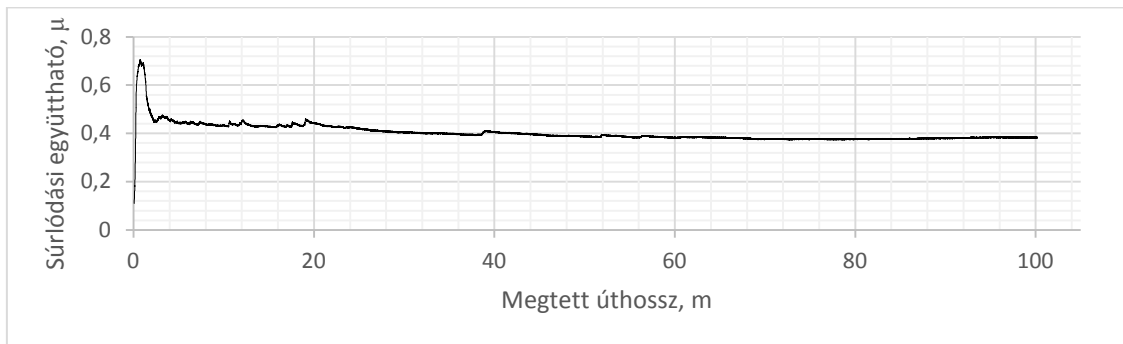


hip_g1_1b_10_sic_f40_v2

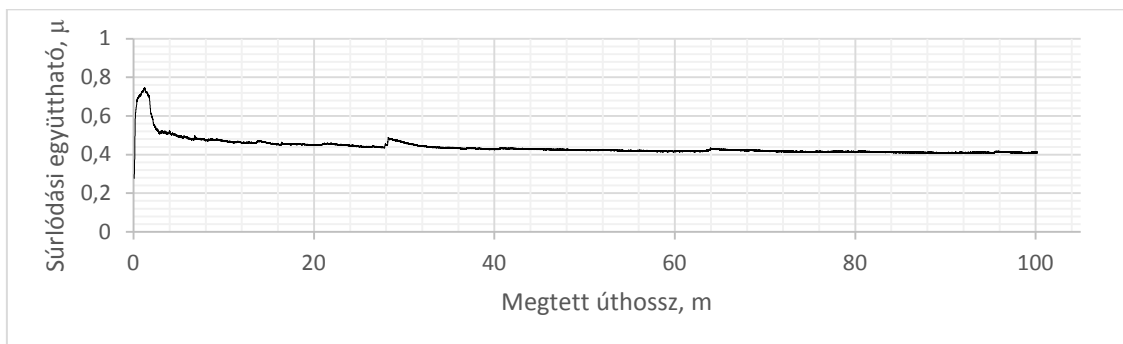


HIP_G1_F40_v20

HIP_G1_4A_v20_1p_SiC golyó

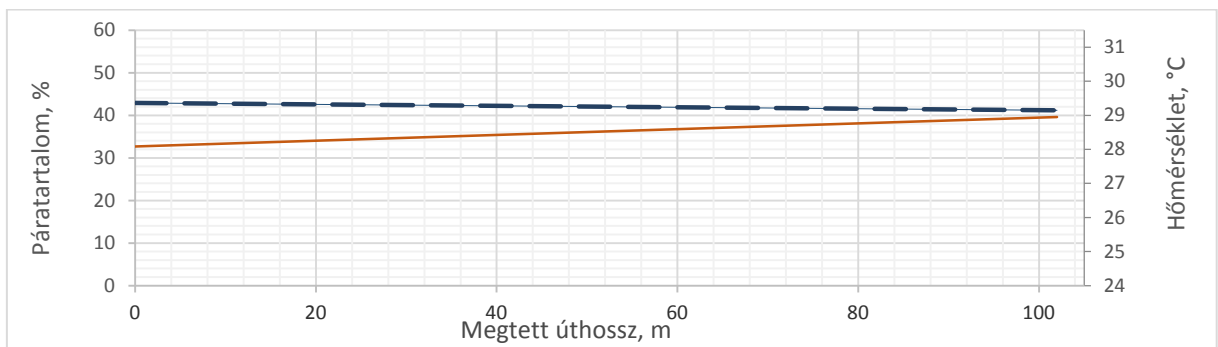
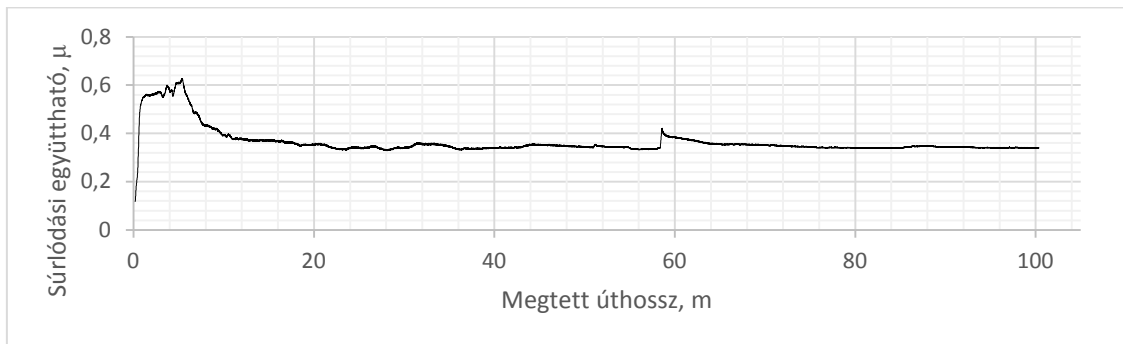


HIP_G1_4A_v20_2p_SiC golyó

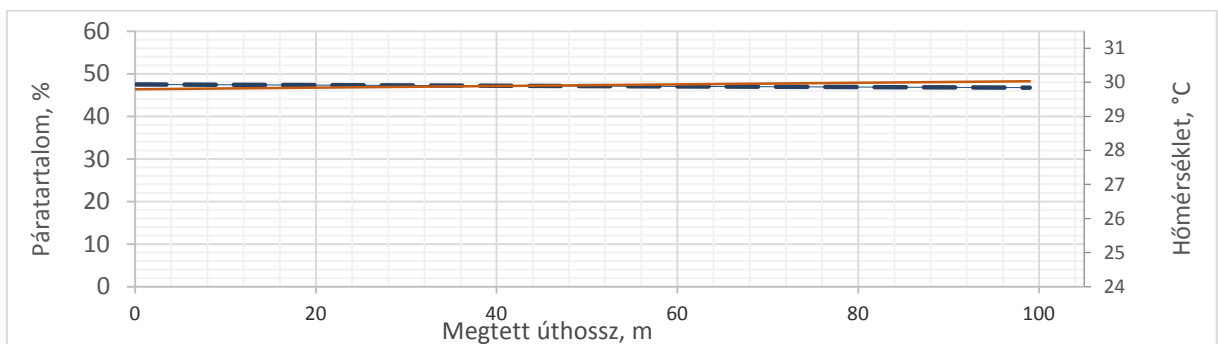
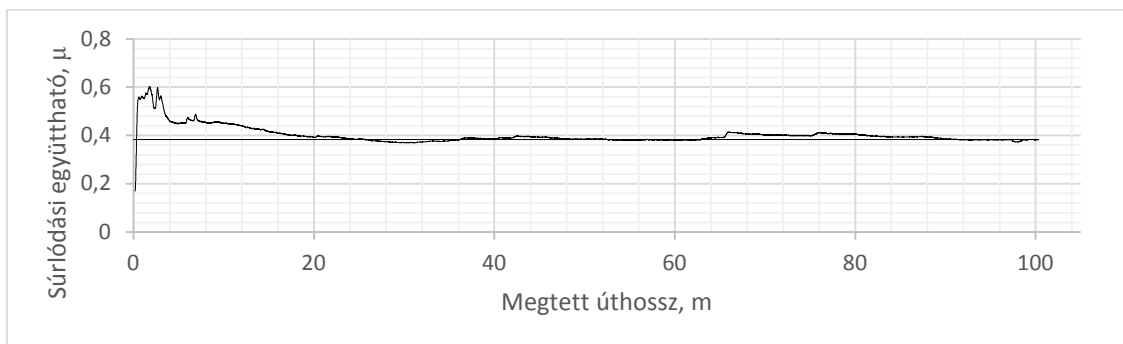


HIP_G1_F40_v50

hip_g1_1a_50_sic_f40_v1

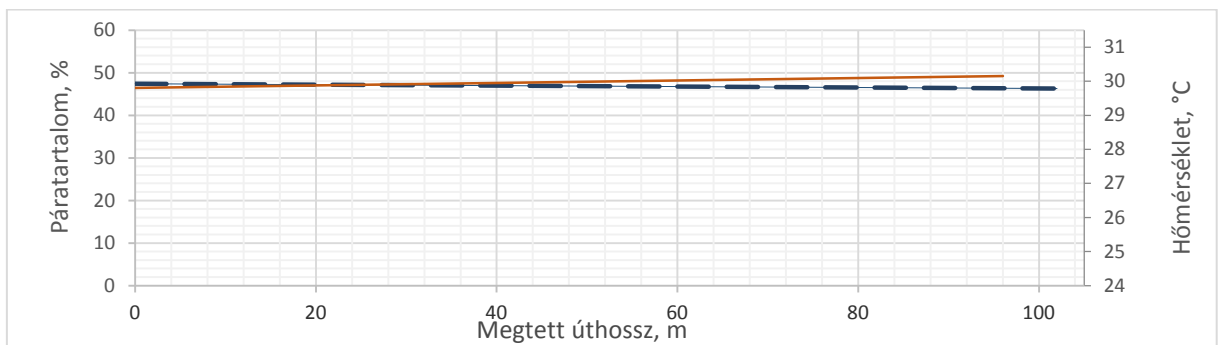
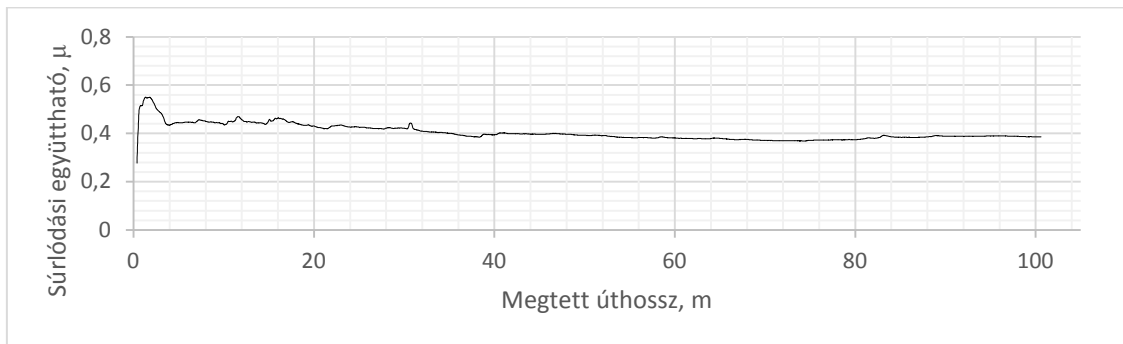


hip_g1_5a_50_sic_f40_v1

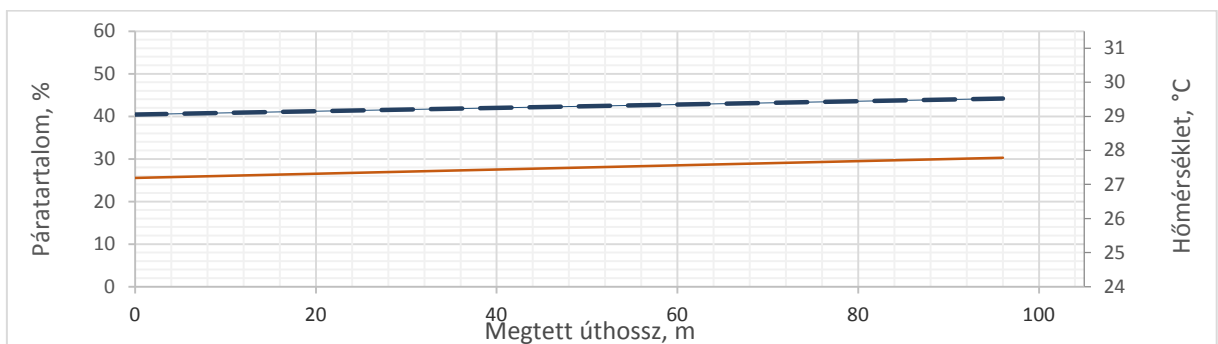
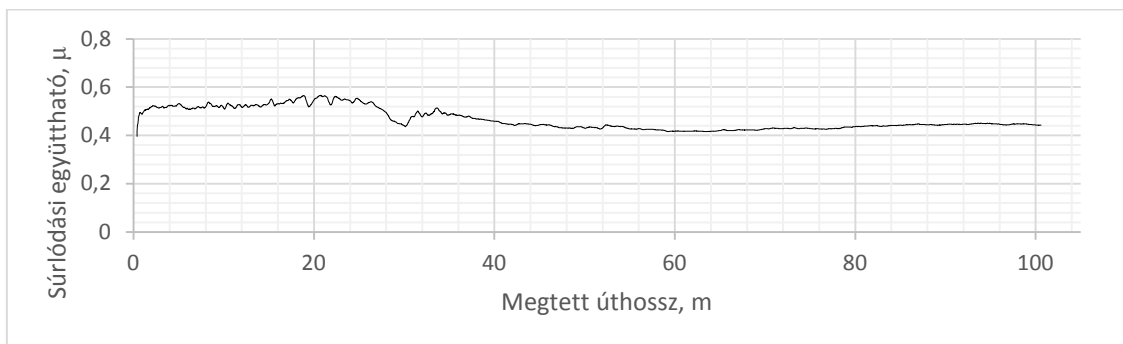


HIP_G1_F40_v100

hip_g1_5a_100_sic_f40_v1

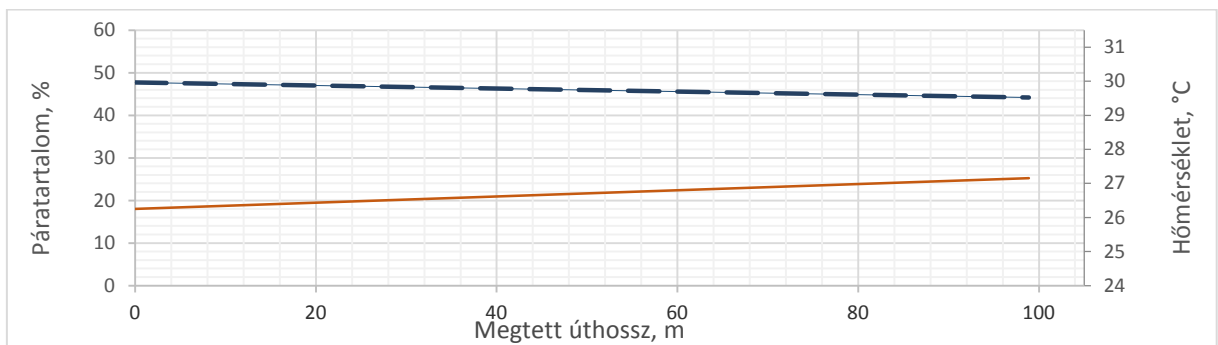
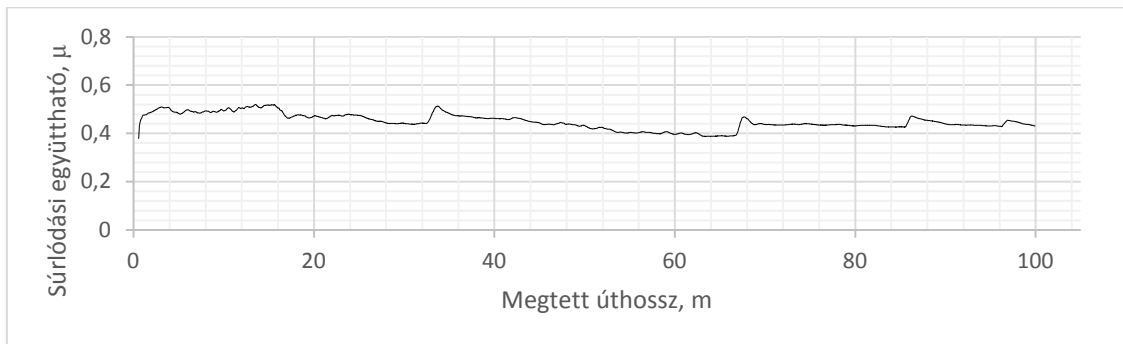


HIP_G1_3A_v100_SiC_f40_v1

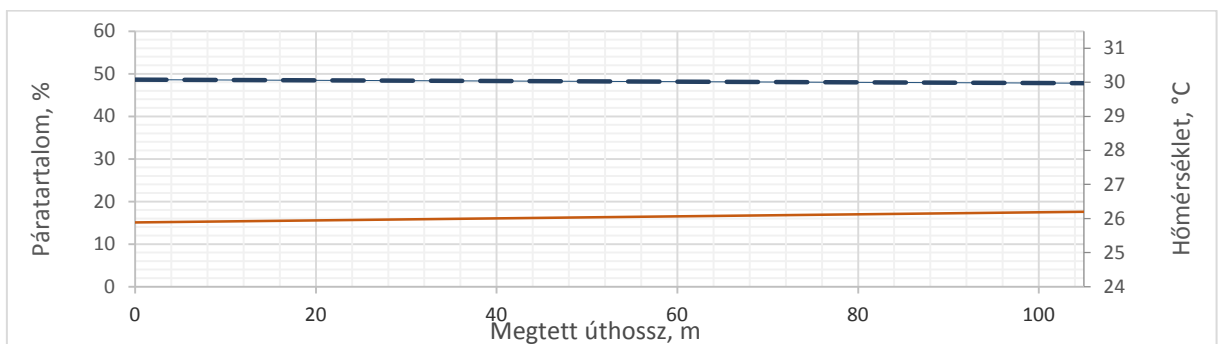
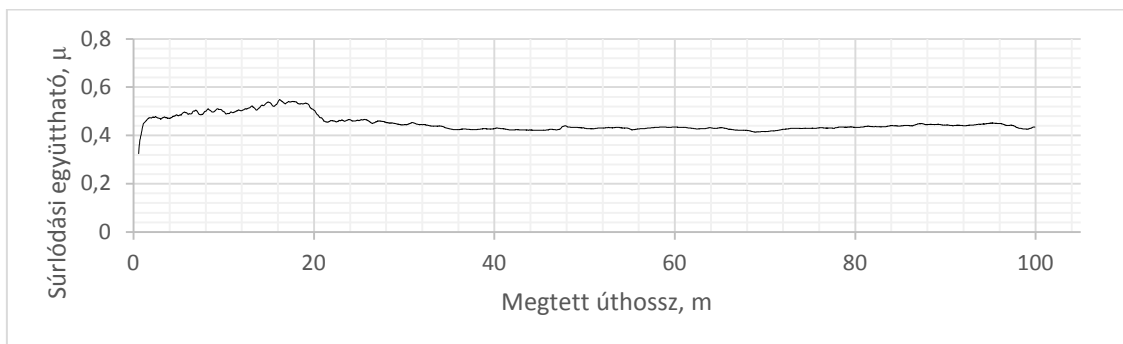


HIP_G1_F40_v150

hip_g1_3a_150_sic_f40_v2

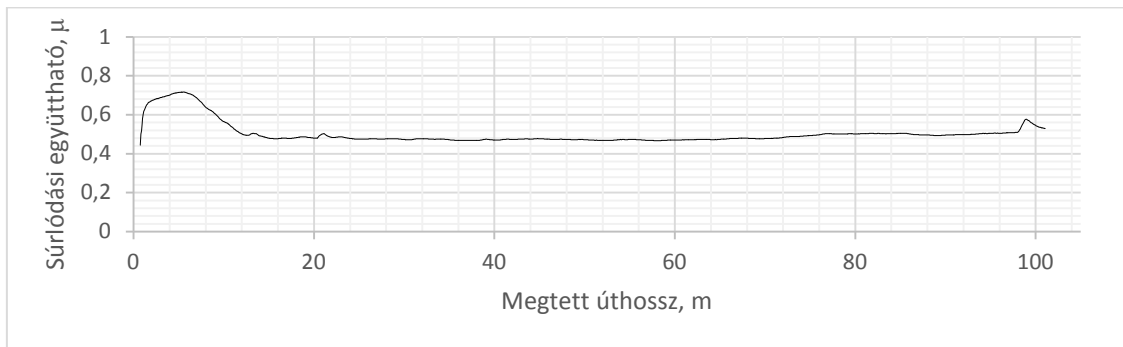


hip_g1_3a_150_sic_f40_v1

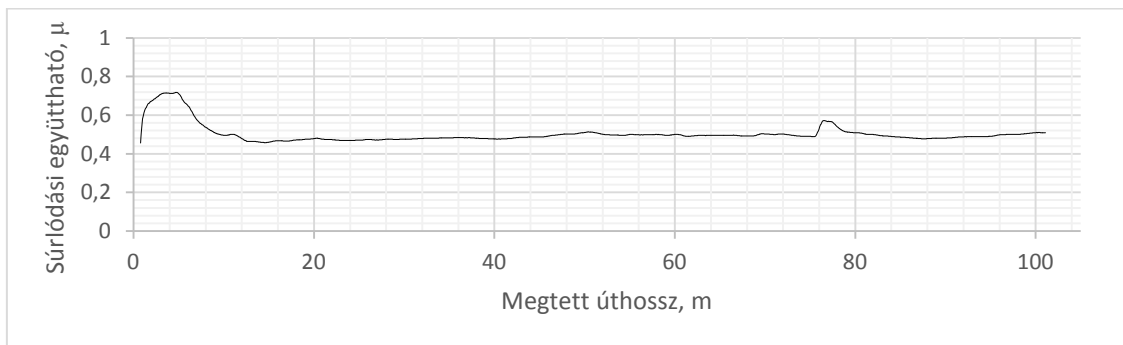


HIP_G1_F40_v200

HIP_G1_4A_v200_3p_SiC golyó

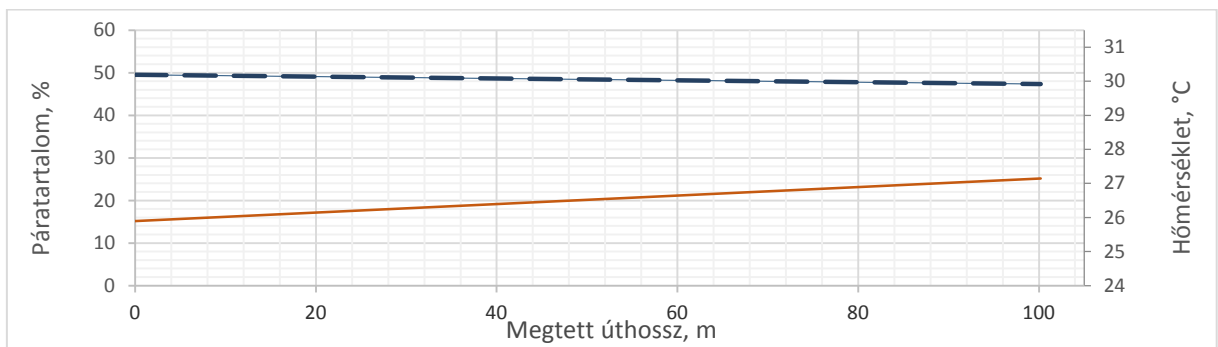
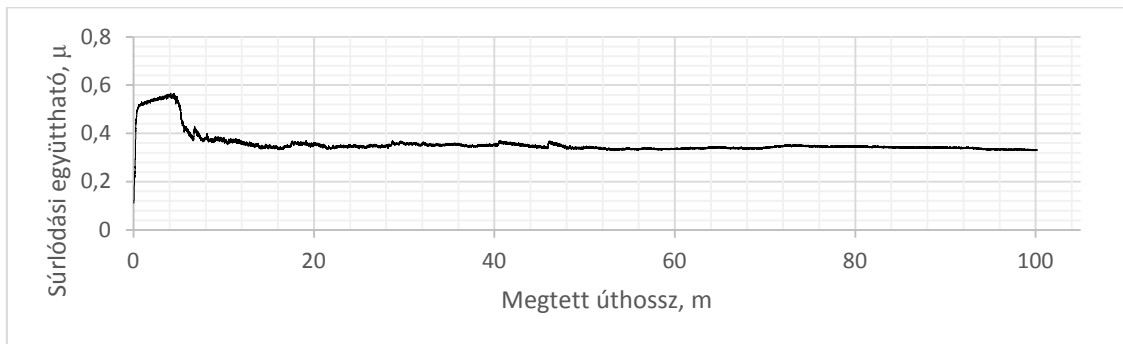


HIP_G1_4A_v200_4p_SiC golyó

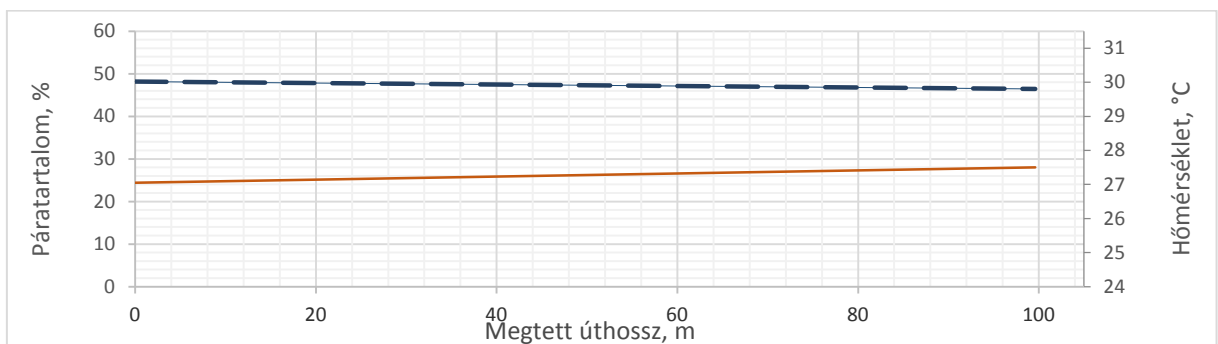
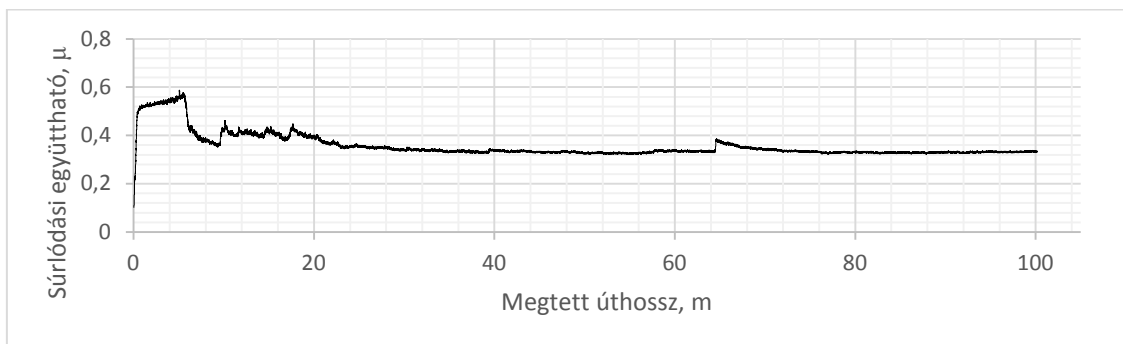


HIP_G1_F80_v10

hip_g1_1b_10_sic_f80_v1

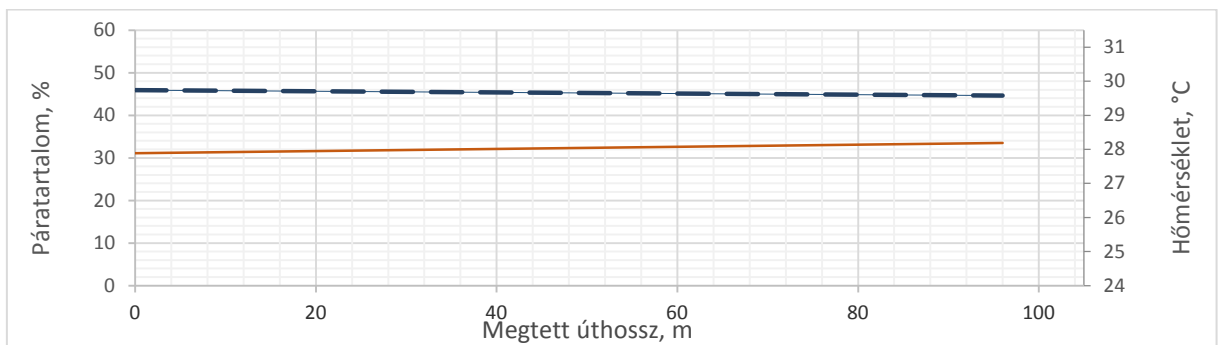
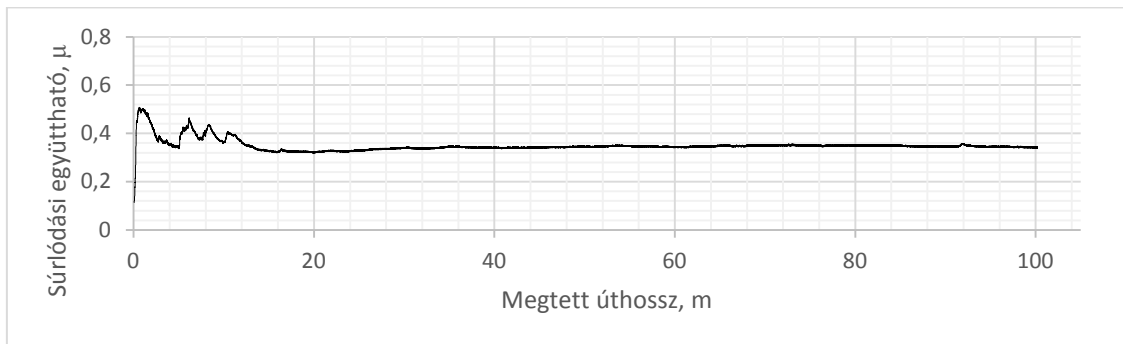


hip_g1_1b_10_sic_f80_v2

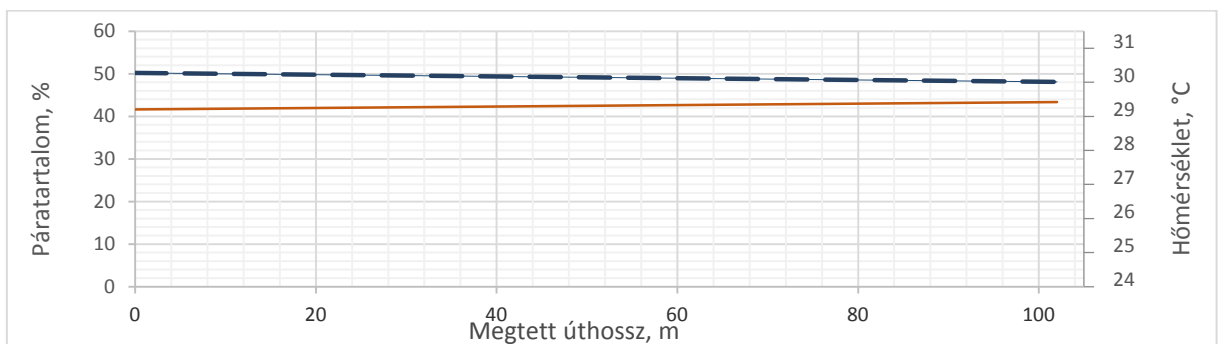
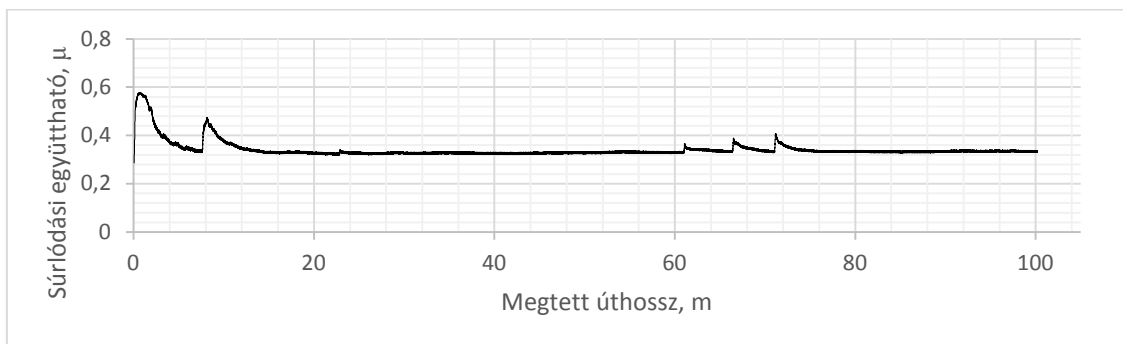


HIP_G1_F80_v20

hip_g1_6a_20_sic_f80_v1

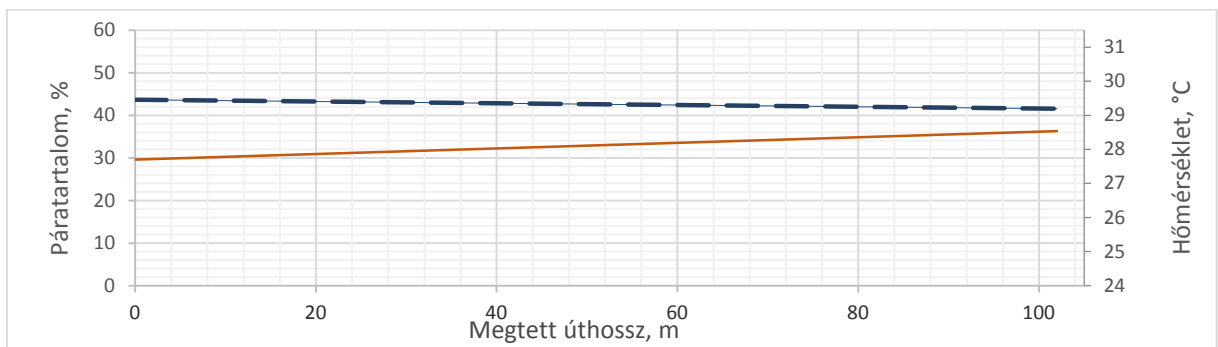
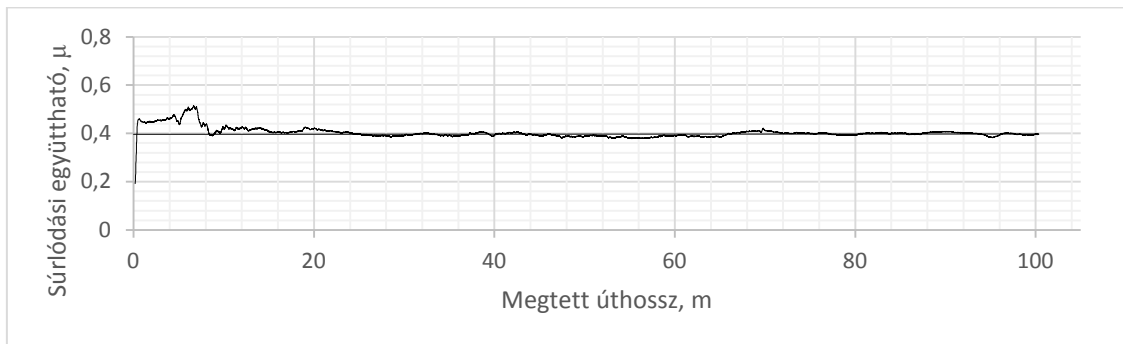


hip_g1_2b_20_sic_f80_v1

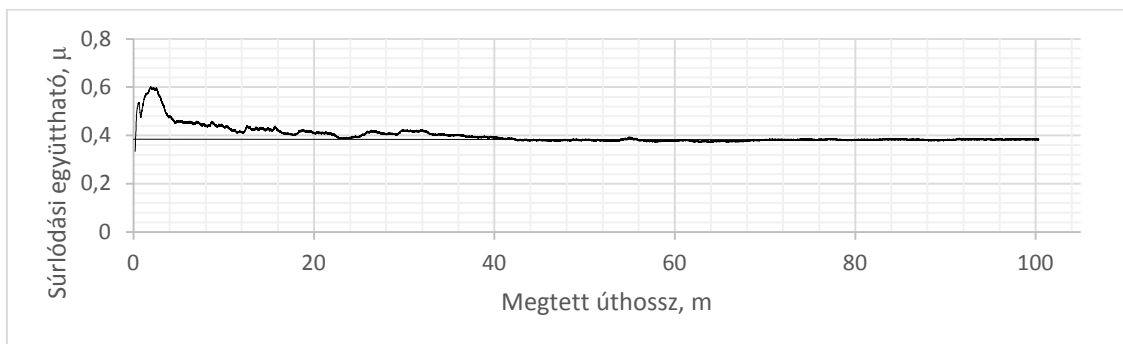


HIP_G1_F80_v50

hip_g1_1a_50_sic_f80_v1

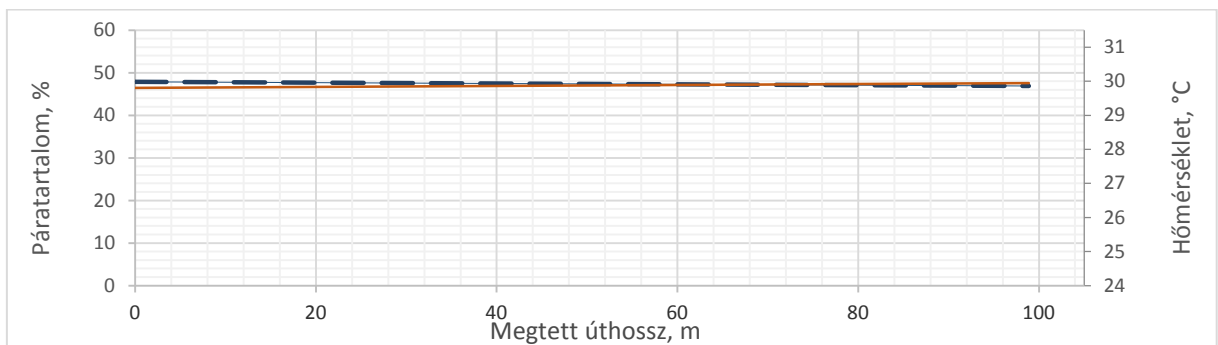
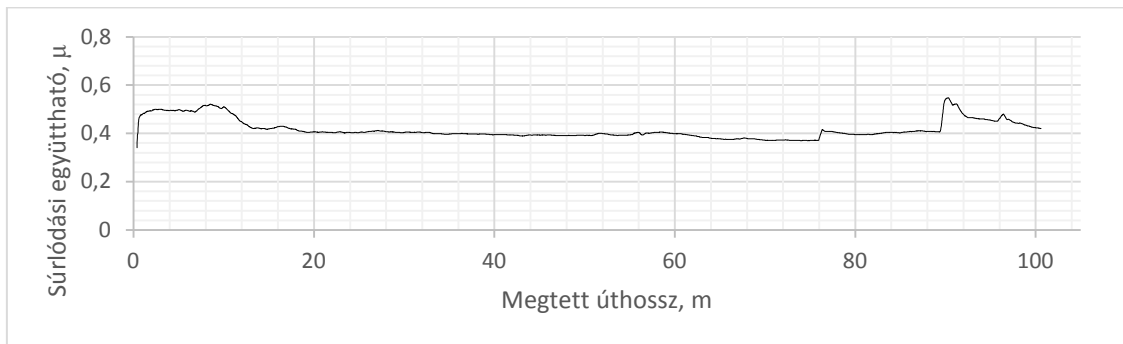


hip_g1_2b_50_sic_f80_v2

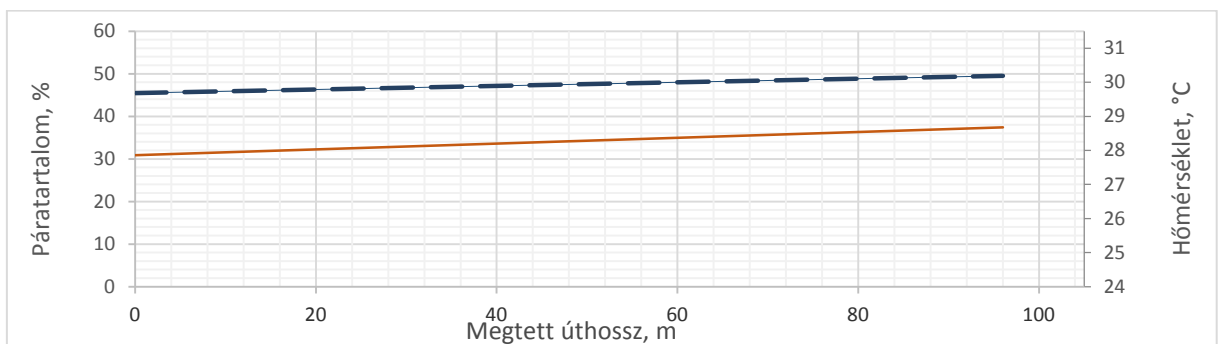
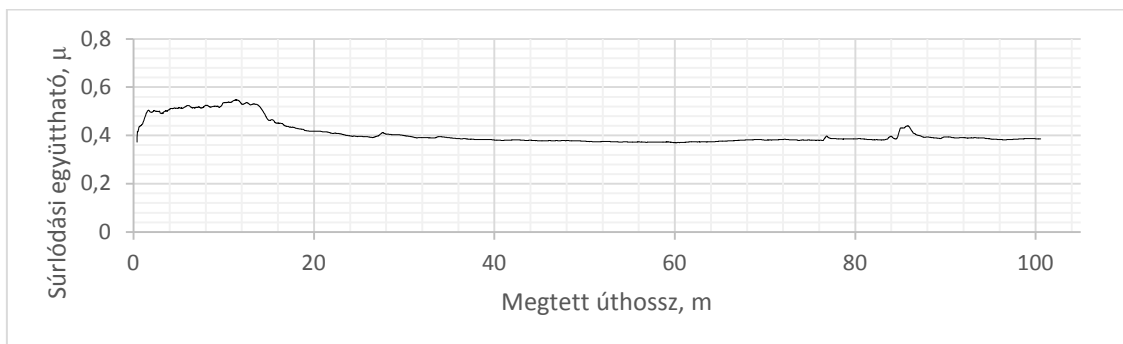


HIP_G1_F80_v100

hip_g1_5a_100_sic_f80_v1

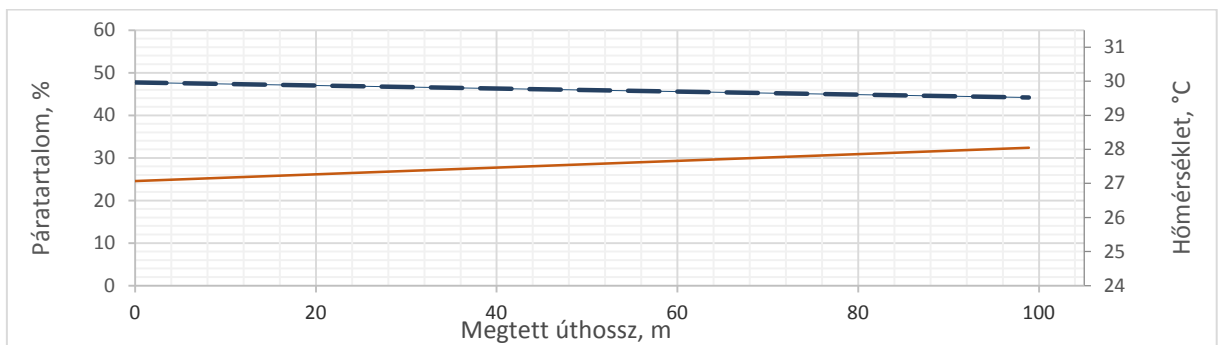
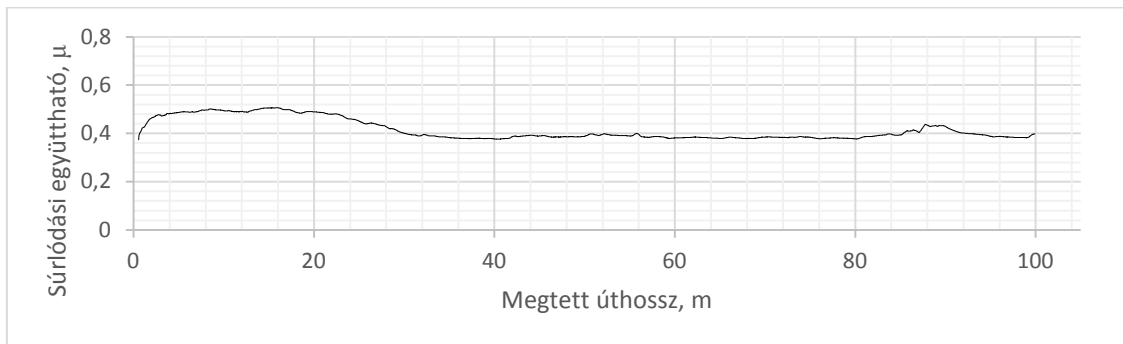


hip_g1_3a_100_sic_f80_v1

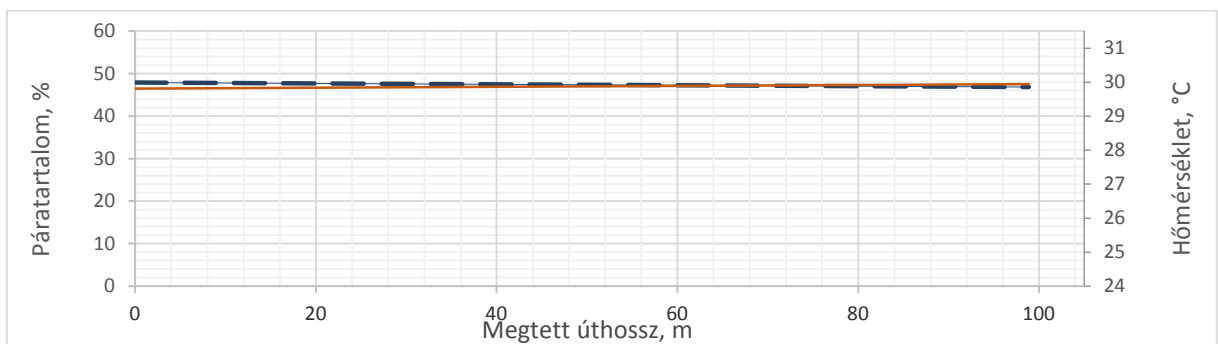
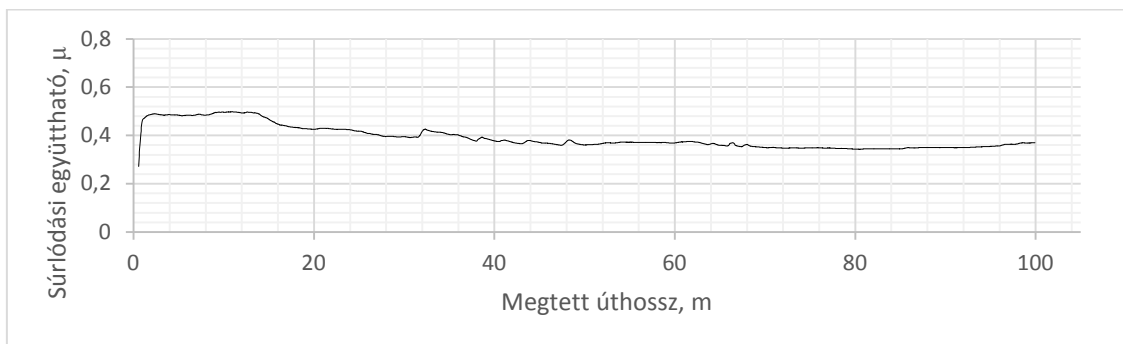


HIP_G1_F80_v150

hip_g1_3a_150_sic_f80_v1

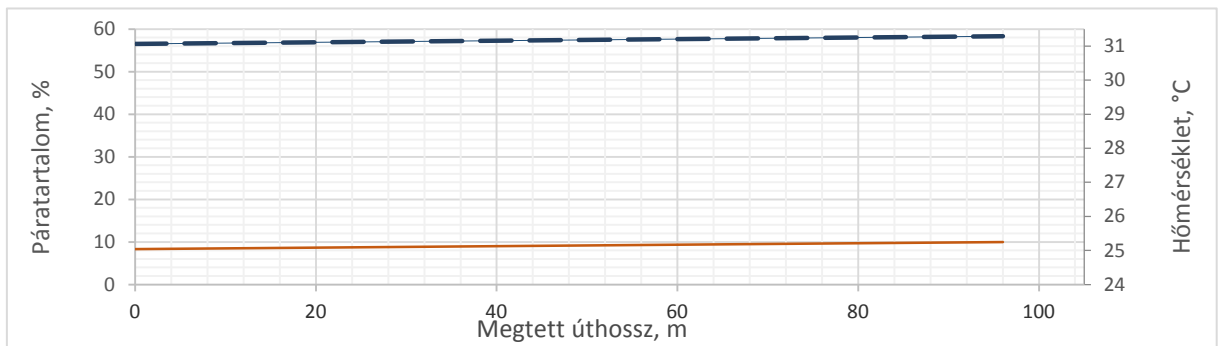
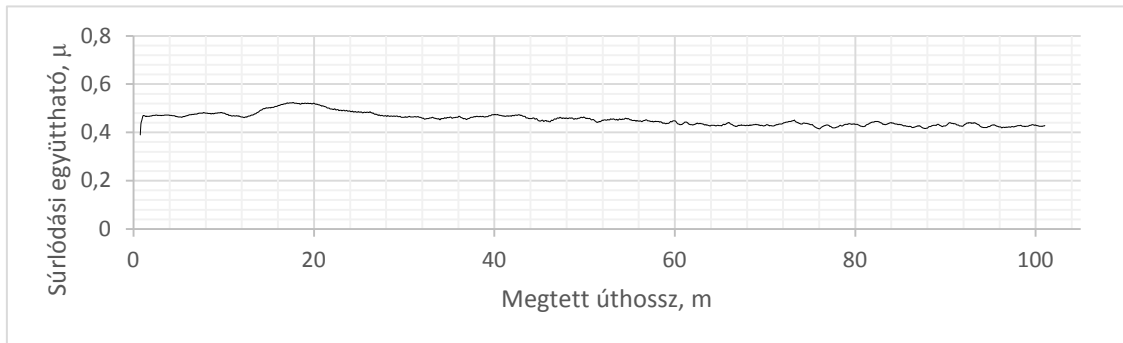


hip_g1_5a_150_sic_f80_v1

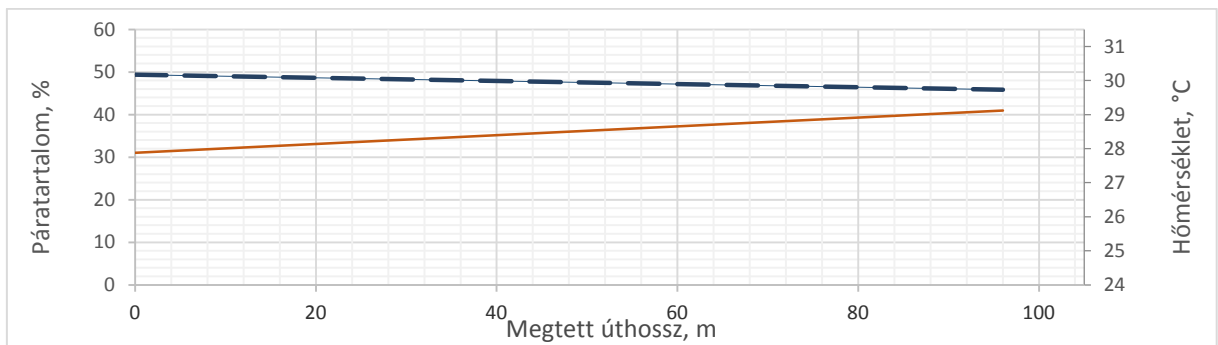
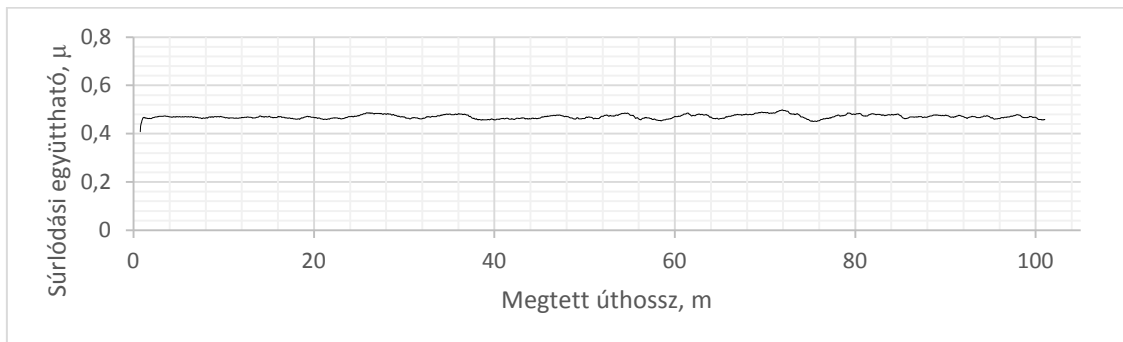


HIP_G1_F80_v200

hip_g1_2b_200_sic_f80_v1

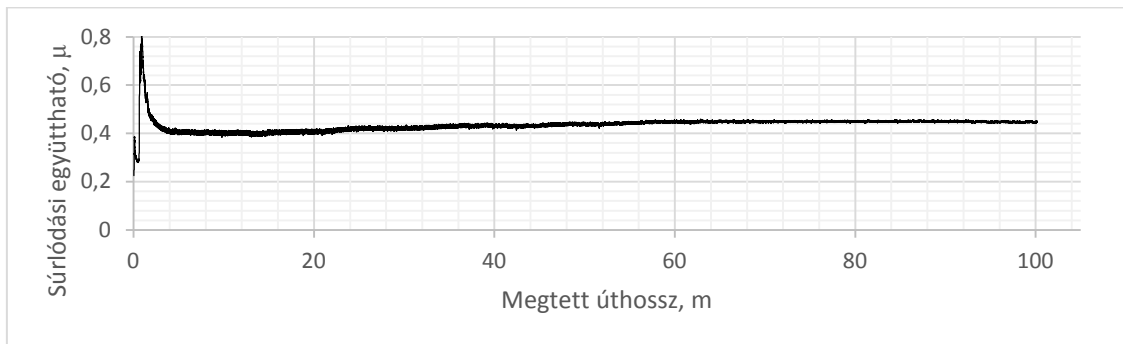


hip_g1_2b_200_sic_f80_v2

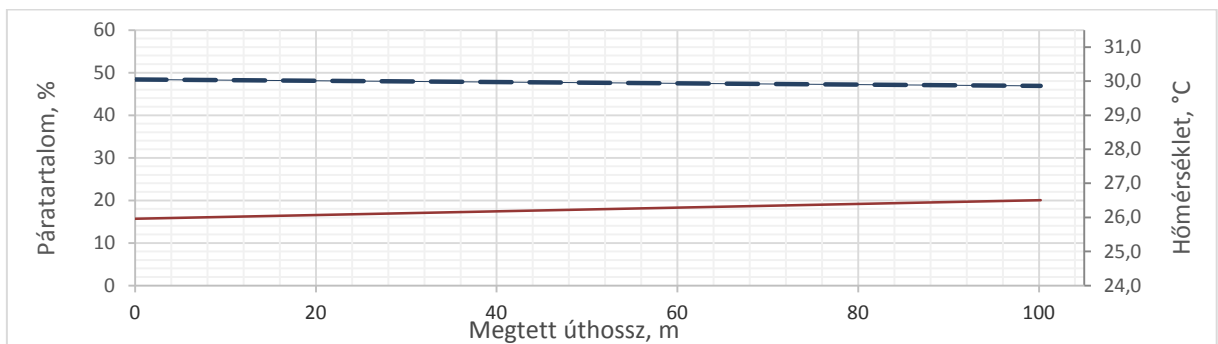
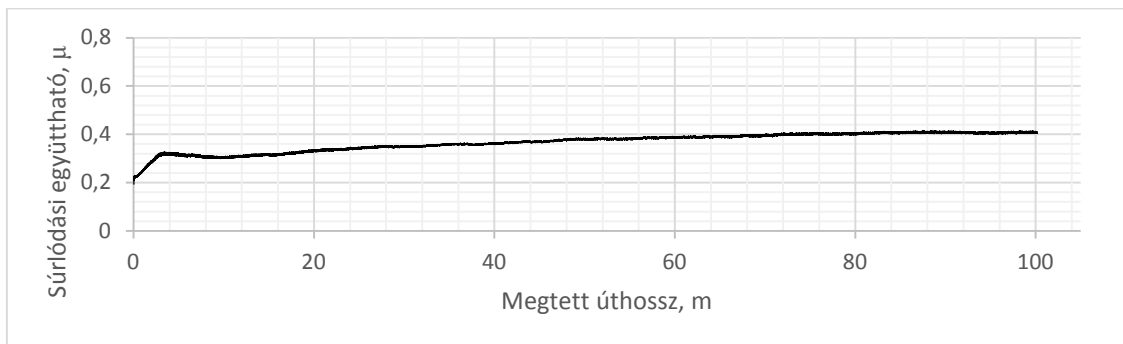


HIP_G3_F10_v10

Hip_g3_5A_10_sic_f10_v1

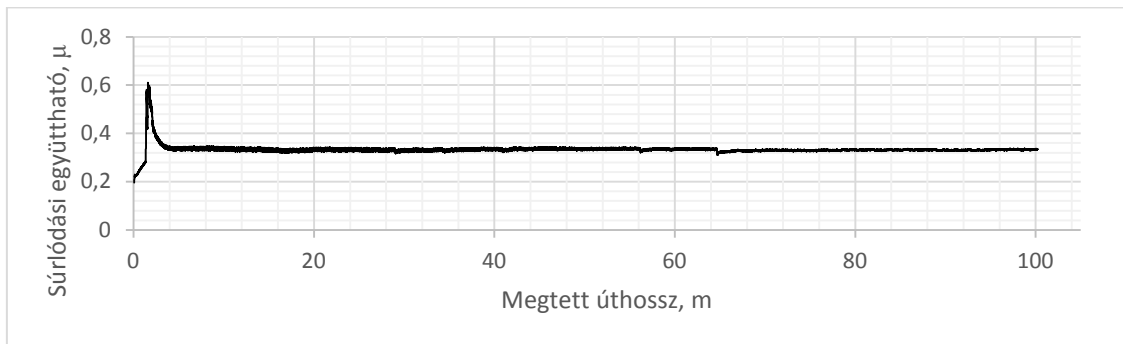


hip_g3_5A_10_sic_f10_v2

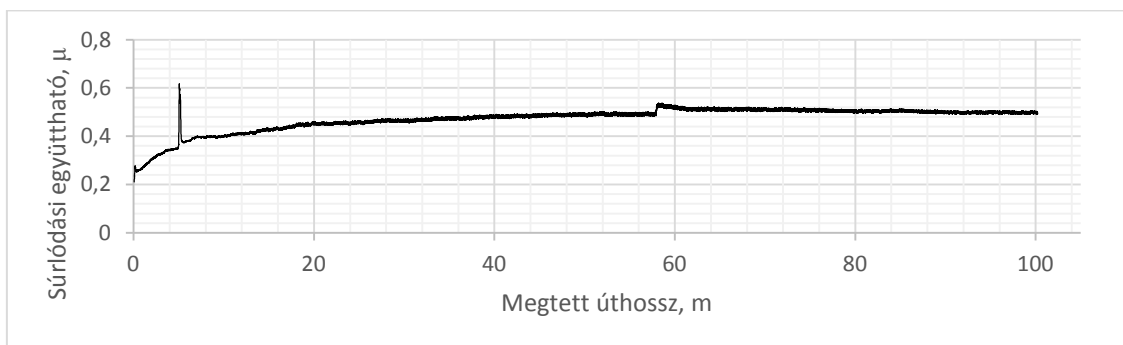


HIP_G3_F10_v20

hip_g3_5A_20_sic_f10_v1

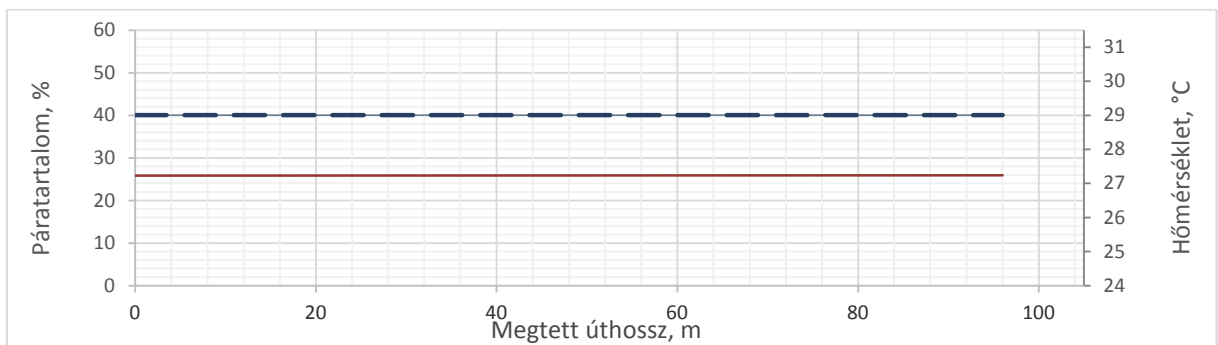
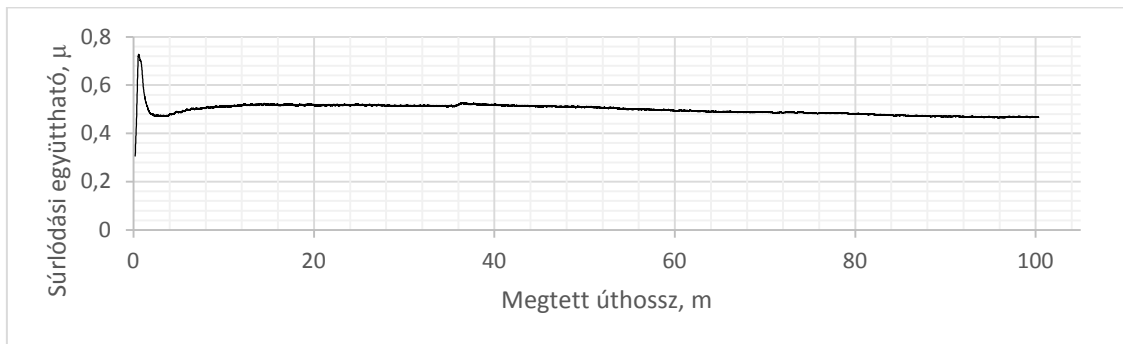


hip_g3_5A_20_sic_f10_v2

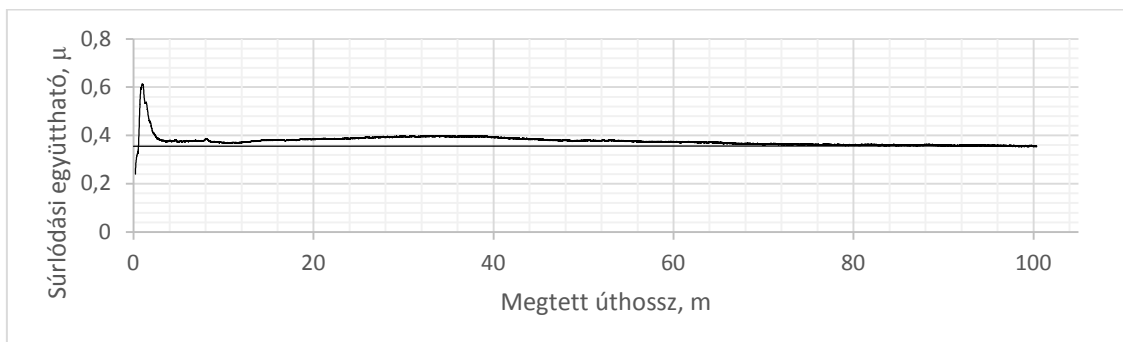


HIP_G3_F10_v50

hip_g3_2a_50_sic_f10_v1

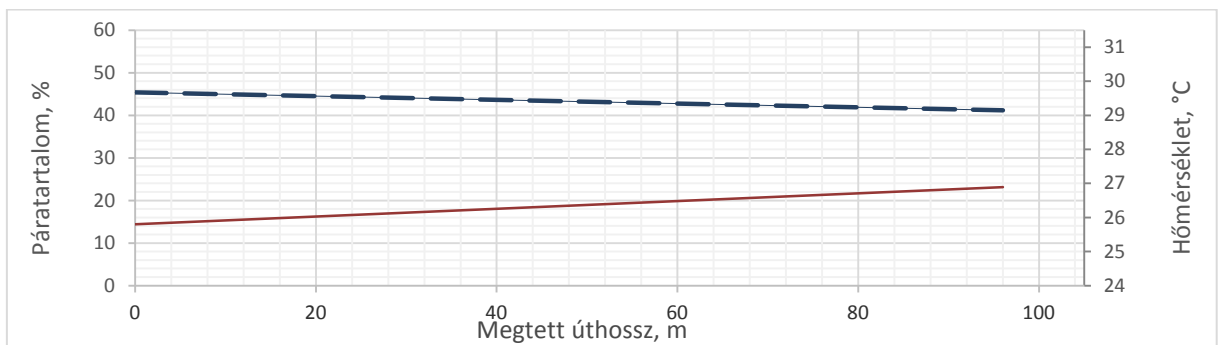
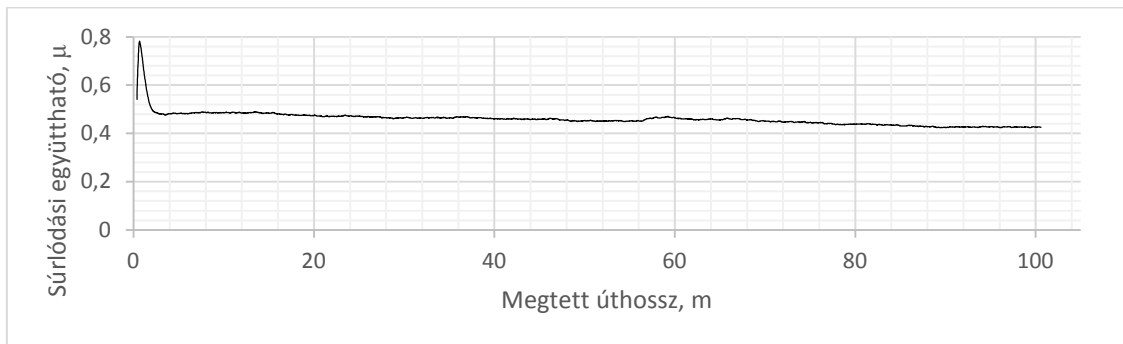


hip_g3_3a_50_sic_f10_v1

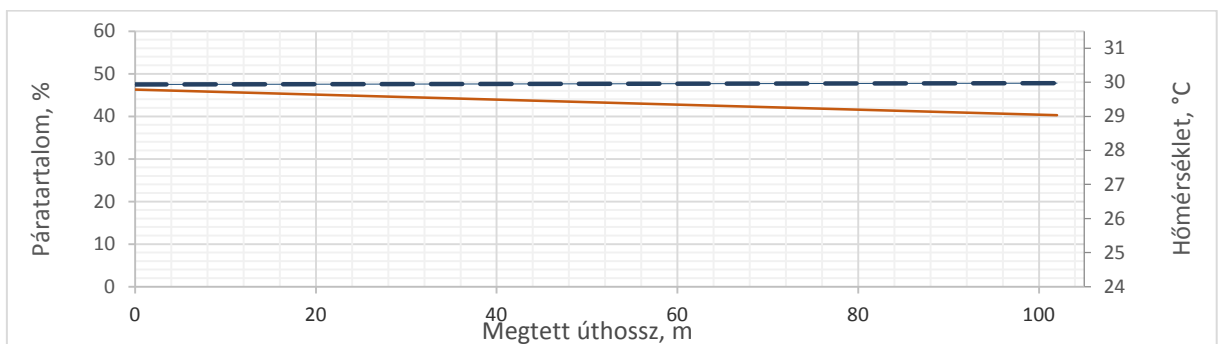
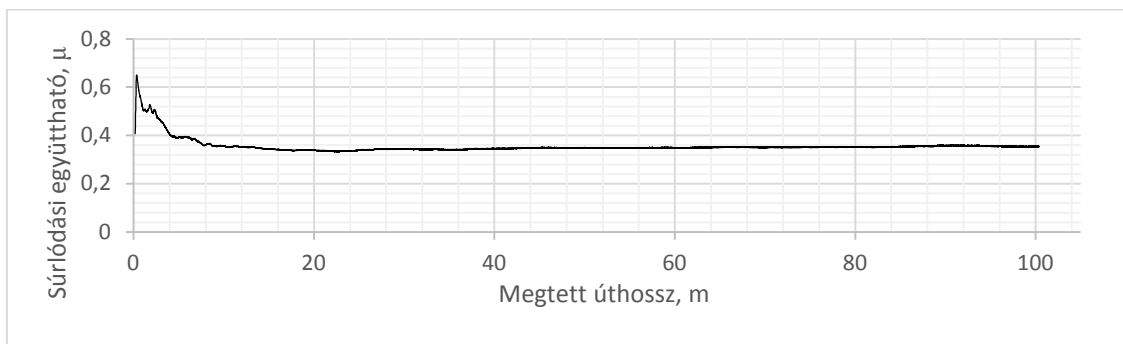


HIP_G3_F10_v100

hip_g3_2a_100_sic_f10_v1

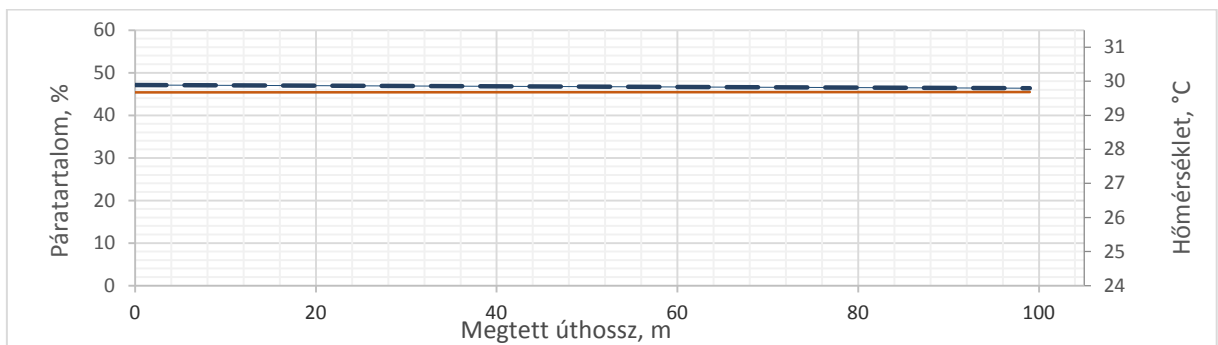
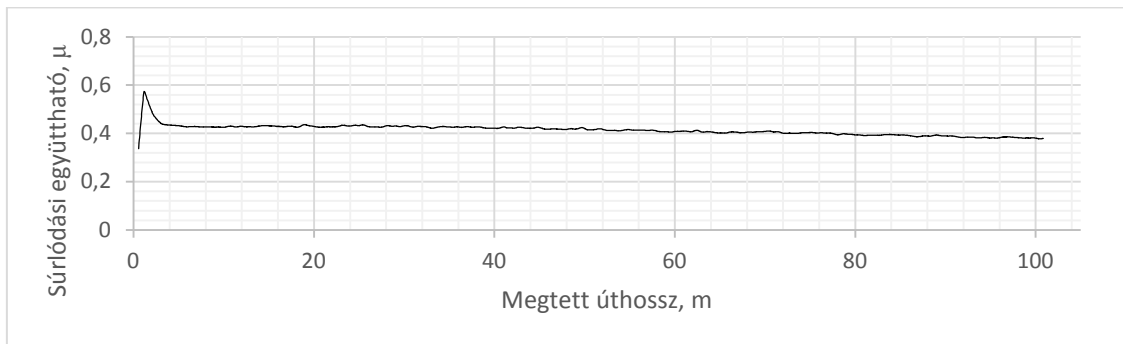


hip_g3_3a_100_sic_f10_v1

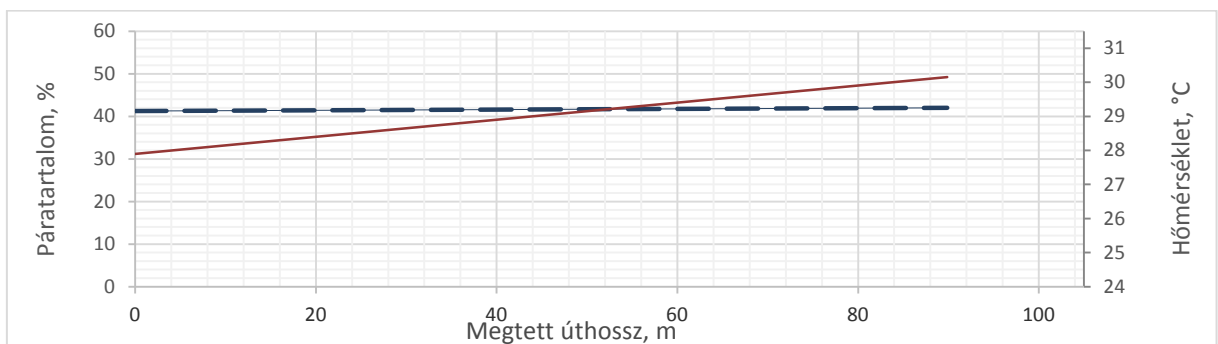
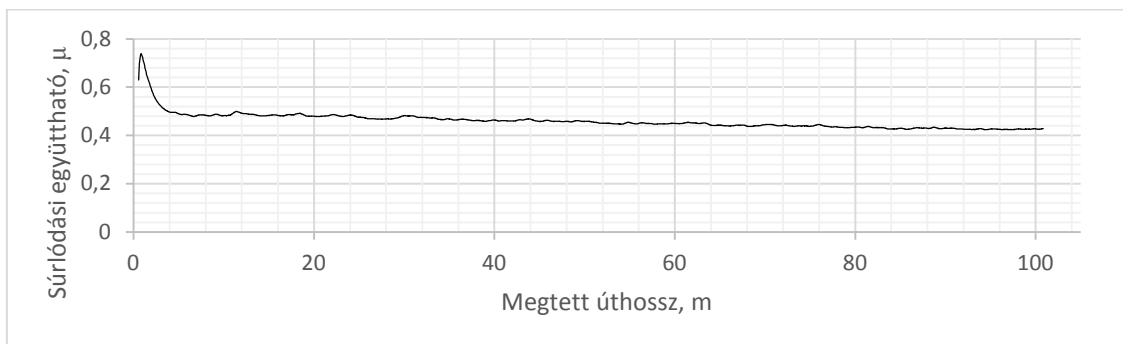


HIP_G3_F10_v150

hip_g3_3a_150_sic_f10_v1

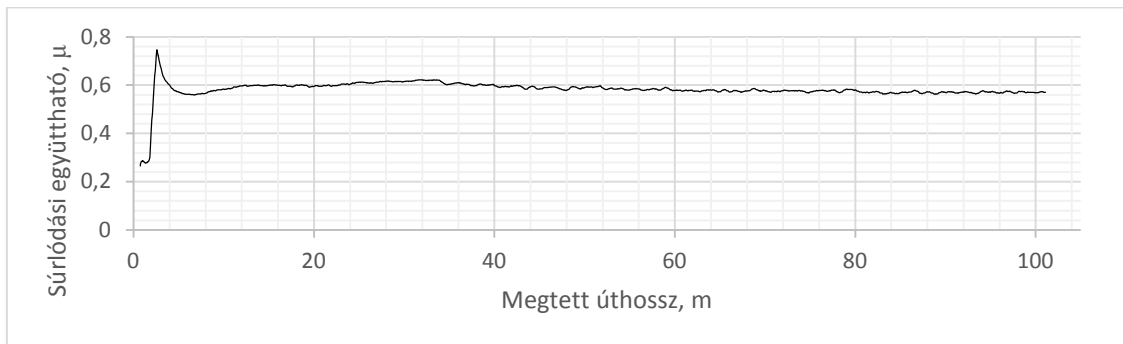


hip_g3_2a_150_sic_f10_v1

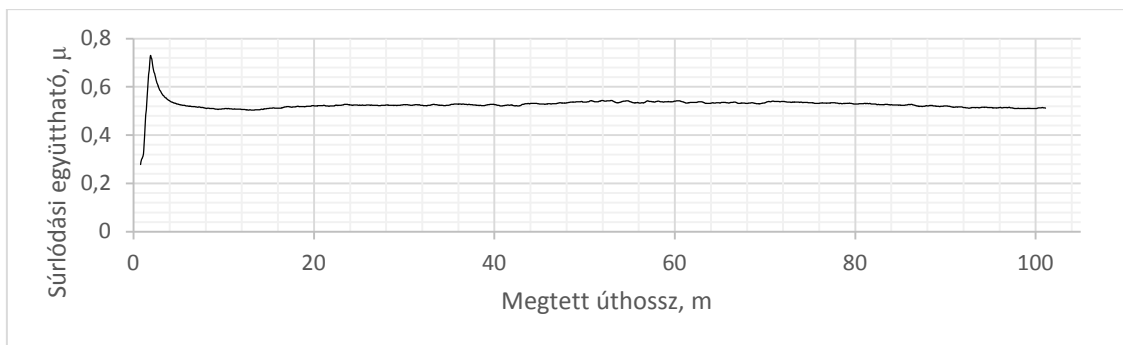


HIP_G3_F10_v200

hip_g3_5A_200_sic_f10_v1

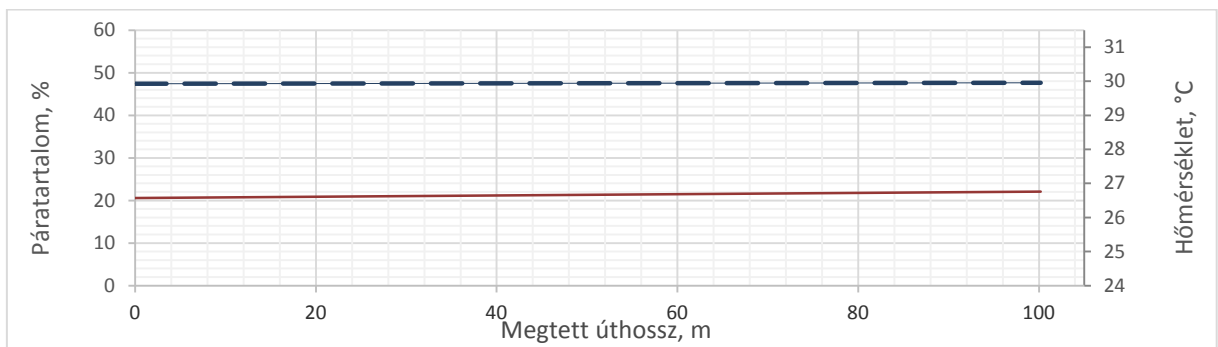
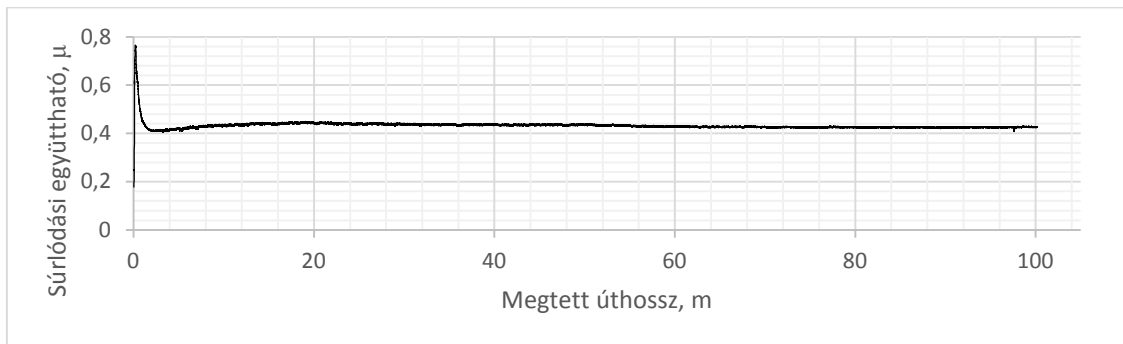


hip_g3_5A_200_sic_f10_v2

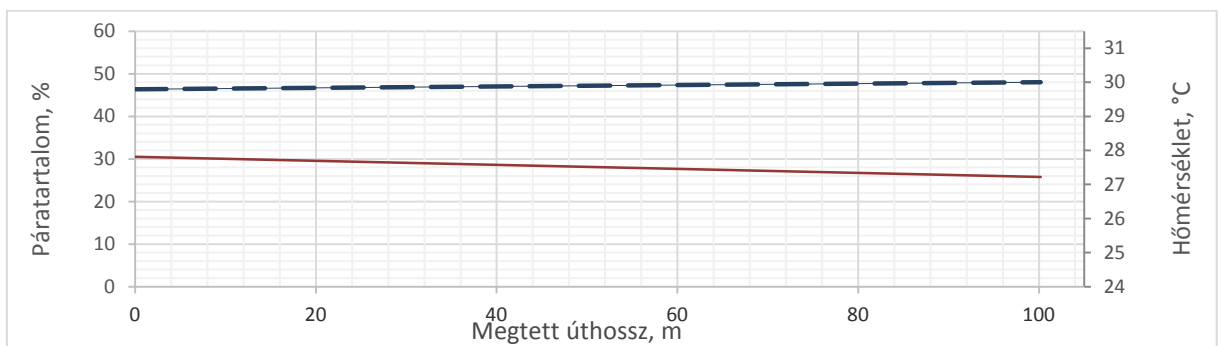
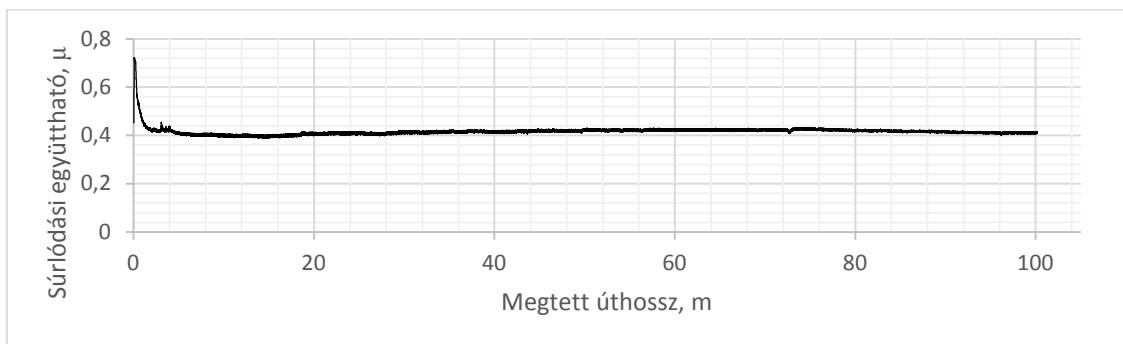


HIP_G3_F40_v10

hip_g3_5A_10_sic_f40_v1

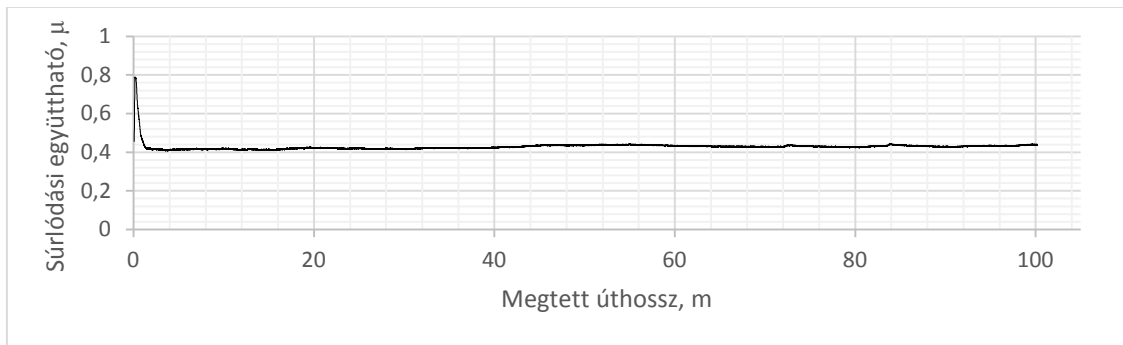


hip_g3_6a_10_sic_f40_v1

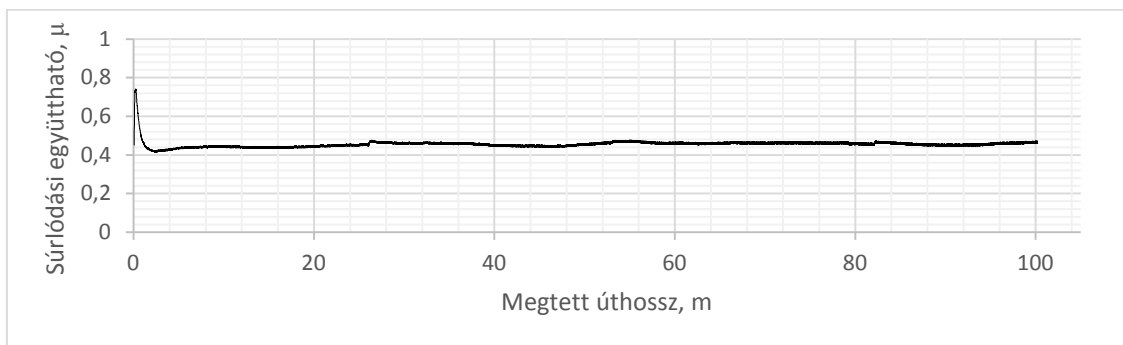


HIP_G3_F40_v20

HIP_G3_1A_v20_1p_SiC golyó

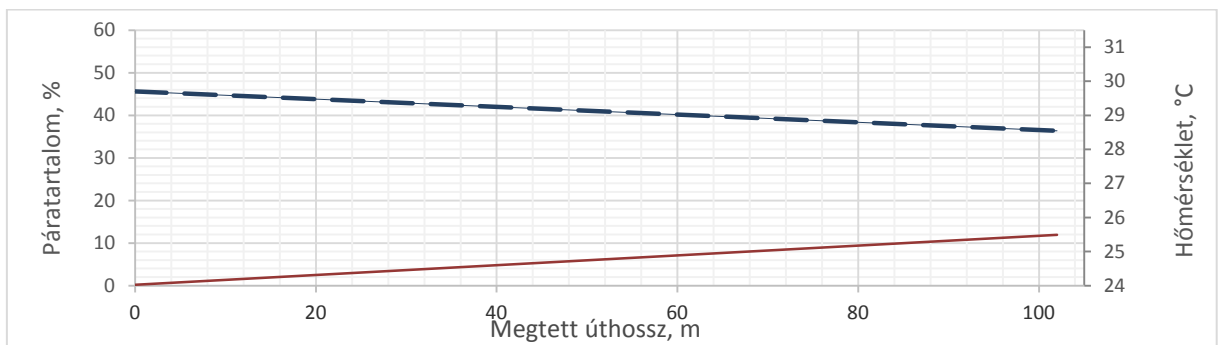
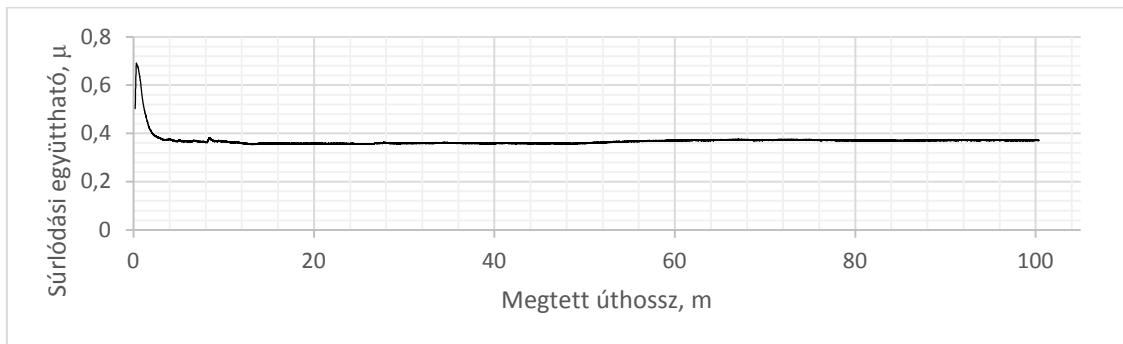


HIP_G3_4A_v20_2p_SiC golyó

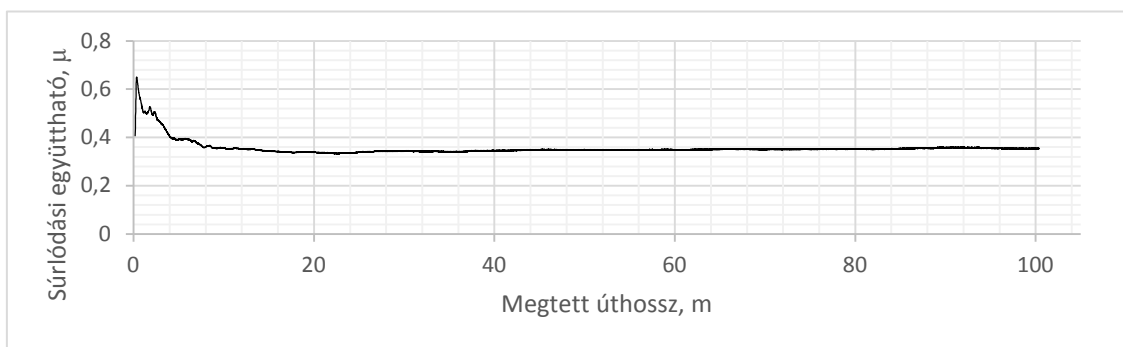


HIP_G3_F40_v50

hip_g3_6a_50_sic_f40_v1

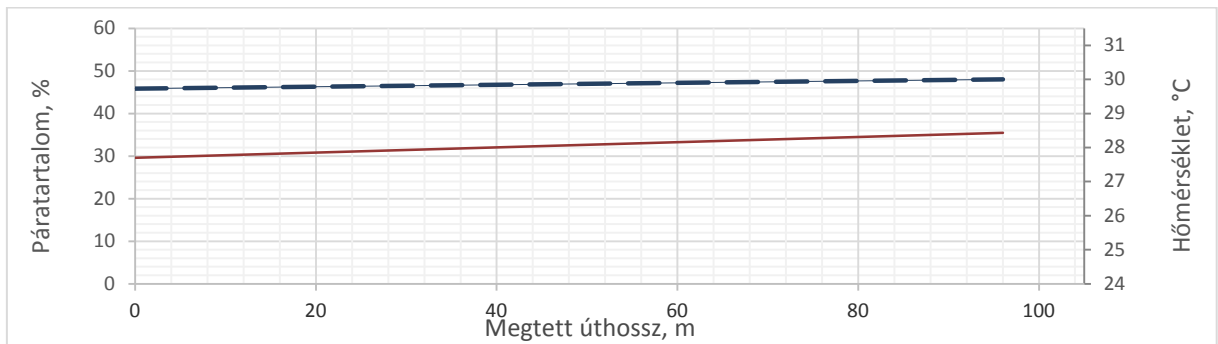
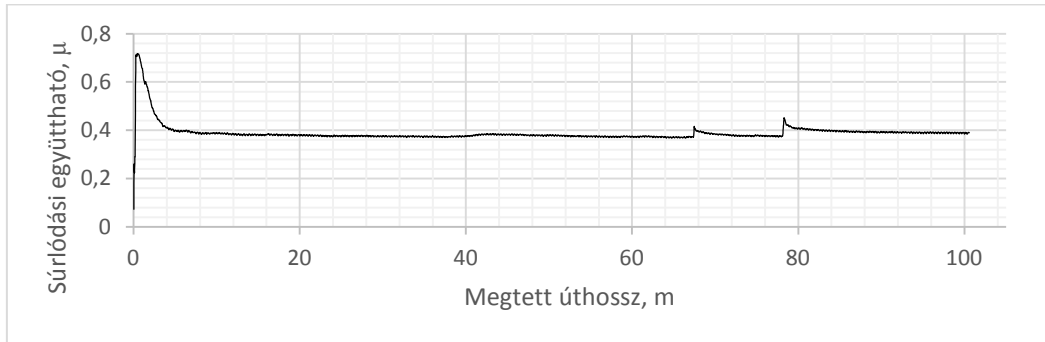


hip_g3_6a_50_sic_f40_v2

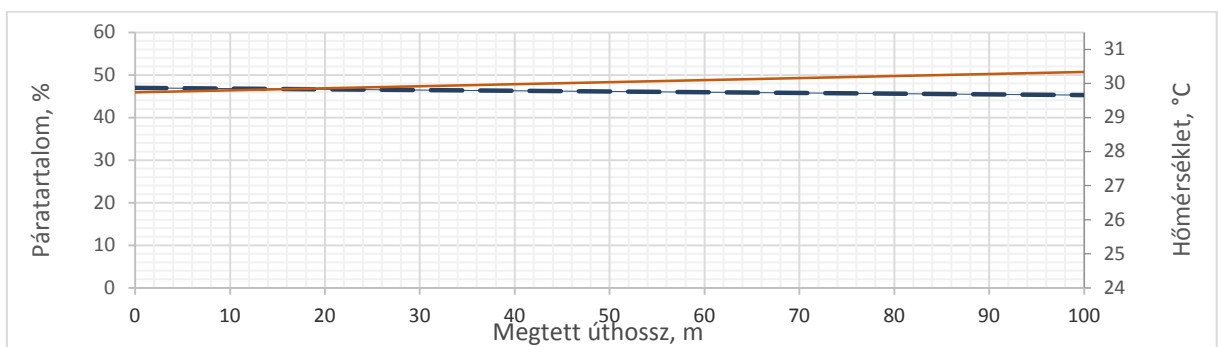
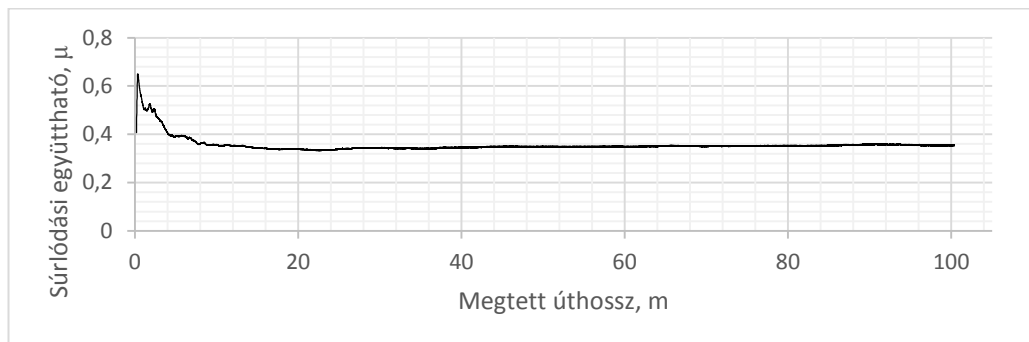


HIP_G3_F40_v100

hip_g3_2a_100_sic_f40_v1

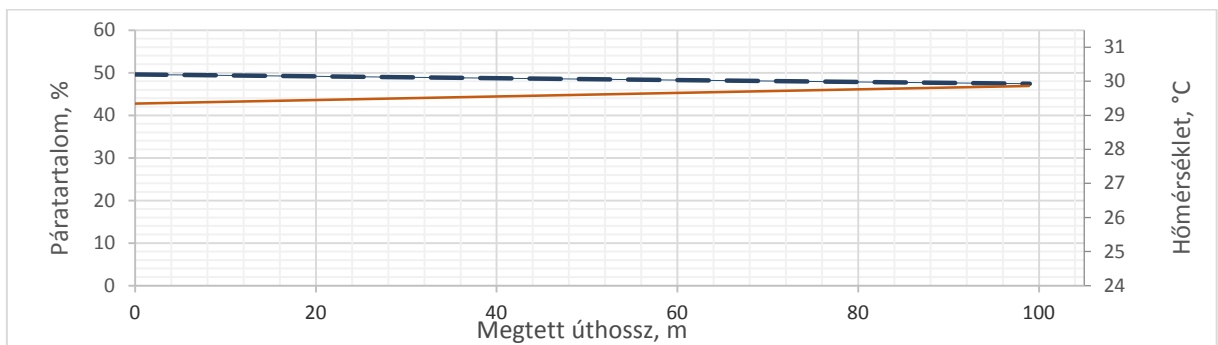
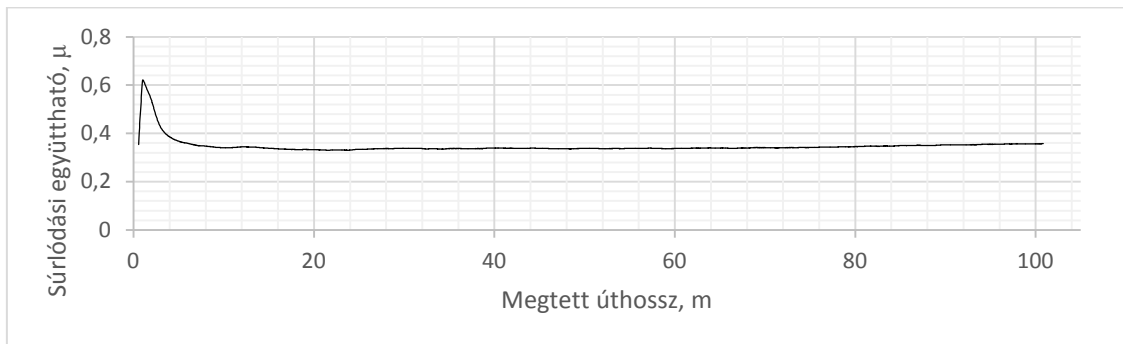


hip_g3_3a_100_sic_f40_v1

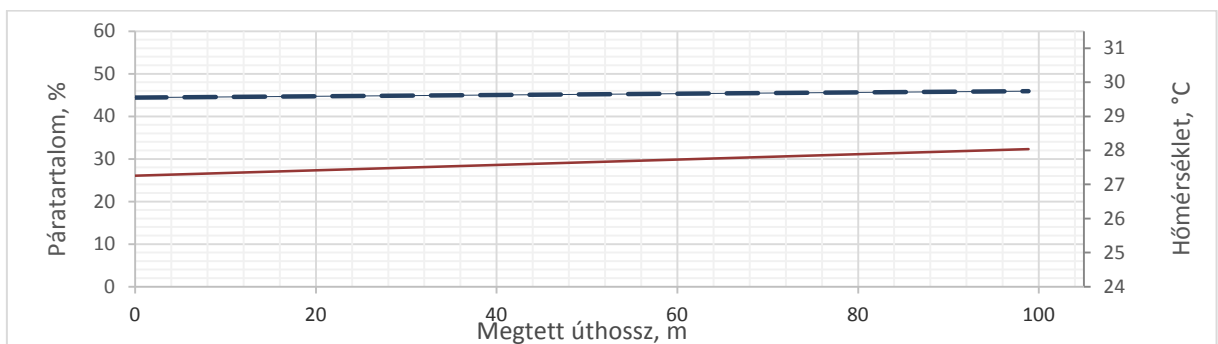
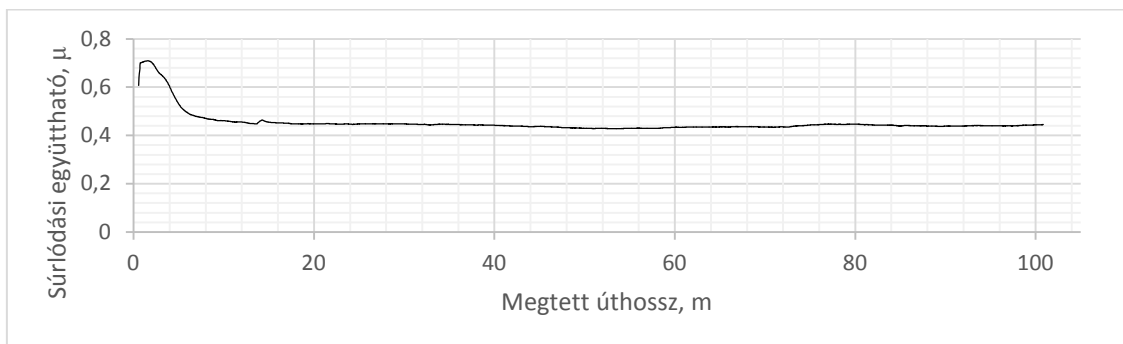


HIP_G3_F40_v150

hip_g3_3a_150_sic_f40_v1

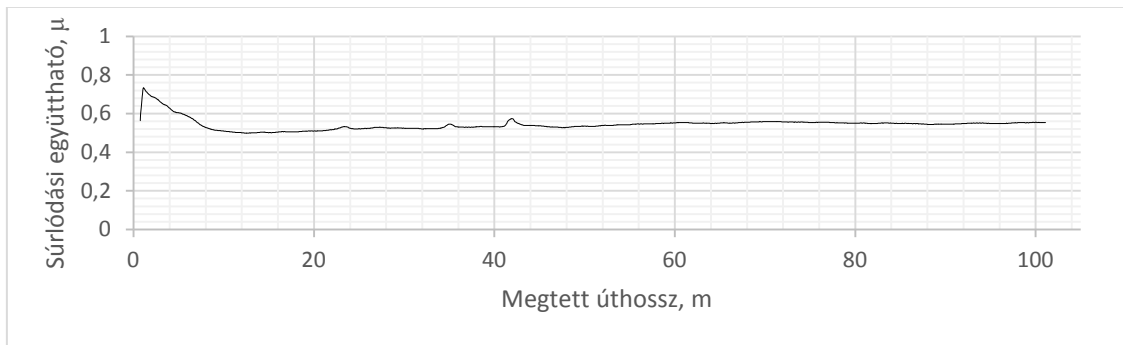


hip_g3_2a_150_sic_f40_v1

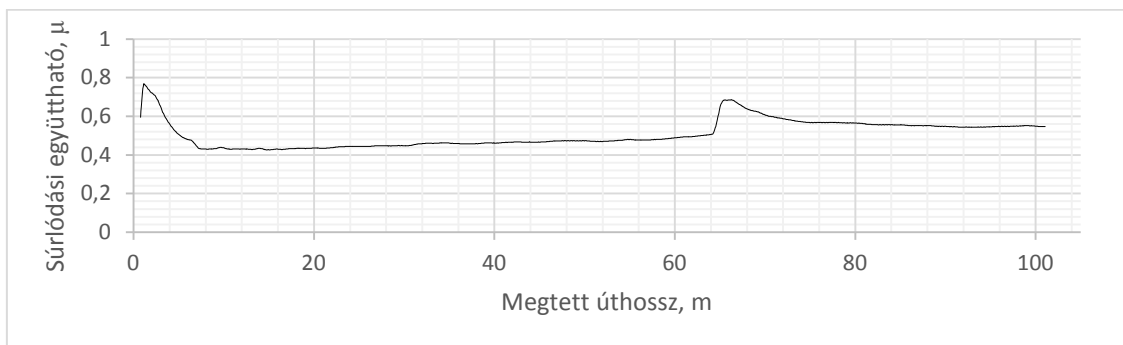


HIP_G3_F40_v200

HIP_G3_1A_v200_3p_SiC golyó

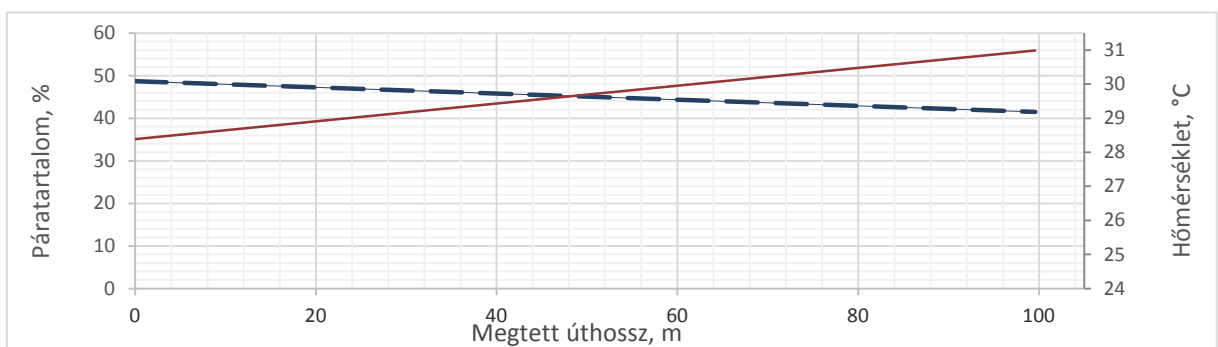
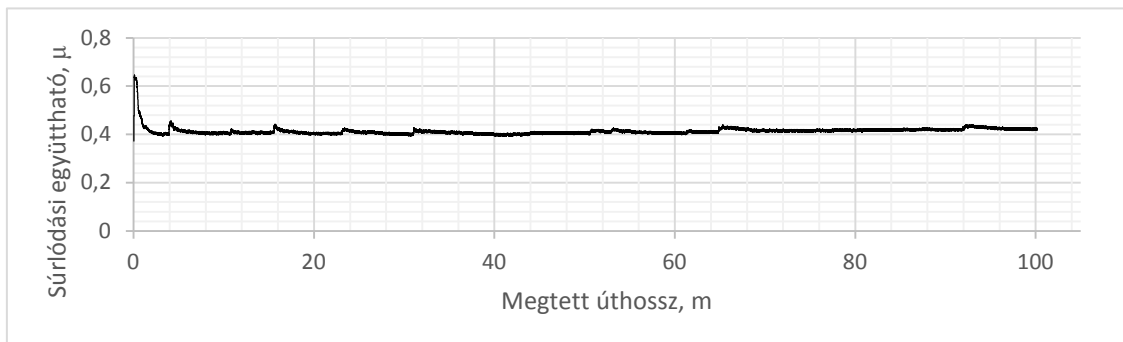


HIP_G3_4A_v200_4p_SiC golyó

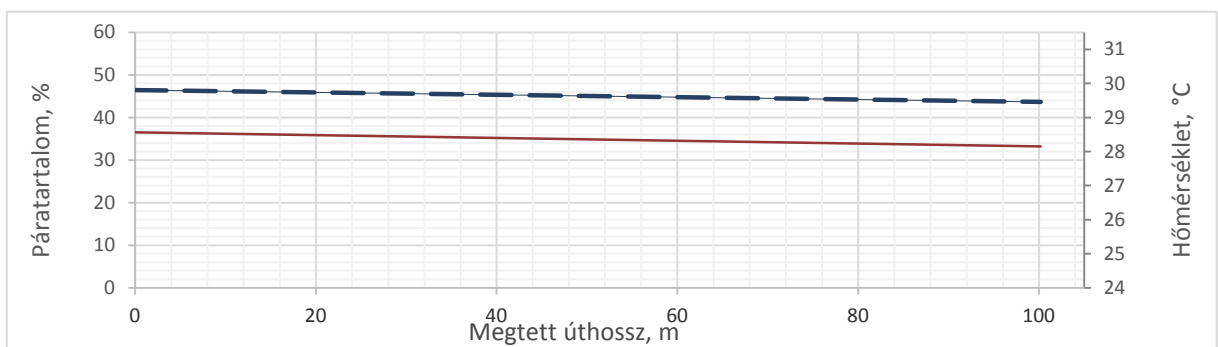
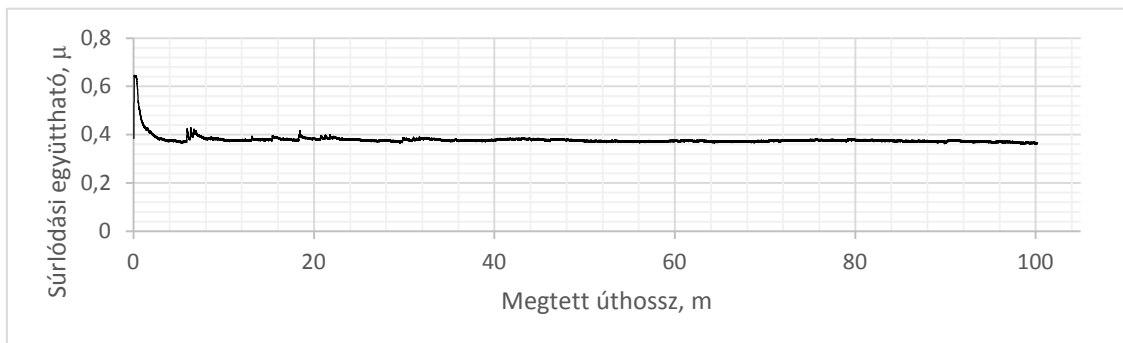


HIP_G3_F80_v10

hip_g3_6a_10_sic_f80_v1

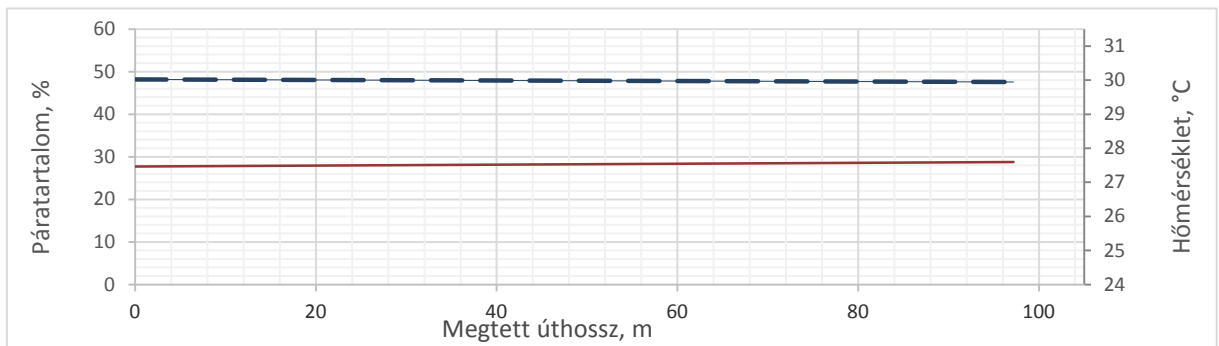
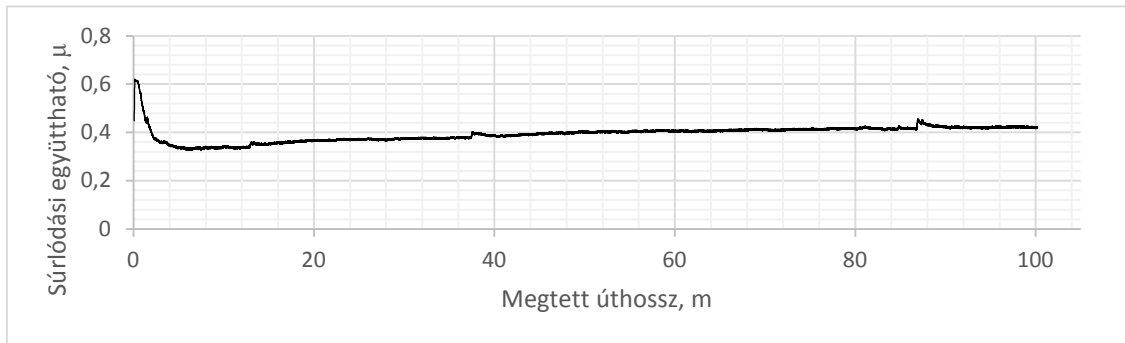


hip_g3_6a_10_sic_f80_v2

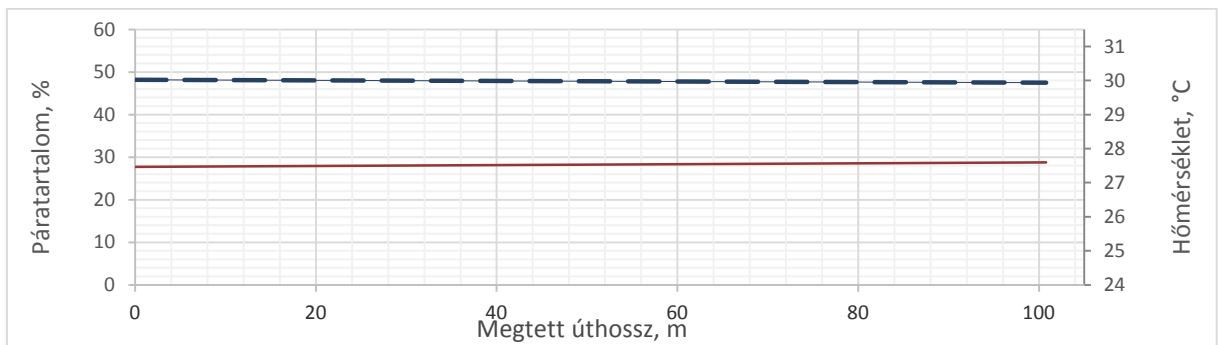
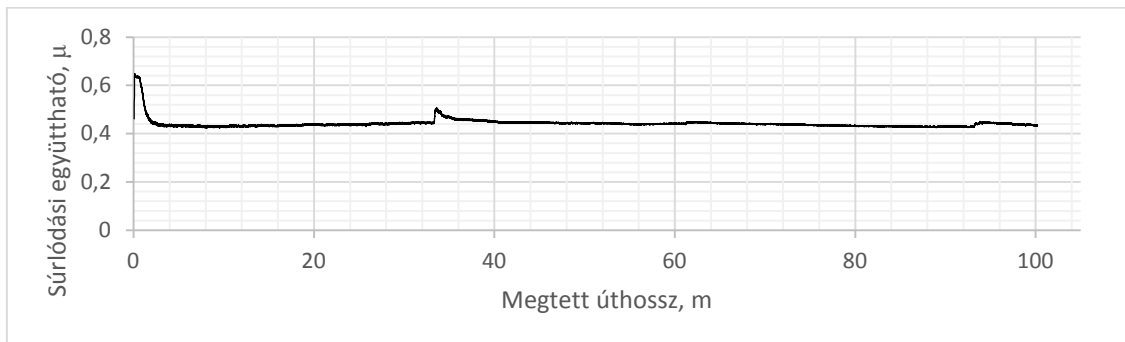


HIP_G3_F80_v20

hip_g3_6a_20_sic_f80_v1

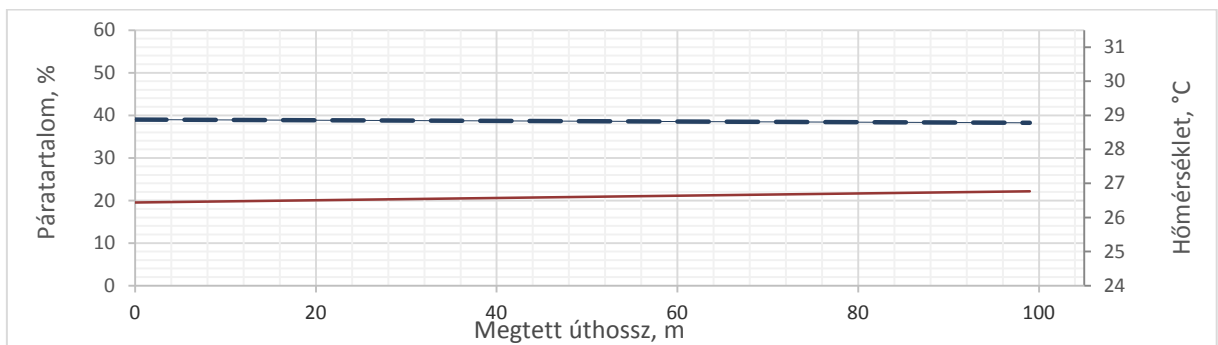
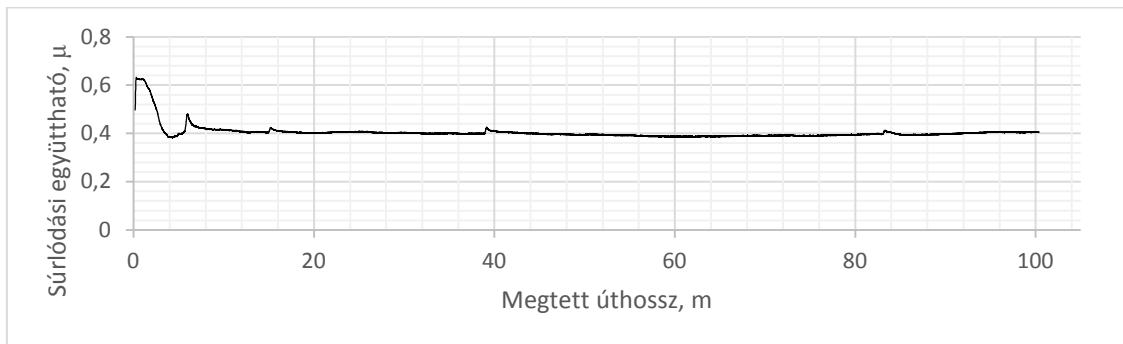


hip_g3_6a_20_sic_f80_v2

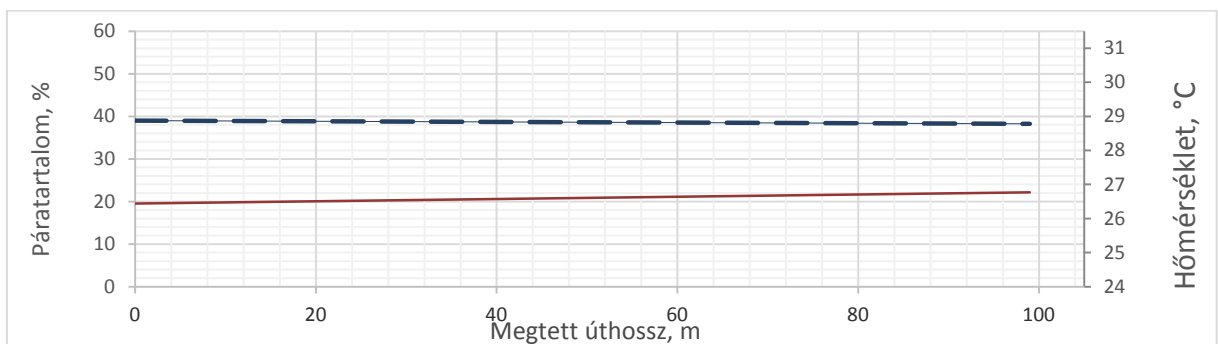
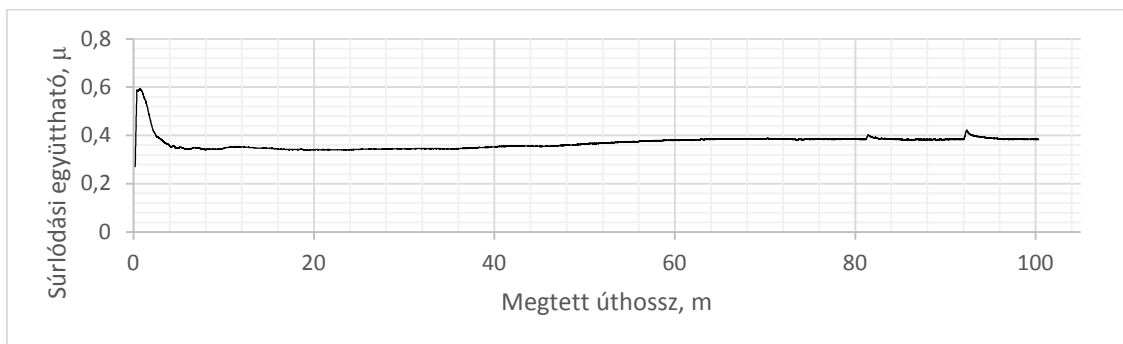


HIP_G3_F80_v50

hip_g3_2a_50_sic_f80_v1

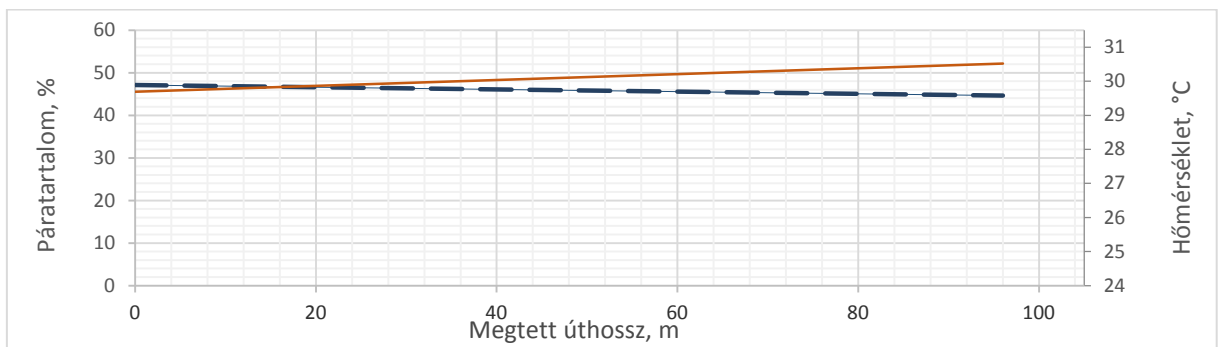
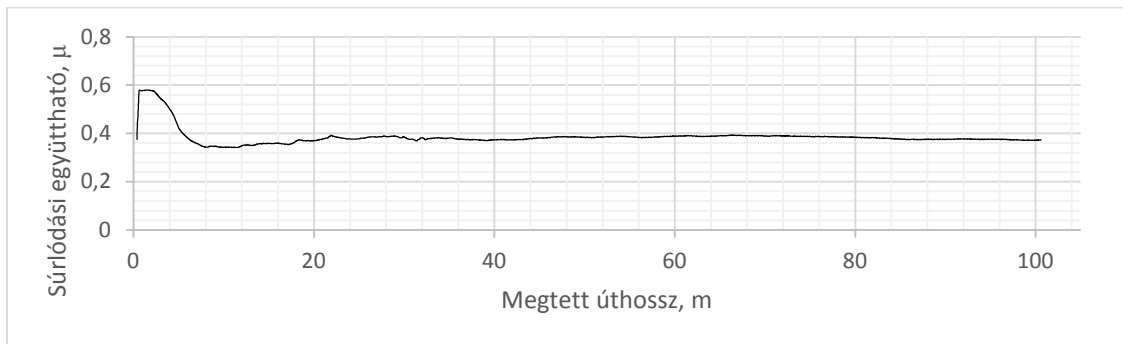


hip_g3_3a_50_sic_f80_v1

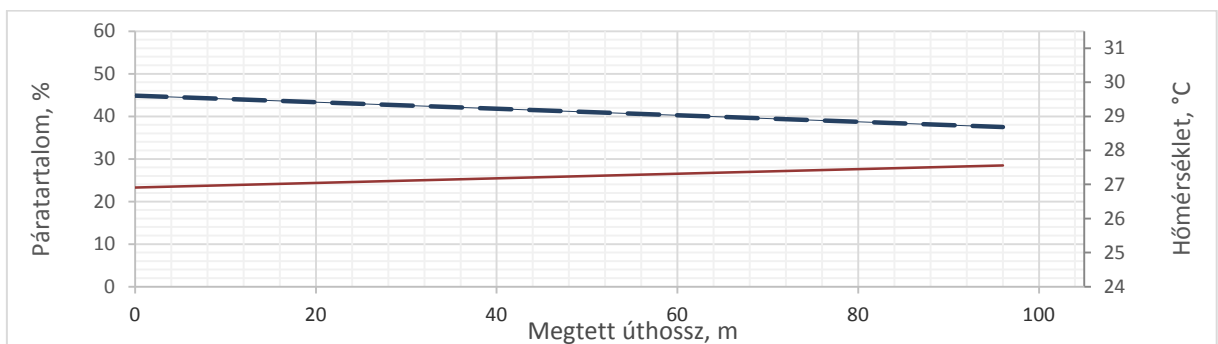
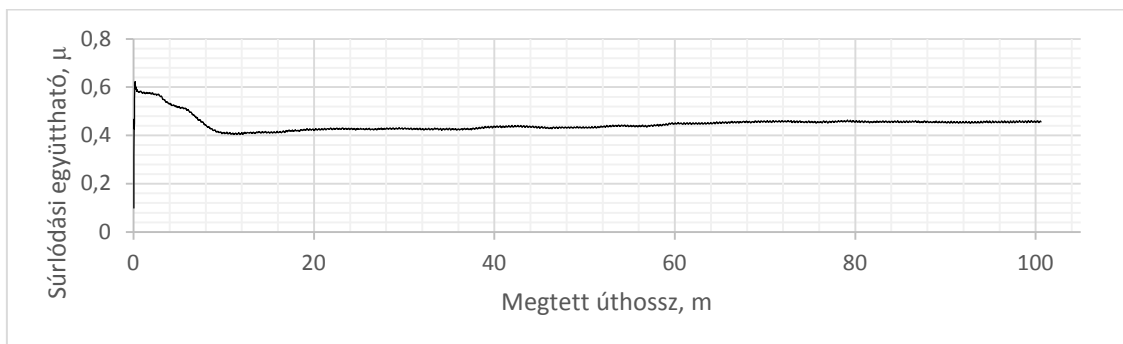


HIP_G3_F80_v100

hip_g3_3a_100_sic_f80_v1,

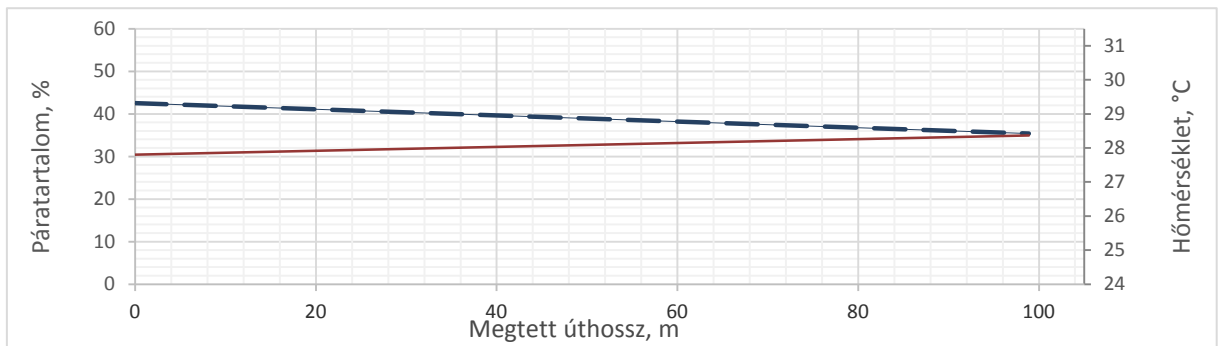
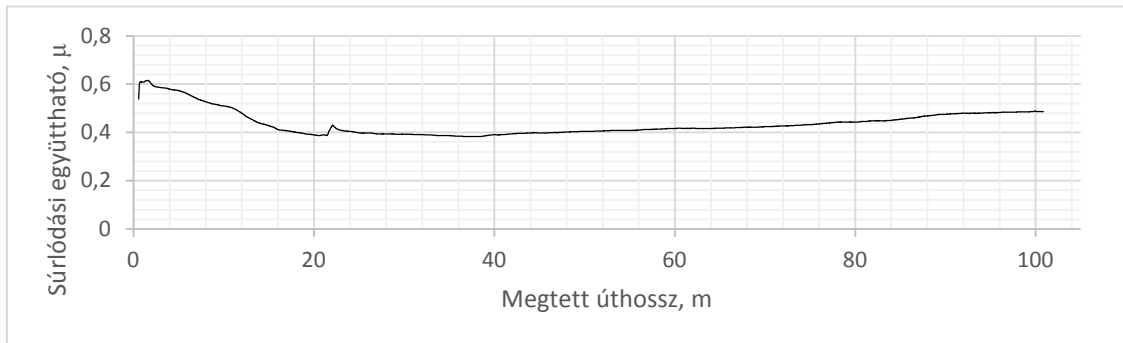


hip_g3_2a_100_sic_f80_v1

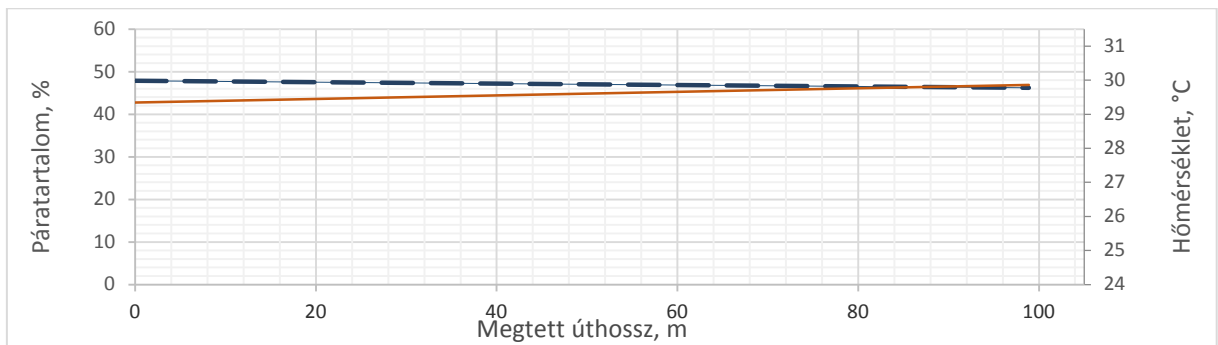
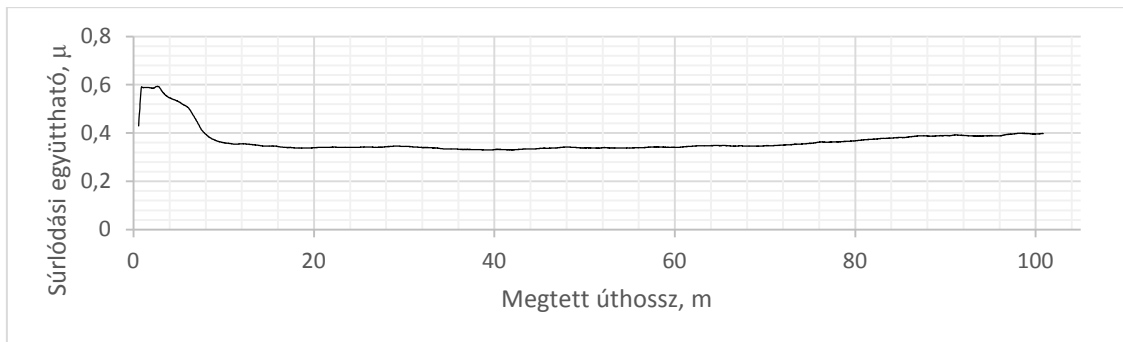


HIP_G3_F80_v150

hip_g3_2a_150_sic_f80_v1

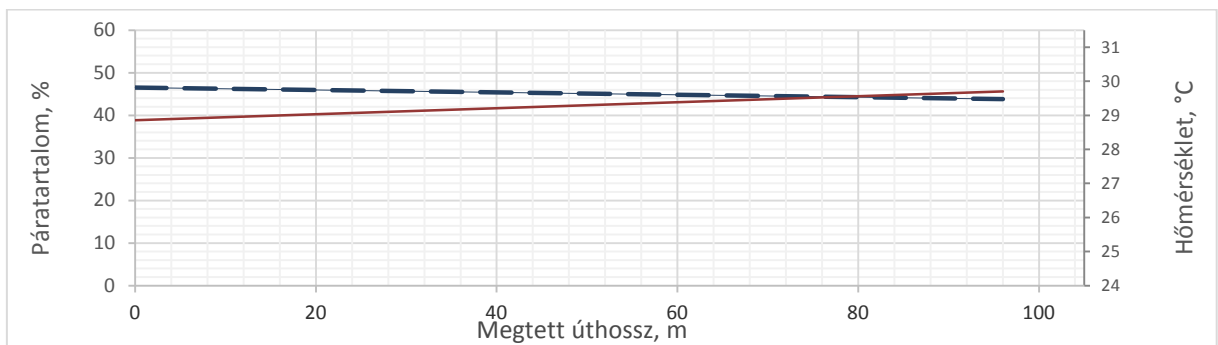
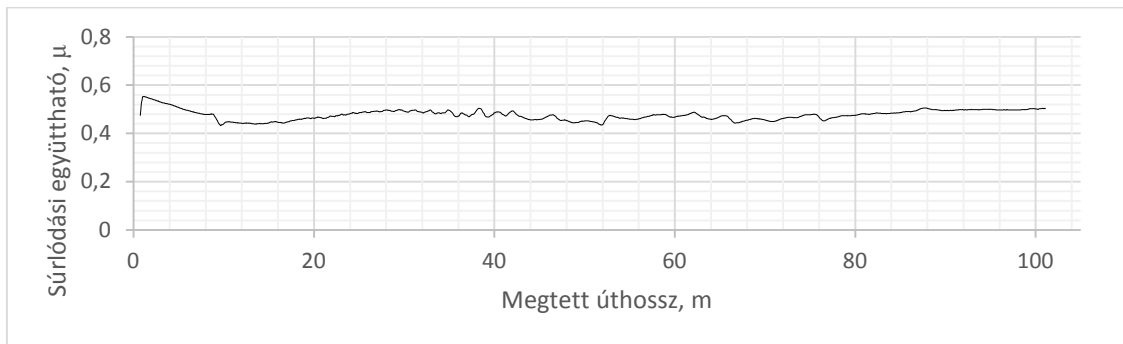


hip_g3_3a_150_sic_f80_v1

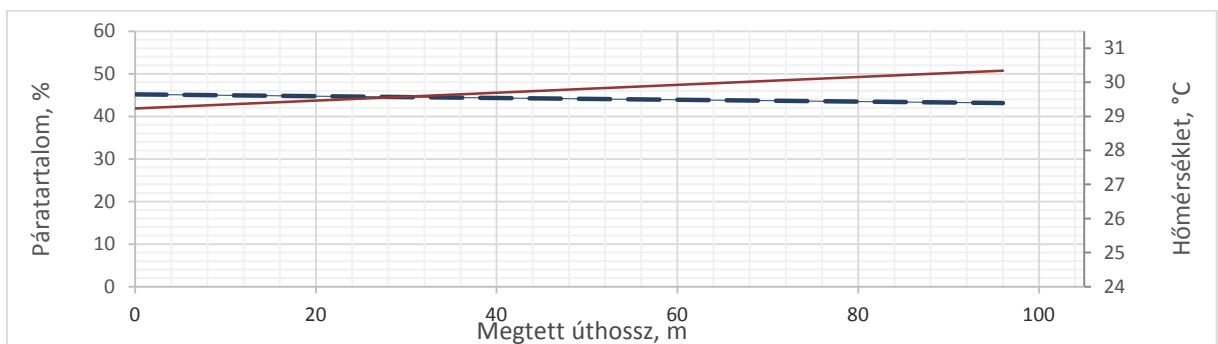
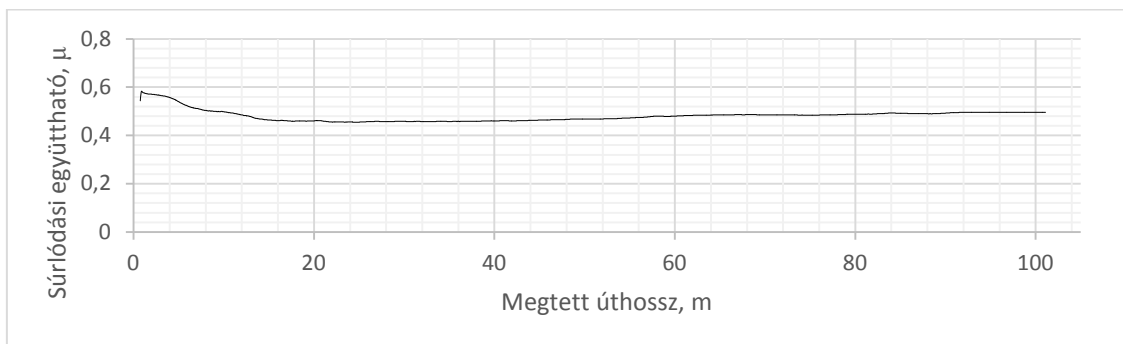


HIP_G3_F80_v200

hip_g3_1b_200_sic_f80_v1

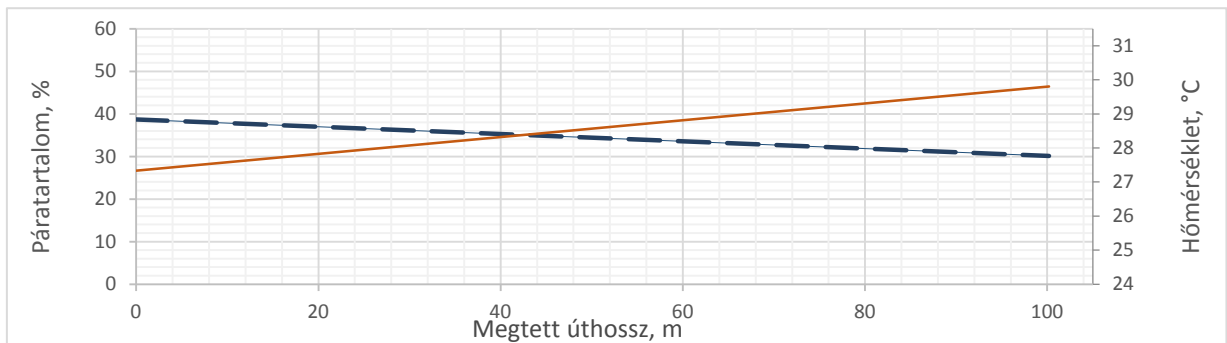
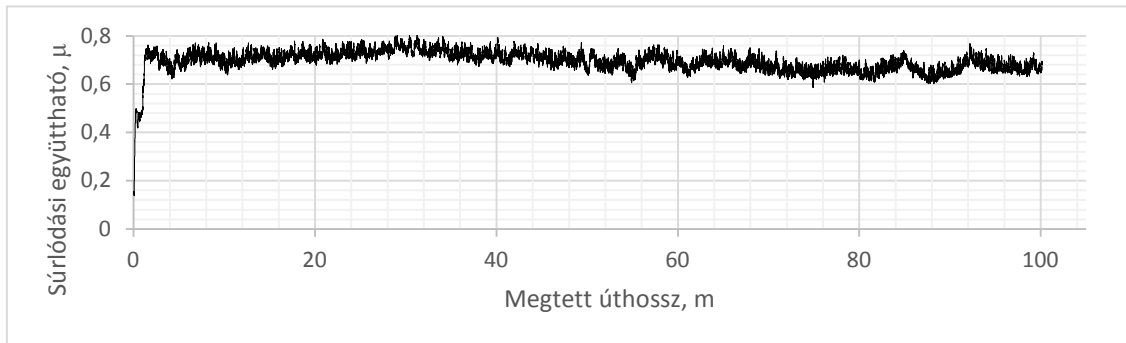


hip_g3_1b_200_sic_f80_v4

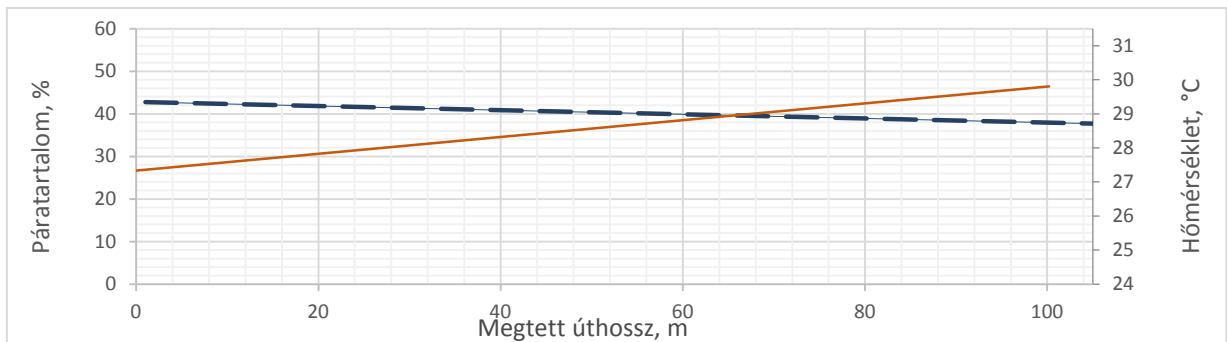
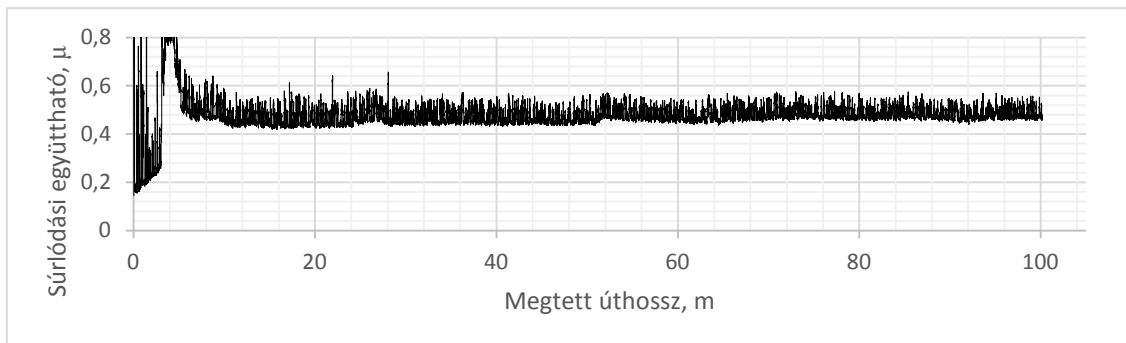


SPS_GO_F10_v10

spsg0_7B_sic_10_f10_v1

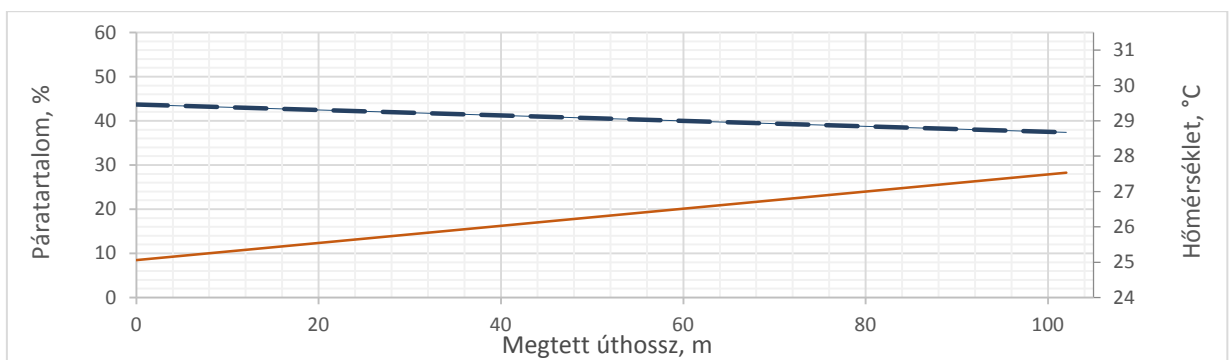
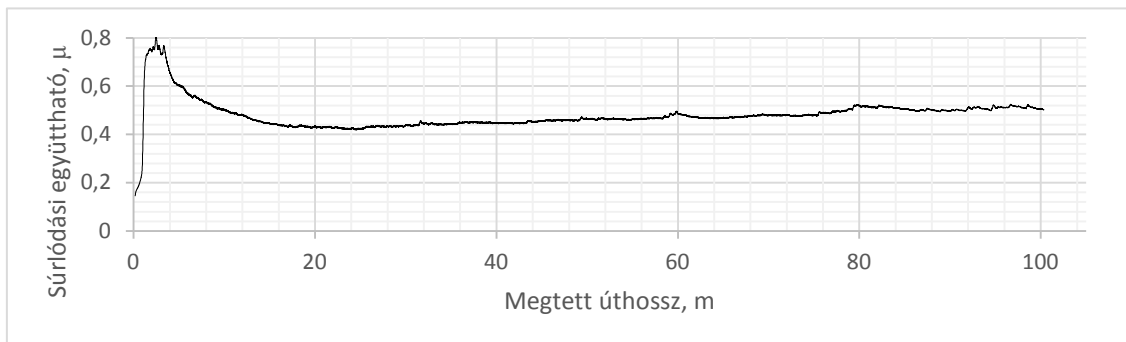


spsg0_9A_sic_10_f10_v1

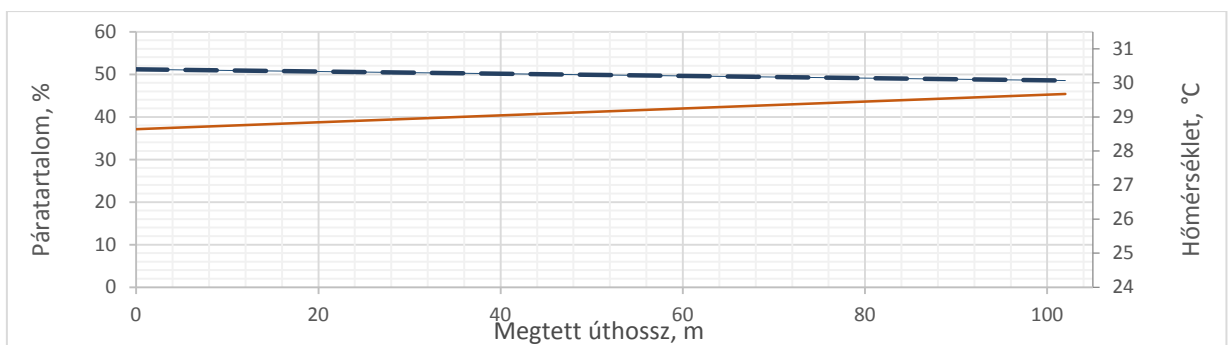
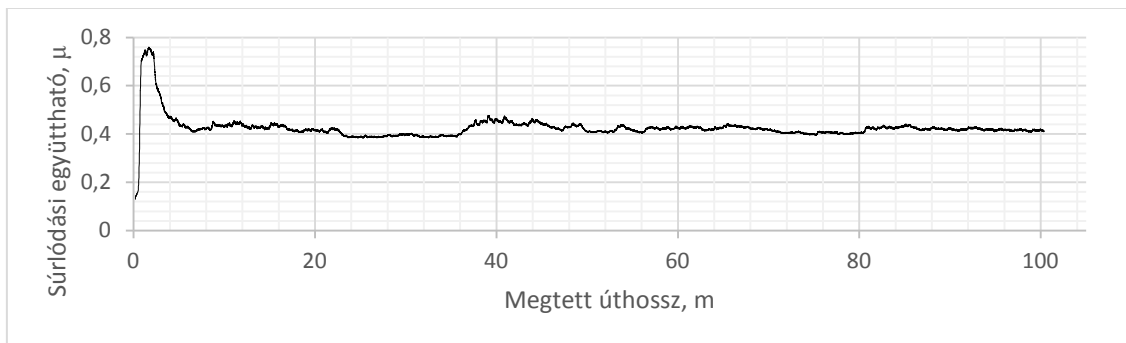


SPS_GO_F10_v50

spsg0_6B_sic_50_f10_v1

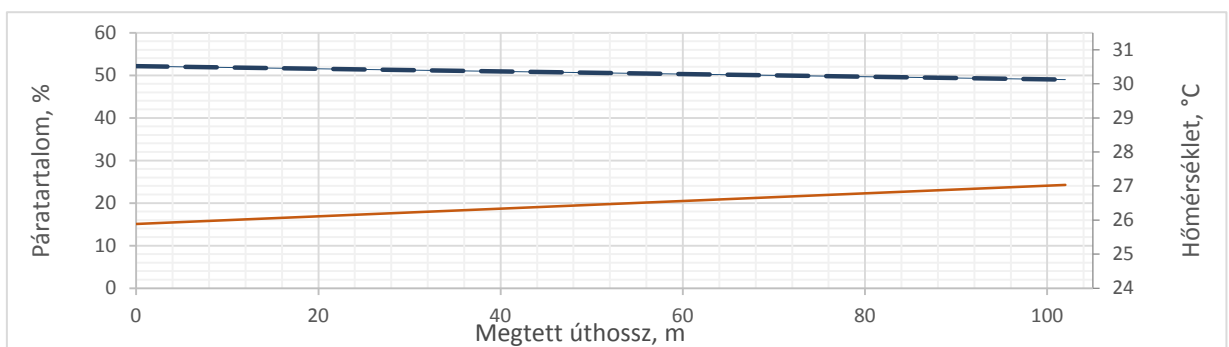
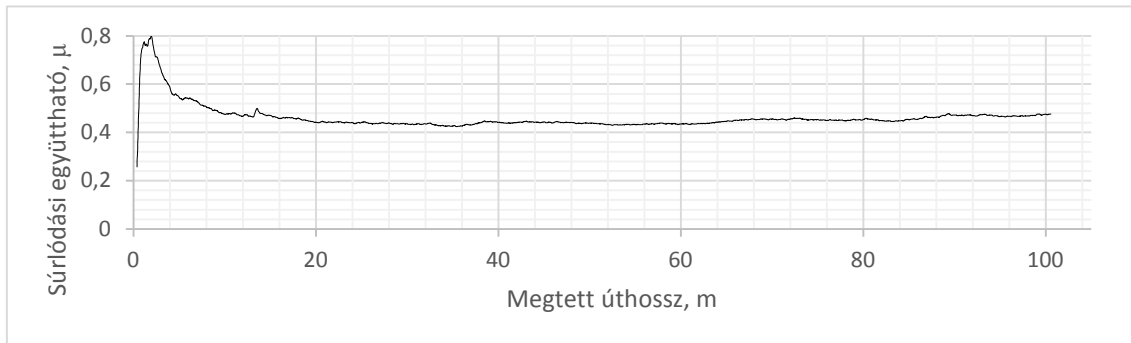


spsg0_9A_sic_50_f10_v1

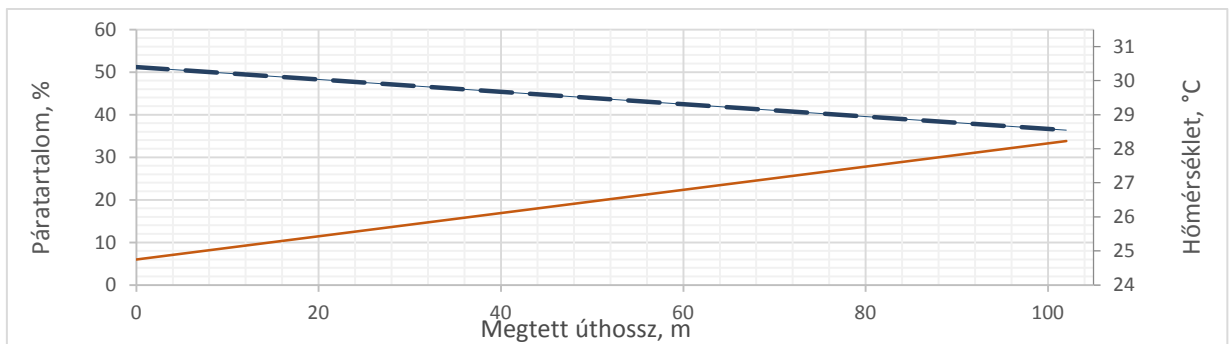
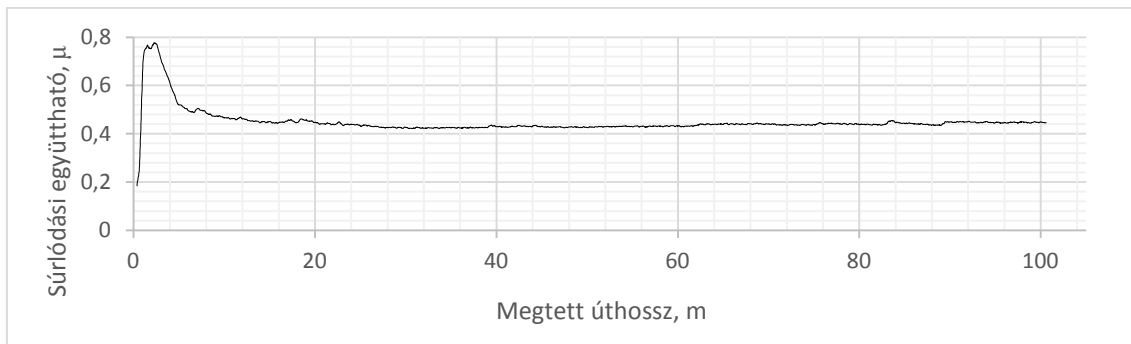


SPS_GO_F10_v100

spsg0_8A_sic_100_f10_v1

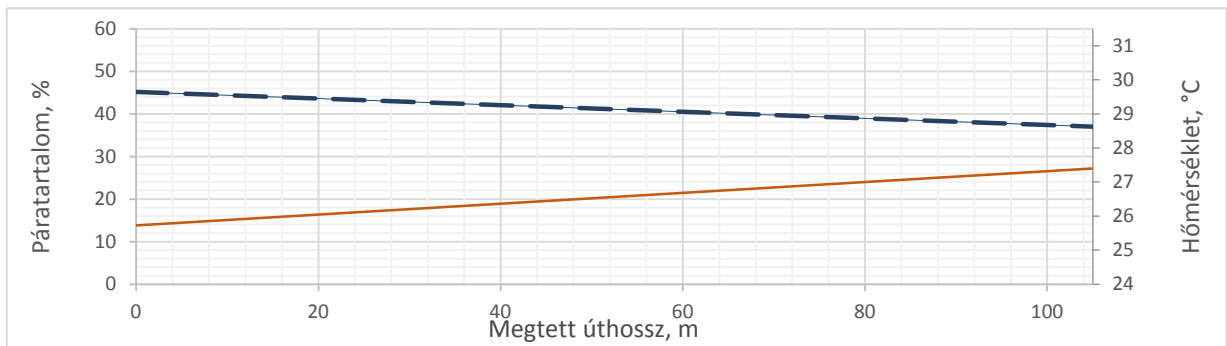
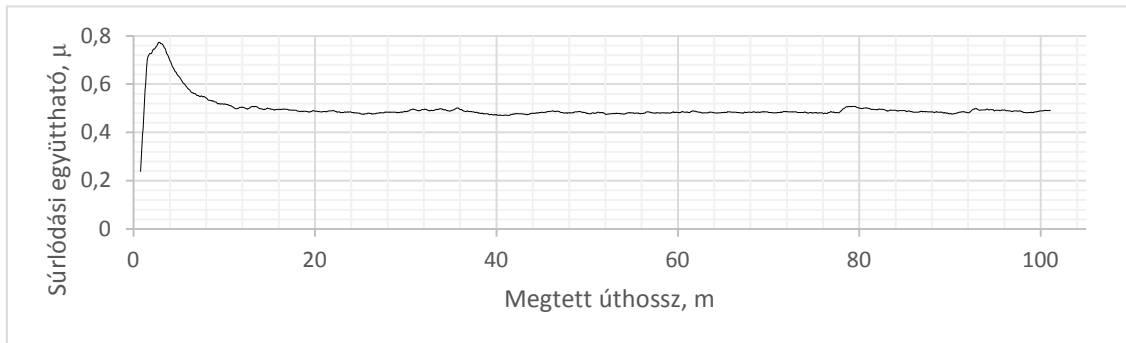


spsg0_6B_sic_100_f10_v1

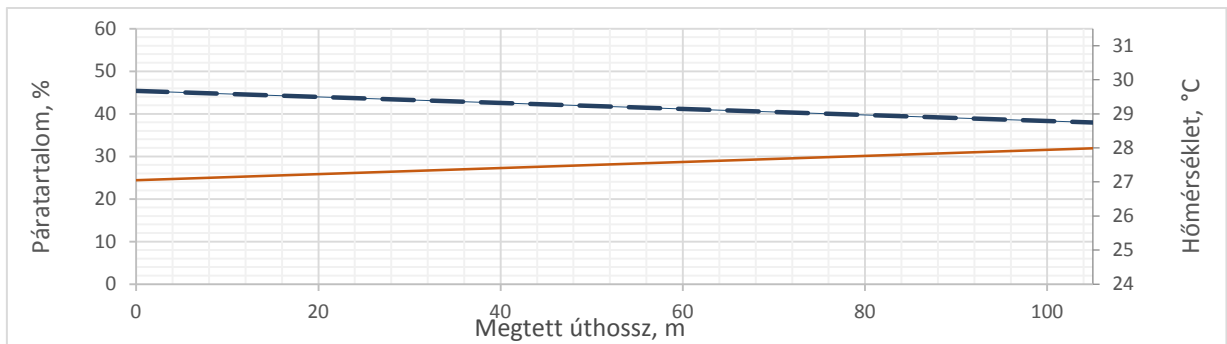
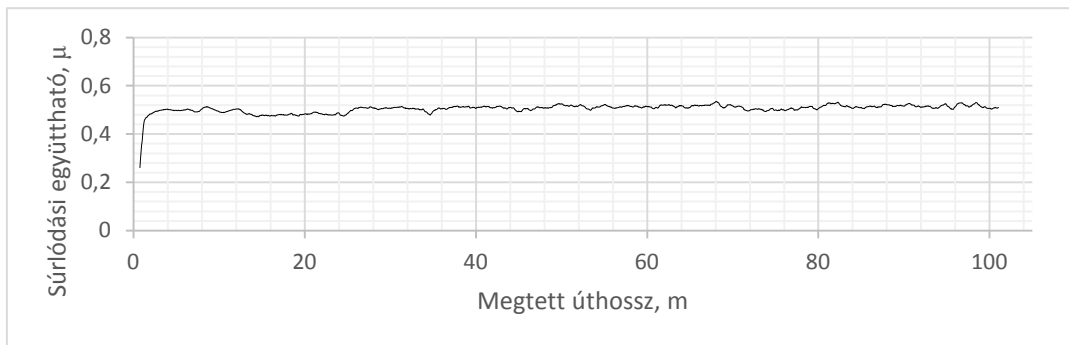


SPS_GO_F10_v200

spsg0_5B_sic_200_f10_v1

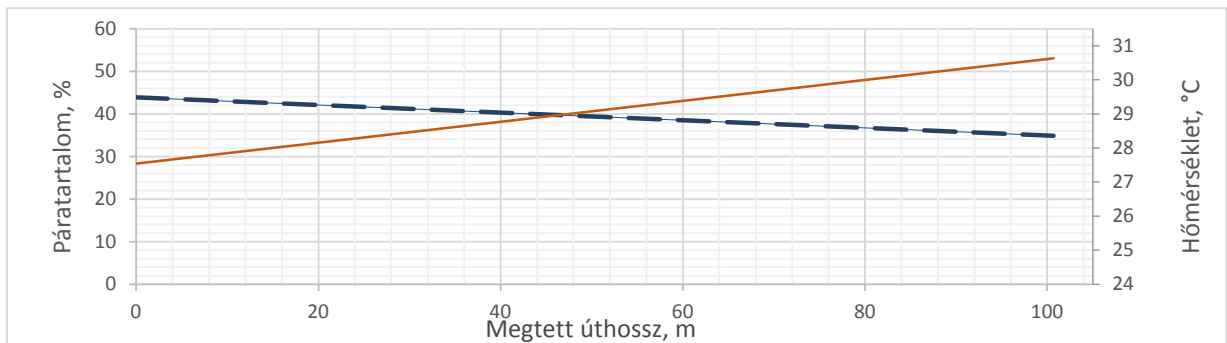
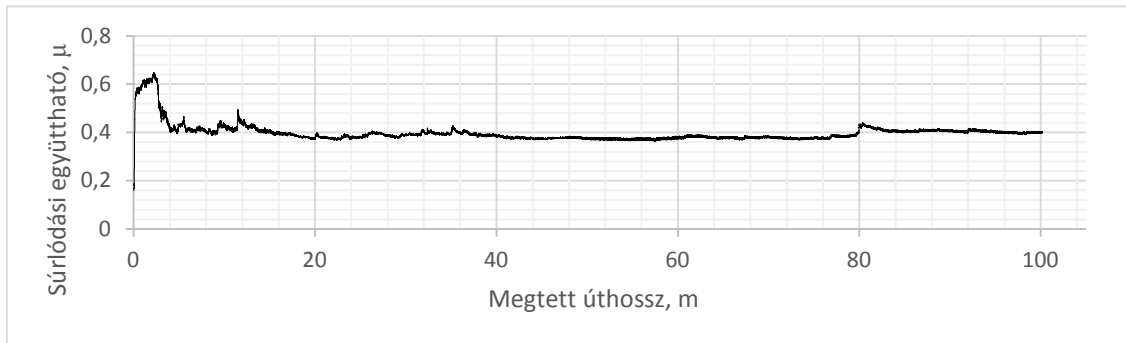


spsg0_5B_sic_200_f10_v2

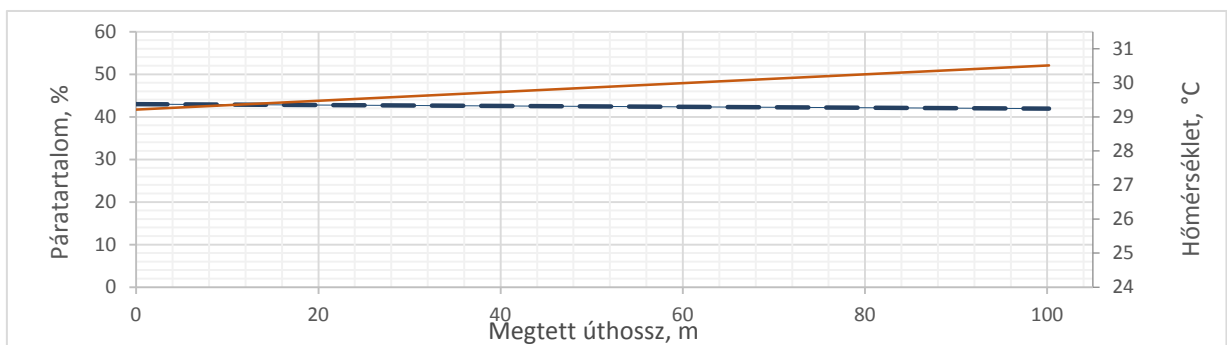
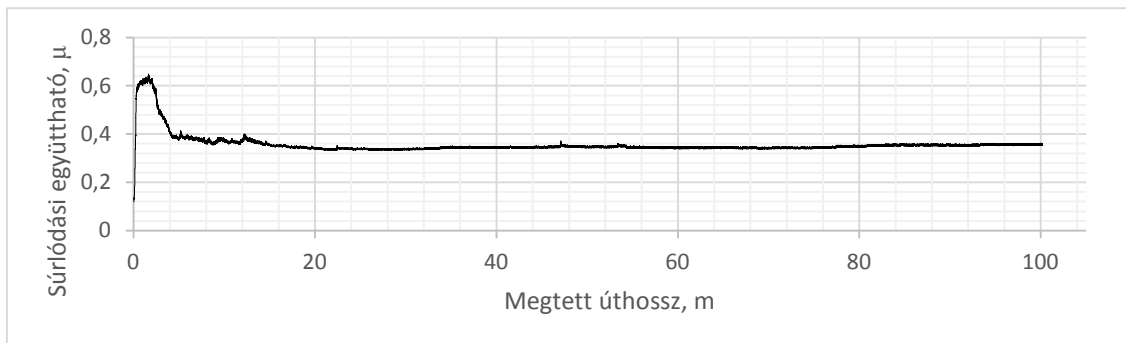


SPS_GO_F40_v10

spsg0_6B_sic_10_f40_v1

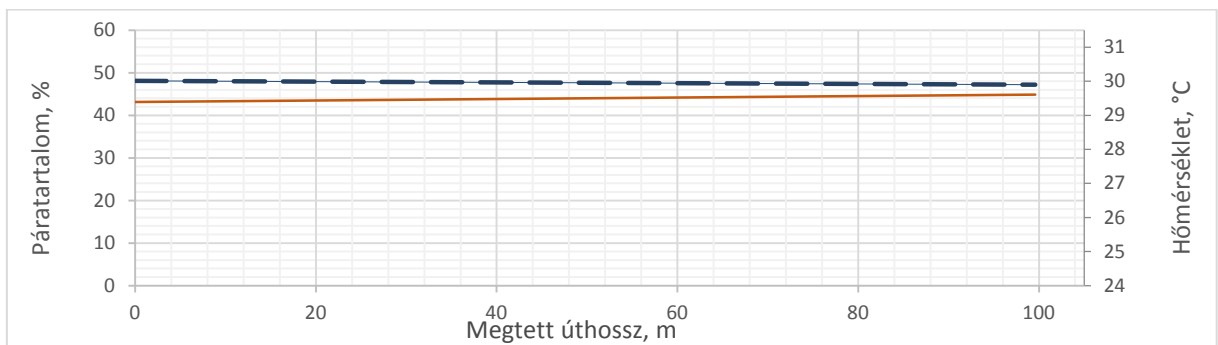
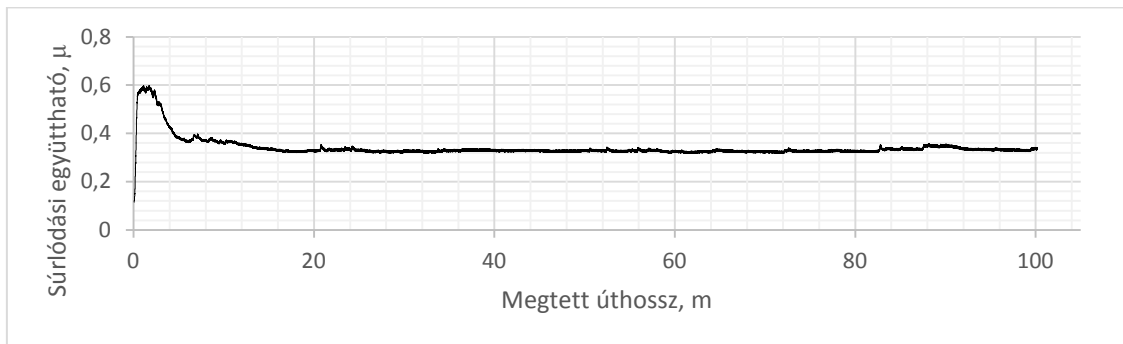


spsg0_8B_sic_10_f40_v1

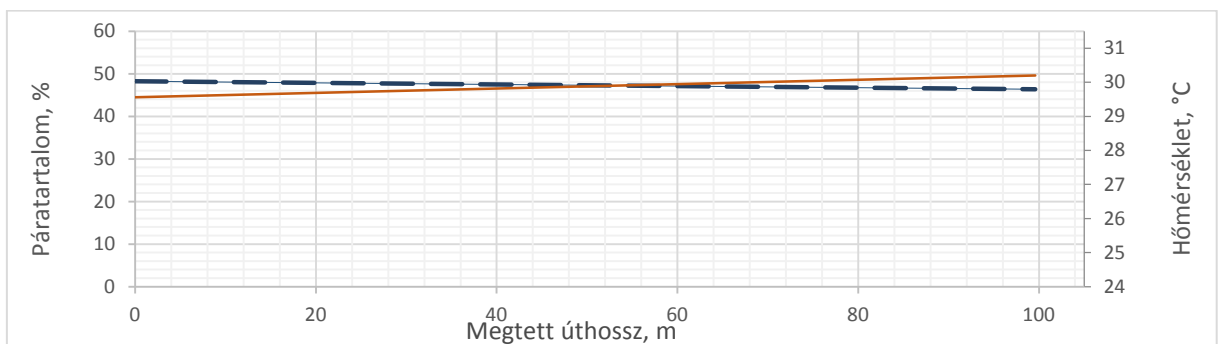
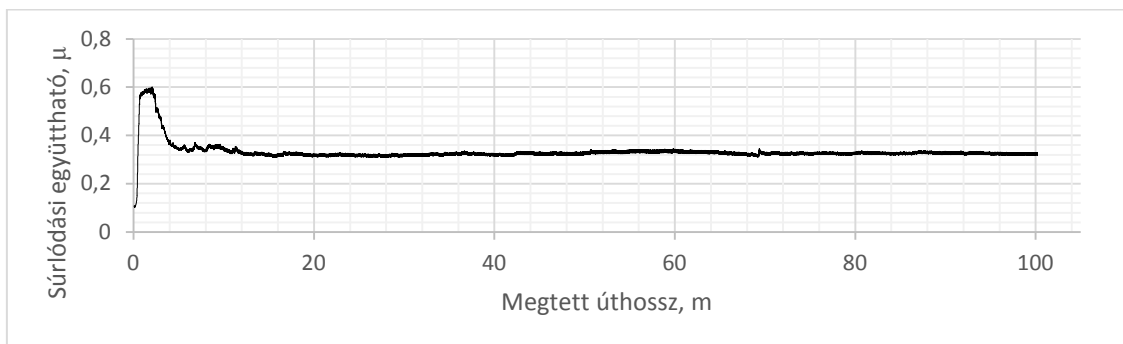


SPS_G0_F40_v20_SiC

sps_g0_6a_20_sic_f40_v2

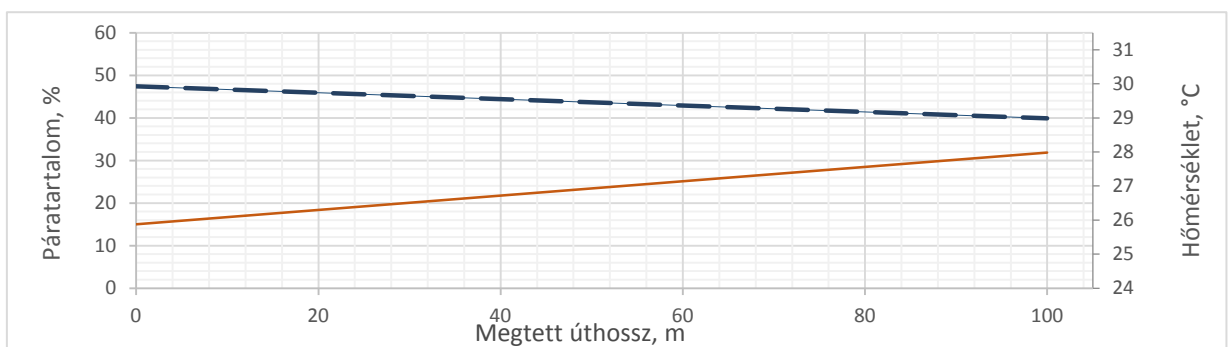
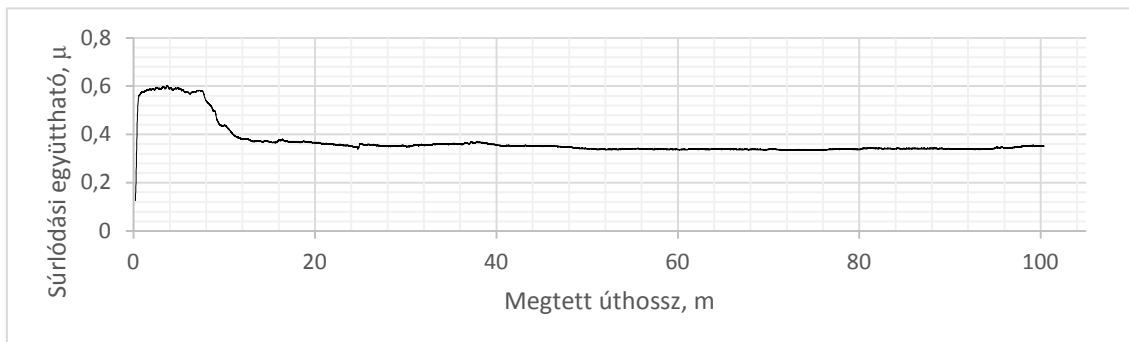


sps_g0_6a_20_sic_f40_v1

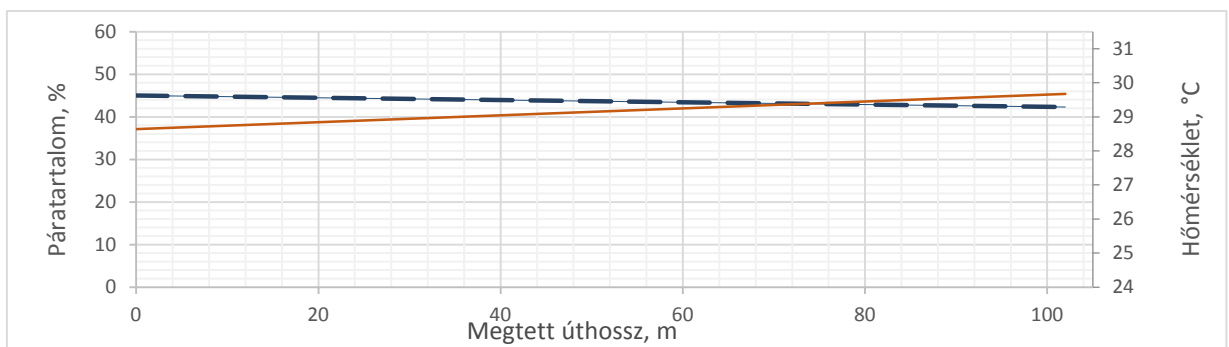
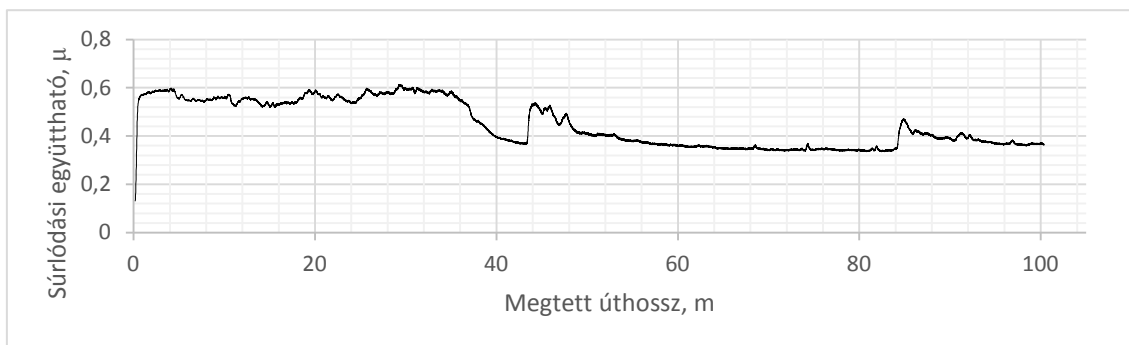


SPS_GO_F40_v50

spsg0_6B_sic_50_f40_v1

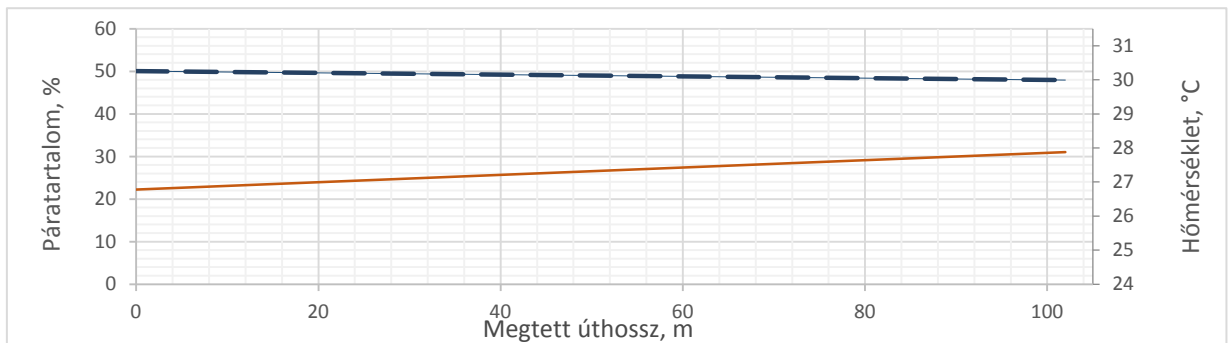
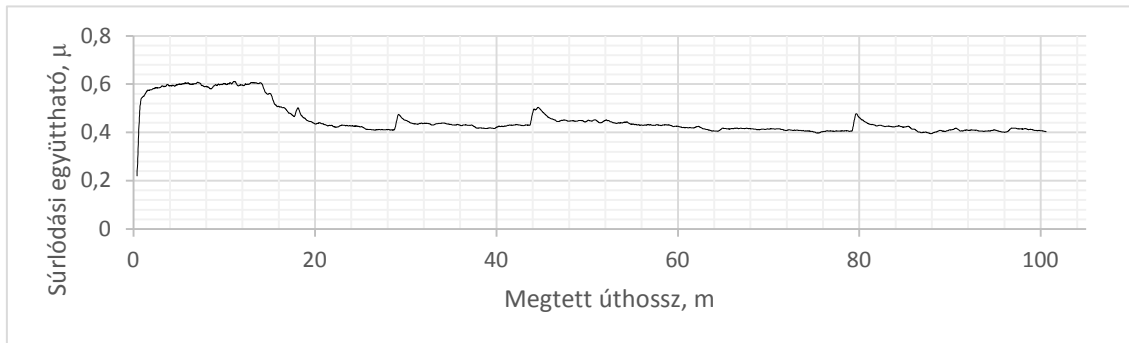


spsg0_8B_sic_50_f40_v1

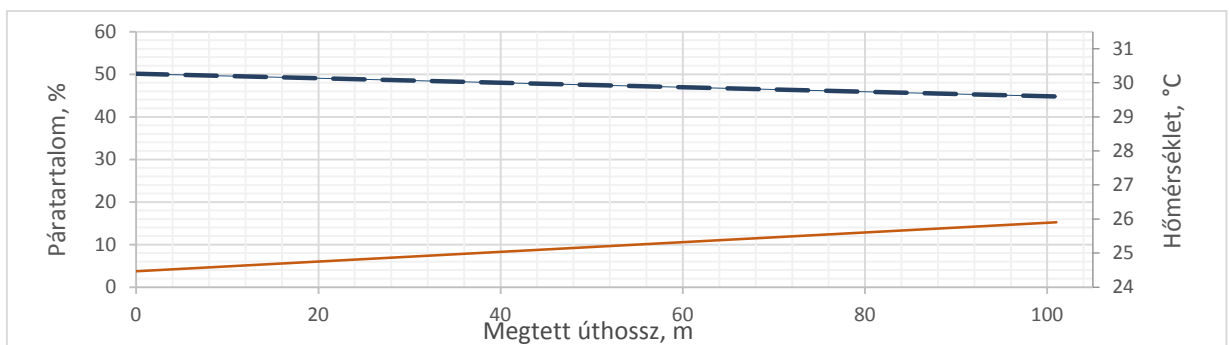
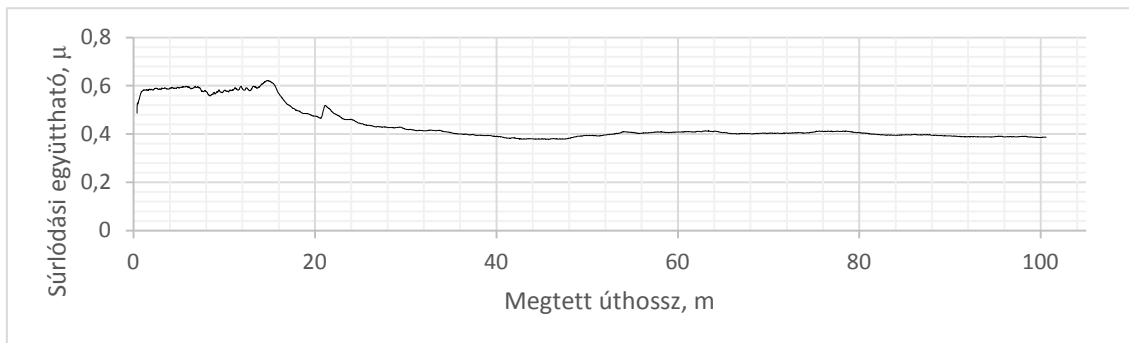


SPS_GO_F40_v100

spsg0_8A_sic_100_f40_v1

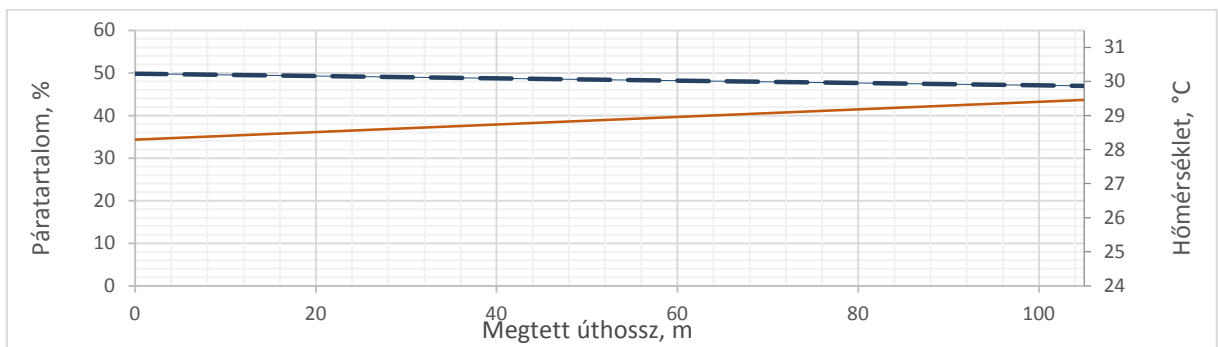
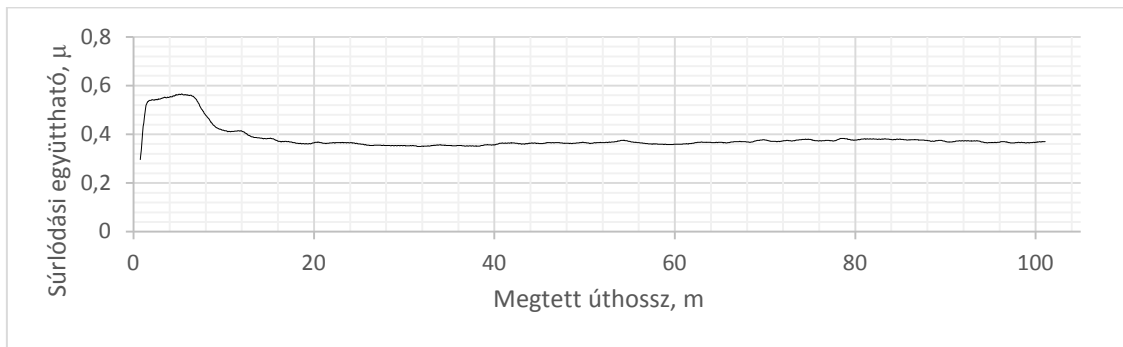


spsg0_7A_sic_100_f40_v1

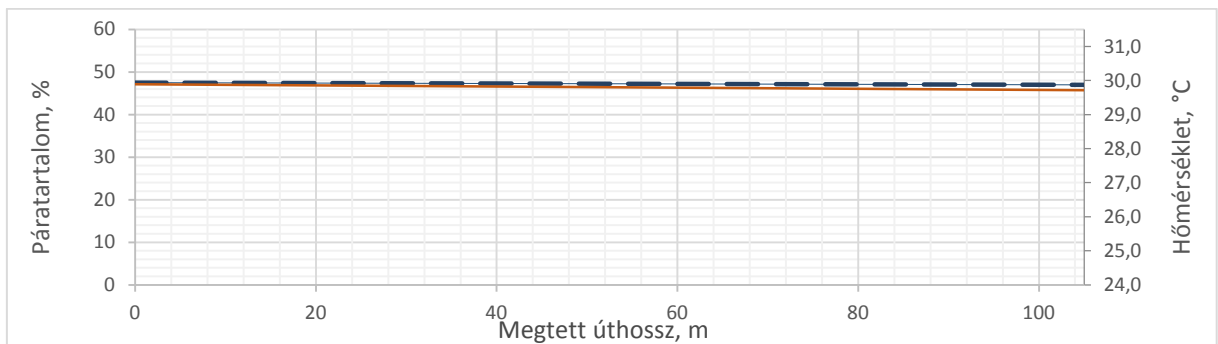
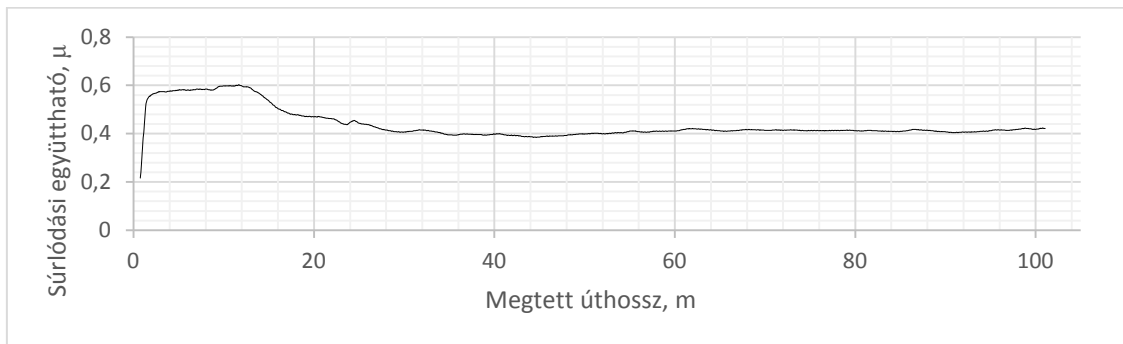


SPS_G0_F40_v200_SiC

sps_g0_6a_200_sic_f40_v1

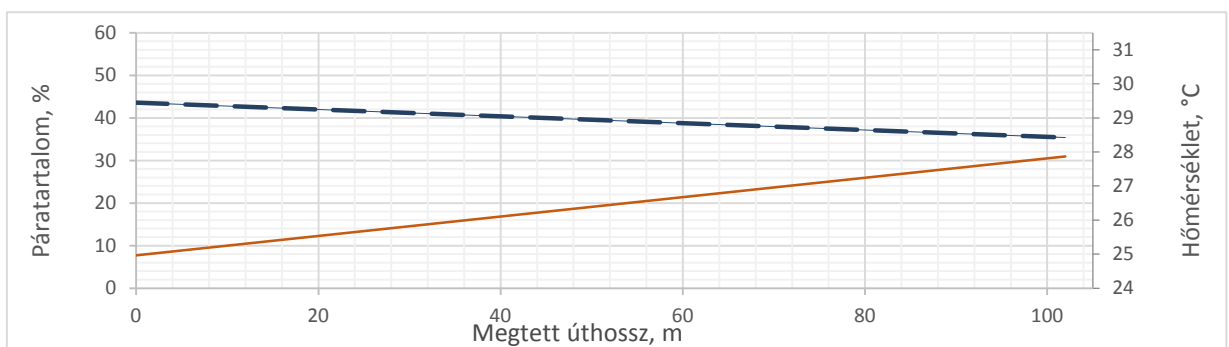
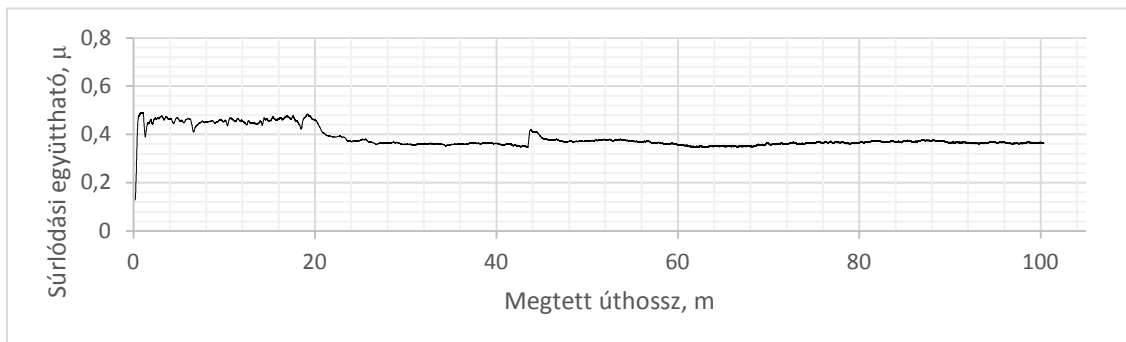


sps_g0_6a_200_sic_f40_v2

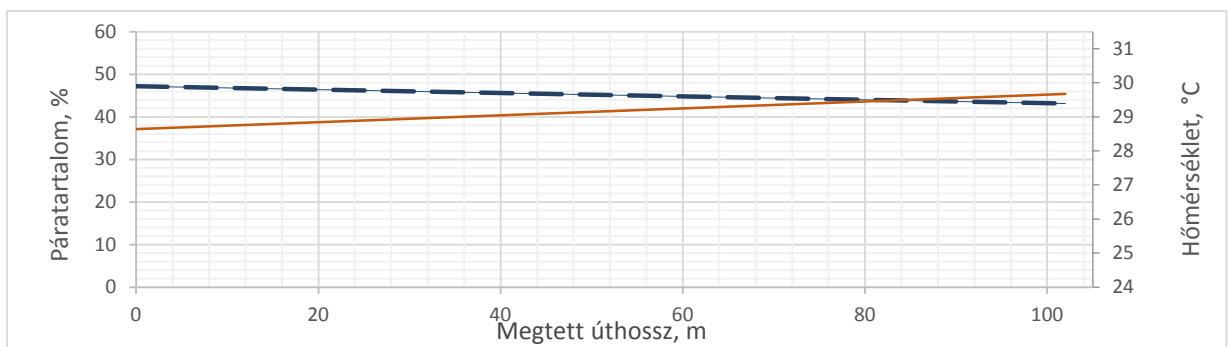
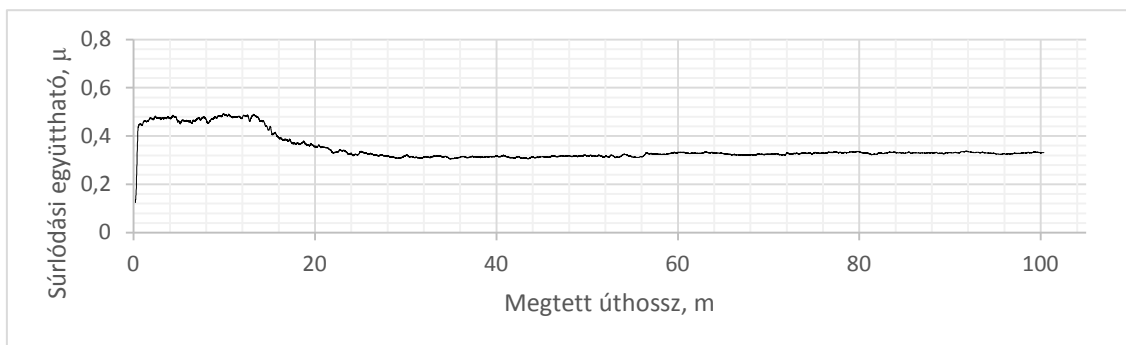


SPS_GO_F80_v50

spsg0_5B_sic_50_f80_v1

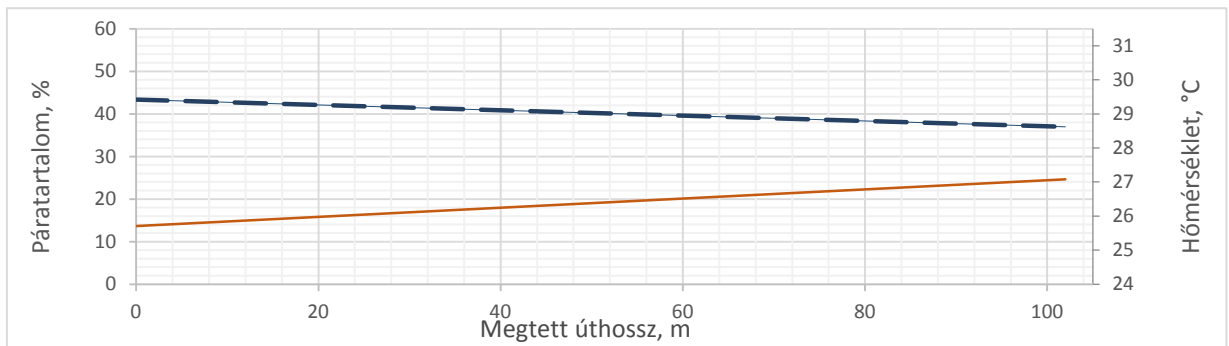
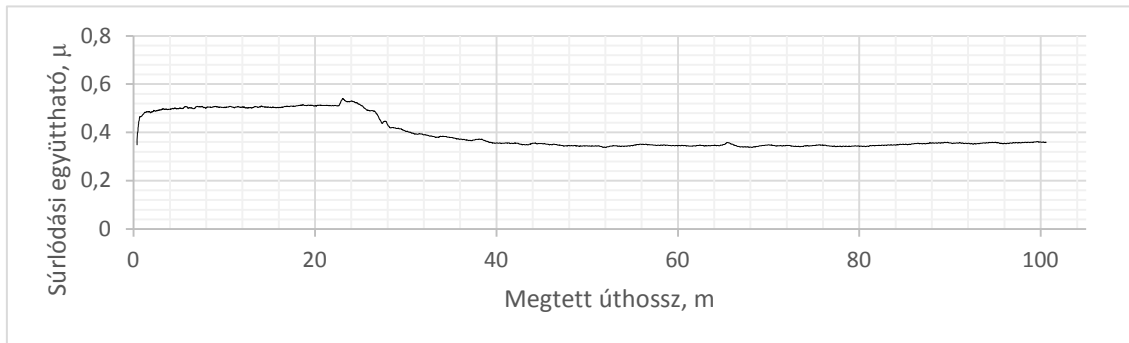


spsg0_8B_sic_50_f80_v1

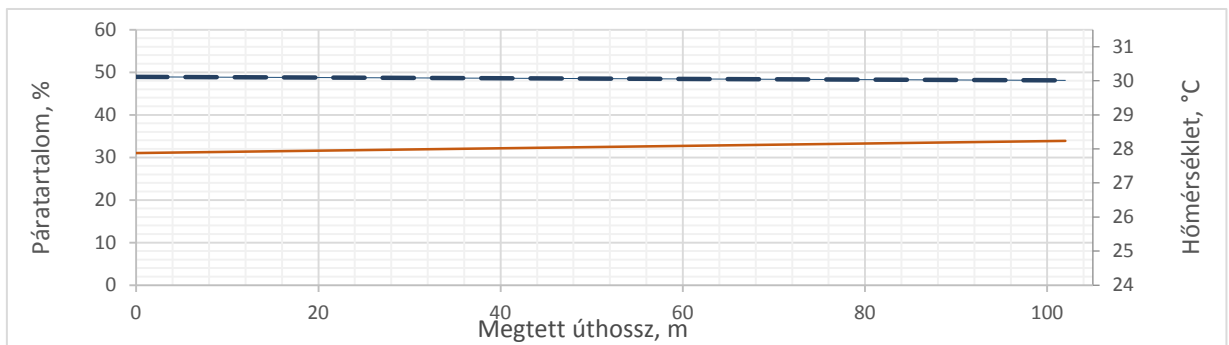
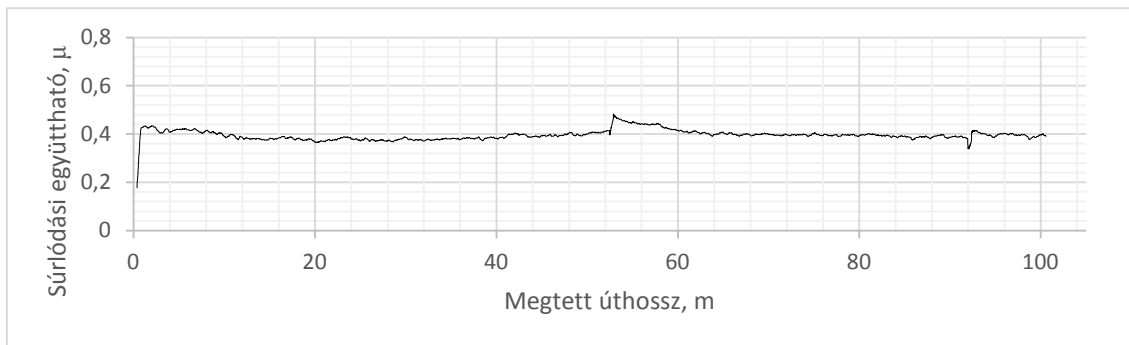


SPS_GO_F80_v100

spsg0_5B_sic_100_f80_v1

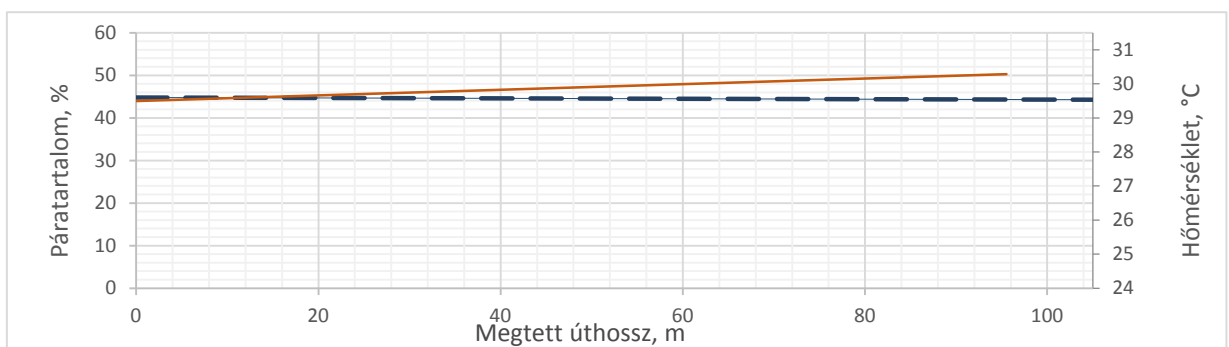
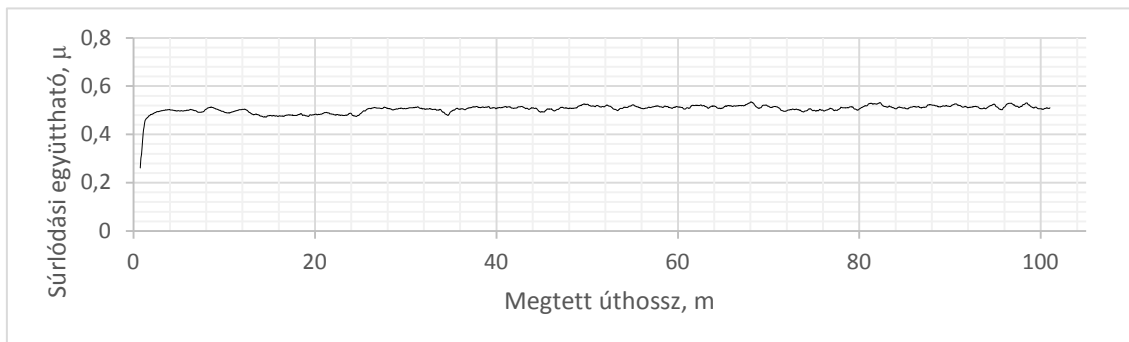


spsg0_8A_sic_100_f80_v1

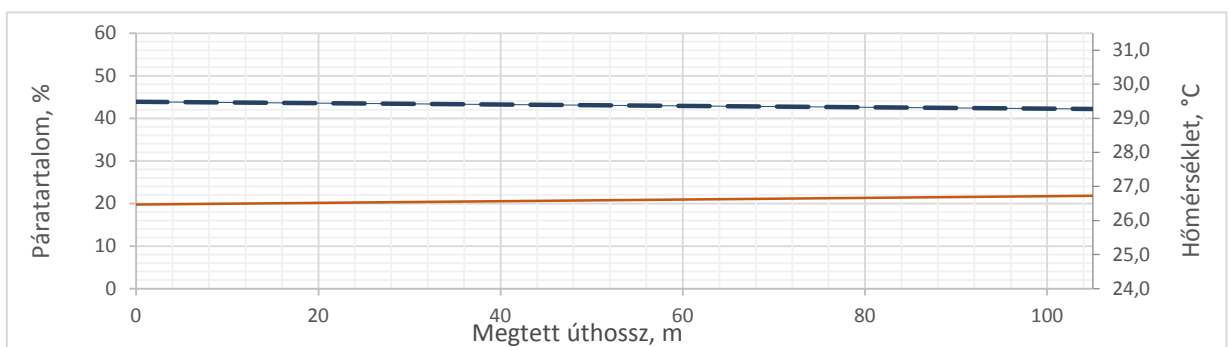
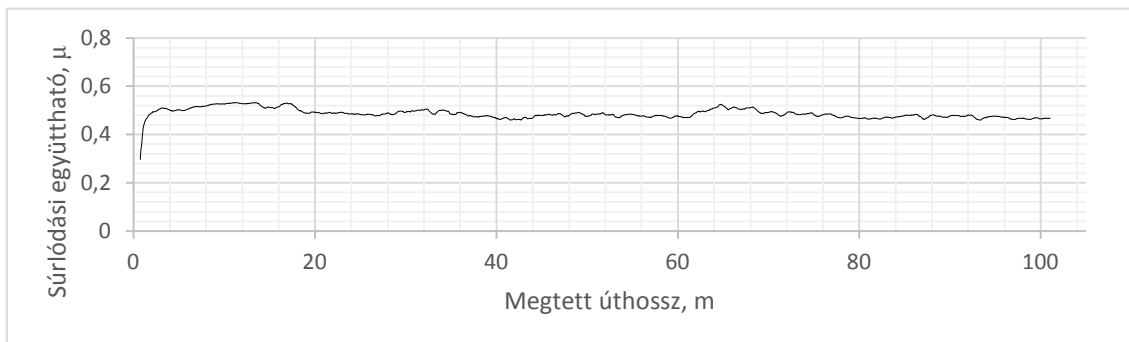


SPS_GO_F80_v200

spsg0_8B_sic_200_f80_v1

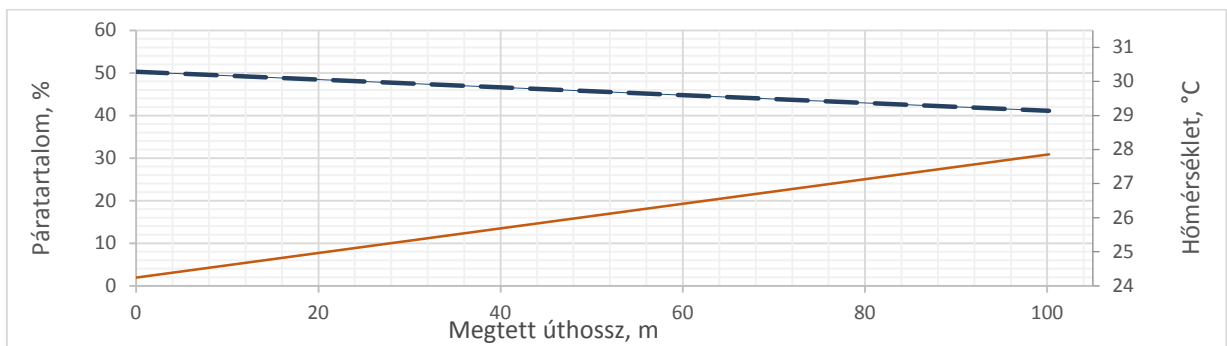
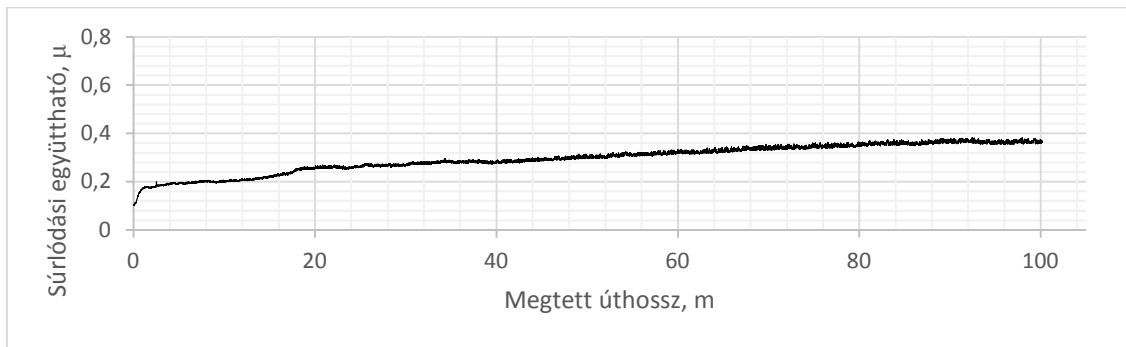


sps_g0_7a_200_sic_f80_v1



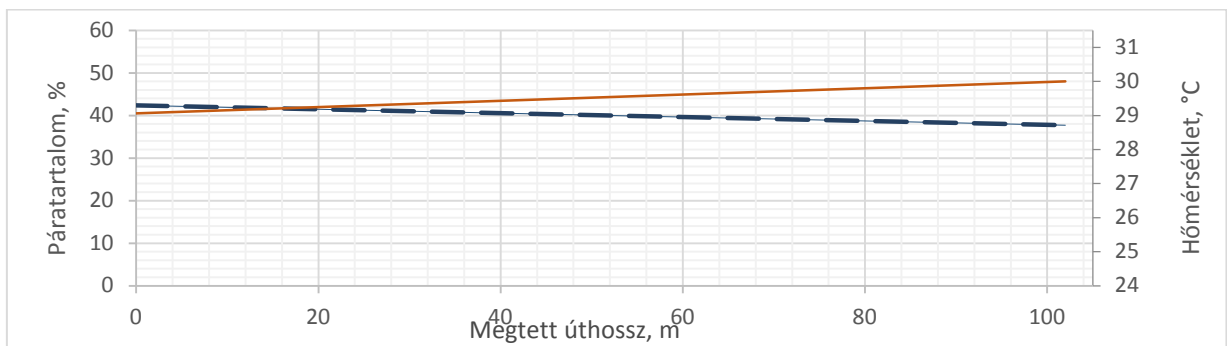
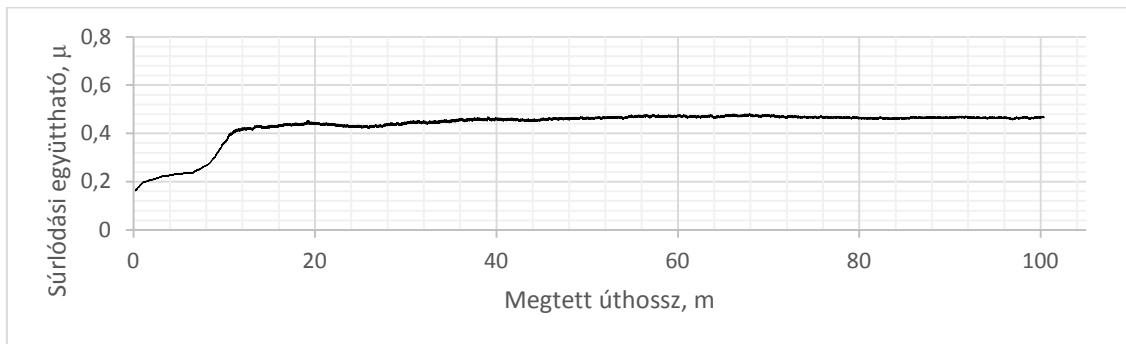
SPS_G1_F10_v10

spsg1_1B_sic_10_f10_v1



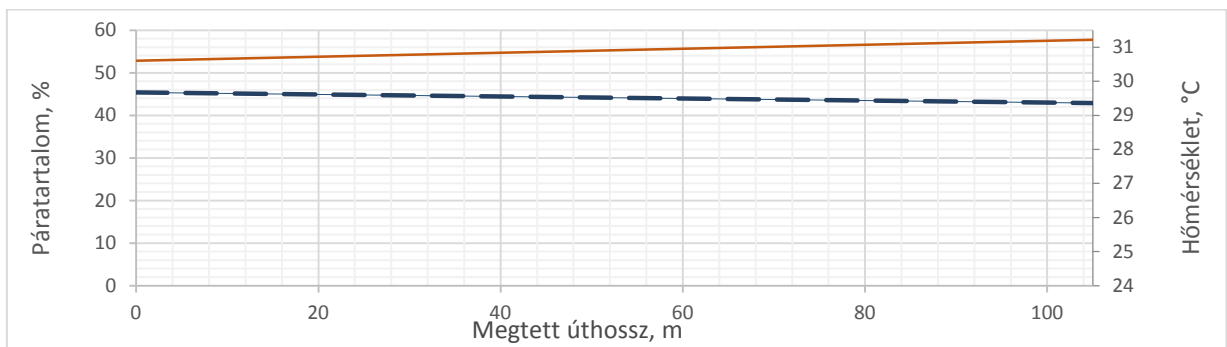
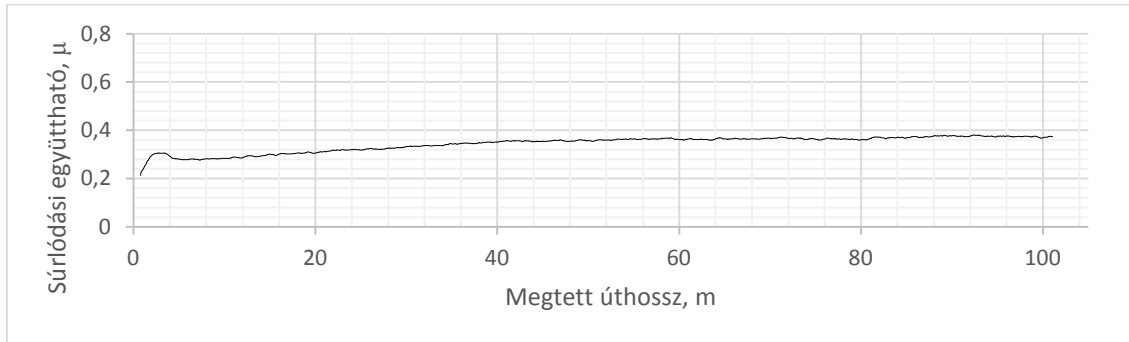
SPS_G1_F10_v50

spsg1_1B_sic_50_f10_v1



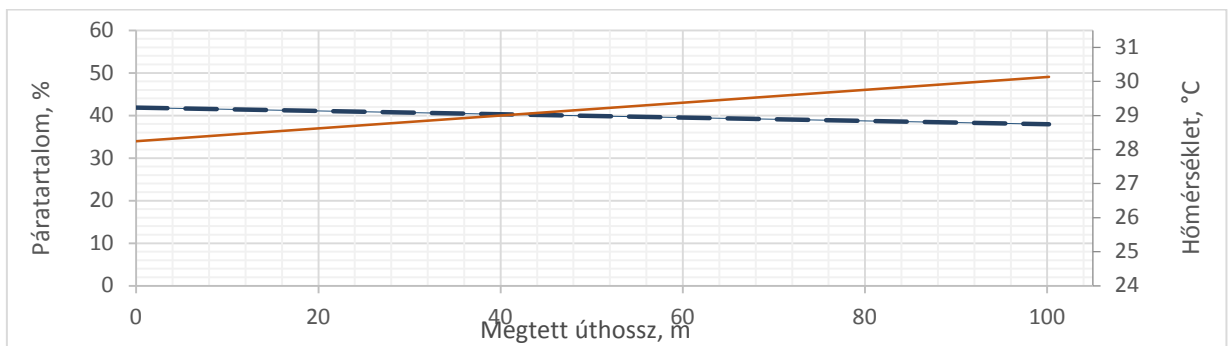
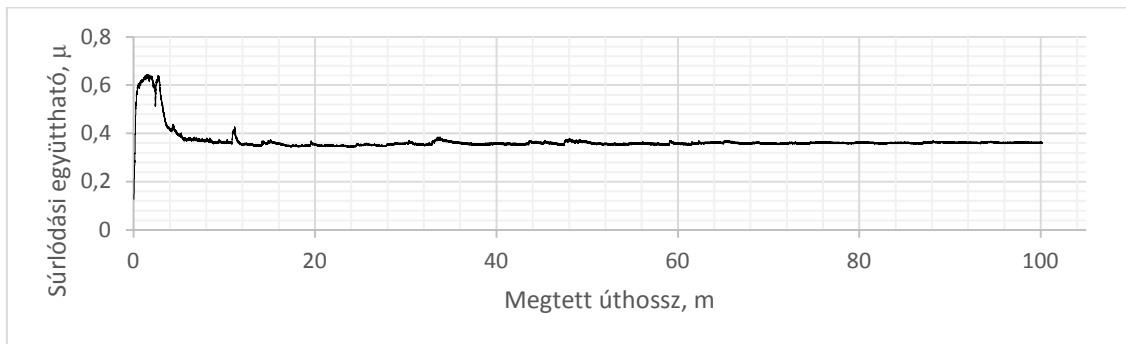
SPS_G1_F10_v200

spsg1_1A_sic_200_f10_v1

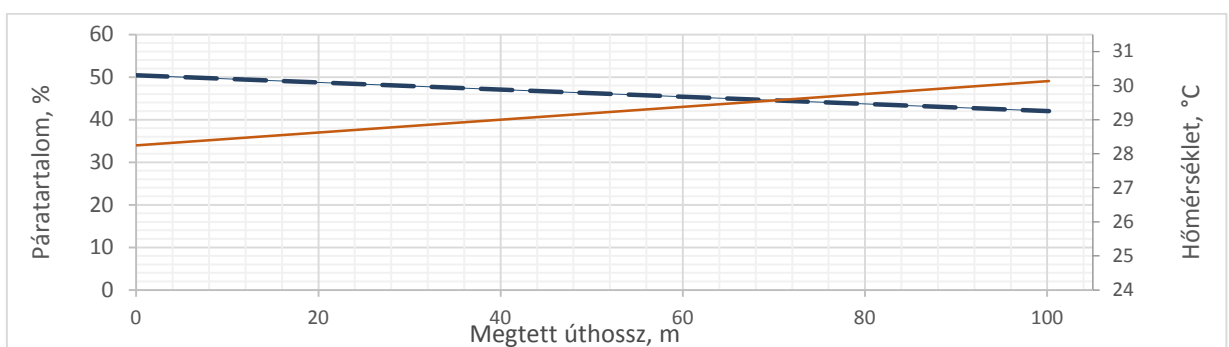
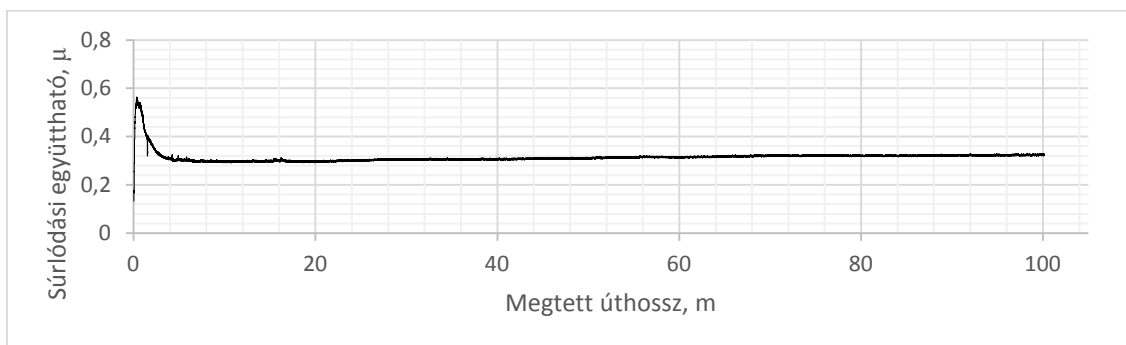


SPS_G1_F40_v10

spsg1_1B_sic_10_f40_v1

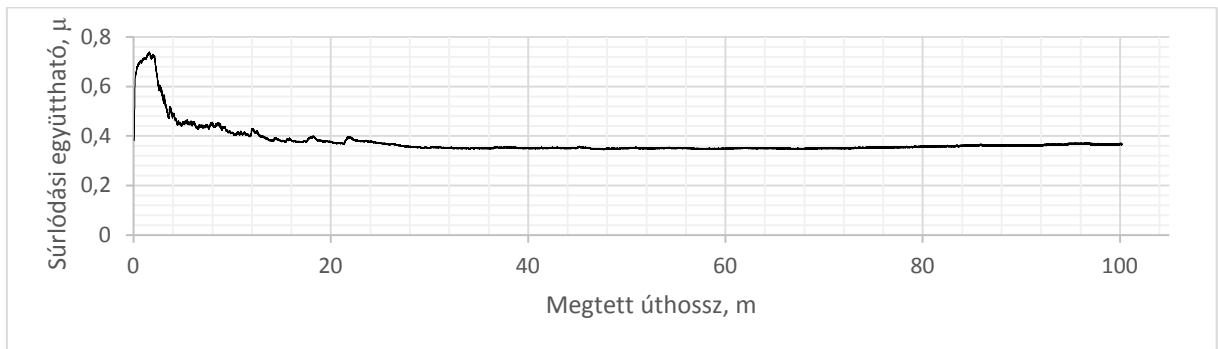


spsg1_4B_sic_10_f40_v1

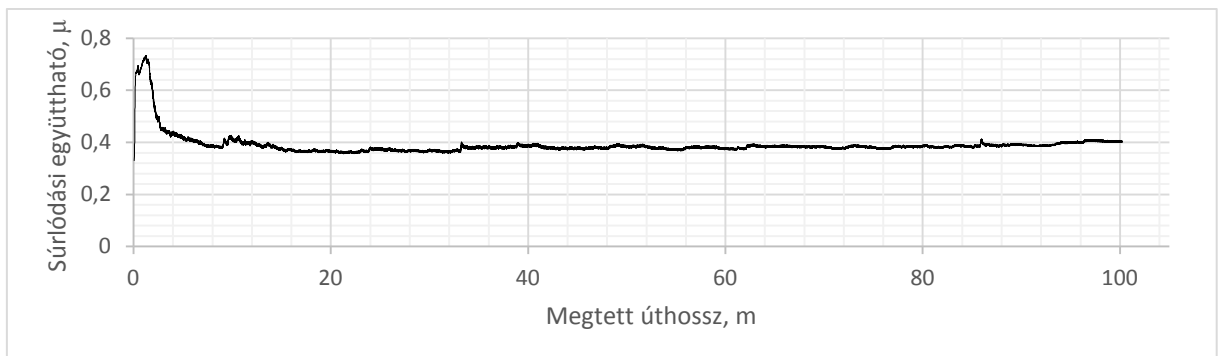


SPS_G1_F40_v20

SPS_G1_4A_v20_p1

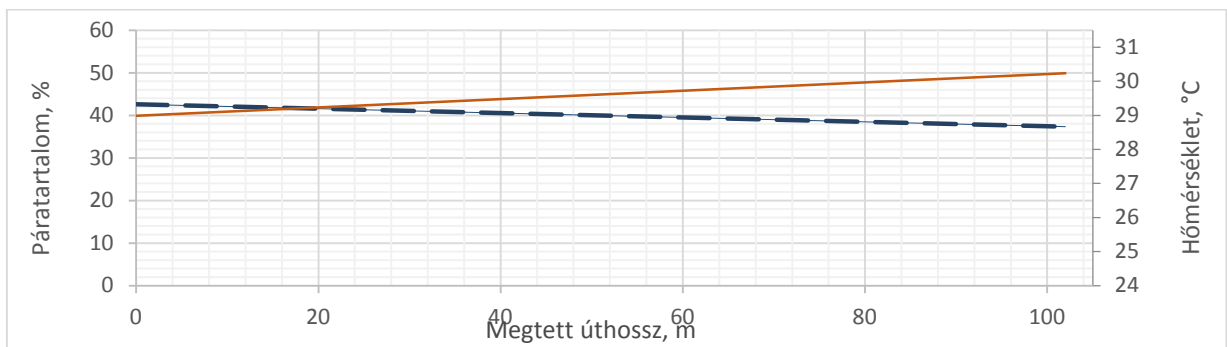
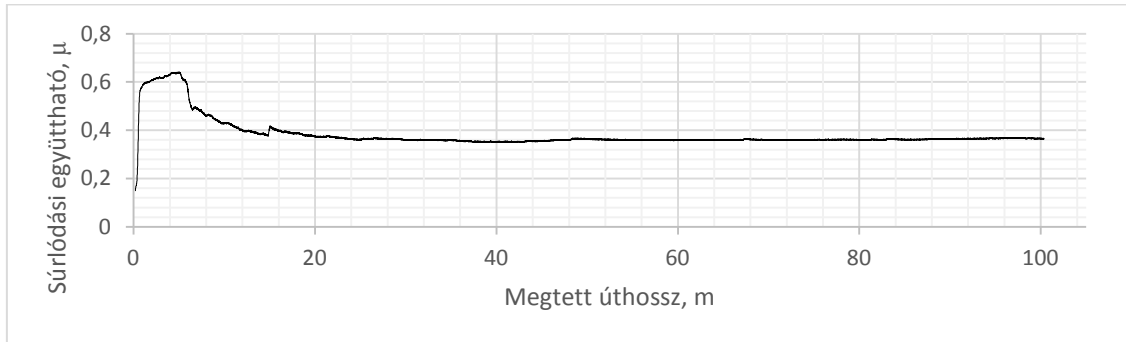


SPS_G1_4A_v20_p1



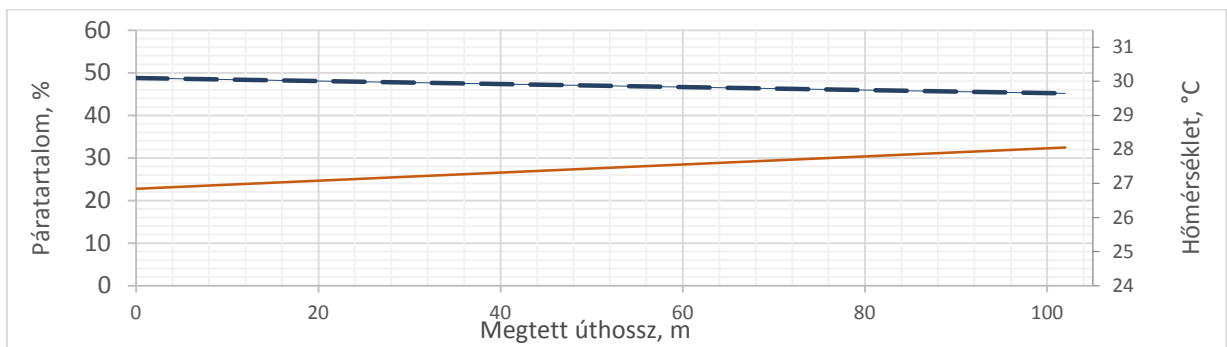
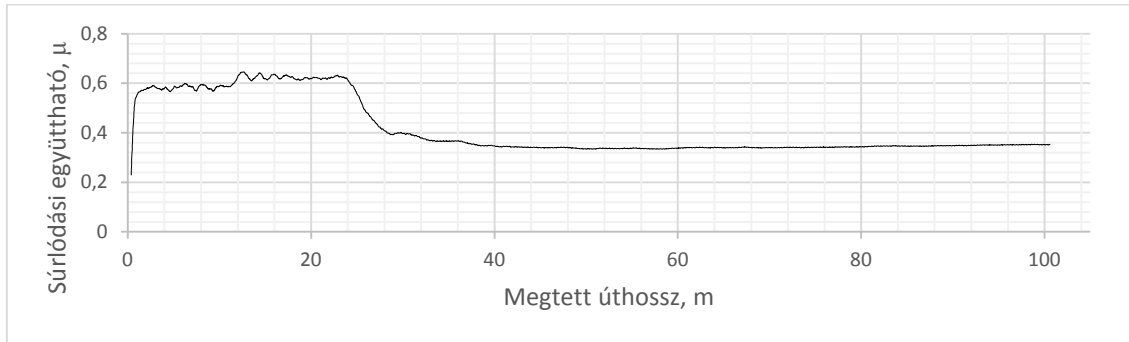
SPS_G1_F40_v50

spsg1_1A_sic_50_f40_v1



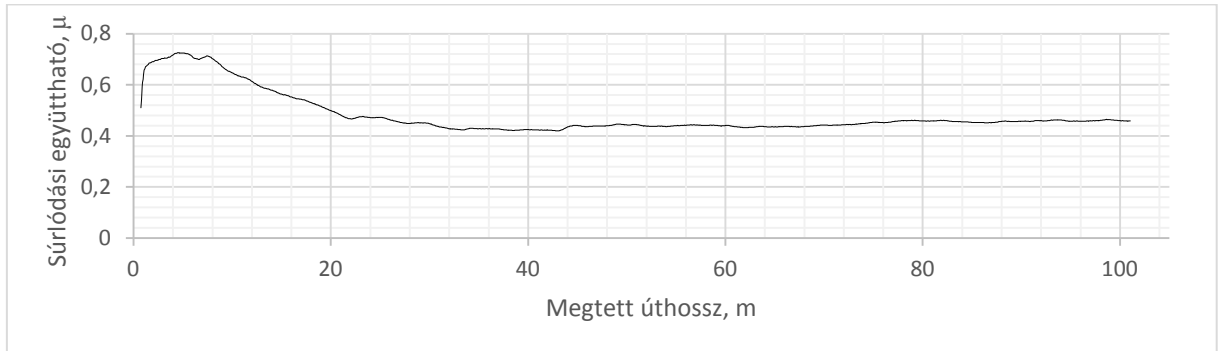
SPS_G1_F40_v100

spsg1_4B_sic_100_f40_v1

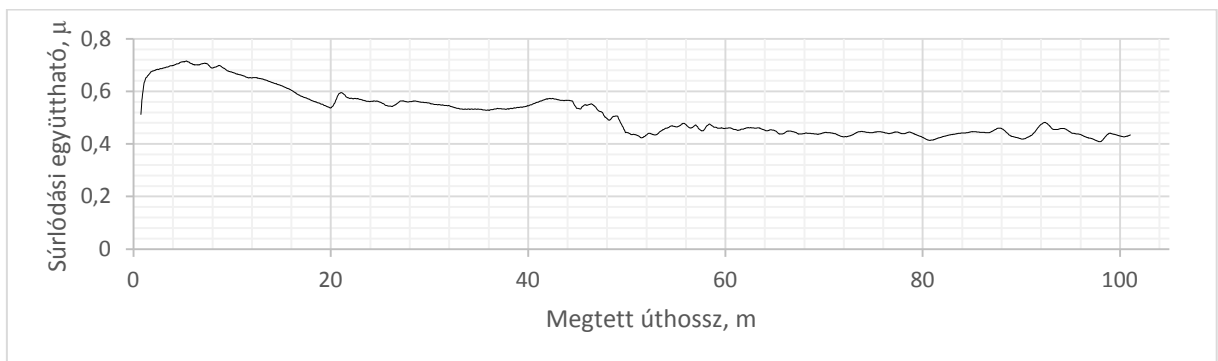


SPS_G1_F40_v200

SPS_G1_4A_v200_p1

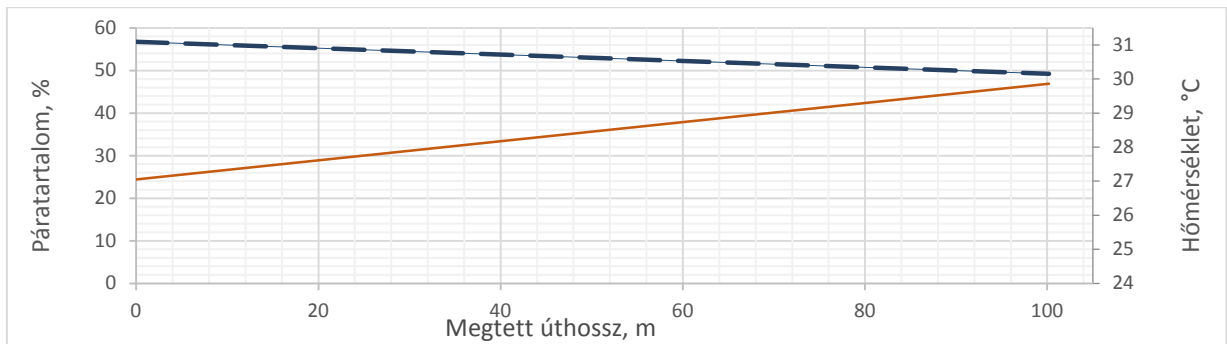
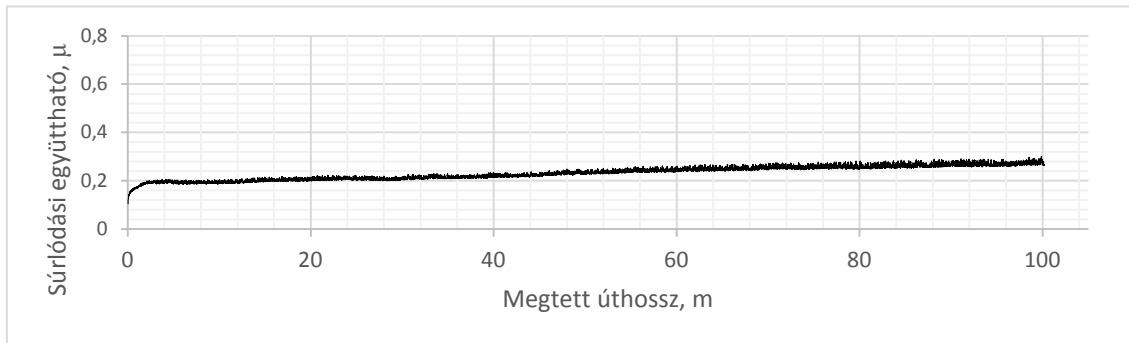


SPS_G1_4A_v200_p2



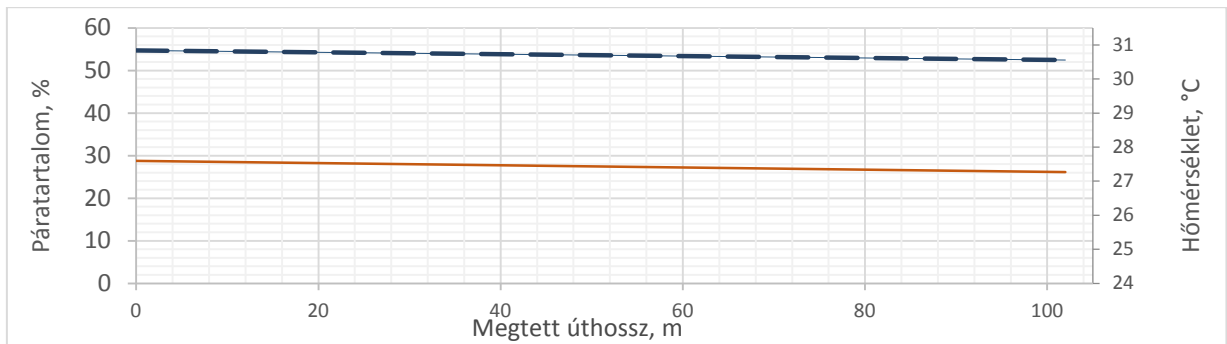
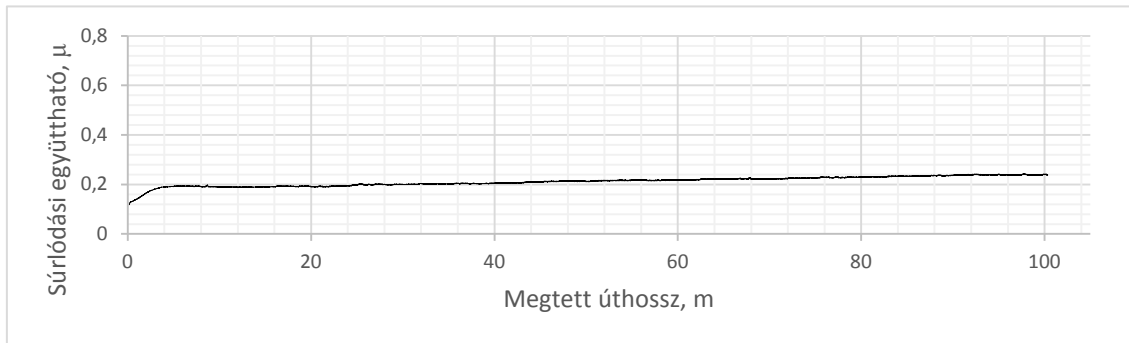
SPS_G3_F10_v10

spsg3_4B_sic_10_f10_v1



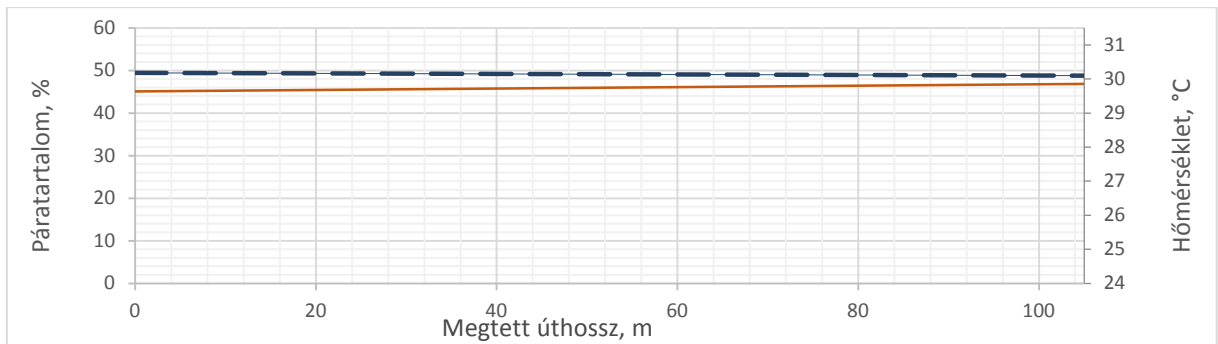
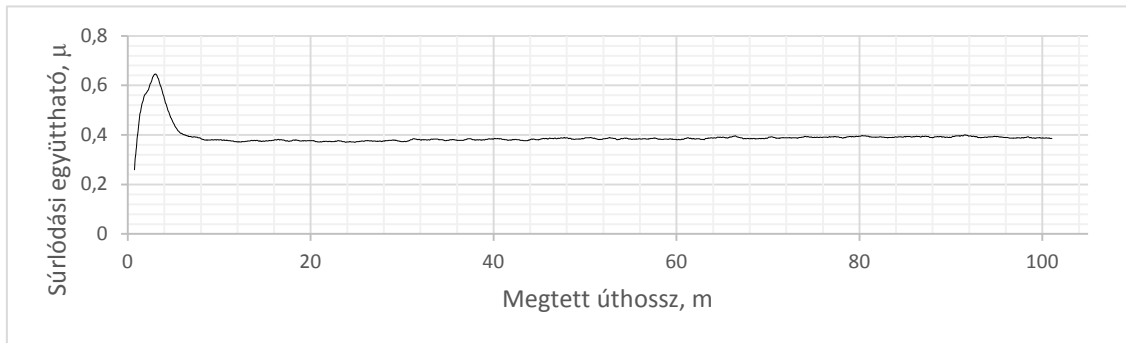
SPS_G3_F10_v50

spsg3_4B_sic_50_f10_v1



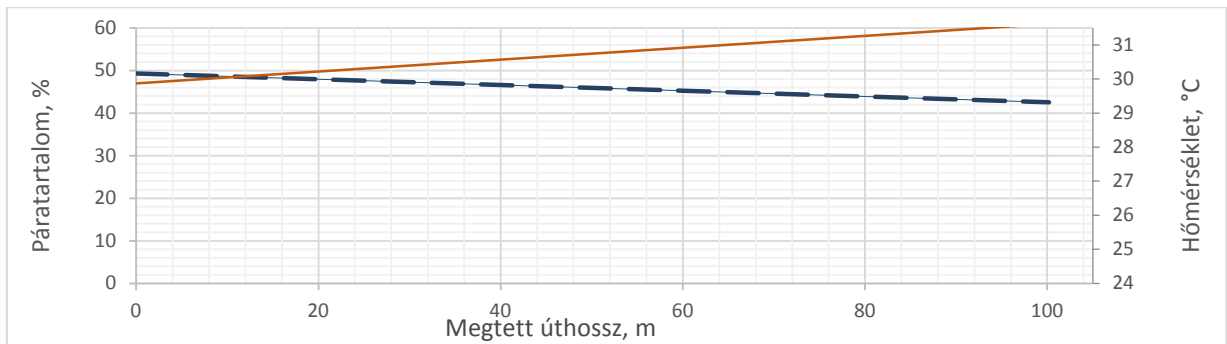
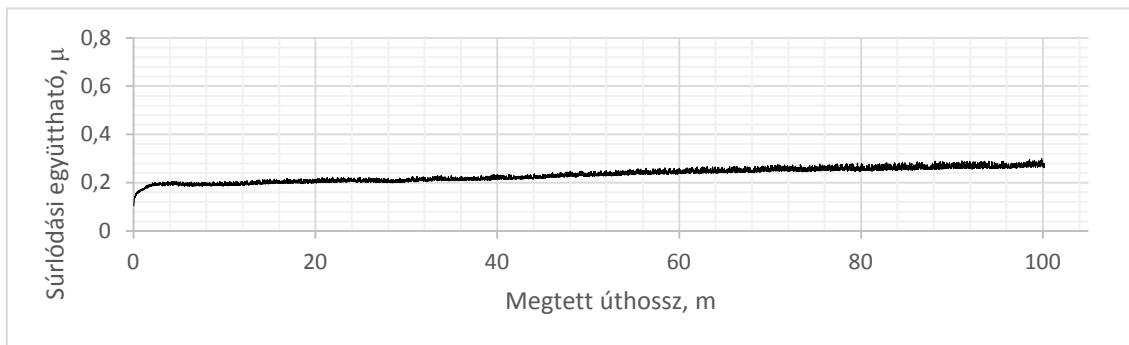
SPS_G3_F10_v200

spsg3_3A_sic_200_f10_v1



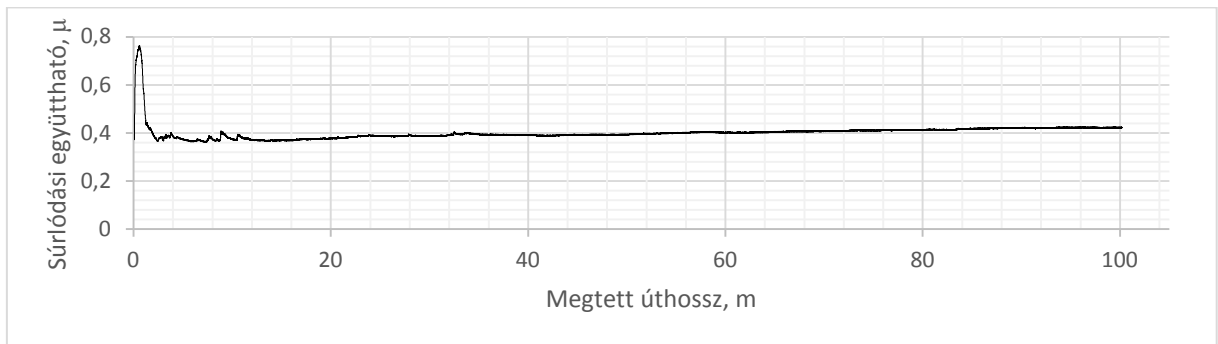
SPS_G3_F40_v10

spsg3_4B_sic_10_f40_v1

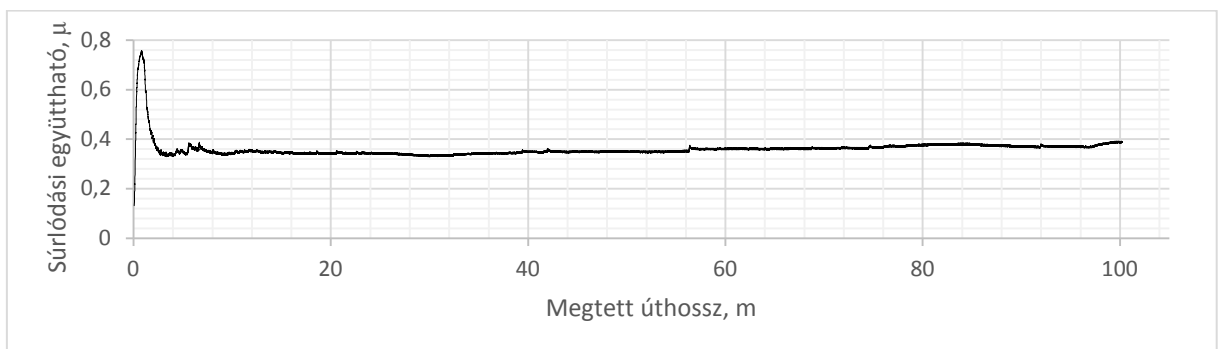


SPS_G3_F40_v20

SPS_G3_4A_v20_p1

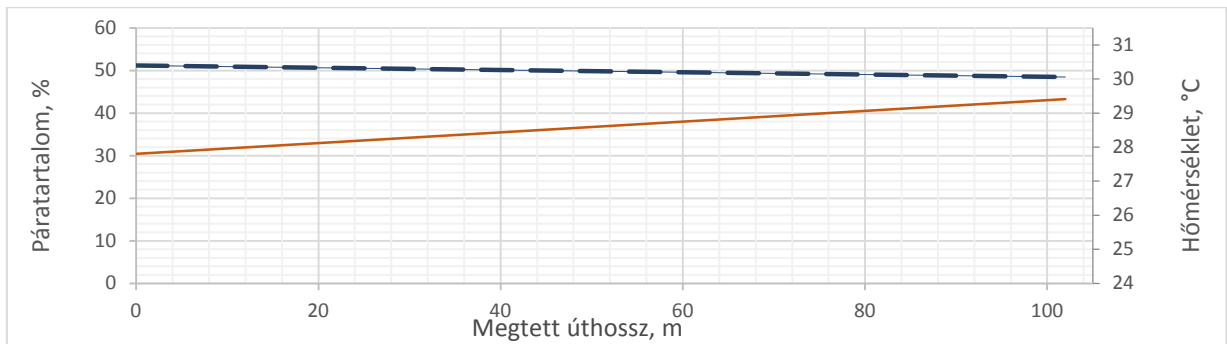
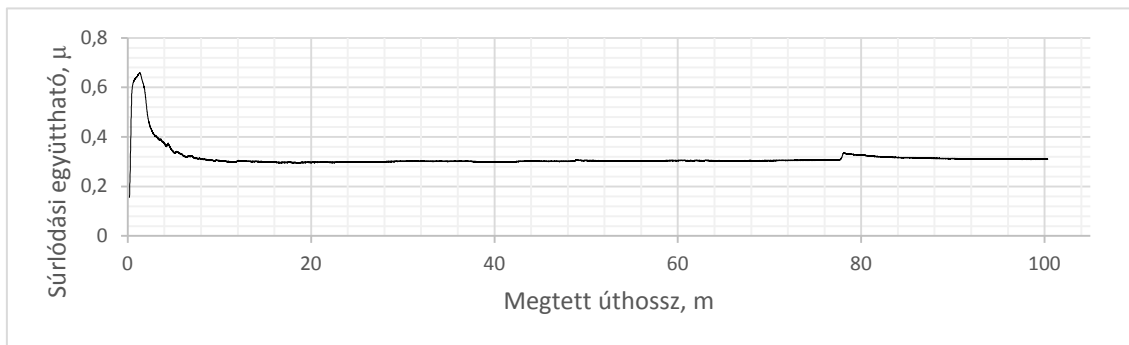


SPS_G3_4A_v20_p2



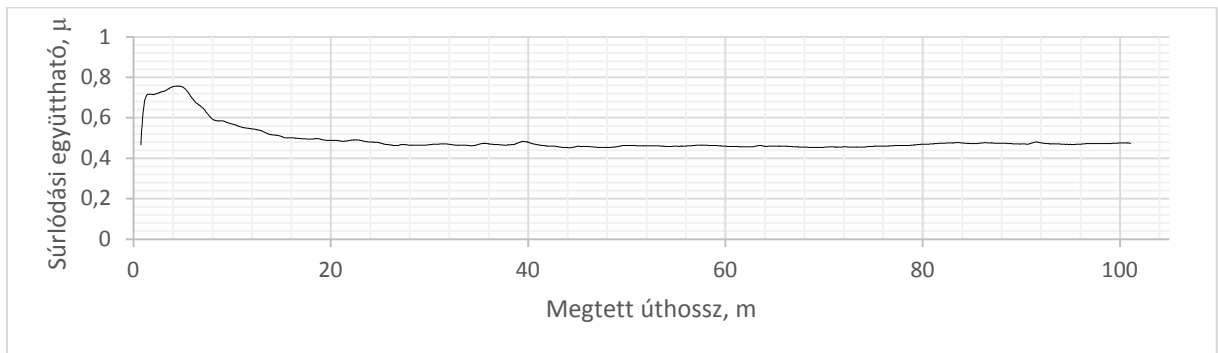
SPS_G3_F40_v50

spsg3_4B_sic_50_f40_v1

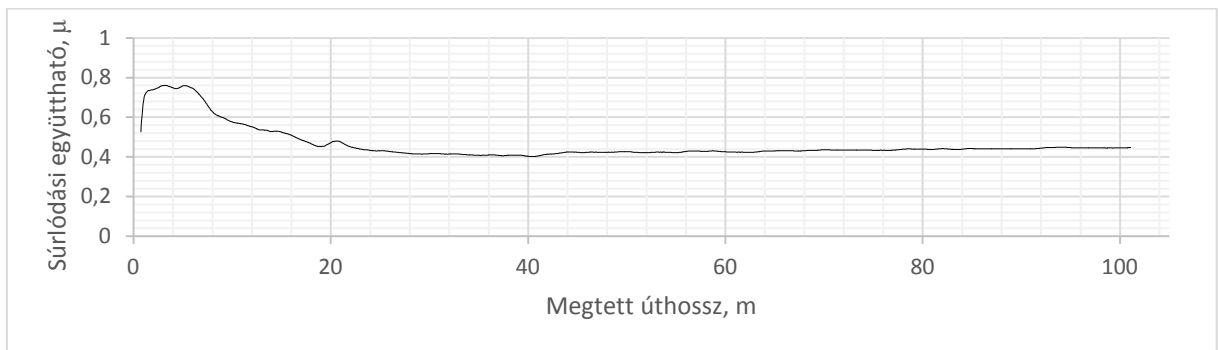


SPS_G3_F40_v200

SPS_G3_4A_v200_p1

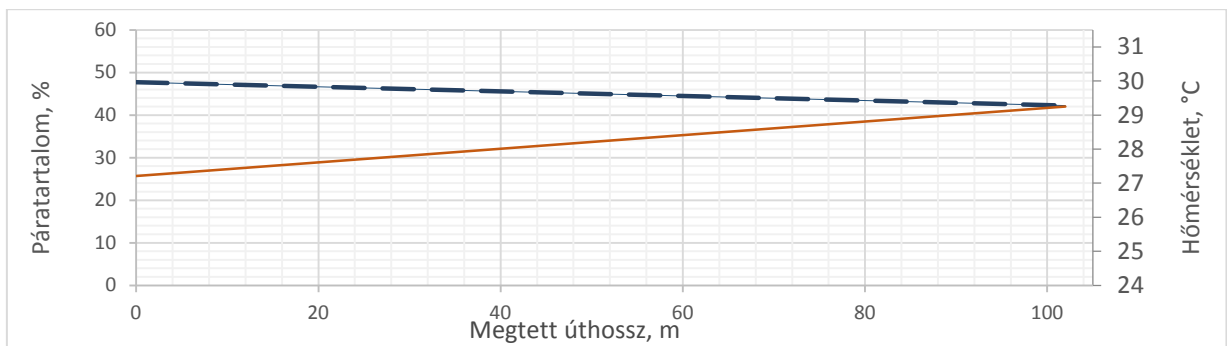
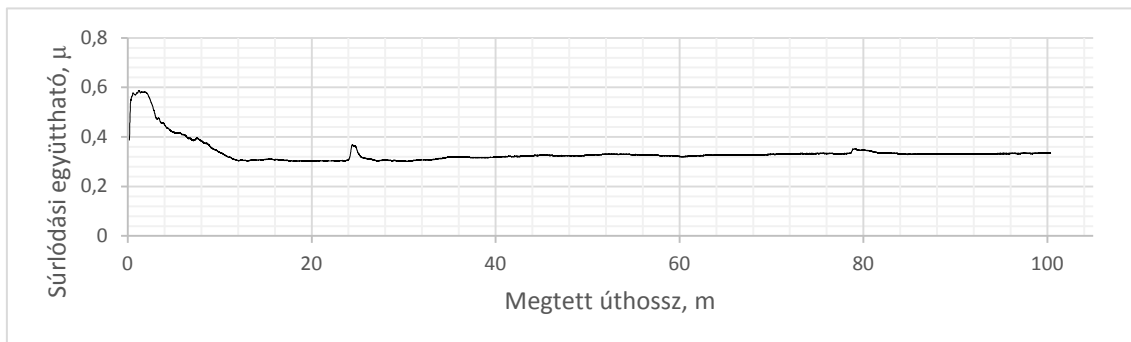


SPS_G3_4A_v200_p2



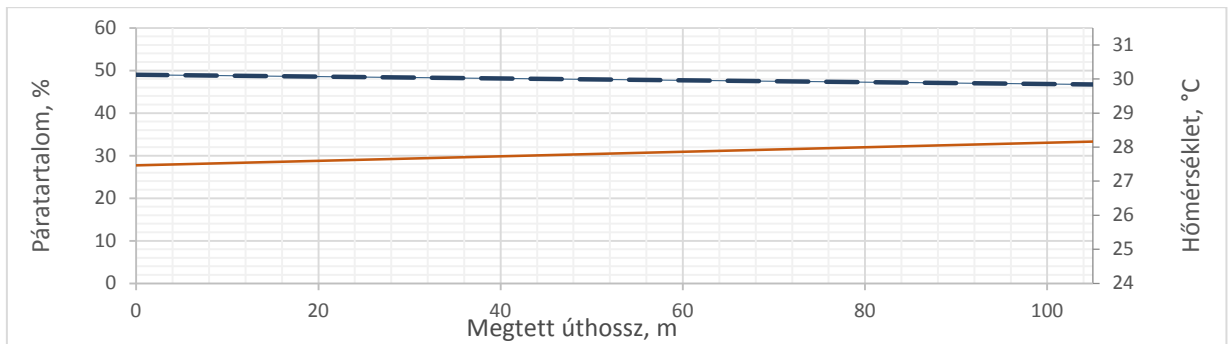
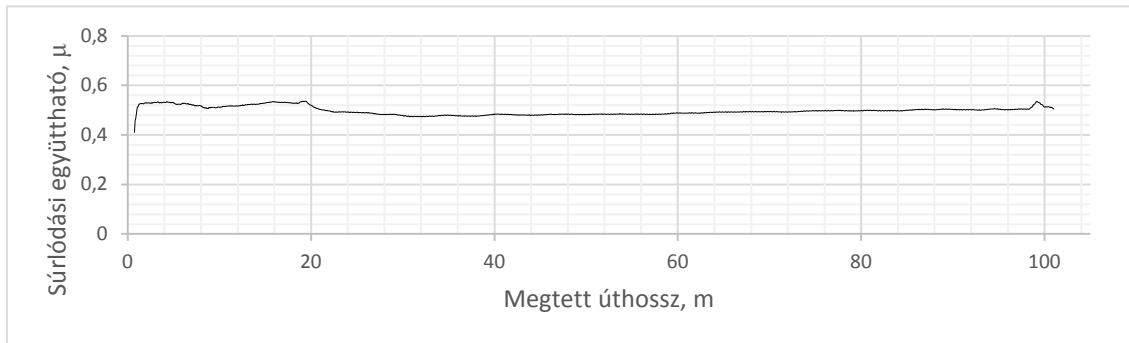
SPS_G3_F80_v50

spsg3_2B_sic_50_f80_v1



SPS_G3_F80_v200

spsg3_2B_sic_200_f80_v1



Próbatest	V, mm/s	F, N	2016-tól mért értékek				2014-ben mért eredmények				Átlag kkmt, A, μm^2	Kopásnyom sugár, mm	Klikopott térfogat, V = A x 2B, mm ³	Kopási sebesség, k = w/F _w , mm ³ /Nm	HV _{0.05} MPa	HV _{0.1} MPa	HV _{0.2} MPa	HV _{diag} GPa	Dim.nélküli kop. tény., K = k/HV, -
			Kkmt. 1,	Kkmt. 2	Kkmt. 2	Kkmt. 2	Kkmt. 1	Kkmt. 2	Kkmt. 2	Kkmt. 2									
HIP G0	10	10	219,05	HIP G0 8A p2	302,25	HIP G0 8A p3					261	2,8	0,00458	4,58E-06	1143	1143	1143	11,4	5,24E-05
	10	40	334,25	HIP G0 8A v1	4910,25	HIP G0 9A v4					4127	2,8	0,07257	1,81E-05	1143	1258	1258	12,0	2,18E-04
	10	80	18348,25	HIP G0 10A 3p	12703,25	HIP G0 10A 4p					15526	2,8	0,27300	3,41E-05	1239	1239	1239	12,4	4,23E-04
	20	10	909,75	HIP G0 8A p1	277,2	HIP G0 10A 1v					593	2,8	0,01044	1,04E-05	1143	1239	1239	11,9	1,24E-04
	20	40	5143	HIP G0 9A v2			5076	HIP G0 2B 1p	7549	HIP G0 6A k	5923	2,8	0,10414	2,60E-05	1258	1377	1377	13,2	3,43E-04
	20	80	16639,5	HIP G0 10A 1p	23779	HIP G0 10A 2p					20209	2,8	0,35536	4,44E-05	1239	1239	1239	12,4	5,50E-04
	200	10	550	HIP G0 8A p4	578,75	HIP G0 8A p5					564	2,8	0,00992	9,92E-06	1143	1143	1143	11,4	1,13E-04
	200	40					21401	HIP G0 1A 1v	28040	HIP G0 4A 2p	24721	2,8	0,43469	1,09E-04	1370	1369	1369	13,7	1,49E-03
	200	80	81808,25	HIP G0 10A 5p	65391,5	HIP G0 10A 6p					73600	2,8	1,29418	1,62E-04	1239	1239	1239	12,4	2,00E-03
	10	10	558	HIP G1 1B fp	110,55	HIP G1 6A 3p					334	2,8	0,00588	5,88E-06	1380	1369	1369	13,7	8,08E-05
HIP G1	10	40	5053	HIP G1 1B 1v	3769	HIP G1 1A 2v					4411	2,8	0,07756	1,94E-05	1380	1380	1380	13,8	2,68E-04
	10	80	19220,25	HIP G1 1B 2pp	19320	HIP G1 1B 3pp					19270	2,8	0,33885	4,24E-05	1380	1380	1380	13,8	5,85E-04
	20	10	481,5	HIP G1 6A 4p	731,5	HIP G1 6A 5p					607	2,8	0,01066	1,07E-05	1369	1369	1369	13,7	1,46E-04
	20	40					4471	HIP G1 4A 1p	7412	HIP G1 4A 2p	5942	2,8	0,10448	2,61E-05	1240	1240	1240	12,4	3,24E-04
	20	80	21653,25	HIP G1 1B 1pp	11605	HIP G1 2A 1p					16629	2,8	0,29241	3,66E-05	1380	1250	1250	13,2	4,81E-04
	200	10	1489,25	HIP G1 6A 1p	661,25	HIP G1 6A 2p					1075	2,8	0,01891	1,89E-05	1369	1369	1369	13,7	2,59E-04
	200	40					19341	HIP G1 4A 3p	13244	HIP G1 4A 4p	16293	2,8	0,28649	7,16E-05	1240	1240	1240	12,4	8,88E-04
	200	80	380000	HIP G1 2A pp3	516000	HIP G1 2A pp4					448000	2,8	7,87763	9,85E-04	1250	1250	1250	12,5	1,23E-02
	10	10	1300,75	HIP G3 5A 5p	51,7	HIP G3 5A 6p					676	2,8	0,01189	1,19E-05	554	554	554	5,5	6,59E-05
	10	40	8555,5	HIP G3 5A 1v	11188,25	HIP G3 6A 1v					9872	2,8	0,17359	4,34E-05	554	476	476	5,1	2,23E-04
HIP G3	10	80	32658,5	HIP G3 6A 3p	35588,25	HIP G3 6A 4p					34123	2,8	0,60003	7,50E-05	476	476	476	4,8	3,57E-04
	20	10	1037,75	HIP G3 5A 1p	370,25	HIP G3 5A 2p					704	2,8	0,01238	1,24E-05	554	554	554	5,5	6,86E-05
	20	40					9823	HIP G3 4A 1p	11908	HIP G3 4A 2p	10866	2,8	0,19106	4,78E-05	560	560	560	5,6	2,67E-04
	20	80	37319,25	HIP G3 6A 1p	40169,25	HIP G3 6A 2p					38744	2,8	0,68128	8,52E-05	476	476	476	4,8	4,05E-04
	200	10	2188,5	HIP G3 5A 4p	2157,75	HIP G3 5A 3p					2173	2,8	0,03821	3,82E-05	554	554	554	5,5	2,12E-04
	200	40					27178	HIP G3 4A 3p	30443	HIP G3 4A 4p	28811	2,8	0,50660	1,27E-04	560	560	560	5,6	7,09E-04
	50	10	414	HIP G0 10B 2p (10 1p)	902	HIP G0 10B p1					300253	2,8	5,27965	6,60E-04	549	549	549	5,5	3,62E-03
	50	40	6829,5	HIP G0 11A 3v	7304,5	HIP G0 10B 2v					658	2,8	0,01157	1,16E-05	1239	1239	1239	12,4	1,43E-04
	50	80	34555,25	HIP G0 10B pp1	26505,5	HIP G0 10B pp2 (pp3?)					7067	2,8	0,12427	3,11E-05	1302	1239	1239	12,7	3,95E-04
	100	10	44,45	HIP G0 11A 2p	283,5	HIP G0 11A(B) p1					30530	2,8	0,53685	6,71E-05	1239	1239	1239	12,4	8,31E-04
HIP G0	100	40	7798	HIP G0 11A 2v	6244	HIP G0 10B v1					164	2,8	0,00288	2,88E-06	1302	1302	1302	13,0	3,76E-05
	100	80	36927,75	HIP G0 11A 2pp	29853,5	HIP G0 11A(B) pp2					7021	2,8	0,12346	3,09E-05	1302	1239	1239	12,7	3,92E-04
	150	10	531	HIP G0 11A 1p	359	HIP G0 11A(B) p2					33391	2,8	0,58714	7,34E-05	1302	1302	1302	13,0	1,02E-04
	150	40	5462	HIP G0 11A 1v	6349,5	HIP G0 11A(B) v1					5906	2,8	0,10385	2,60E-05	1302	1302	1302	13,0	3,38E-04
	150	80	34016	HIP G0 11A 1pp	48876	HIP G0 11A(B) pp1					41446	2,8	0,72879	9,11E-05	1302	1302	1302	13,0	1,19E-03
	50	10	253	HIP G1 3A 3p	1194	HIP G1 5A pp3					724	2,8	0,01272	1,27E-05	1507	1259	1259	13,8	1,76E-04
	50	40	6288,5	HIP G1 1A 3v	4327,25	HIP G1 5A v2					5308	2,8	0,09333	2,33E-05	1380	1259	1259	13,2	3,08E-04
	50	80	27219,5	HIP G1 1A 4pp	8864,25	HIP G1 2A pp2					18042	2,8	0,31725	3,97E-05	1380	1259	1259	13,2	5,22E-04
	100	10	535,75	HIP G(3)1 3A 1p	556,75	HIP G1 5A p2					546	2,8	0,00961	9,61E-06	1507	1259	1259	13,8	1,33E-04
	100	40	34952,75	HIP G(3)1 3A 1v	5635,75	HIP G1 5A v1					20294	2,8	0,35685	8,92E-05	1507	1259	1259	13,8	1,23E-03
HIP G1	100	80	45923,75	HIP G(3)1 3A 1pp	42003,5	HIP G1 5A pp2					43964	2,8	0,77306	9,66E-05	1507	1259	1259	13,8	1,34E-03
	150	10	671,5	HIP G1 3A 2p	936,25	HIP G1 5A p1					804	2,8	0,01414	1,41E-05	1507	1259	1259	13,8	1,96E-04
	150	40	20737,75	HIP G1 3A 2v	15566,75	HIP G1 3A 3v					18152	2,8	0,31919	7,98E-05	1507	1507	1507	15,1	1,20E-03
	150	80	53472,25	HIP G1 3A 2pp	48449,25	HIP G1 5A pp1					50961	2,8	0,89609	1,12E-04	1507	1259	1259	13,8	1,55E-03
	50	10	1359,75	HIP G3 2A 1p	1049,25	HIP G3 3A p3					1205	2,8	0,02118	2,12E-05	490	566	566	5,3	1,12E-04
	50	40	7825,75	HIP G3 6A 3v	15568,75	HIP G3 6A 4v					11697	2,8	0,20588	5,14E-05	476	476	476	4,8	2,45E-04
	50	80	66185	HIP G3 2A 1pp	41991,75	HIP G3 3A pp3					54088	2,8	0,95109	1,19E-04	490	566	566	5,3	6,28E-04
	100	10	2475	HIP G3 2A 2p	1194	HIP G3 3A p2					1835	2,8	0,03226	3,23E-05	490	566	566	5,3	1,70E-04
	100	40	9839,75	HIP G3 2A 2v	9572,25	HIP G3 3A v2					9706	2,8	0,17067	4,27E-05	490	566	566	5,3	2,25E-04
	100	80	131543,75	HIP G3 2A 2pp	91252	HIP G3 3A pp2					111398	2,8	1,95882	2,45E-04	490	566	566	5,3	1,29E-03
HIP G3	150	10	1913	HIP G3 2A 3p	1976,5	HIP G3 3A p1					1945	2,8	0,03420	3,42E-05	490	566	566	5,3	1,81E-04
	150	40	17635,75	HIP G3 2A 1v	8300,5	HIP G3 3A v1					12968	2,8	0,22803	5,70E-05	490	566	566	5,3	3,01E-04
	150	80	233250	HIP G3 2A 3pp	120822	HIP G3 3A pp1					177036	2,8	3,11300	3,89E-04	490	566	566	5,3	2,05E-03

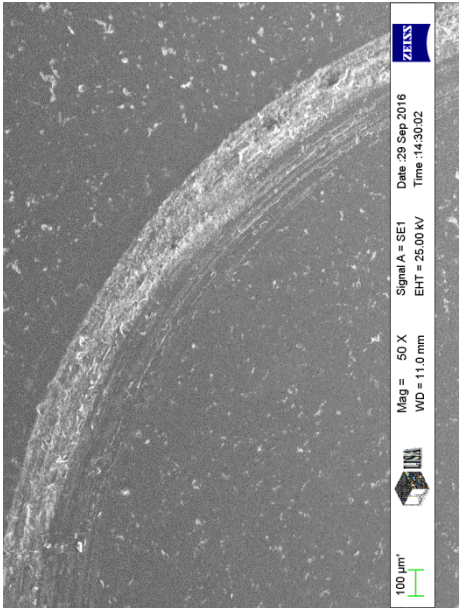
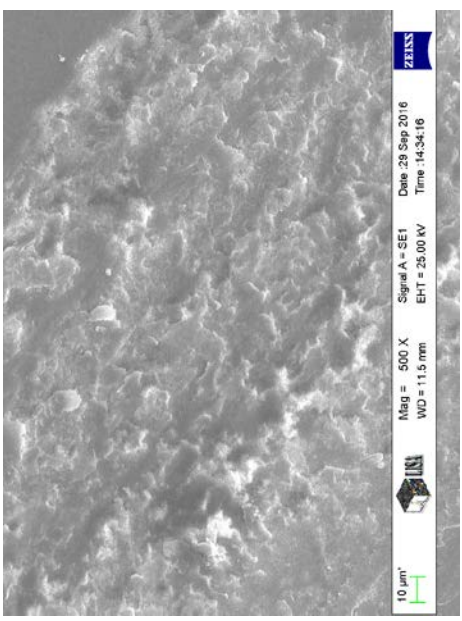
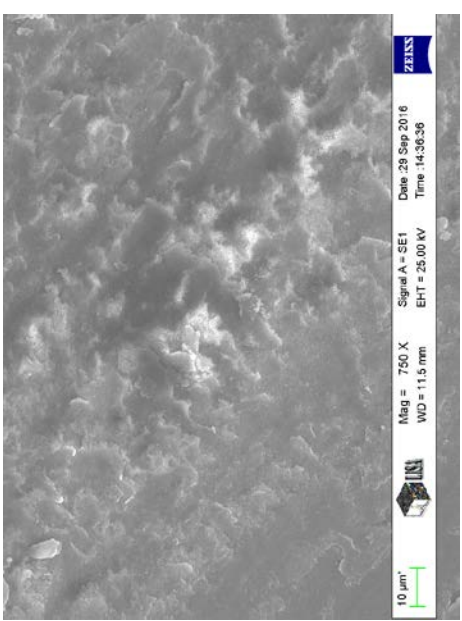
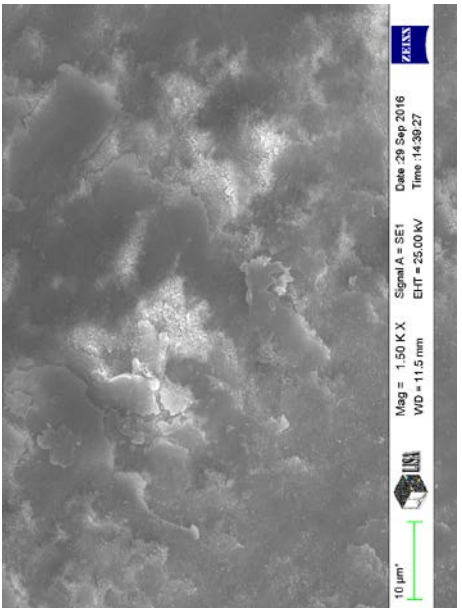
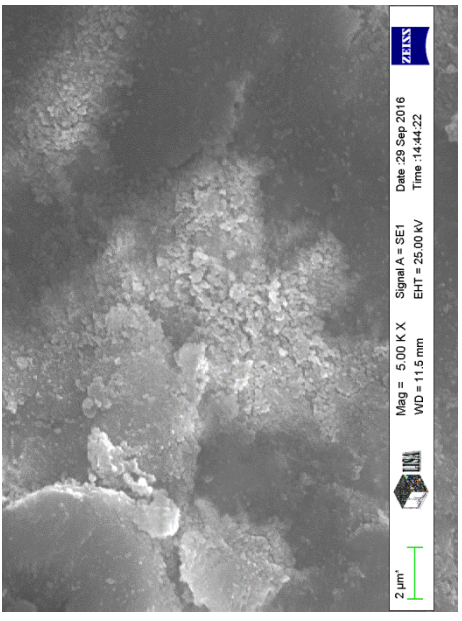
5. melléklet: A kikopott keresztmetszet és a származtatott kopást jellemző mérőszámok számszerű értékei

2/2

Próbatest	V, mm/s	F, N	2016-től mért értékek				2014-ben mért eredmények				Átlag kkm _t , A, μm ²	Kopásnyom sugár, mm	Kikopott térfogat, V = Ax2Rr, mm ³	Kopási sebesség, k=w/F _n , mm ³ /Nm	HV _{pit} , MPa	HV _{pit} , MPa	HV _{diap} , Gpa	Dim.nélküli kop. tény., K= kxHV, -
			Kkmt. 1., mm ²	Knyom jele 1.	Kkmt. 2	Knyom jele 2.	Kkmt. 1	Knyom jele 1.	Kkmt. 2	Knyom jele 2.								
	10	10		SPS G0 7B p1	748		SPS G0 9A p1				2,8	0,01315	1,32E-05	1515	1608	15,6	2,05E-04	
	10	40	3208,75	SPS G0 8B v2	3961,25		SPS G0 6B v2				2,8	0,06304	1,58E-05	1497	1614	15,6	2,45E-04	
	10	80																
	20	10																
SPS G0	20	40	4016	SPS G0 6A v2	3242		SPS G0 6A v1				2,8	0,06381	1,60E-05	1614	1614	16,1	2,57E-04	
	20	80																
SPS G0	200	10	847,5	SPS G0 5B 2p	1059,5		SPS G0 5B 1p				2,8	0,01677	1,68E-05	1491	1491	14,9	2,50E-04	
	200	40	22403,5	SPS G0 6A v4			SPS G0 6A v3				2,8	0,39394	9,85E-05	1614	1614	16,1	1,59E-03	
	200	80	365000	SPS G0 7A pp1	420000		SPS G0 8B pp2				2,8	6,90172	8,63E-04	1515	1497	15,1	1,30E-02	
	50	10	854,75	SPS G0 6B p1	809		SPS G0 9A p2				2,8	0,01463	1,46E-05	1614	1608	16,1	2,36E-04	
	50	40	11859	SPS G0 6B v1			SPS G0 8B v1				2,8	0,20853	5,21E-05	1614	1497	15,6	8,11E-04	
	50	80		SPS G0 5B 1pp	41521,5		SPS G0 8B pp1				2,8	0,73011	9,13E-05	1491	1497	14,9	1,36E-03	
	100	10	956	SPS G0 6B p2	775		SPS G0 8A p1				2,8	0,01522	1,52E-05	1614	1497	15,6	2,37E-04	
	100	40	28994,75	SPS G0 7A v1	21998,5		SPS G0 8A v1				2,8	0,44833	1,12E-04	1515	1497	15,1	1,69E-03	
	100	80	82069	SPS G0 5B 2pp			SPS G0 8A pp1				2,8	1,44310	1,80E-04	1491	1497	14,9	2,69E-03	
	10	10	60	SPS G1 1B p1							2,8	0,00106	1,06E-06	1547	155	15,5	1,64E-05	
	10	40		SPS G1 1B v1	1827		SPS G1 4B v1				2,8	0,03212	8,03E-06	1547	1593	15,7	1,26E-04	
	10	80																
SPS G1	20	10						4394,25	SPS_G1_4A_3p	2732,5	SPS_G1_4A_4p	2,8	0,06266	1,57E-05	1593	1593	15,9	2,50E-04
	20	40																
	20	80																
	200	10	80	SPS G1 1A p1				11387,3	SPS_G1_4A_1p	13637	SPS_G1_4A_2p	2,8	0,00141	1,41E-06	1547	15,5	2,18E-05	
SPS G1	200	40																
	200	80																
	50	10	90	SPS G1 1B p2							2,8	0,00158	1,58E-06	1547	15,5	2,45E-05		
	50	40	9161	SPS G1 1A v1							2,8	0,16108	4,03E-05	1547	15,5	6,23E-04		
	50	80																
	100	10																
	100	40	32469	SPS G1 4B v4							2,8	0,57093	1,43E-04	1593	15,9	2,27E-03		
	100	80																
	10	10	44	SPS G3 4B p1							2,8	0,00077	7,74E-07	1296		13,0	1,00E-05	
	10	40	1902	SPS G3 4B v1							2,8	0,03344	8,36E-06	1296		13,0	1,08E-04	
	10	80																
	20	10																
SPS G3	20	40						2894,5	SPS_G3_4A_3p	3364,5	SPS_G3_3A_2p	2,8	0,05503	1,38E-05	1296,00	1393	13,4	1,85E-04
	20	80																
	200	10	386	SPS G3 3A p1							2,8	0,00679	6,79E-06	1393		13,9	9,45E-05	
	200	40						12641,8	SPS_G3_4A_1p	16432,5	SPS_G3_3A_3p	2,8	0,25562	6,39E-05	1296,00	1393	13,4	8,59E-04
	200	80	9925,7	SPS G3 4B pp4							2,8	1,74534	2,18E-04	1296		13,0	2,83E-03	
	50	10	46	SPS G3 4B p2							2,8	0,00080	8,03E-07	1296		13,0	1,04E-05	
	50	40	4207	SPS G3 4B v2							2,8	0,07397	1,85E-05	1296		13,0	2,40E-04	
	50	80	17672	SPS G3 2B pp2							2,8	0,31075	3,88E-05	1330		13,3	5,17E-04	
	100	10																
	100	40																
	100	80																
	200	80																

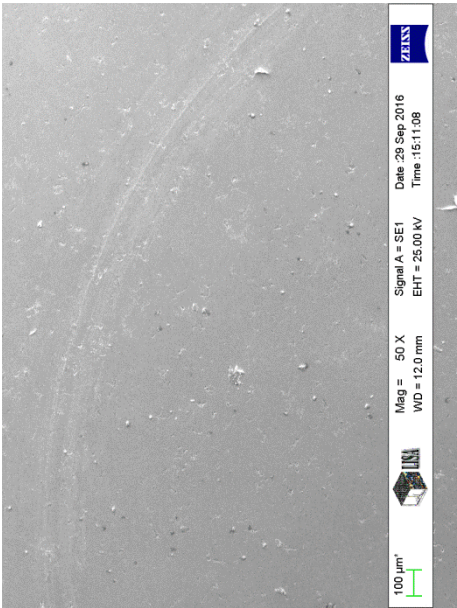
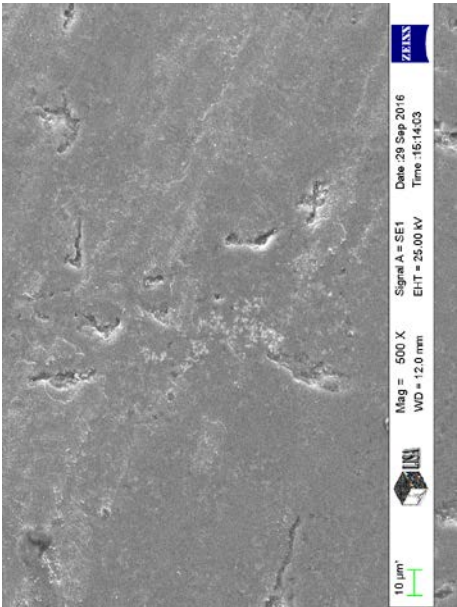
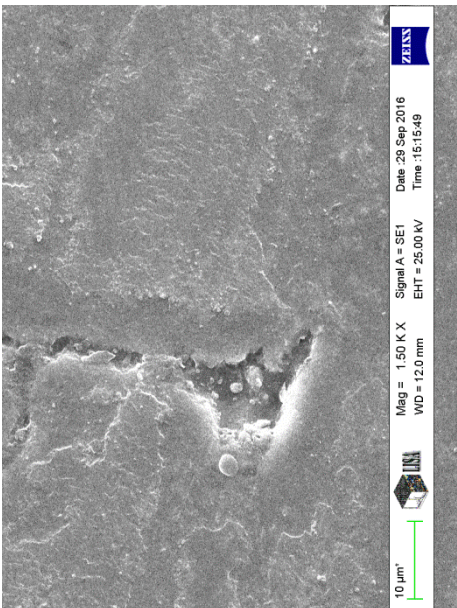
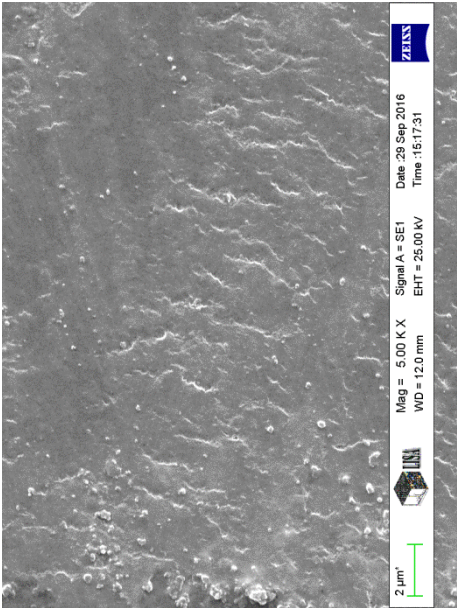
HIP_G0_8A_p3; SiC, 10 mm/s, 10 N

1/1

		
H0_8A_p3_50x_1	H0_8A_p3_50x_2	H0_8A_p3_50x_3
		
H0_8A_p3_50x_04	H0_8A_p3_50x_05	

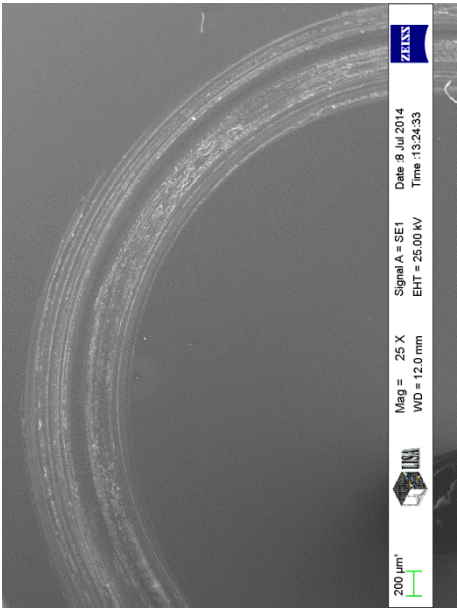
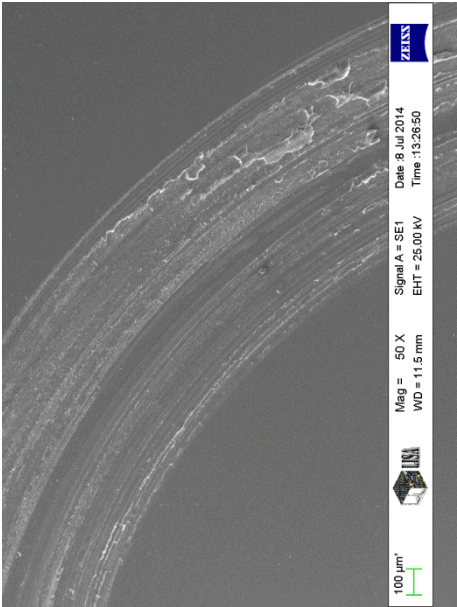
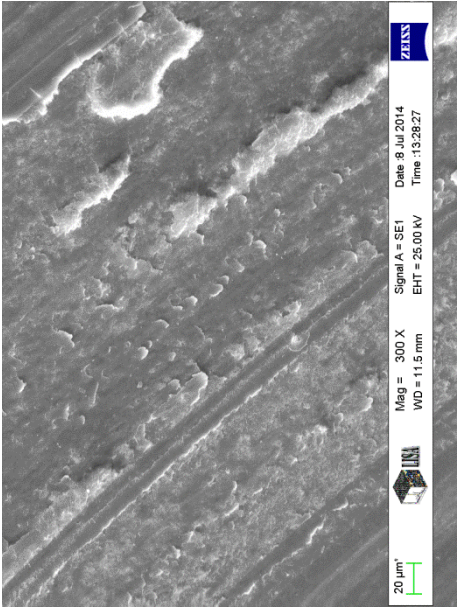
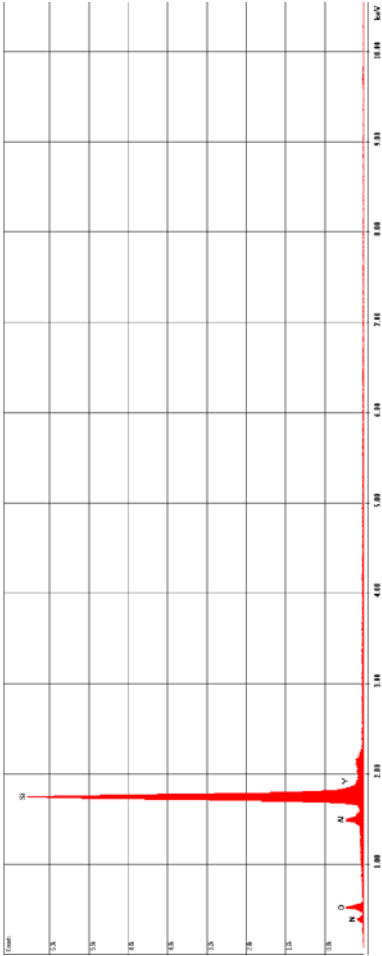
HIP_G0_11A_p2; SiC, 100 mm/s, 10 N

1/1

		
H0_11A_p2_50x	H0_11A_p2_500x	H0_11A_p2_1500x
		
H0_11A_p2_5000x		

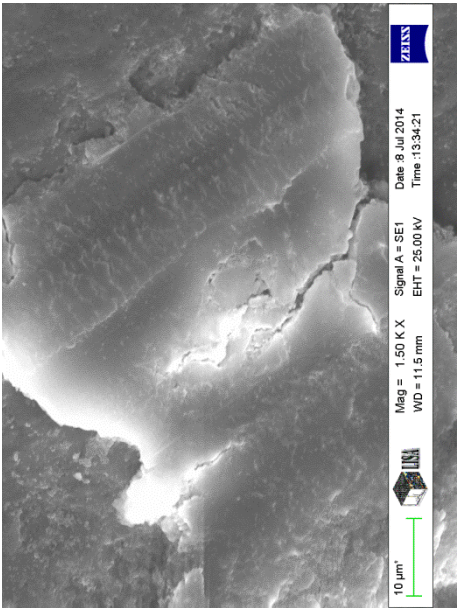
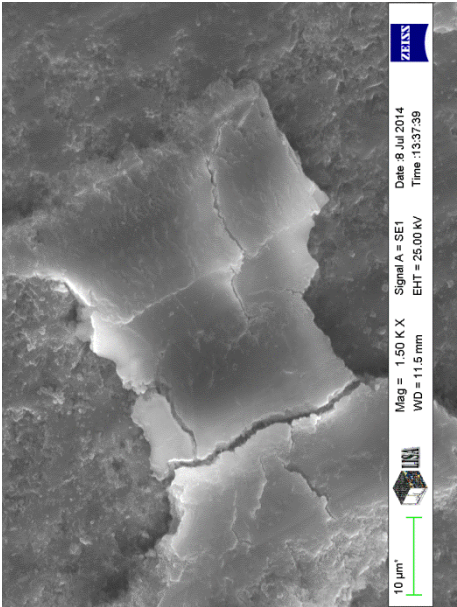
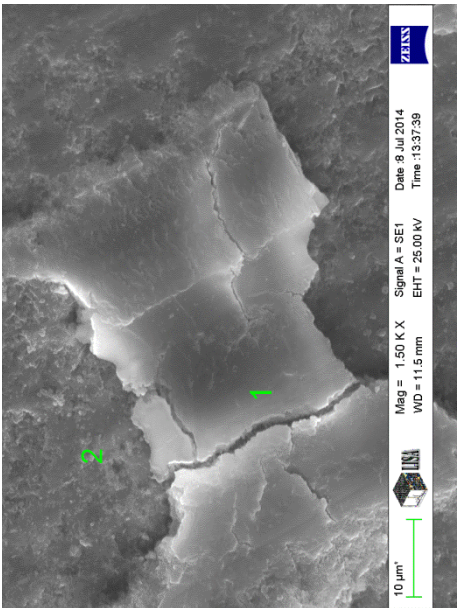
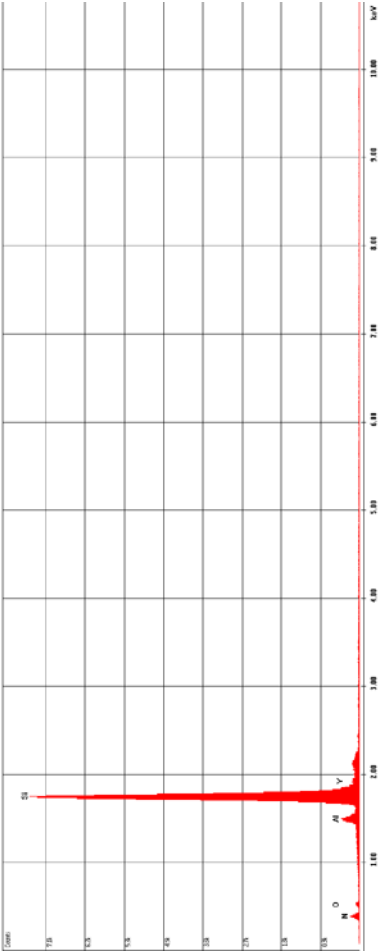
1/3

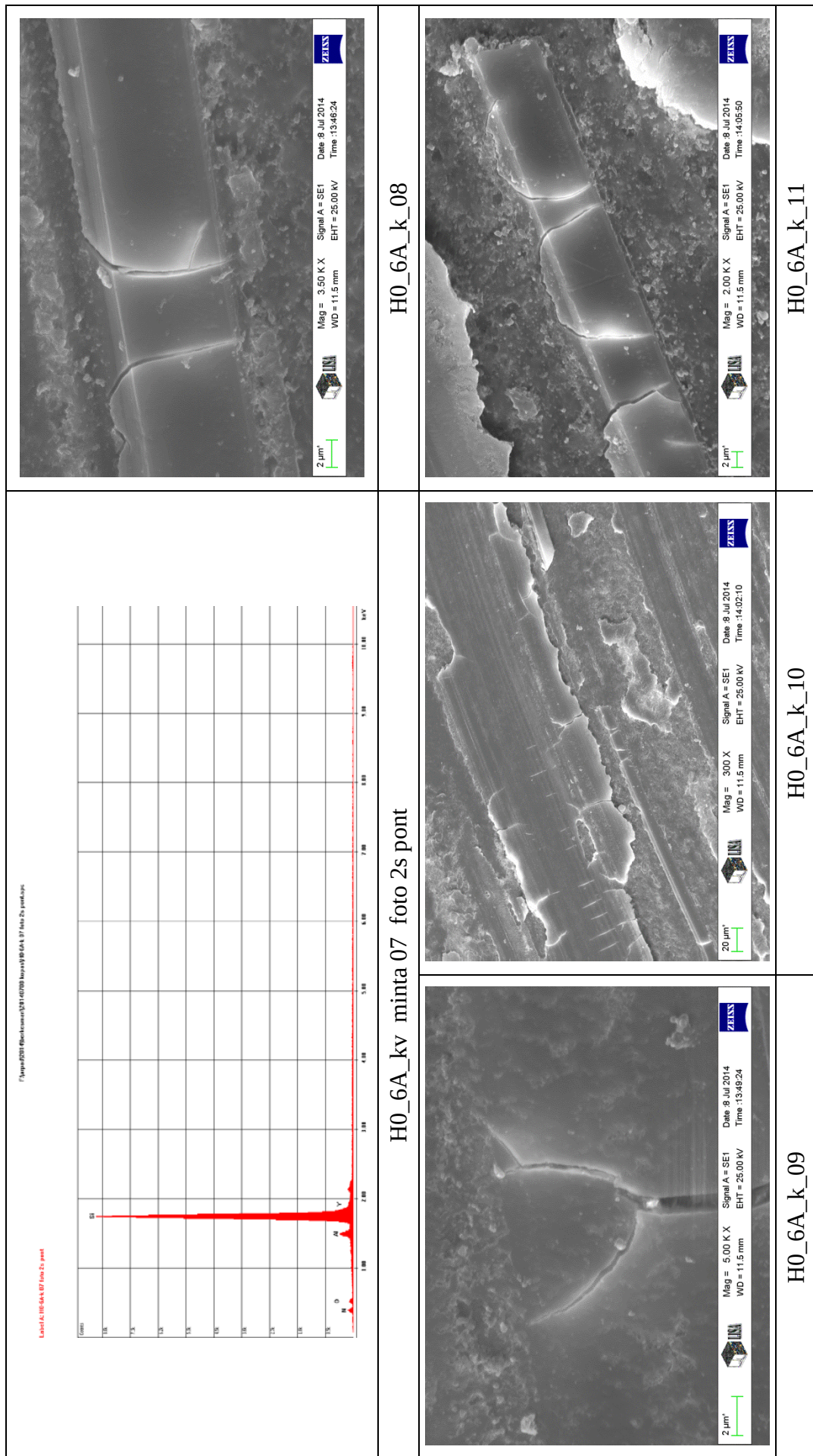
HIP_G0_6A_k; SiC, 20 mm/s, 40 N

		
H0_6A_k_01	H0_6A_k_02	H0_6A_k_03
Labeled At: 100.0 kV, 0.1 Torr, 0.100 µm  F:\pnpa\5314\pnpa\5314\03 foto atlas\H0_6A_k_03 foto atlas.jpg		
H0_6A_k_minta 03 foto atlas		
H0_6A_k_04		

HIP_G0_6A_k; SiC, 20 mm/s, 40 N

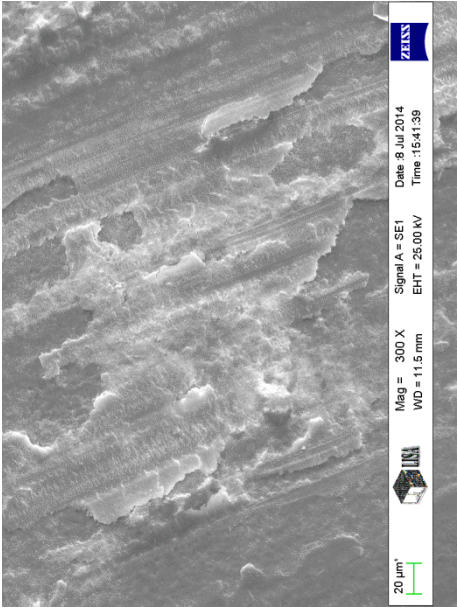
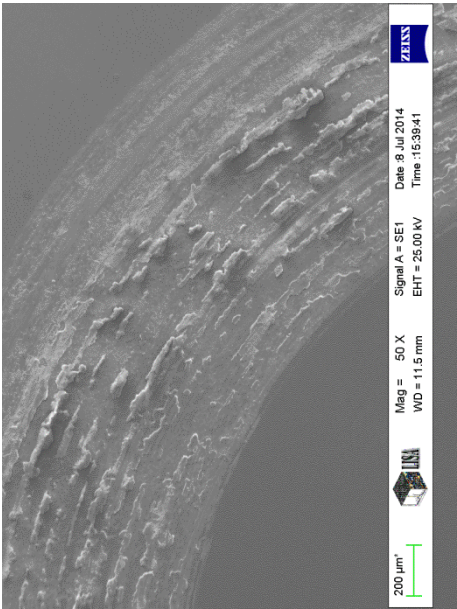
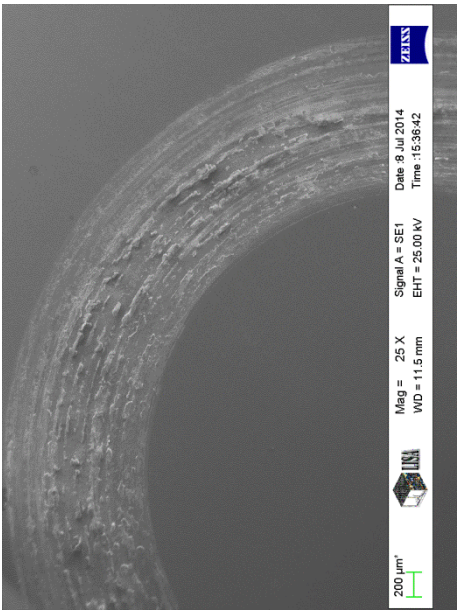
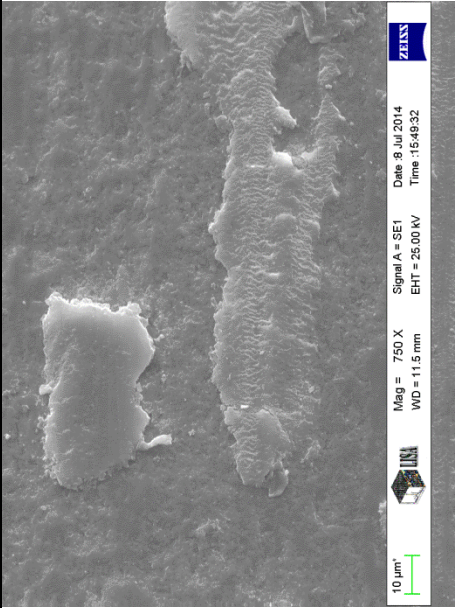
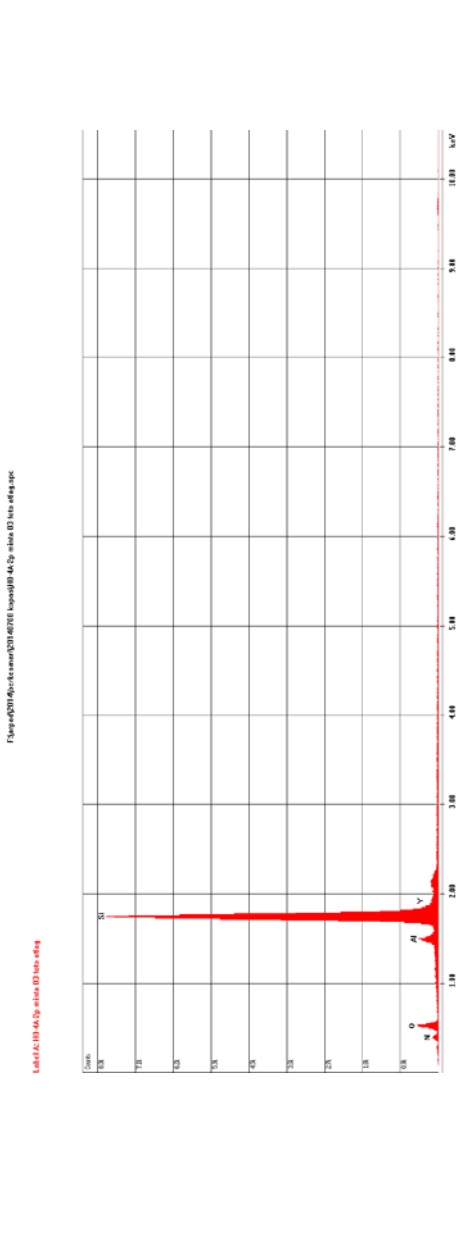
2/3

 10 µm' Mag = 1.50 K X WD = 11.5 mm Signal A = SE1 EHT = 25.00 kV Date :8 Jul 2014 Time :13:34:21 ZEISS	 10 µm' Mag = 1.50 K X WD = 11.5 mm Signal A = SE1 EHT = 25.00 kV Date :8 Jul 2014 Time :13:37:39 ZEISS	 10 µm' Mag = 1.50 K X WD = 11.5 mm Signal A = SE1 EHT = 25.00 kV Date :8 Jul 2014 Time :13:37:39 ZEISS
H0_6A_k_05	H0_6A_k_06	H0_6A_k_07
Edzett és nem edzett állapot F:\pmp\2014\07\08\korrosio\02140708_kopasnyomok\H0_6A_k_07_foto\H0_6A_k_07_foto_1s.ppt  Count 750 700 650 600 550 500 450 400 350 300 250 200 150 100 50 0 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00 10.00 keV N O Al Si H0_6A_kv minta 07 foto 1s pont		



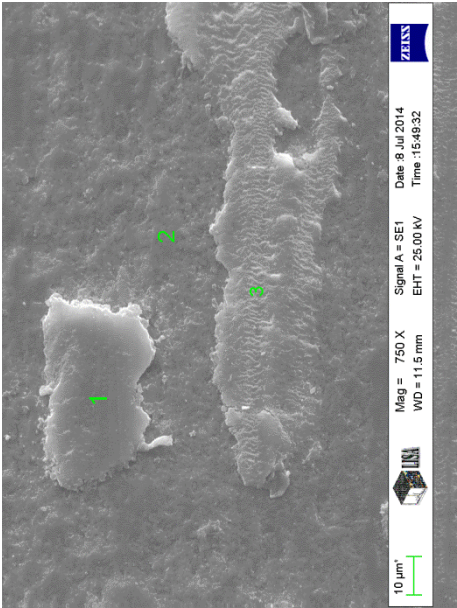
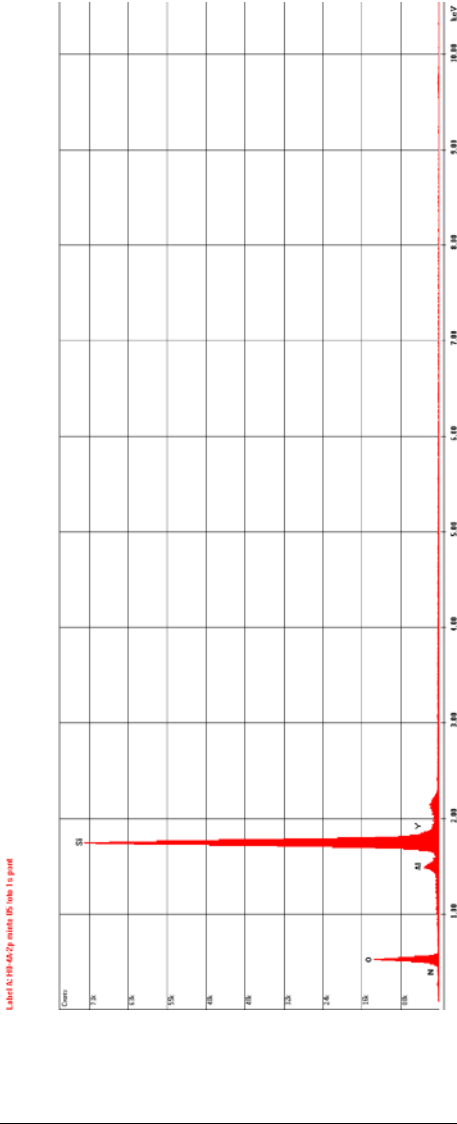
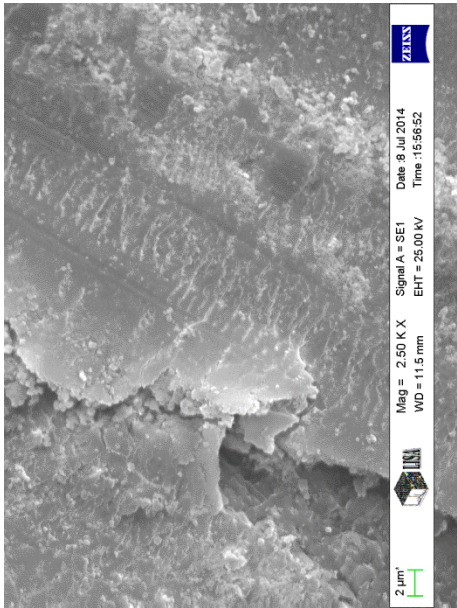
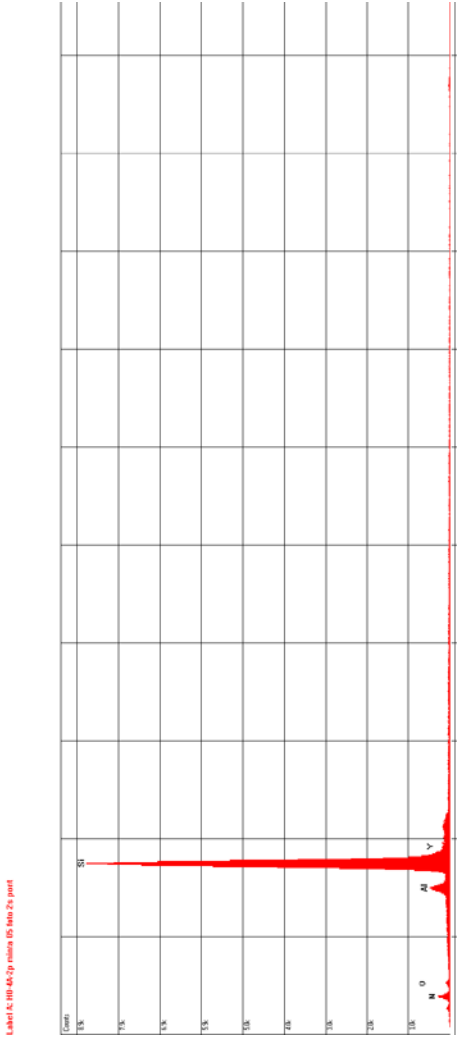
1/2

HIP_G0_4A_2p; SiC, 200 mm/s, 40 N

		
H0_4A_2p_03	H0_4A_2p_02	H0_4A_2p_01
		
H0_4A_2p_04	H0_4A_2p_minta 03 foto atlag	

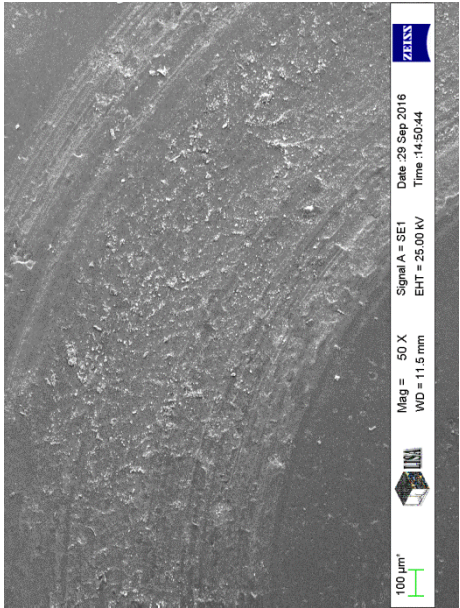
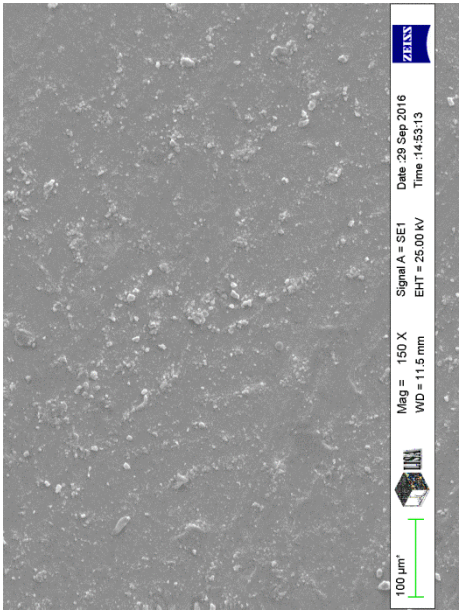
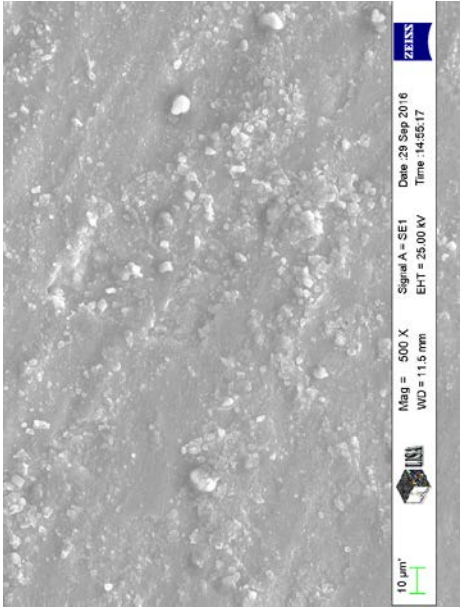
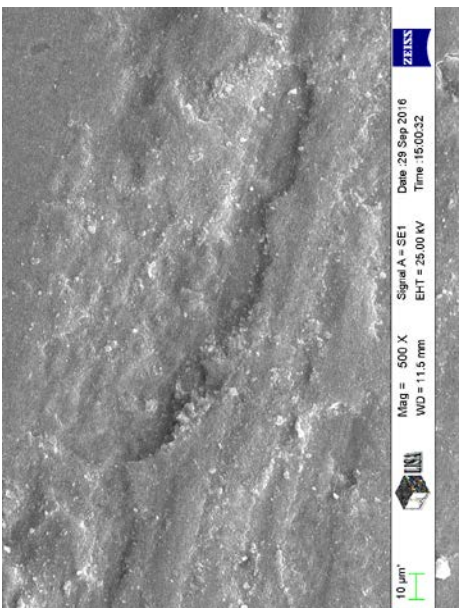
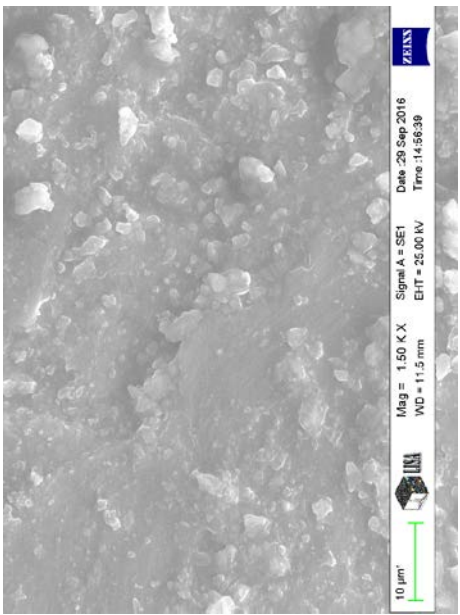
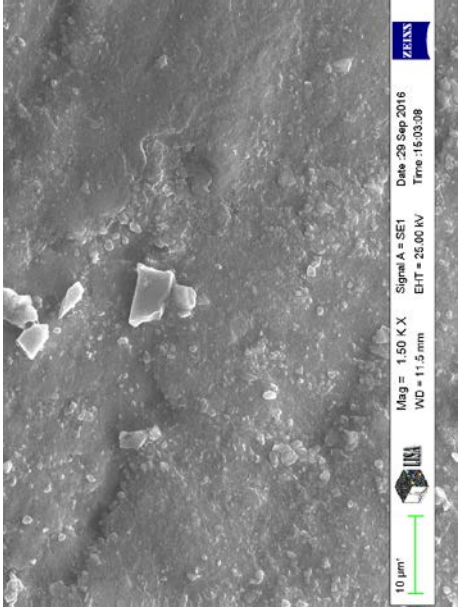
HIP_G0_4A_2p; SiC, 200 mm/s, 40 N

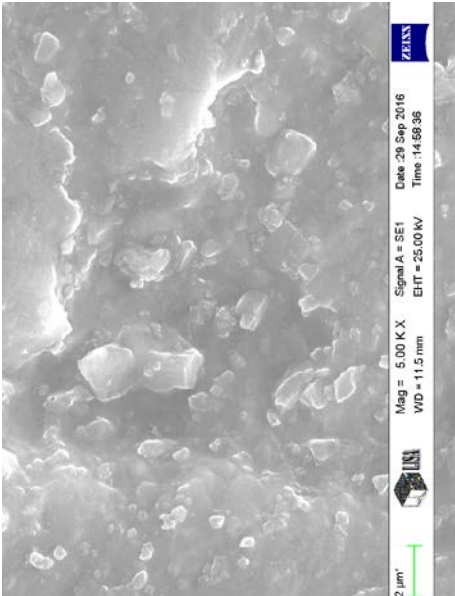
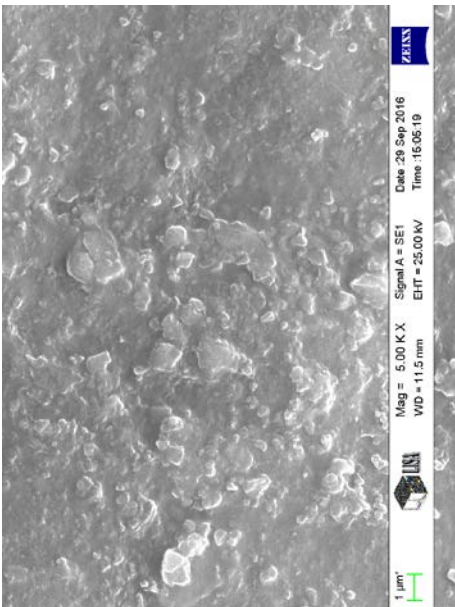
2/2

 Label K: 100-40-2p mintas 05 foto 1s pont 	H0_4A_2p minta 05 foto 1s pont
 Label K: 100-40-2p mintas 05 foto 3s pont 	H0_4A_2p minta 05 foto 3s pont

HIP_G0_11A_pp1; SiC, 150 mm/s, 80 N

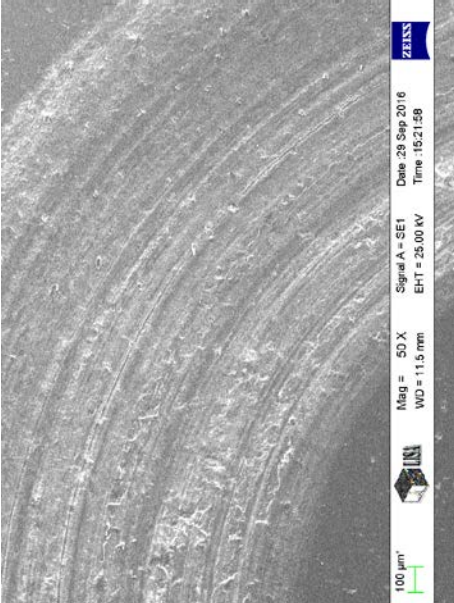
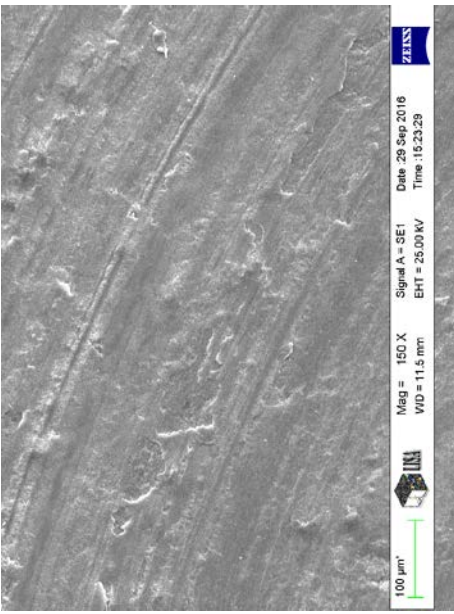
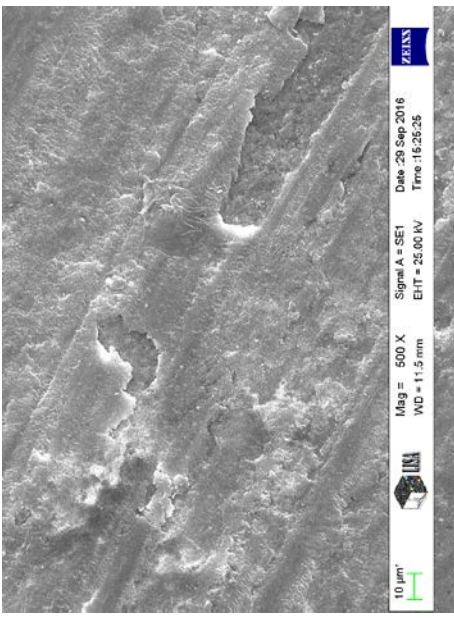
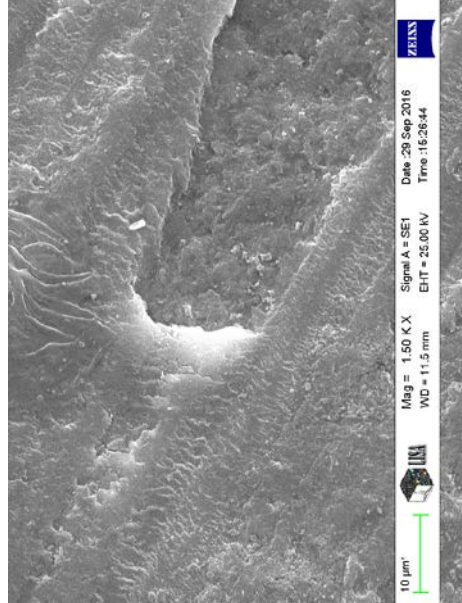
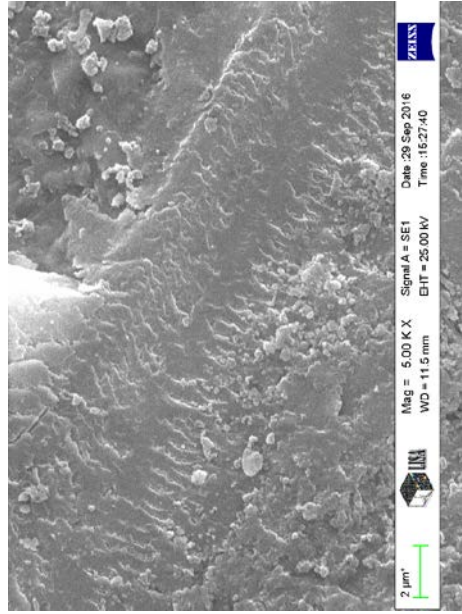
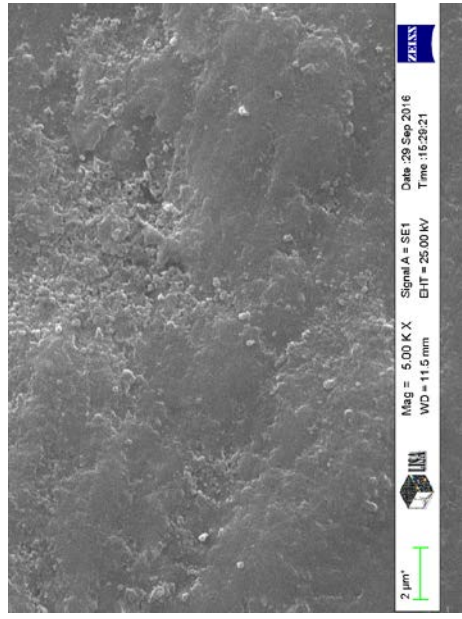
1/2

		
H0_11A_pp1_50x_06	H0_11A_pp1_150x	H0_11A_pp1_500x_belso
		
H0_11A_pp1_500x_kulso	H0_11A_pp1_1500x_belso	H0_11A_pp1_1500x_külső

		H0_11A_pp1_1500x_belso	H0_11A_pp1_1500x_külső
---	--	------------------------	------------------------

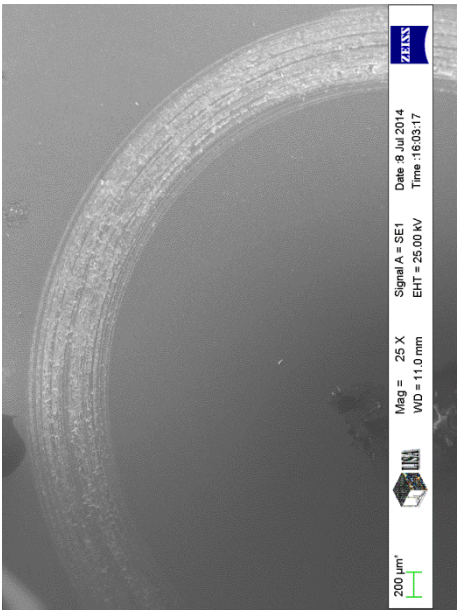
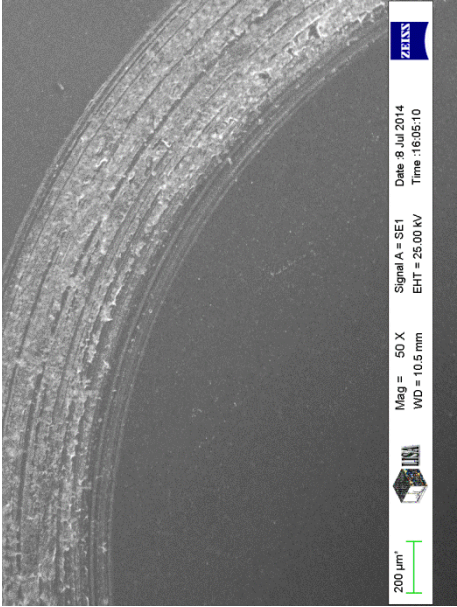
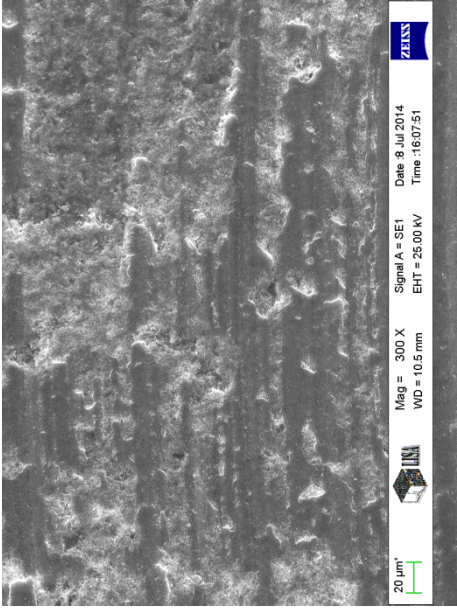
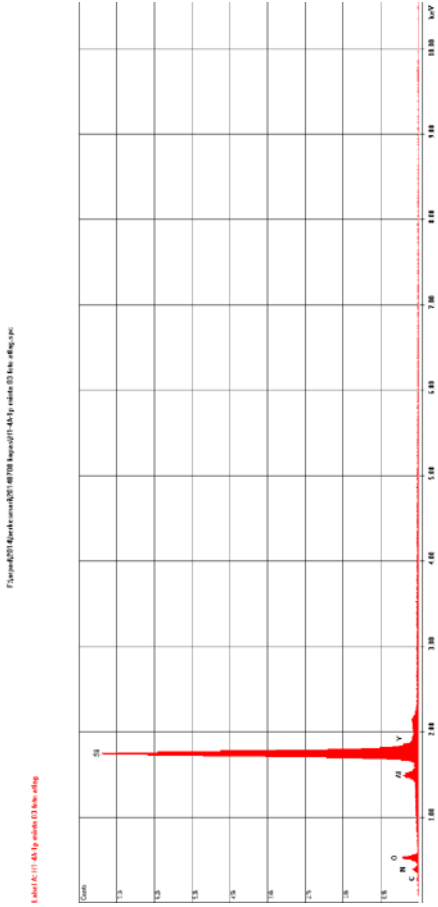
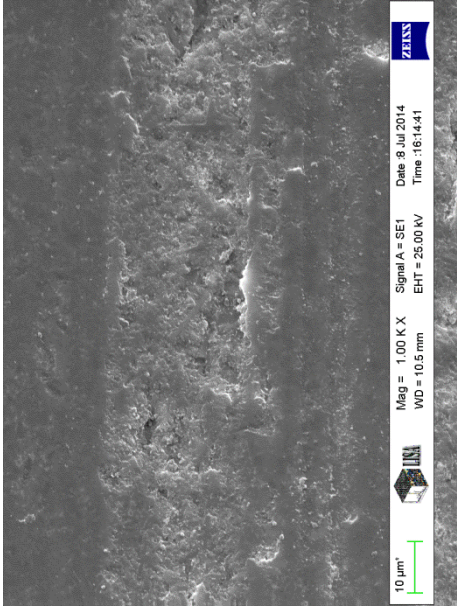
HIP_G0_10A_pp6; SiC, 200 mm/s, 80 N

1/1

		
		
H0_10A_pp6_50x	H0_10A_pp6_150x	H0_10A_pp6_500x
H0_10A_pp6_1500x	H0_10A_pp6_5000x	H0_10A_pp6_5000x_kulso

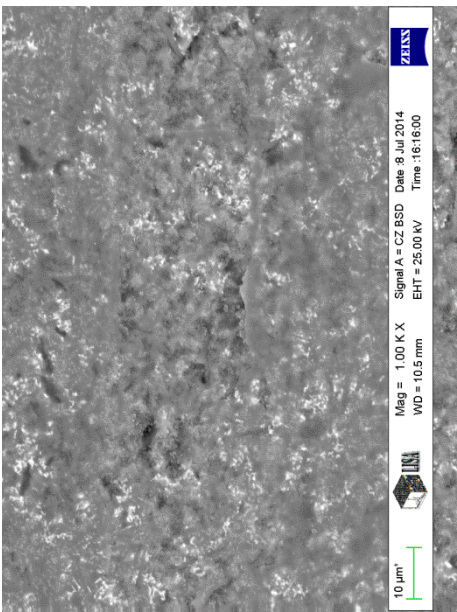
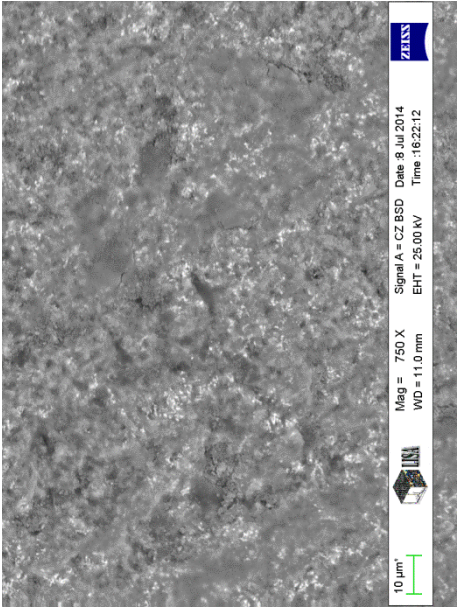
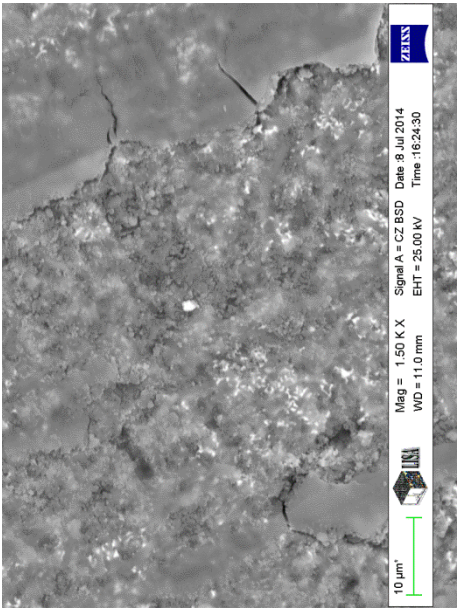
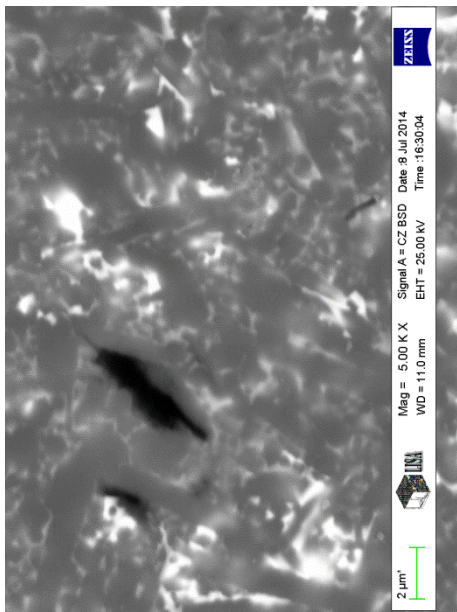
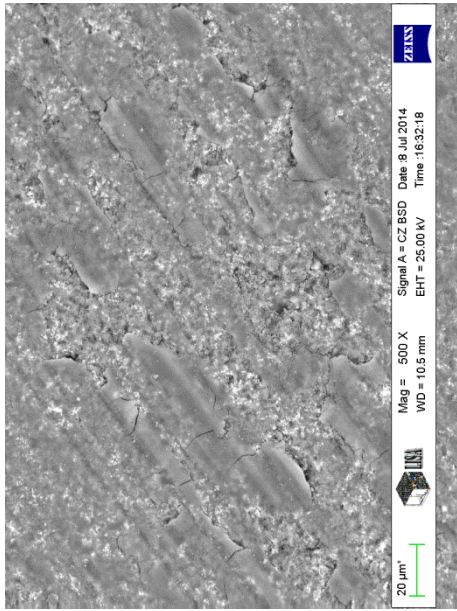
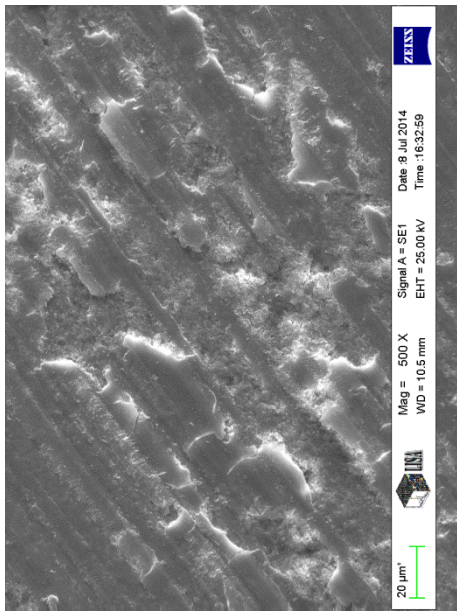
1/2

HIP_G1_4A_1p; SiC, 20 mm/s, 40 N

		
H1_4A_1p_01	H1_4A_1p_02	H1_4A_1p_03
		
H1_4A_1p_minta 03 foto atlag		
		
H1_4A_1p_04		

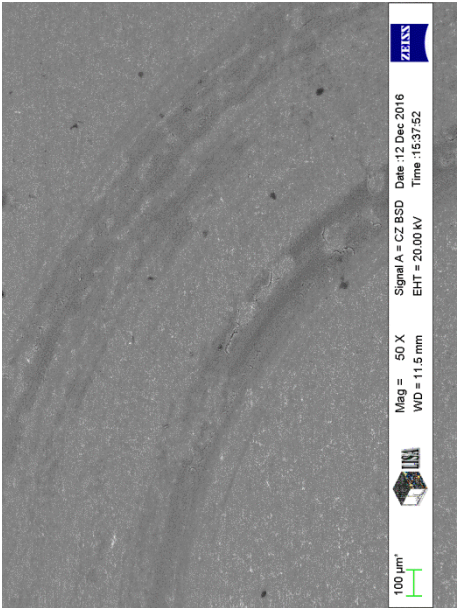
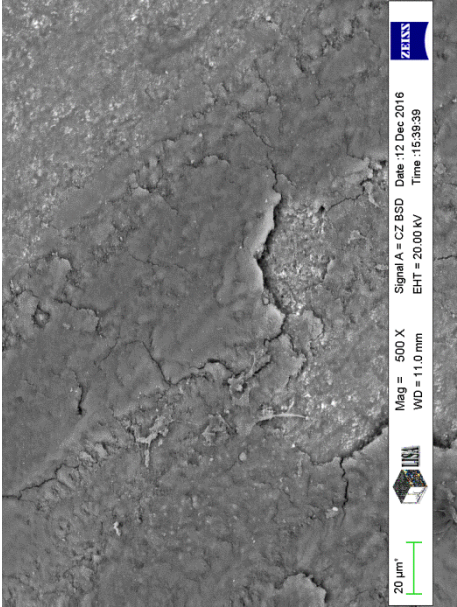
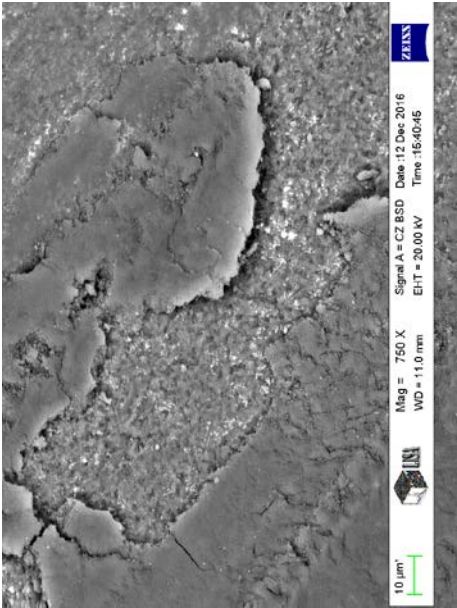
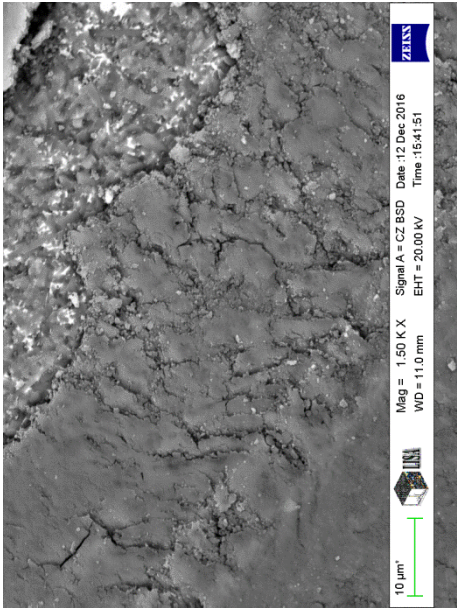
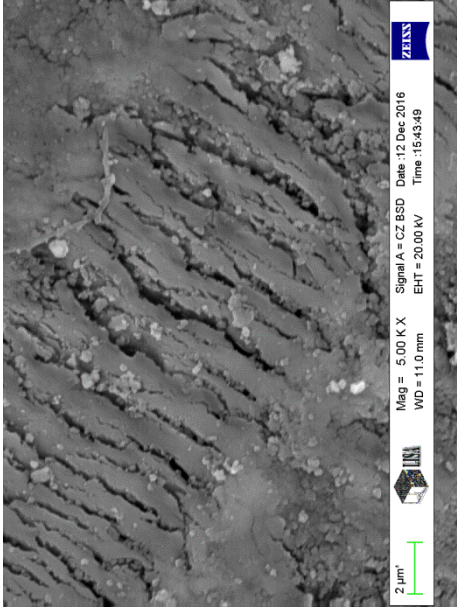
HIP_G1_4A_1p; SiC, 20 mm/s, 40 N

2/2

		
H1_4A_1p_05	H1_4A_1p_06	H1_4A_1p_07
		
H1_4A_1p_08	H1_4A_1p_09	H1_4A_1p_10

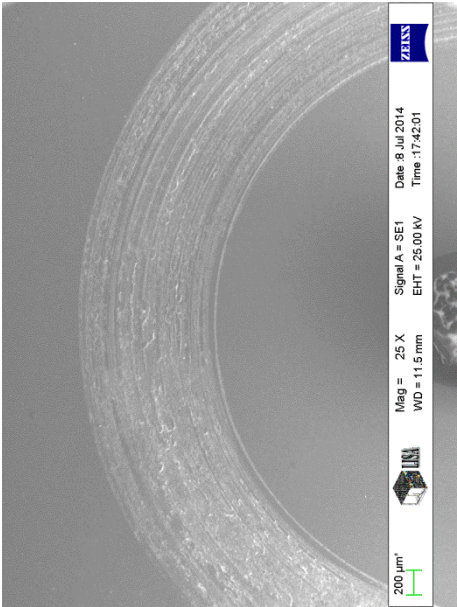
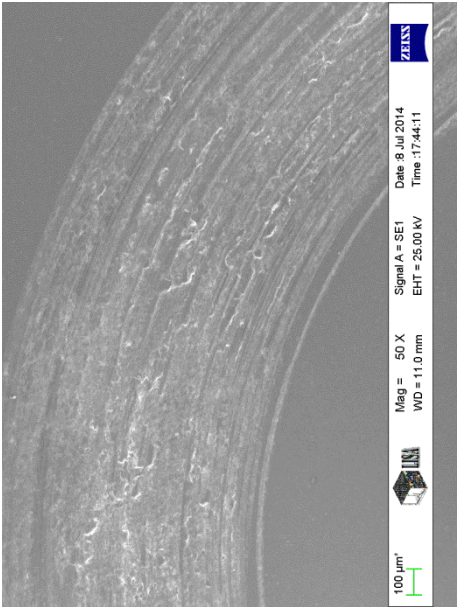
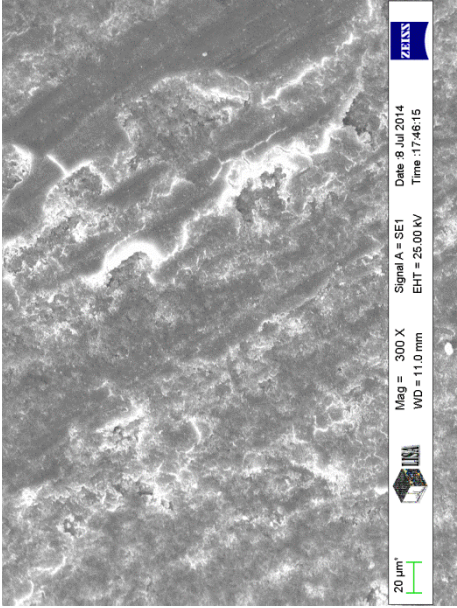
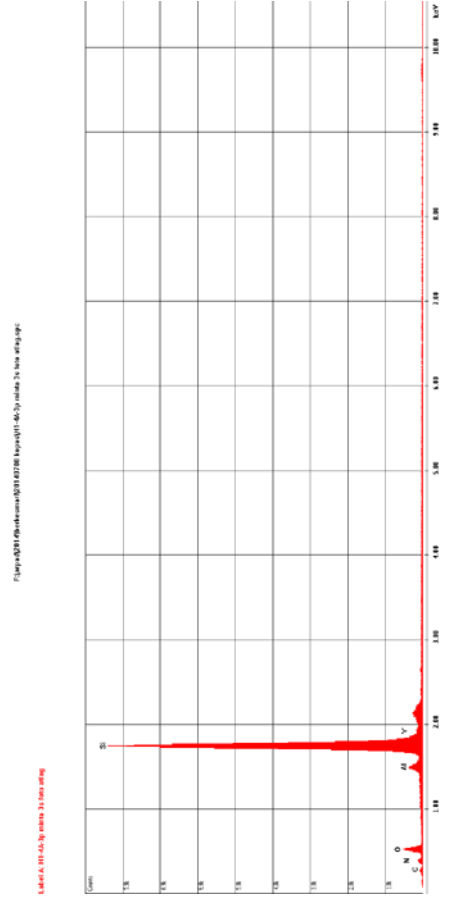
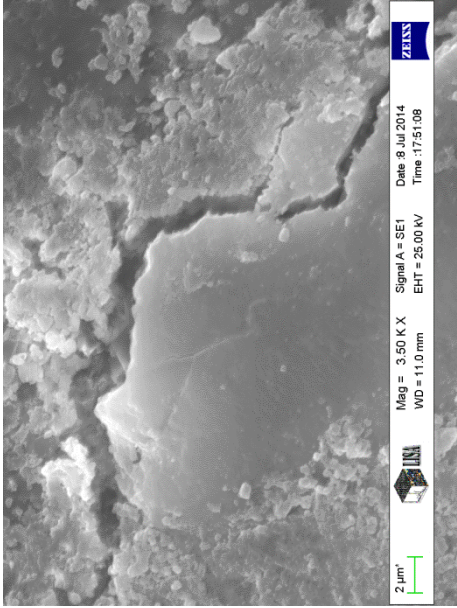
HIP_G1_3A_2v; SiC, 150 mm/s, 40 N

1/1

	Hpg13a2v-1		Hpg13a2v- -2		Hpg13a2v- -3
	Hpg13a2v- -4		Hpg13a2v- -5		

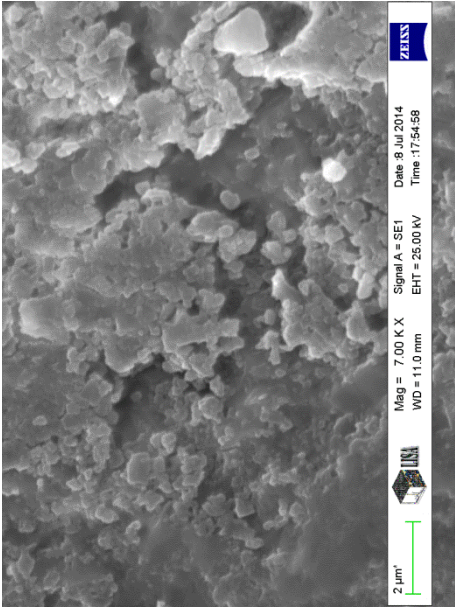
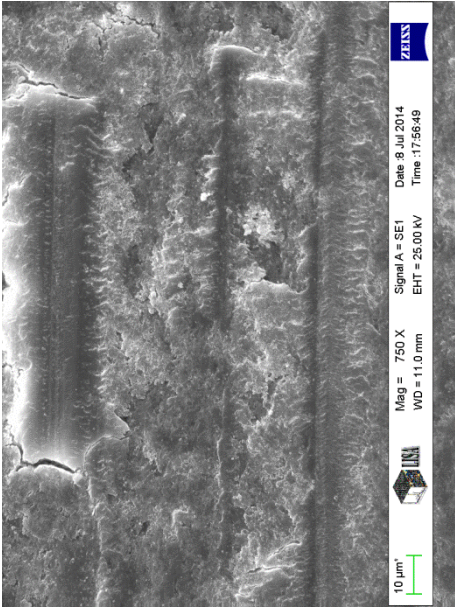
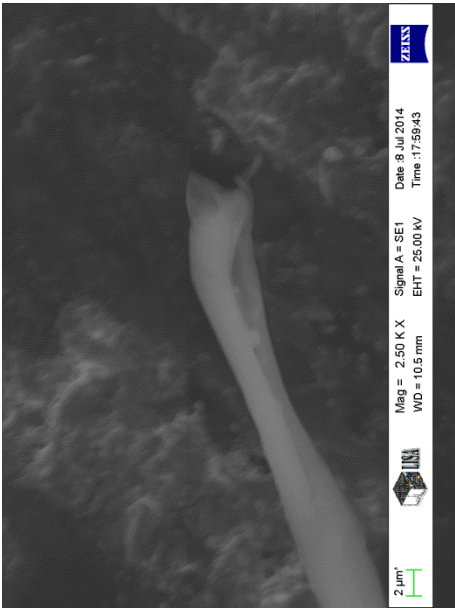
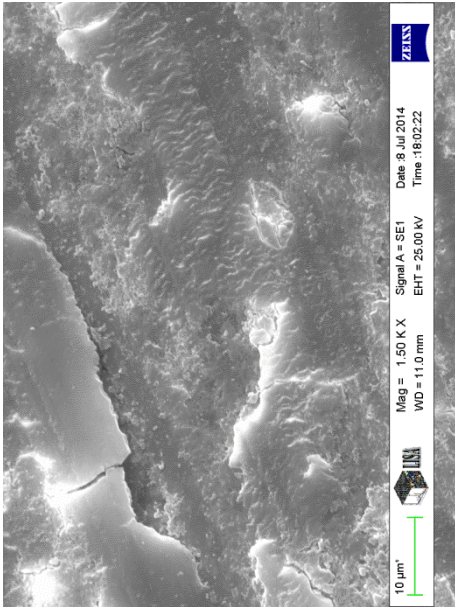
1/2

HIP_G1_4A_3p; SiC, 200 mm/s, 40 N

		
H1_4A_3p_01	H1_4A_3p_02	H1_4A_3v_03
		
H1_4A_3p minta 3s foto atlag		
		
H1_4A_3v_04		

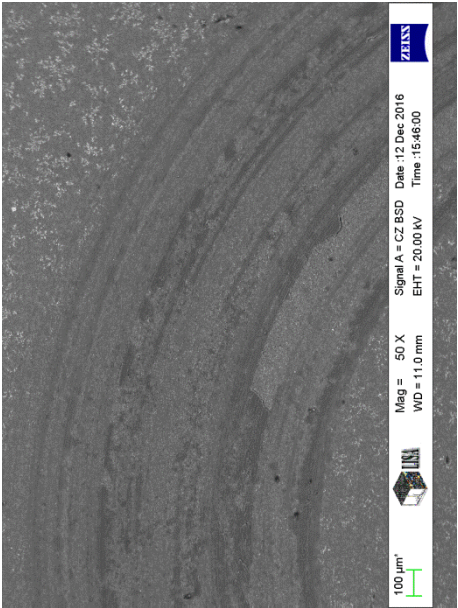
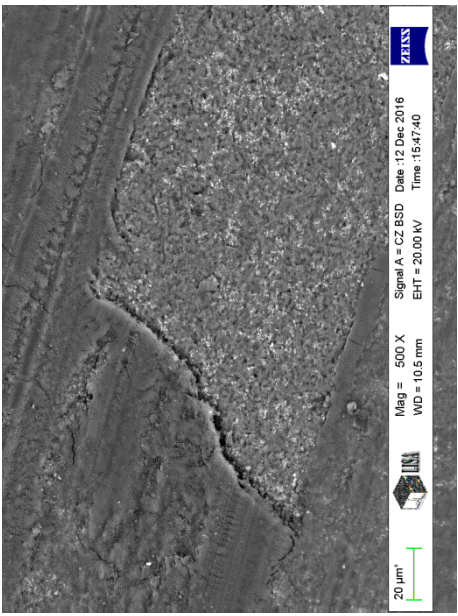
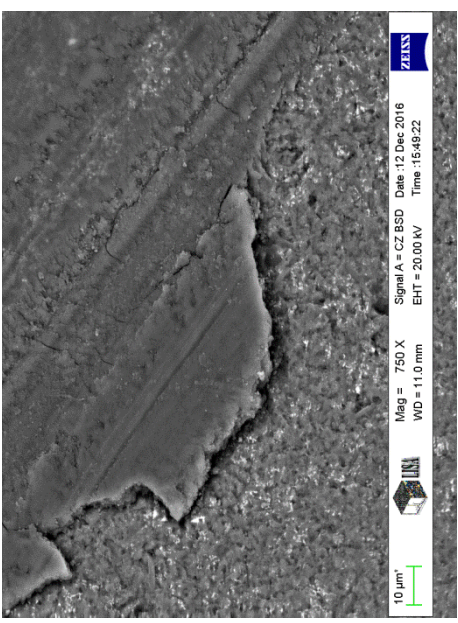
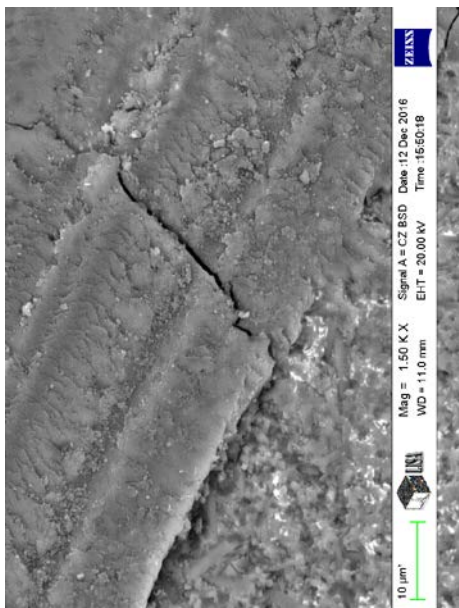
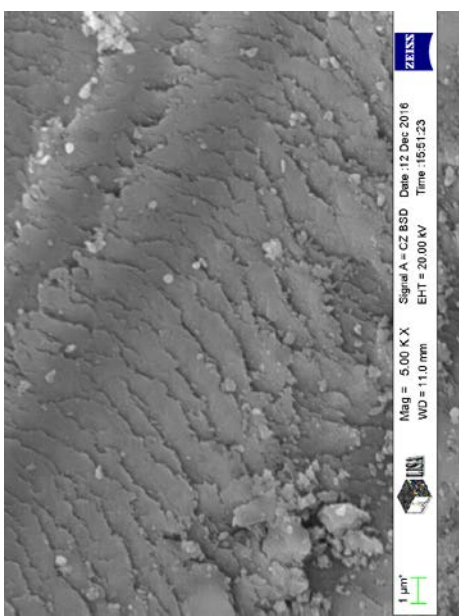
HIP_G1_4A_3p; SiC, 200 mm/s, 40 N

2/2

	H1_4A_3p_05		H1_4A_3p_06		H1_4A_3p_07
	H1_4A_3p_08				

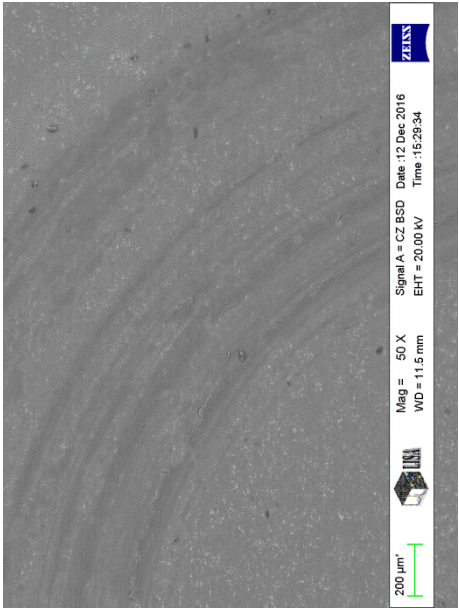
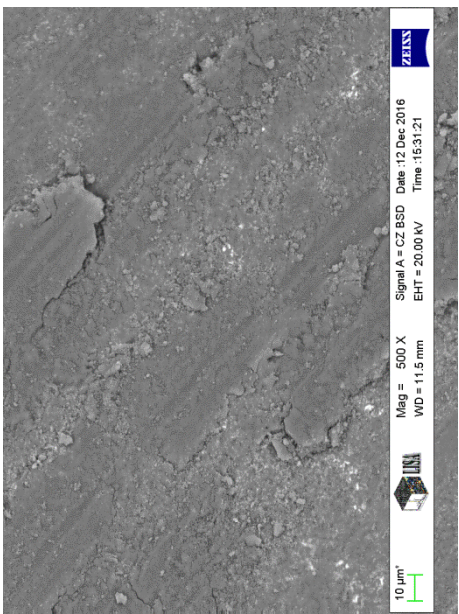
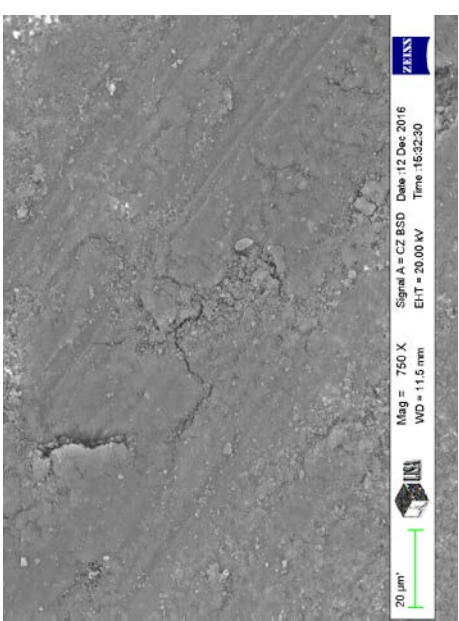
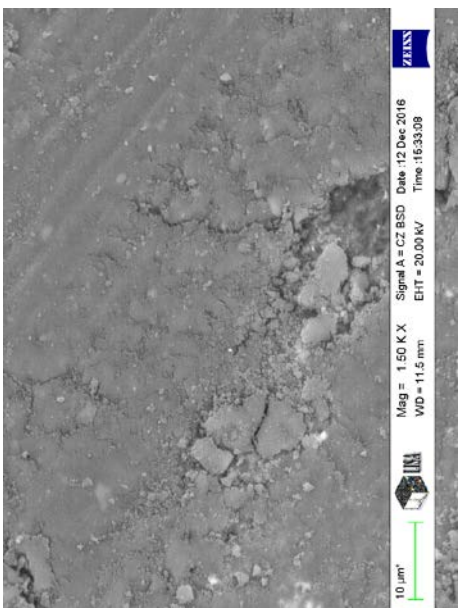
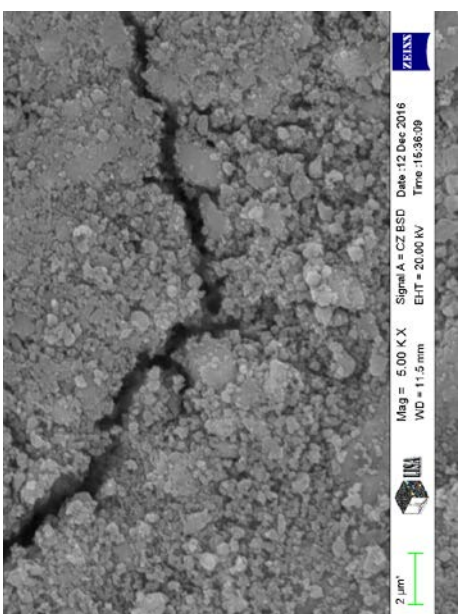
HIP_G1_3A_1pp; SiC, 100 mm/s, 80 N

1/1

 Mag = 50 X Signal A = CZ BSD Date :12 Dec 2016 Time :15:46:00 WD = 11.0 mm EHT = 20.00 kV	 Mag = 500 X Signal A = CZ BSD Date :12 Dec 2016 Time :15:47:40 WD = 10.5 mm EHT = 20.00 kV	 Mag = 750 X Signal A = CZ BSD Date :12 Dec 2016 Time :15:48:22 WD = 11.0 mm EHT = 20.00 kV
 Mag = 1.50 K X Signal A = CZ BSD Date :12 Dec 2016 Time :15:50:18 WD = 11.0 mm EHT = 20.00 kV	 Mag = 5.00 K X Signal A = CZ BSD Date :12 Dec 2016 Time :15:51:23 WD = 11.0 mm EHT = 20.00 kV	Hpg13a1pp-3
Hpg13a1pp-4	Hpg13a1pp-5	Hpg13a1pp-2

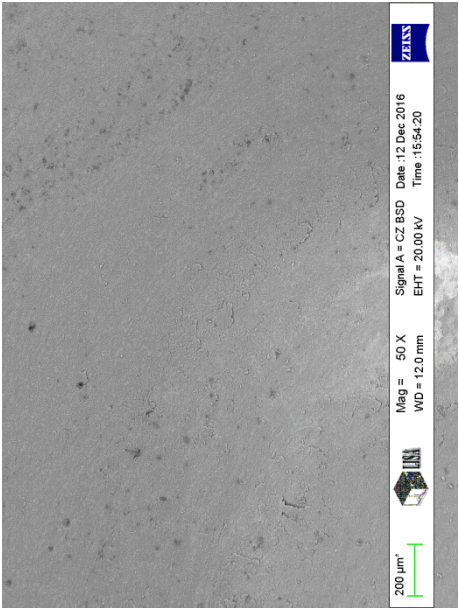
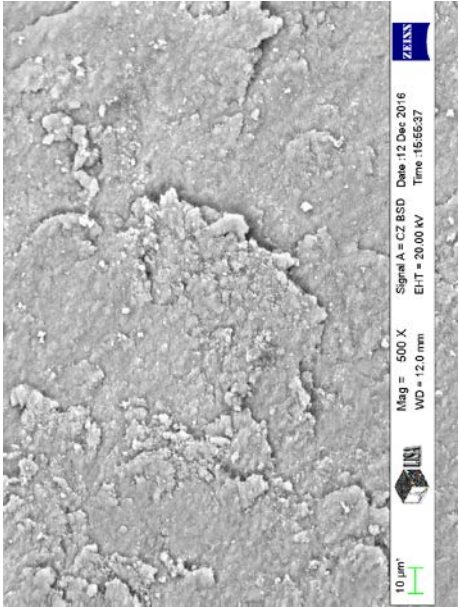
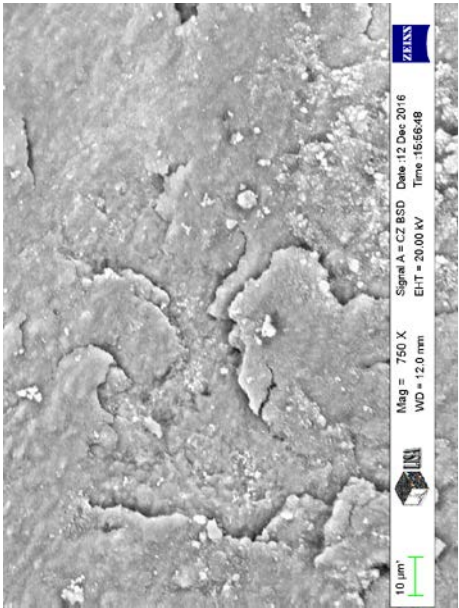
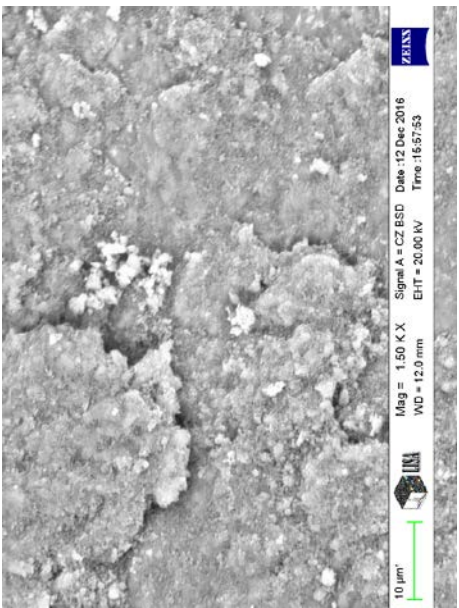
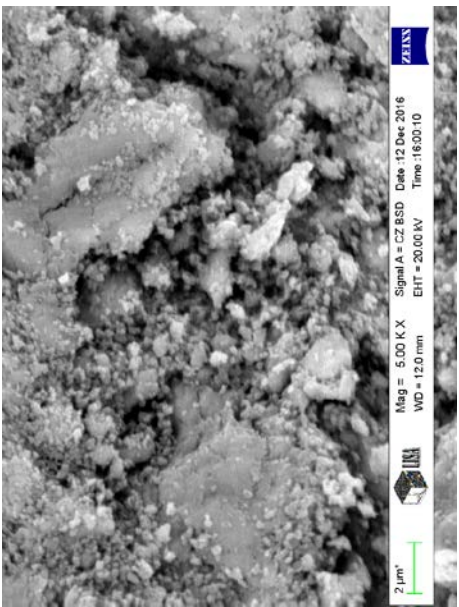
HIP_G1_3A_2pp; SiC, 150 mm/s, 80N

1/1

		
Hpg13a2pp-1	Hpg13a2pp -2	Hpg13a2pp -3
		
Hpg13a2pp -4	Hpg13a2pp -5	

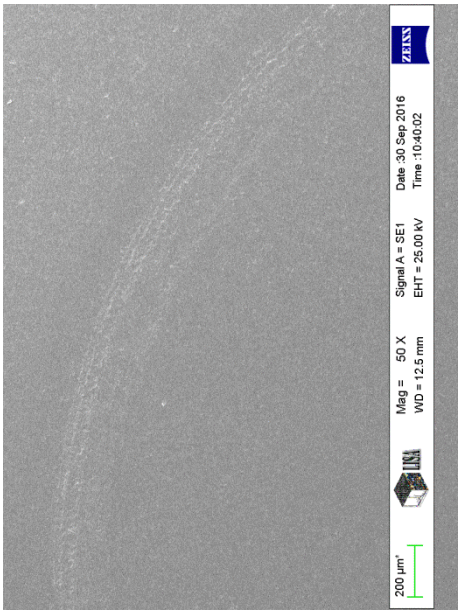
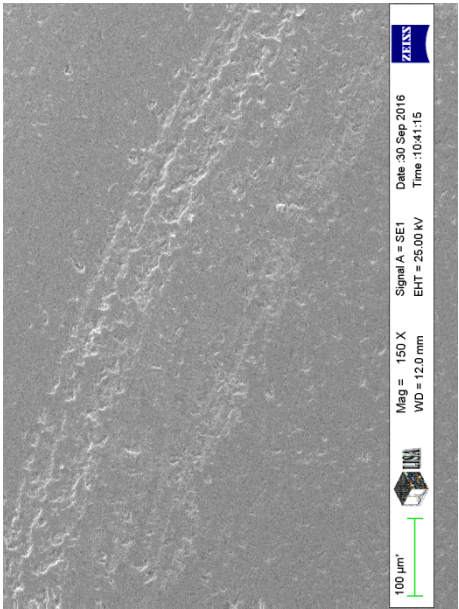
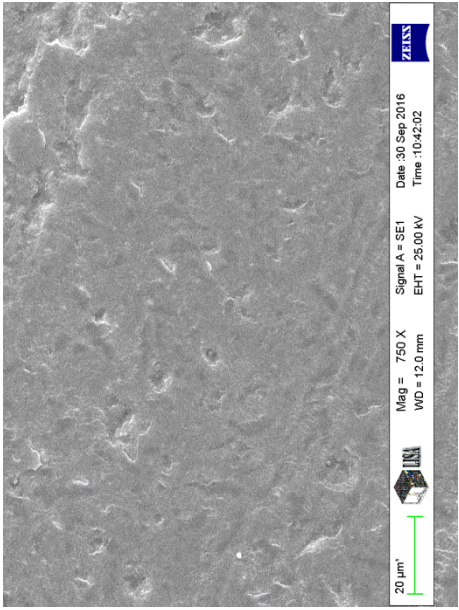
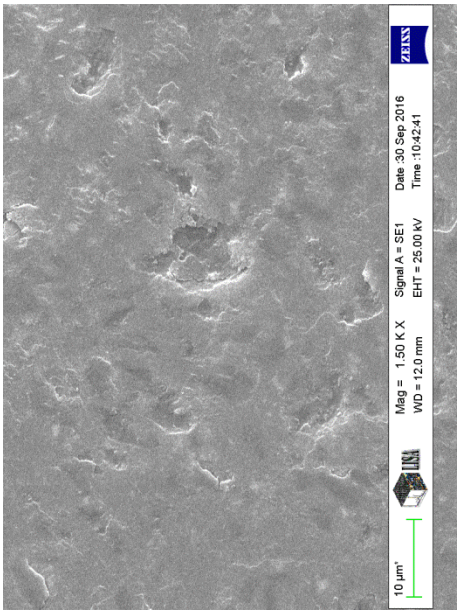
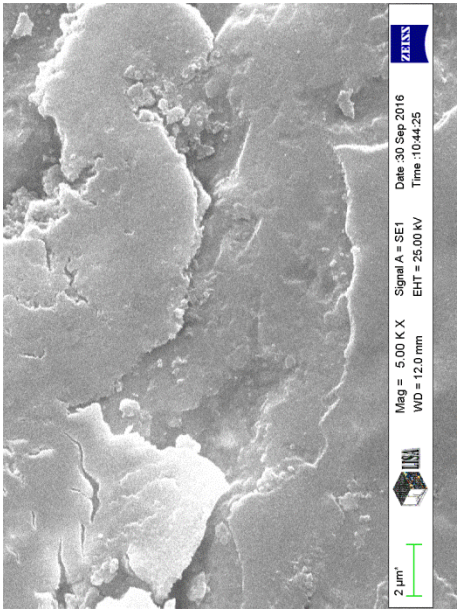
HIP_G1_2A_3pp; SiC, 200 mm/s, 80 N

1/1

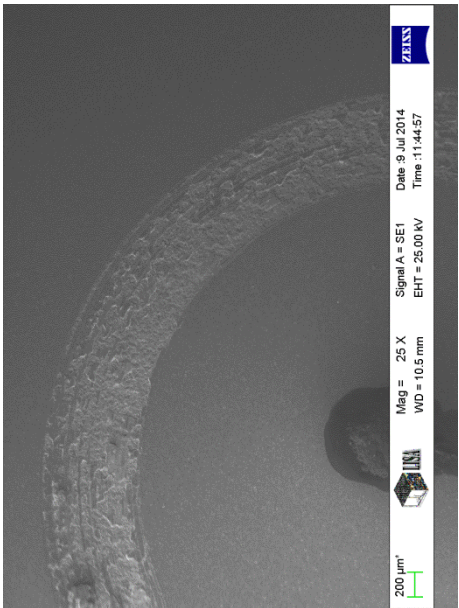
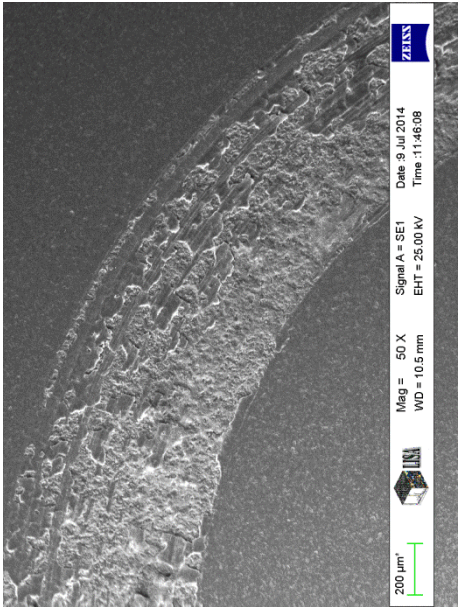
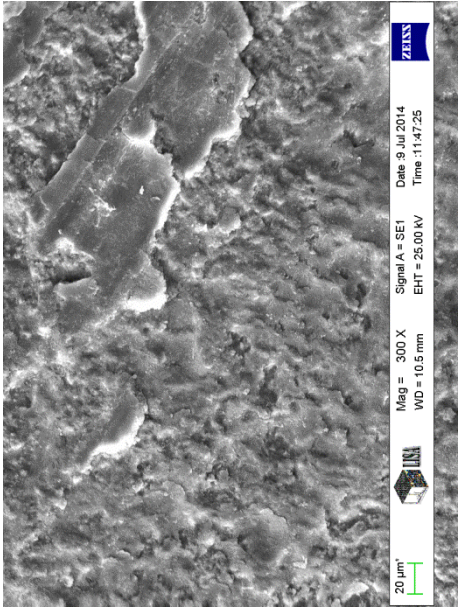
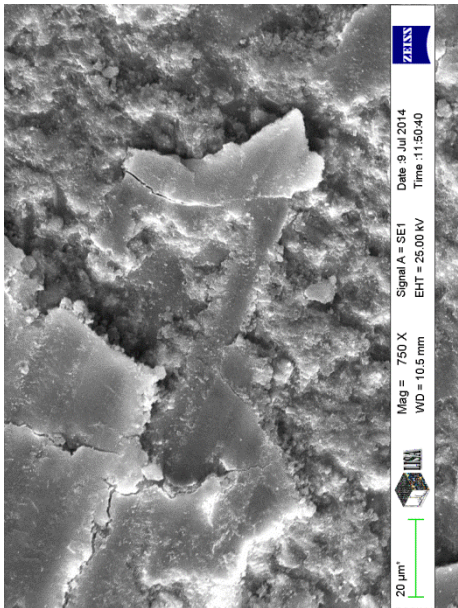
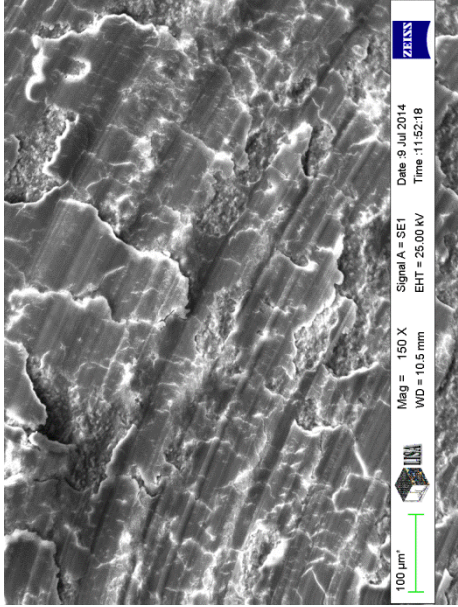
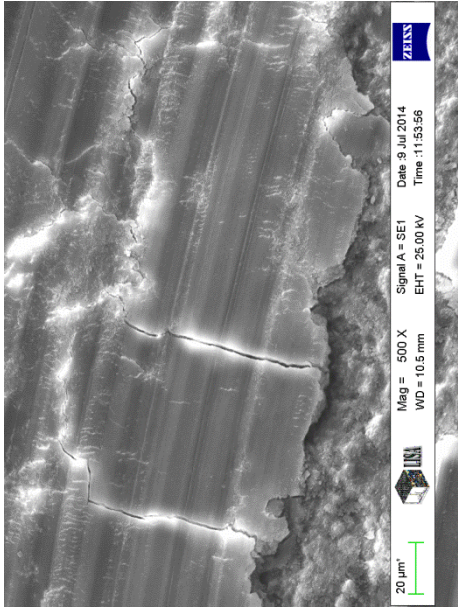
	Hpg122a3pp-1		Hpg122a3pp-2		Hpg122a3pp-3
	Hpg122a3pp-4		Hpg122a3pp-5		

HIP_G3_5A_p6; SiC, 10 mm/s, 10 N

1/1

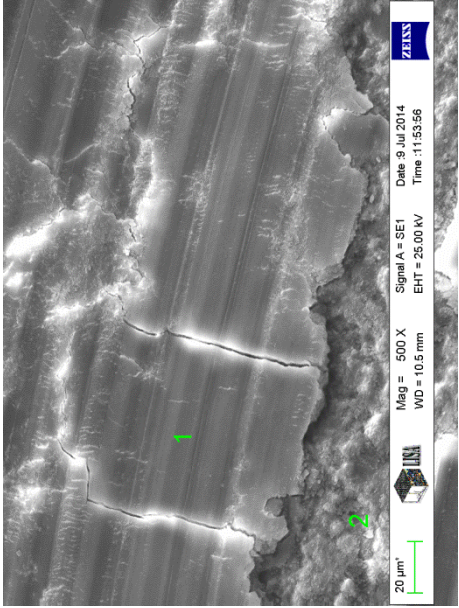
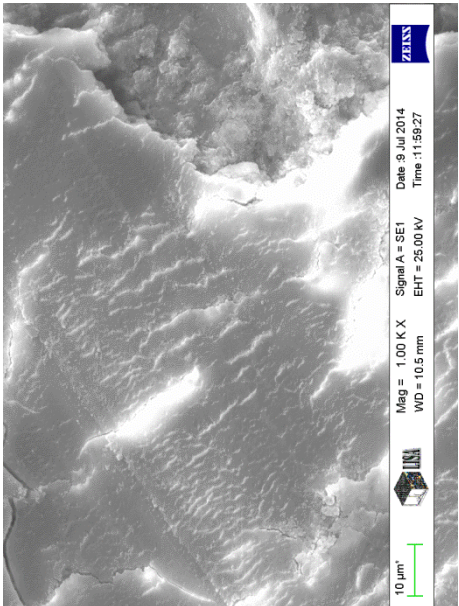
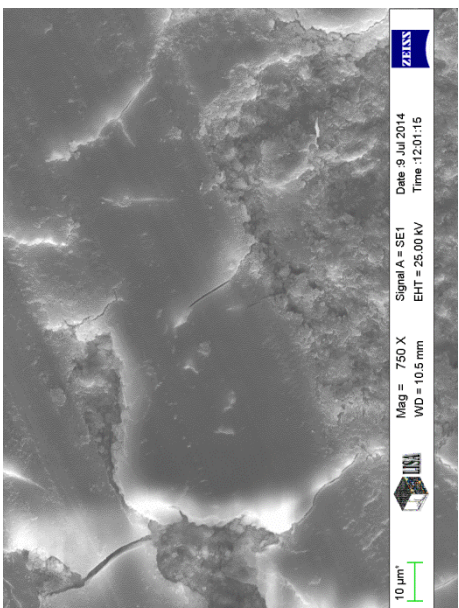
		
H3_5A_p6_50x	H3_5A_p6_150x	H3_5A_p6_750x
		
H3_5A_p6_1500x	H3_5A_p6_5000x	

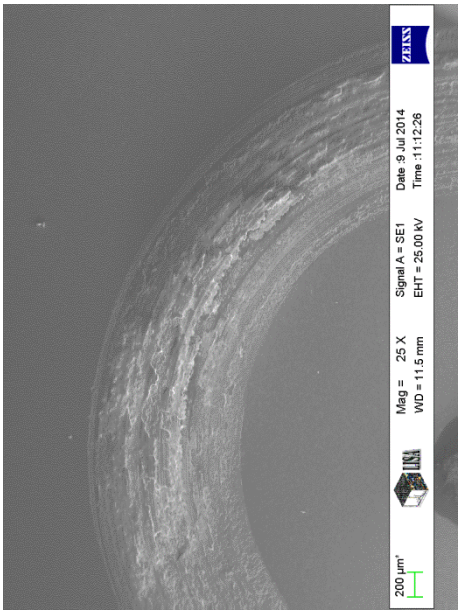
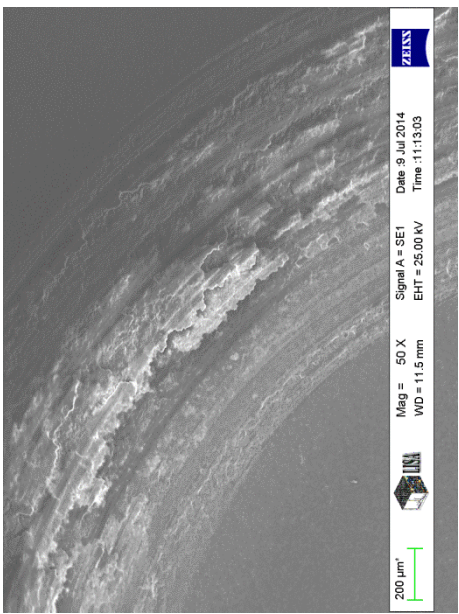
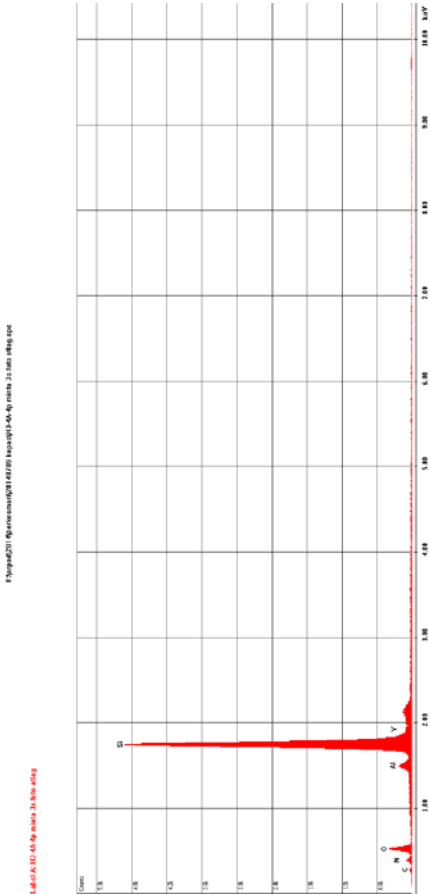
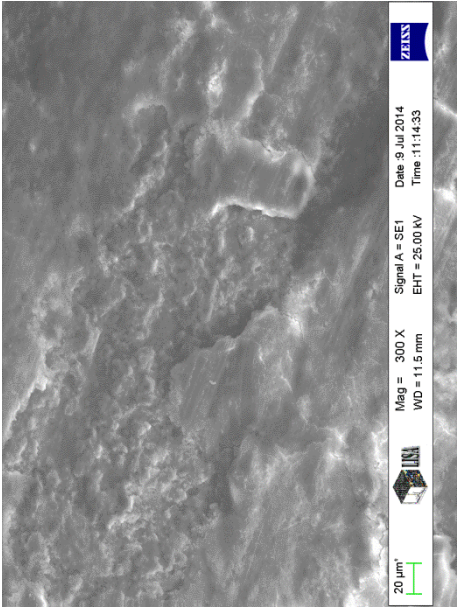
HIP_G3_4A_2p; SiC, 20 mm/s, 40 N

		
H3_4A_2p_01	H3_4A_2p_02	H3_4A_2p_03
		
H3_4A_2p_04	H3_4A_2p_05	H3_4A_2p_06

2/2

HIP_G3_4A_2p; SiC, 20 mm/s, 40 N

		
H3_4A_2p_07	H3_4A_2p_08	H3_4A_2p_09

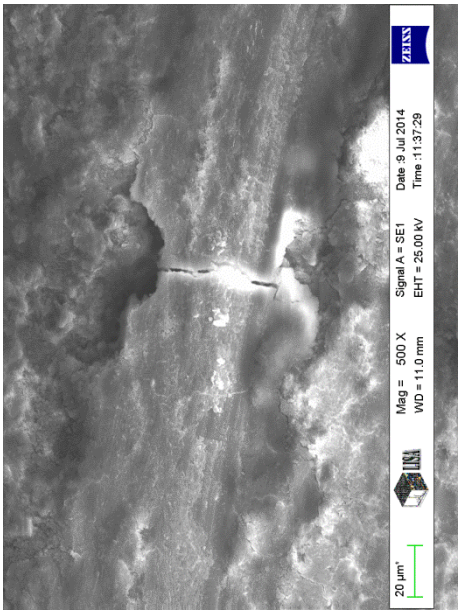
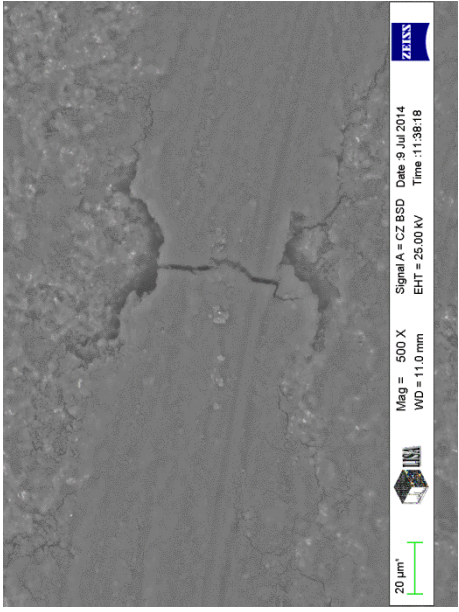
		H3_4A_4p_01	H3_4A_4p_02
			
H3_4A_4p minta 3s foto atlag		H3_4A_4p_03	

2/3

HIP_G3_4A_4p; SiC, 200 mm/s, 40 N

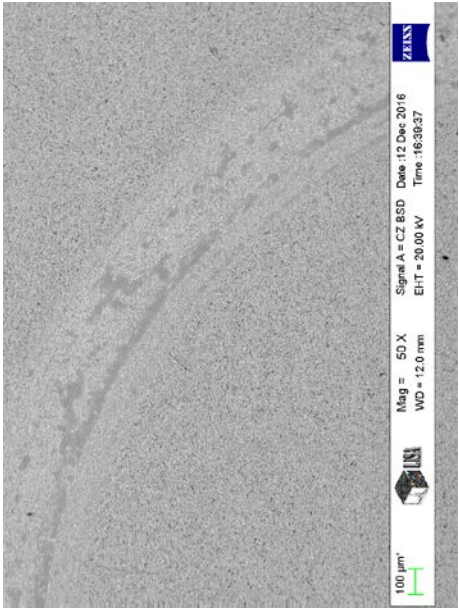
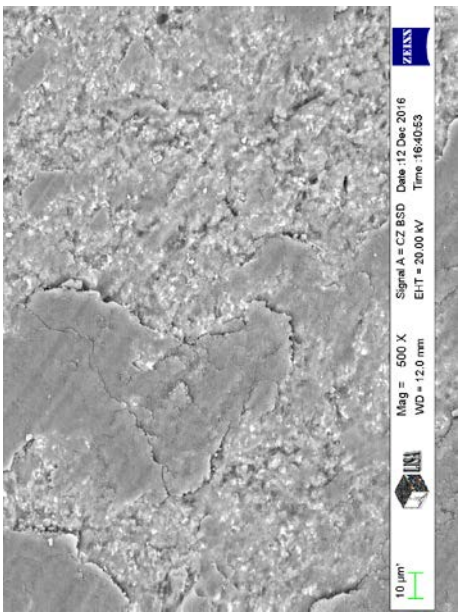
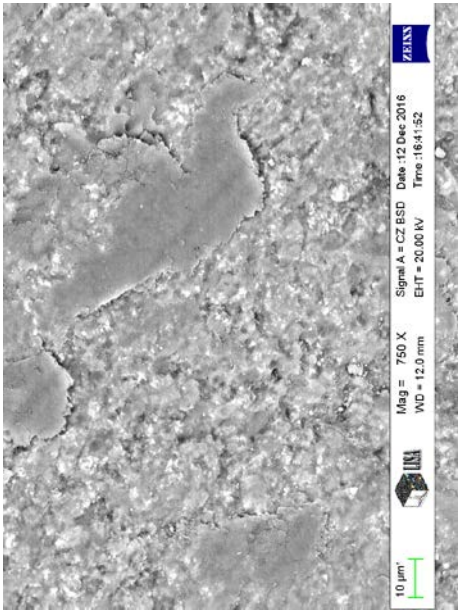
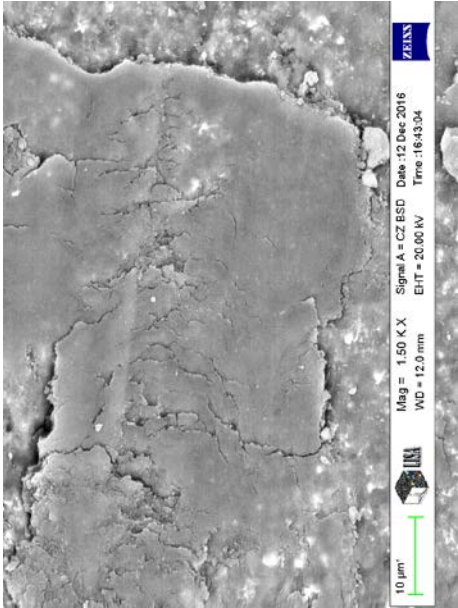
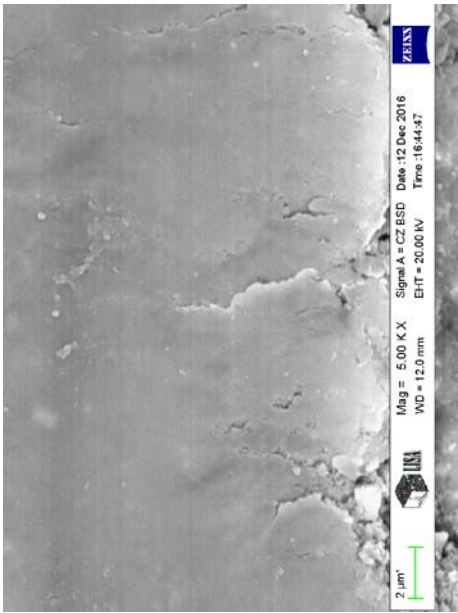
		H3_4A_4p_04
		H3_4A_4p_05

H3_4A_4p minta 5s foto (grafén látható)!

	
H3_4A_4p_06	H3_4A_4p_07

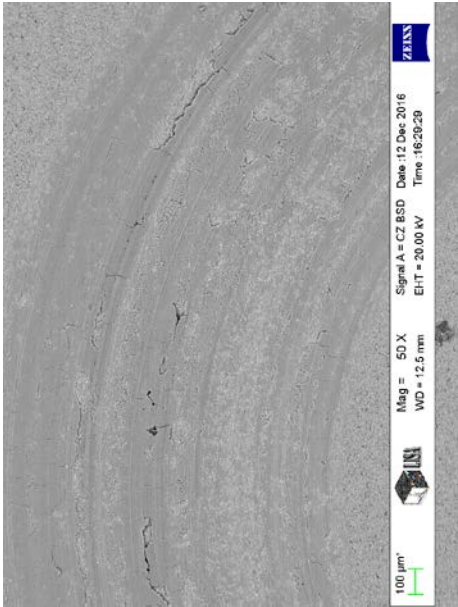
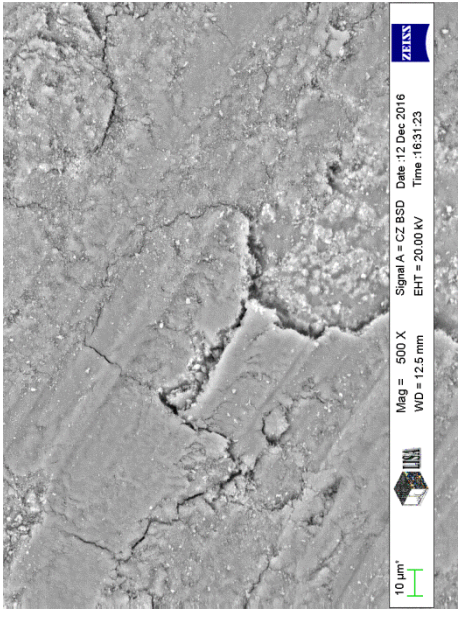
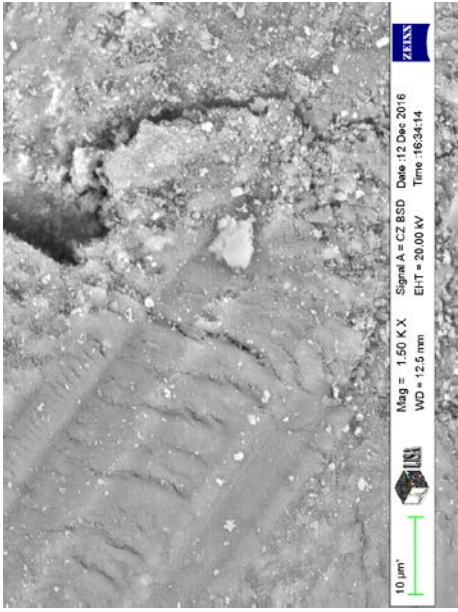
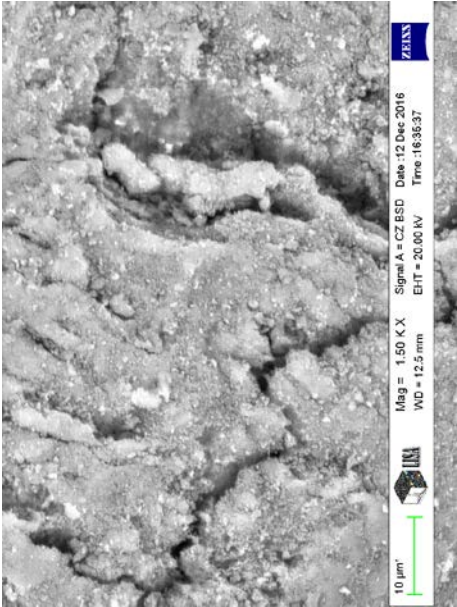
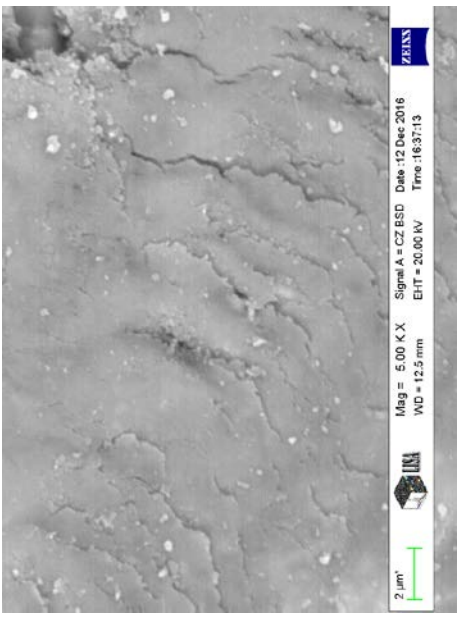
HIP_G3_5A_5p; SiC, 10 mm/s, 80 N

1/1

		
Hpg35a5p-1	Hpg35a5p -2	Hpg35a5p - -3
		
Hpg35a5p -4	Hpg35a5p -5	

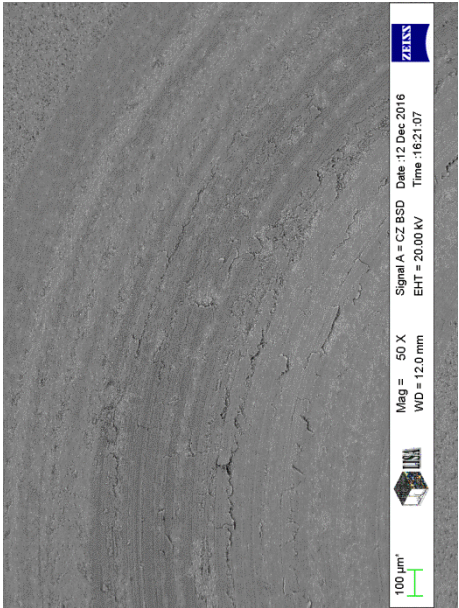
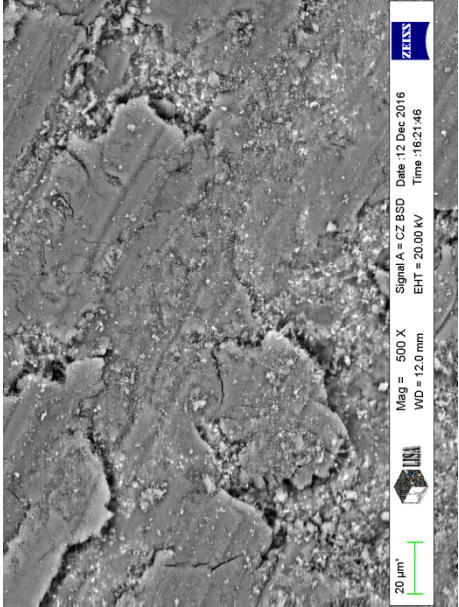
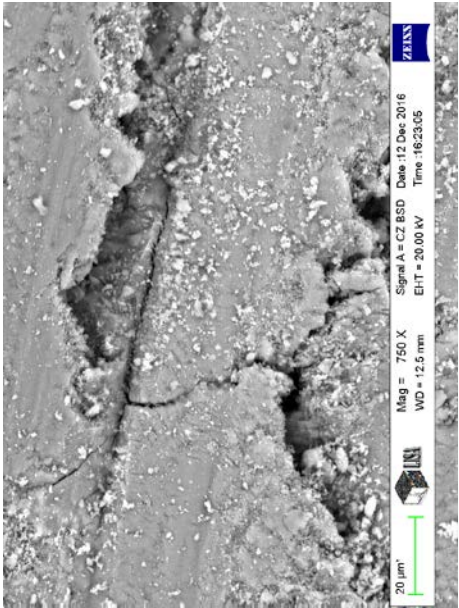
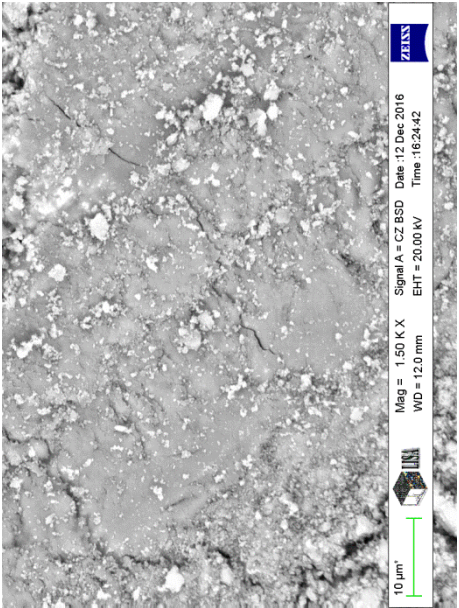
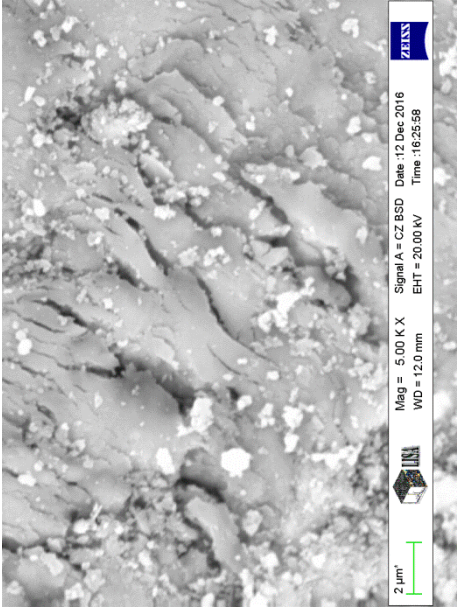
HIP_G3_2A_1pp; SiC, 50 mm/s, 80 N

1/1

			Hpg32a1pp-1	Hpg32a1pp - -2	Hpg32a1pp - -3
			Hpg32a1pp - -4	Hpg32a1pp - -5	

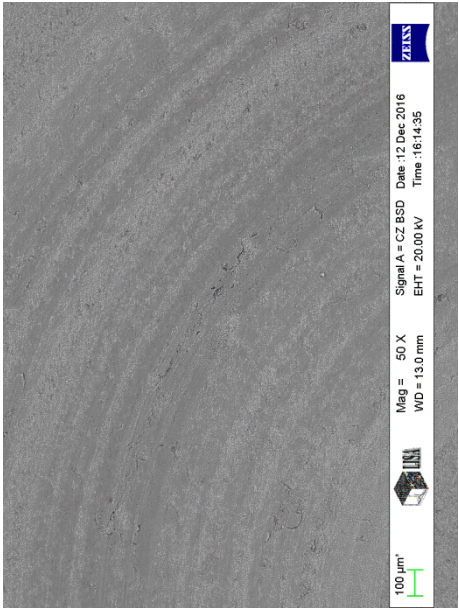
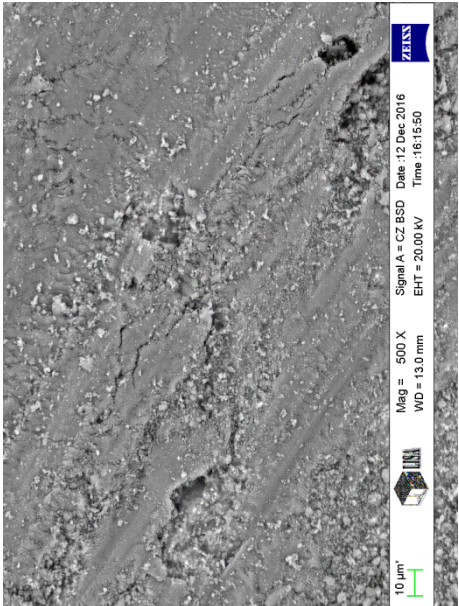
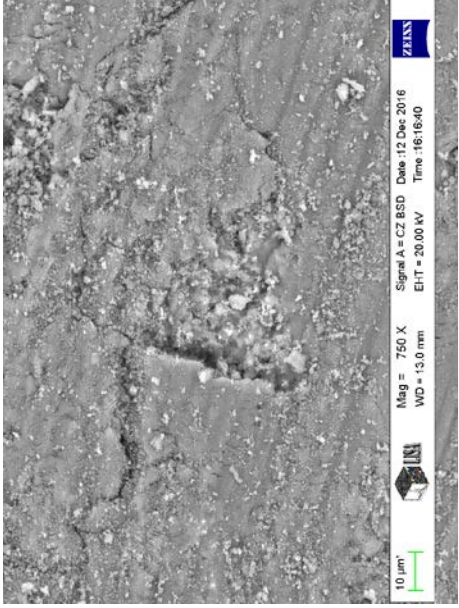
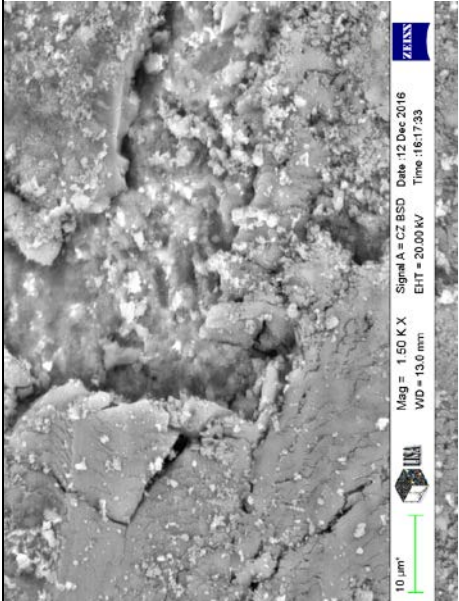
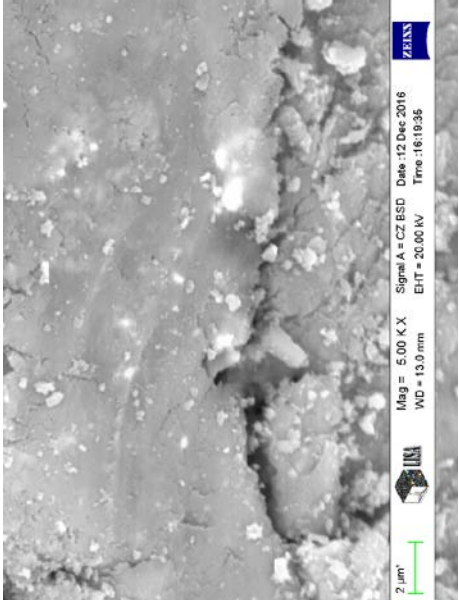
HIP_G3_2A_2pp; SiC, 100 mm/s,80 N

1/1

 100 µm Mag = 50 X WD = 12.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date: 12 Dec 2016 Time: 16:21:07	Hpg32a2pp-1
 20 µm Mag = 500 X WD = 12.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date: 12 Dec 2016 Time: 16:21:46	Hpg32a2pp - -2
 20 µm Mag = 750 X WD = 12.5 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date: 12 Dec 2016 Time: 16:23:05	Hpg32a2pp - -3
 10 µm Mag = 1.50 K X WD = 12.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date: 12 Dec 2016 Time: 16:24:42	Hpg32a2pp - -4
 2 µm Mag = 5.00 K X WD = 12.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date: 12 Dec 2016 Time: 16:25:58	Hpg32a2pp - -5

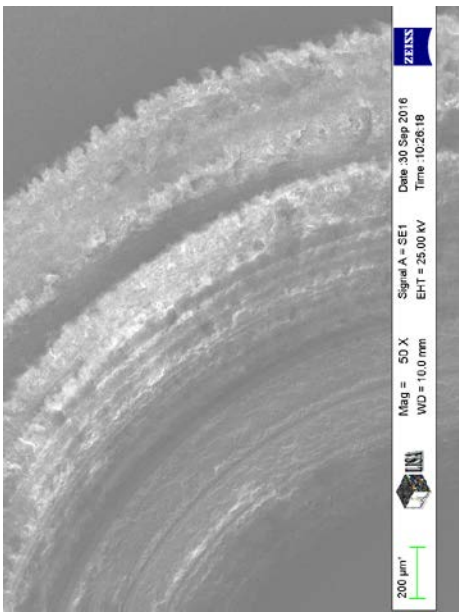
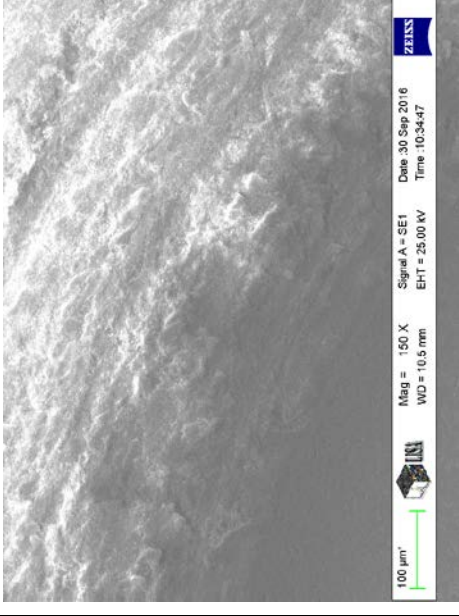
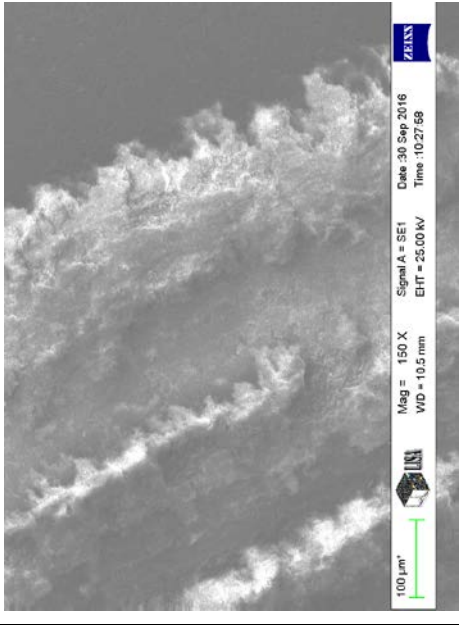
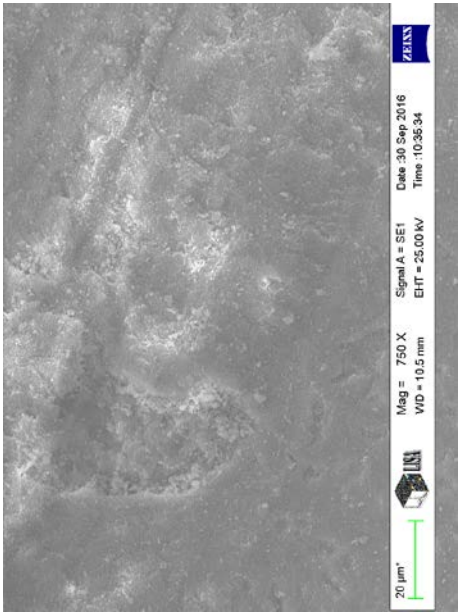
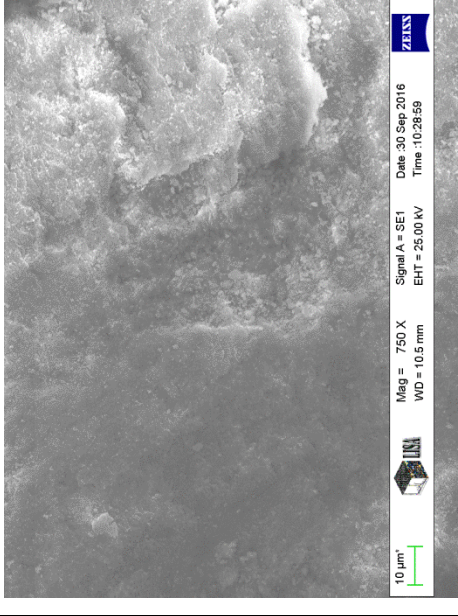
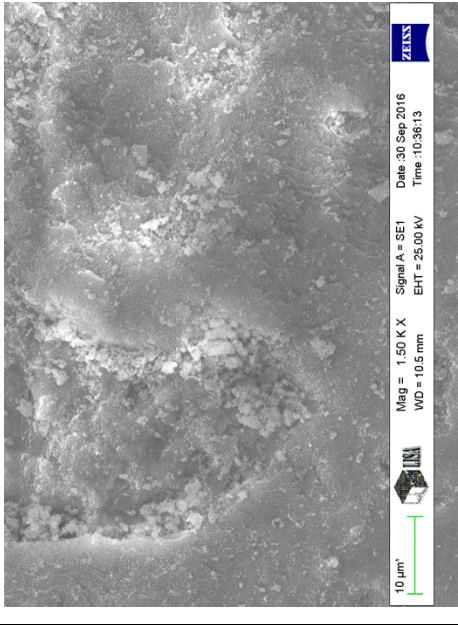
HIP_G3_2A_3pp; SiC, 150 mm/s, 80 N

1/1

 100 µm Mag = 50 X WD = 13.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date :12 Dec 2016 Time :16:14:35	Hpg32a3pp-1
 10 µm Mag = 500 X WD = 13.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date :12 Dec 2016 Time :16:15:50	Hpg32a3pp -2
 10 µm Mag = 750 X WD = 13.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date :12 Dec 2016 Time :16:16:40	Hpg32a3pp- -3
 10 µm Mag = 1.50 K X WD = 13.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date :12 Dec 2016 Time :16:17:33	Hpg32a3pp -4
 2 µm Mag = 5.00 K X WD = 13.0 mm Signal A = CZ BSD EHT = 20.00 kV Date :12 Dec 2016 Time :16:19:35	Hpg32a3pp -5

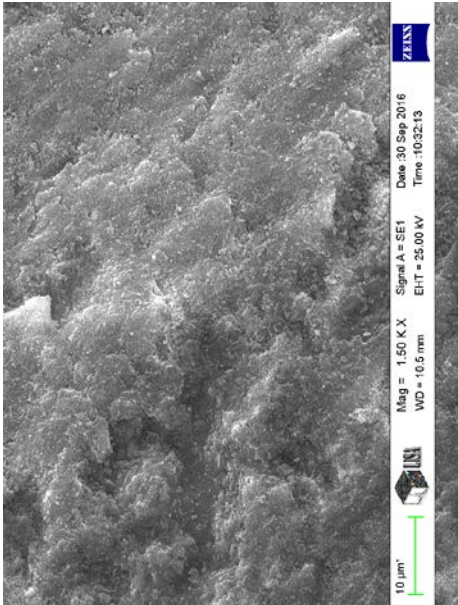
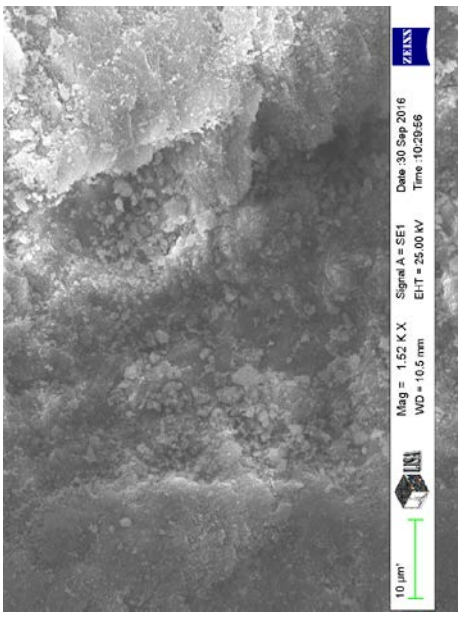
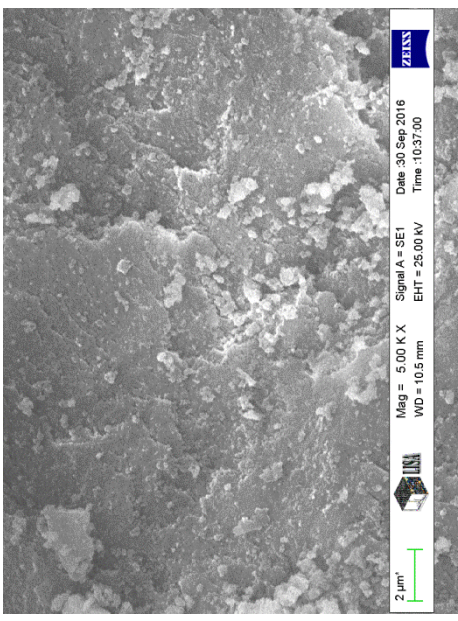
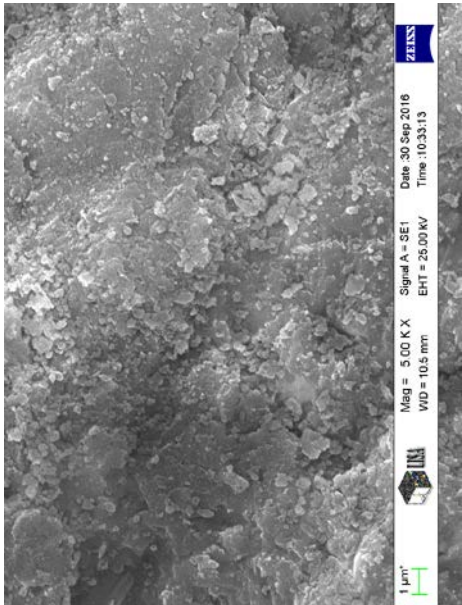
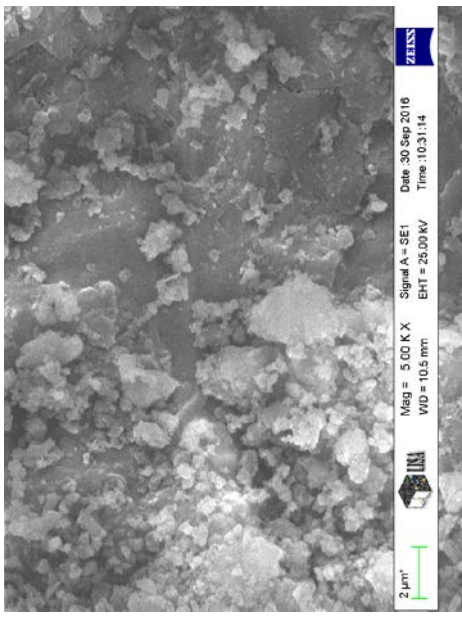
HIP_G3_1A_pp3; SiC, 200 mm/s, 80 N

1/2

		
H3_1A_pp3_50x	H3_1A_pp3_150x_belső	H3_1A_pp3_150x_kulso
		
H3_1A_pp3_750x_belső	H3_1A_pp3_750x_kulso	H3_1A_pp3_1500x_belső

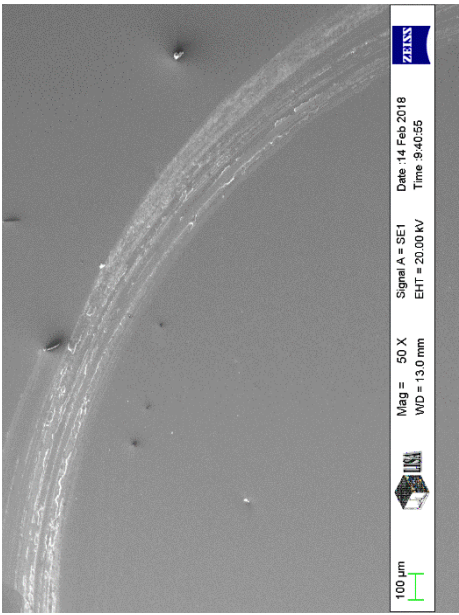
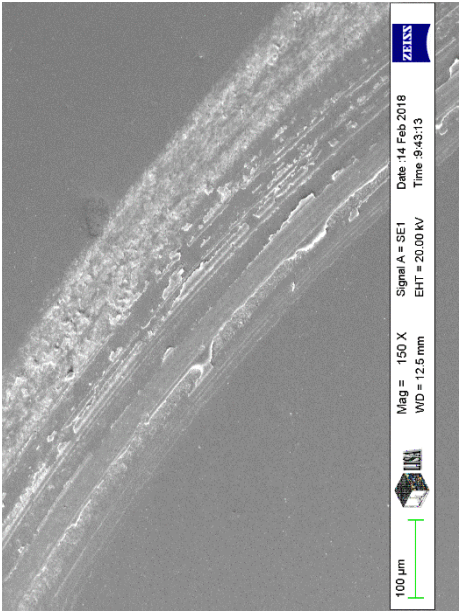
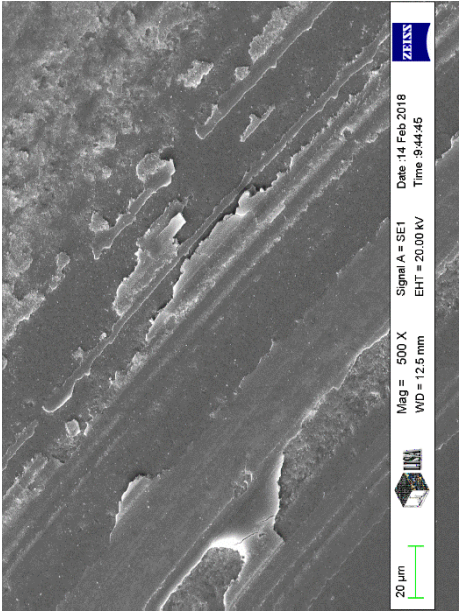
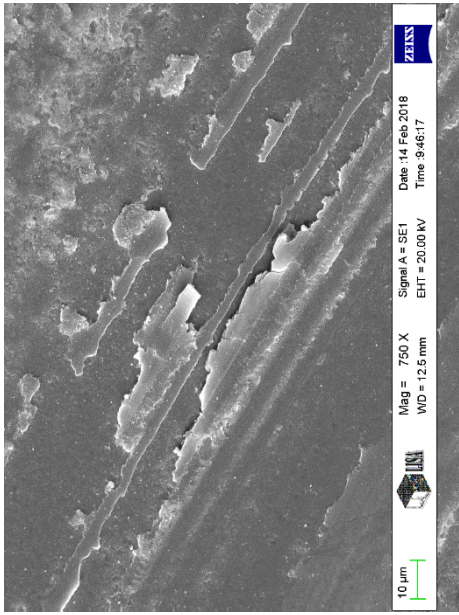
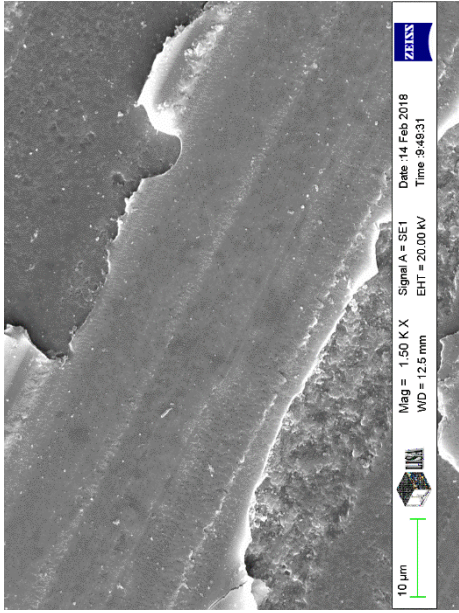
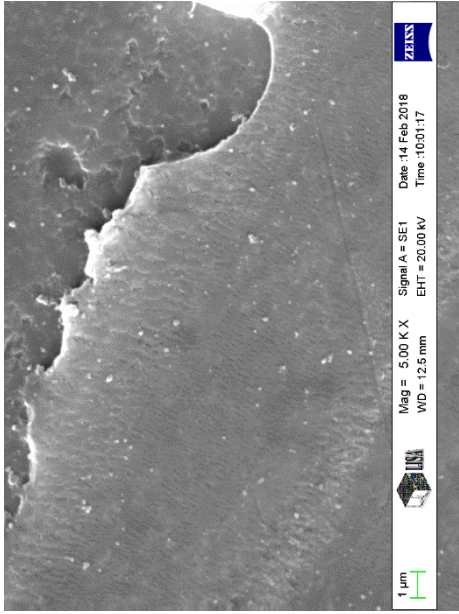
HIP_G3_1A_pp3; SiC, 200 mm/s, 80 N

2/2

		
		H3_1A_pp3_5000x_belső
H3_1A_pp3_5000x_kozep	H3_1A_pp3_5000x_kulso	

SPS_G0_9A_1p; SiC, 10 mm/s, 10 N

1/2

		
s09a1p-01	s09a1p-02	s09a1p-03
		
s09a1p-04	s09a1p-05	s09a1p-07

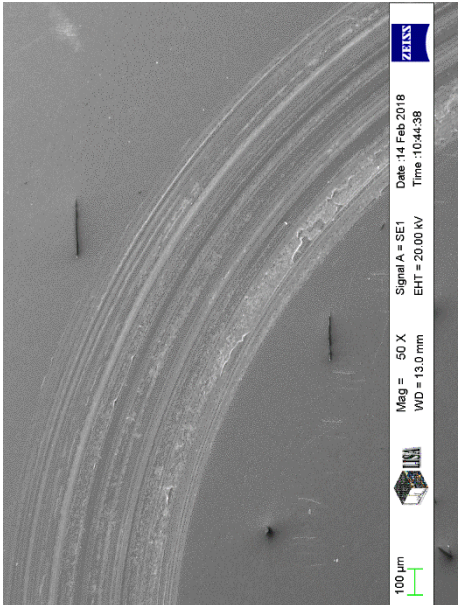
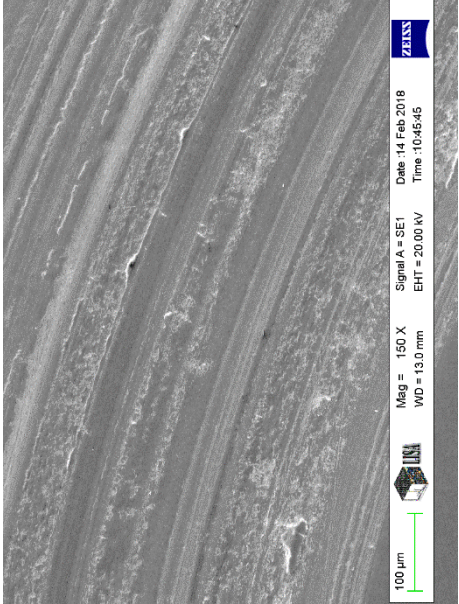
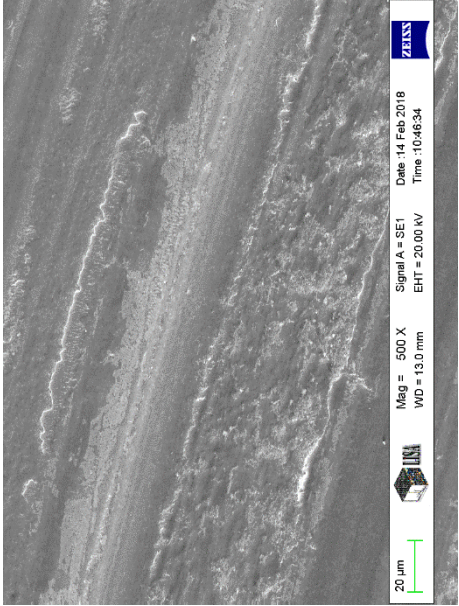
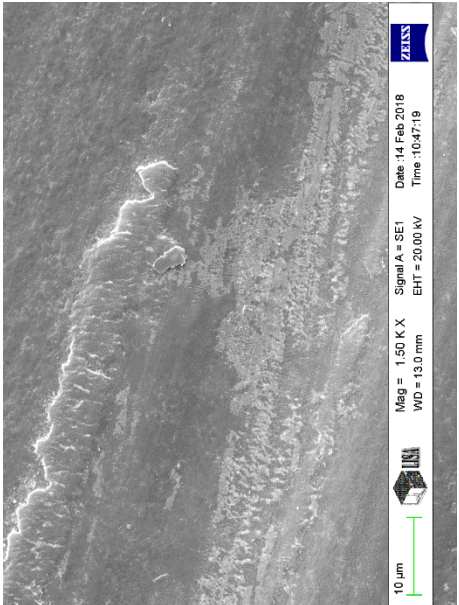
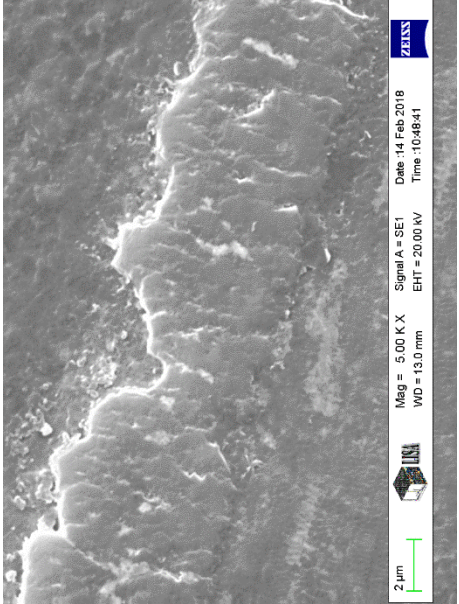
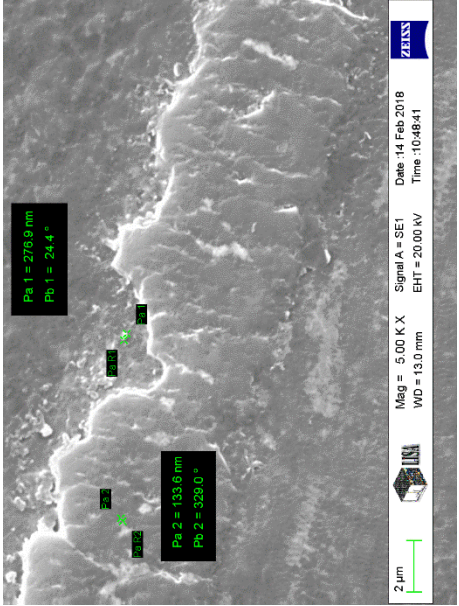
SPS_G0_9A_1p; SiC, 10 mm/s, 10 N

2/2

s09a1p minta 06 foto 1s terület	s09a1p-06
s09a1p minta 06 foto 2s terület	s09a1p-08

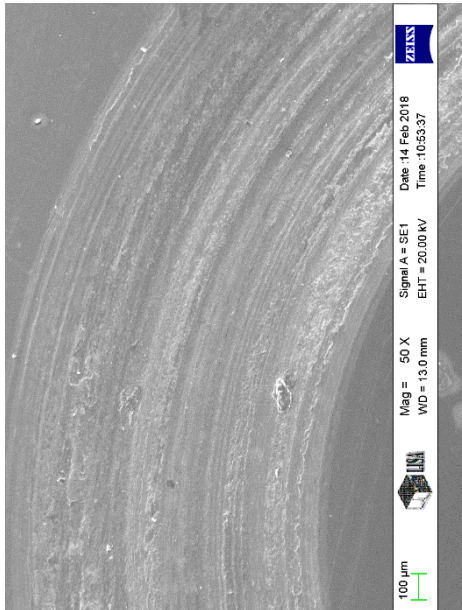
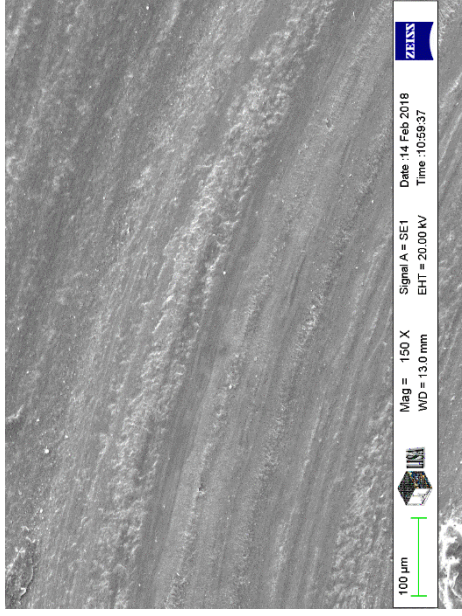
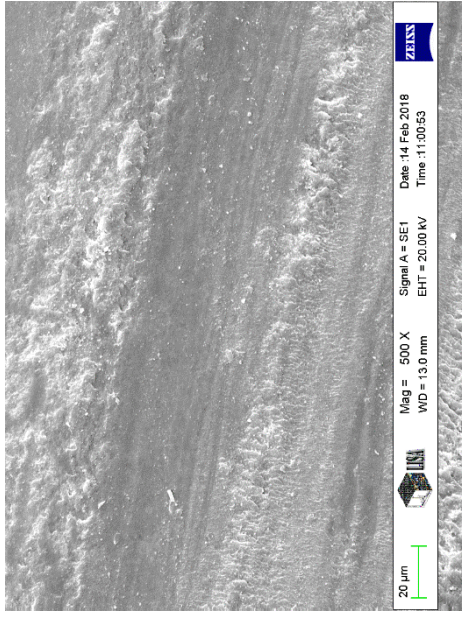
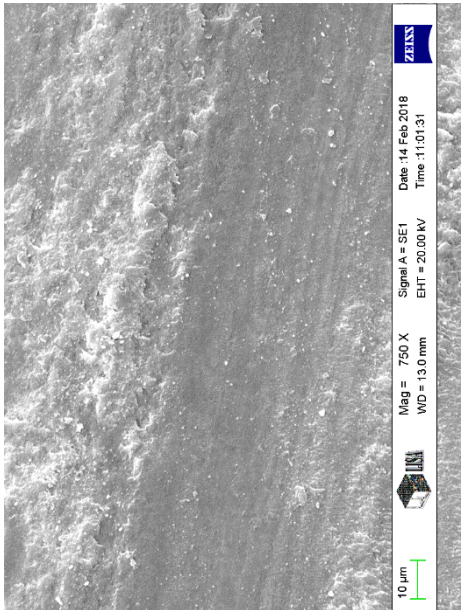
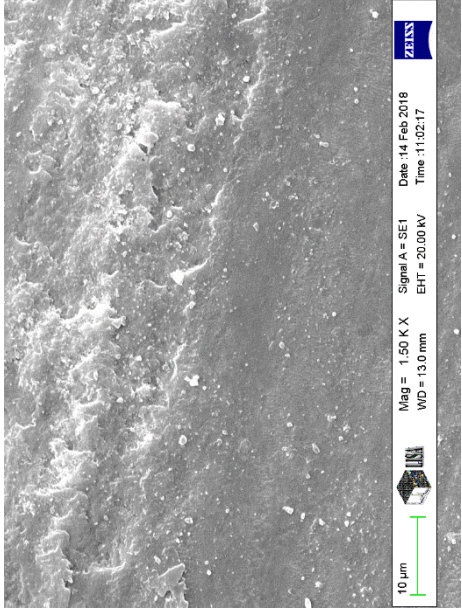
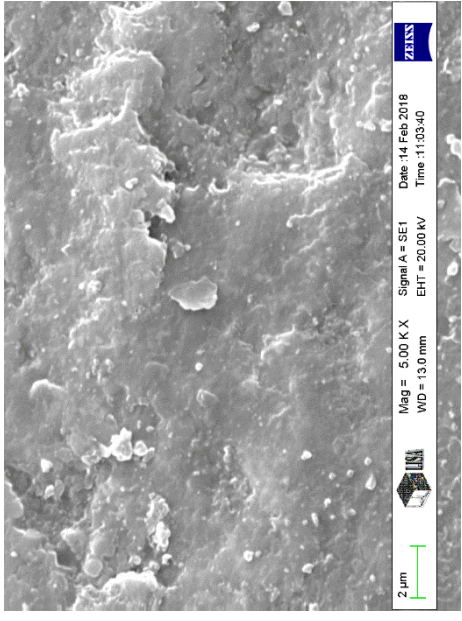
SPS_G0_6A_1v; SiC, 20 mm/s, 40 N

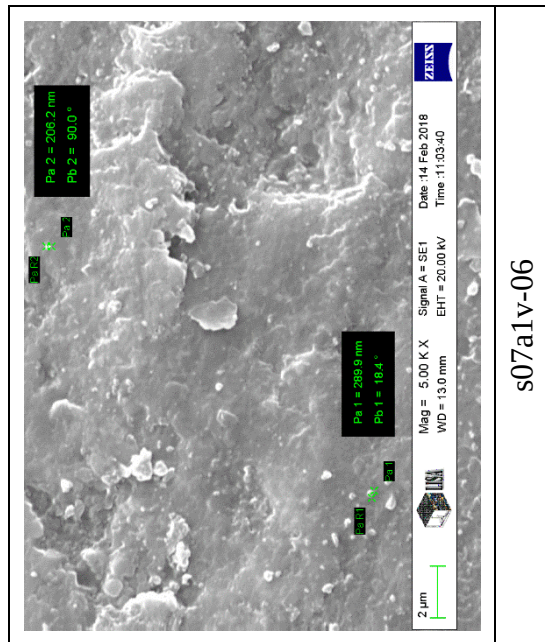
1/1

 100 µm Mag = 50 X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:44:38 ZEISS	 100 µm Mag = 150 X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:45:45 ZEISS	 20 µm Mag = 500 X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:46:34 ZEISS	s06a1v-01	s06a1v-02	s06a1v-03
 10 µm Mag = 1.50 K X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:47:19 ZEISS	 2 µm Mag = 5.00 K X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:48:41 ZEISS	 2 µm Mag = 5.00 K X WD = 13.0 mm Signal A = SE1 EHT = 20.00 kV Date :14 Feb 2018 Time :10:48:41 ZEISS	s06a1v-04	s06a1v-05	s06a1v-06

SPS_G0_7A_1v; SiC, 100 mm/s, 40 N

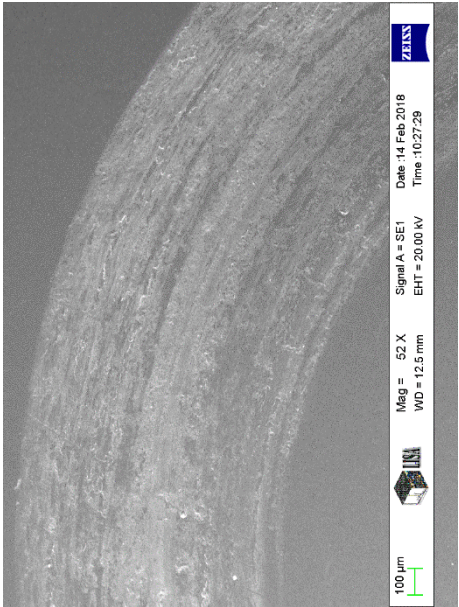
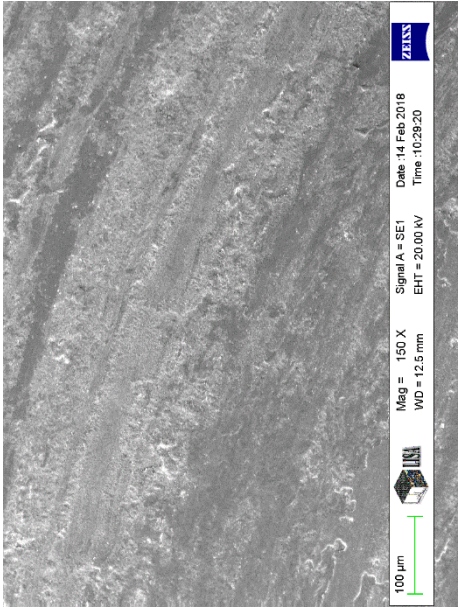
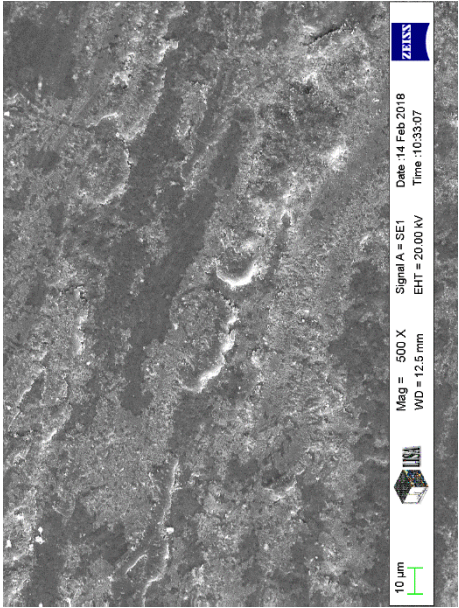
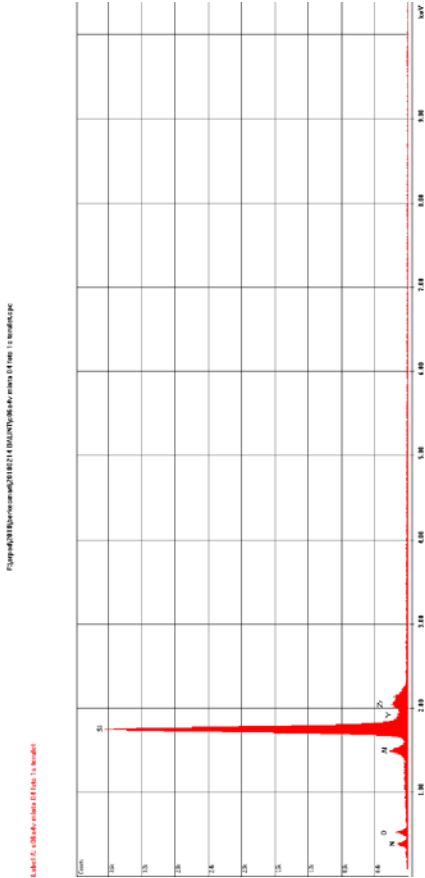
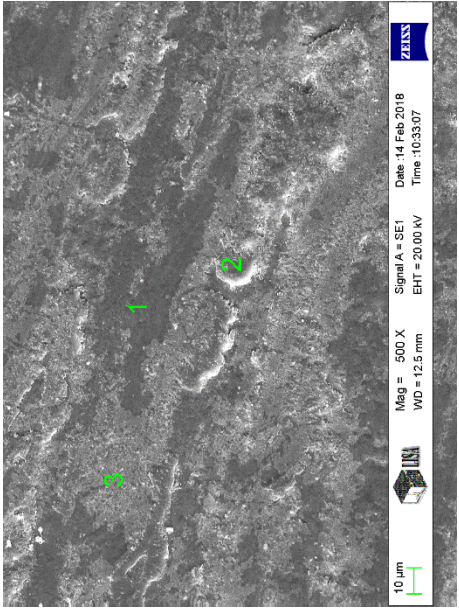
1/2

		
s07a1v-01	s07a1v-02	s07a1v-03
		
s07a1v-04	s07a1v-05	s07a1v-06



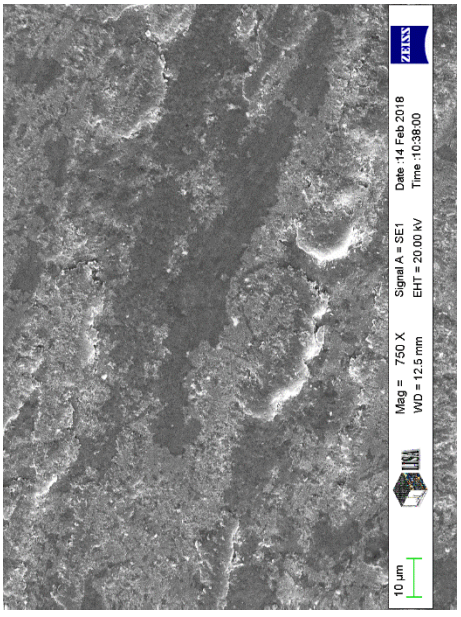
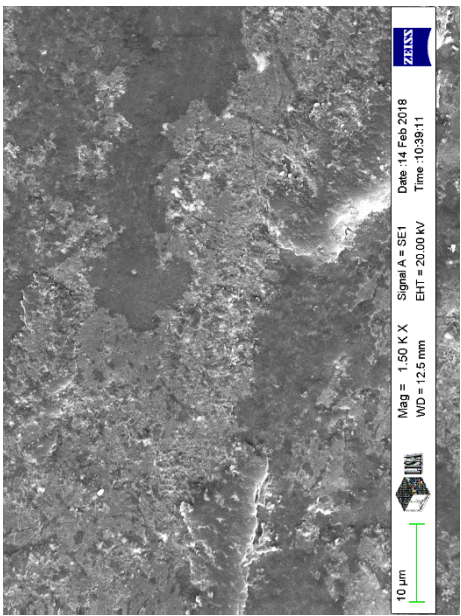
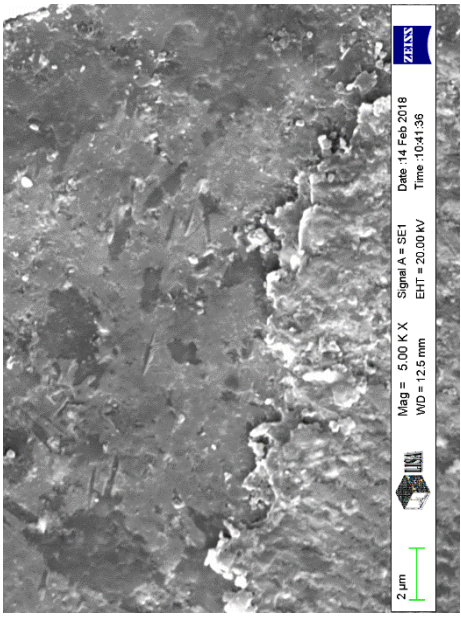
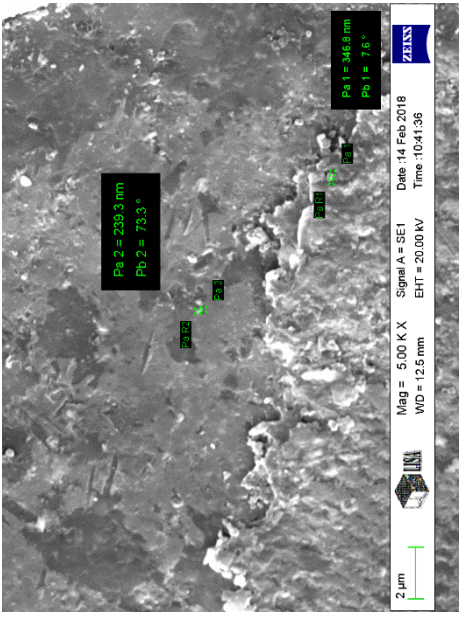
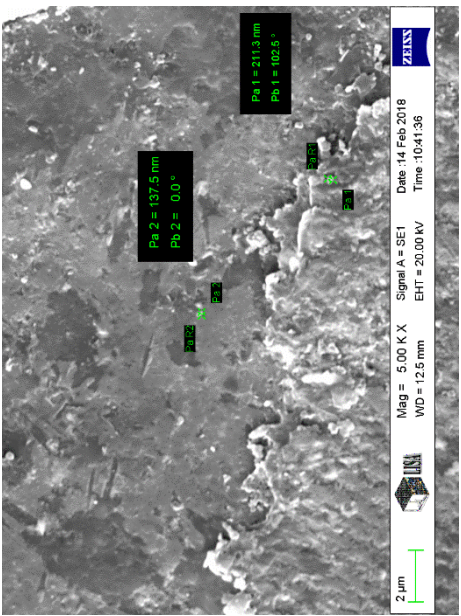
SPS_G0_6A_4v; SiC, 200 mm/s, 40 N

1/2

		
s06a4v-01	s06a4v -02	s06a4v -03
		
s06a4v minta 04 foto 1s terület		
		
s06a4v -04		

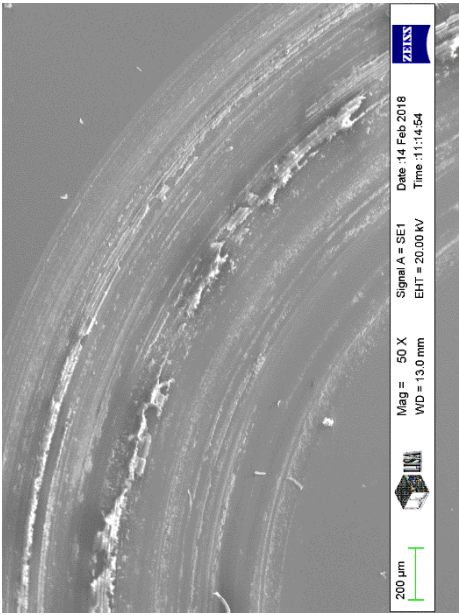
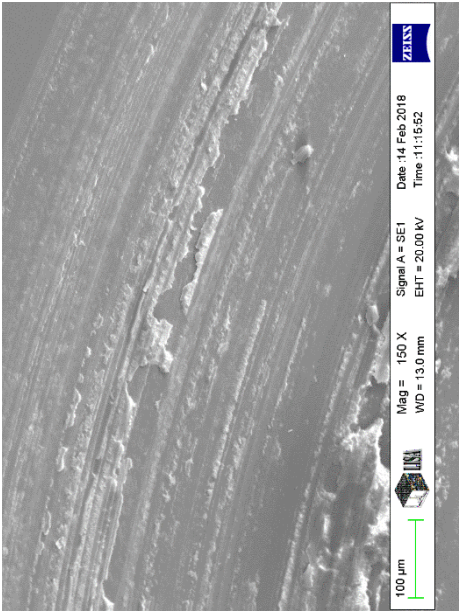
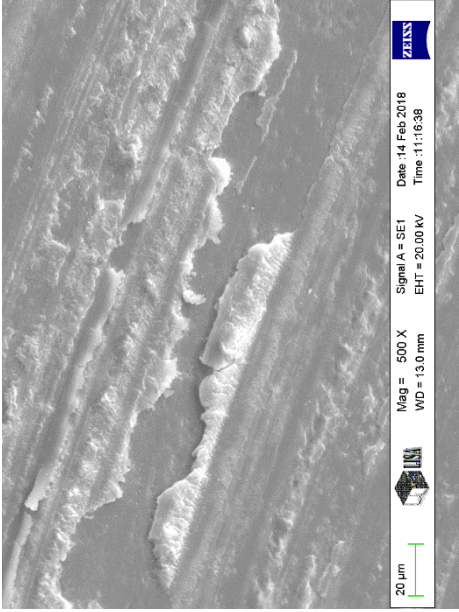
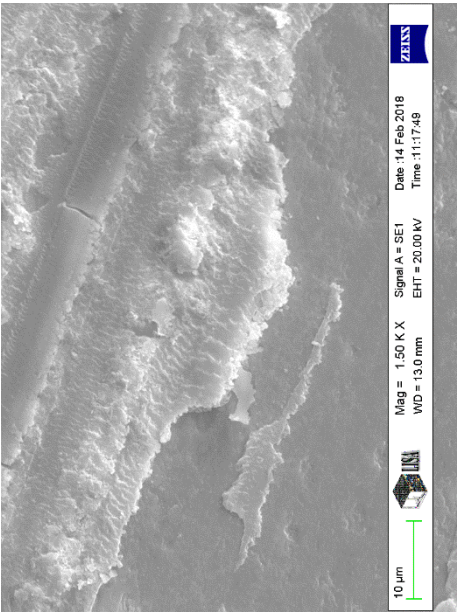
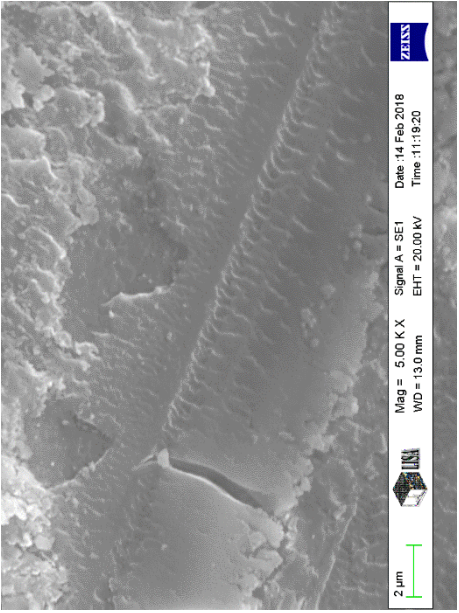
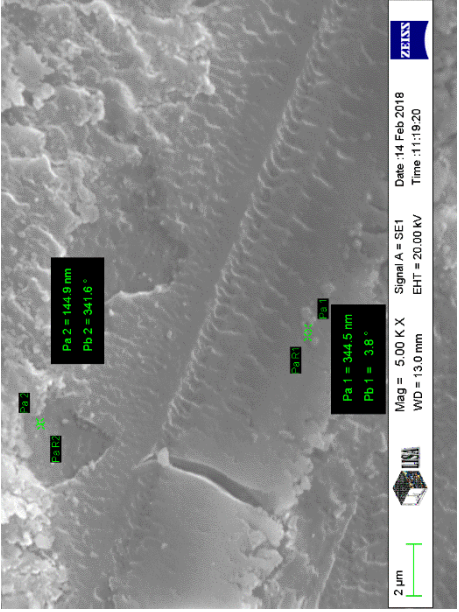
SPS_G0_6A_4v; SiC, 200 mm/s, 40 N

2/2

		
s06a4v -05	s06a4v -06	s06a4v -07
		
s06a4v -08	s06a4v -09	

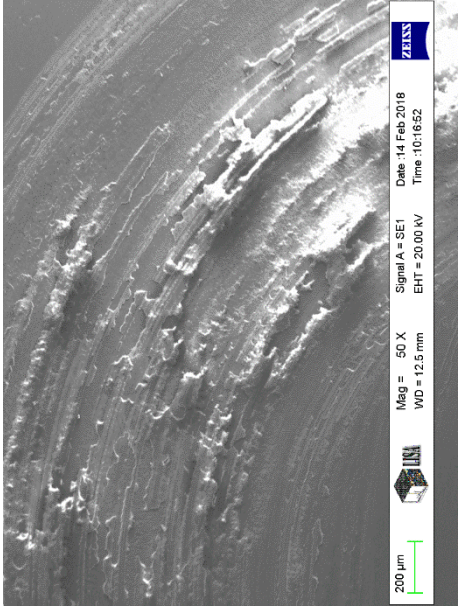
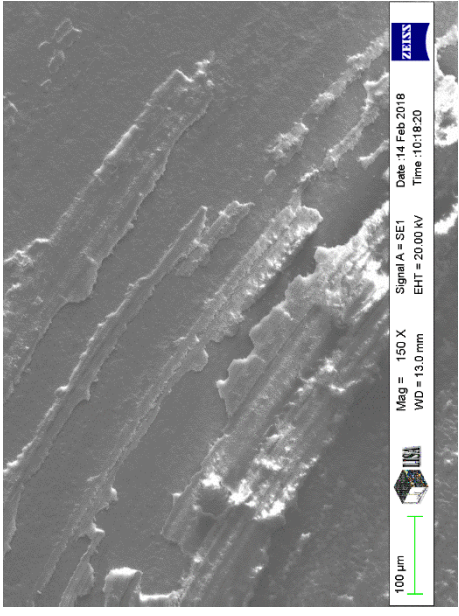
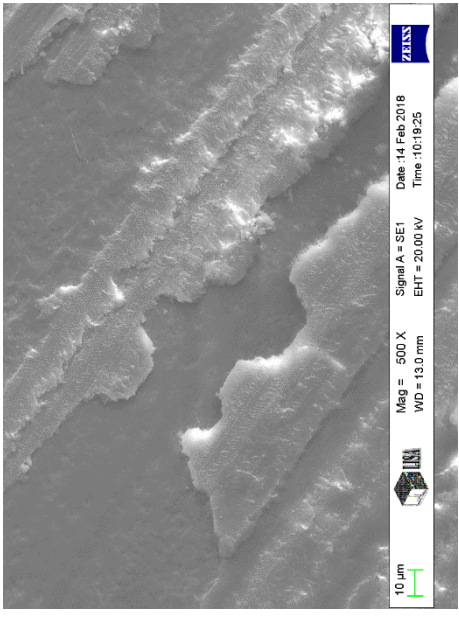
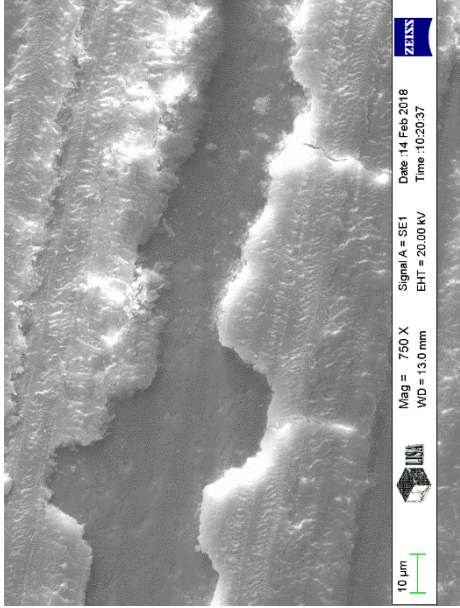
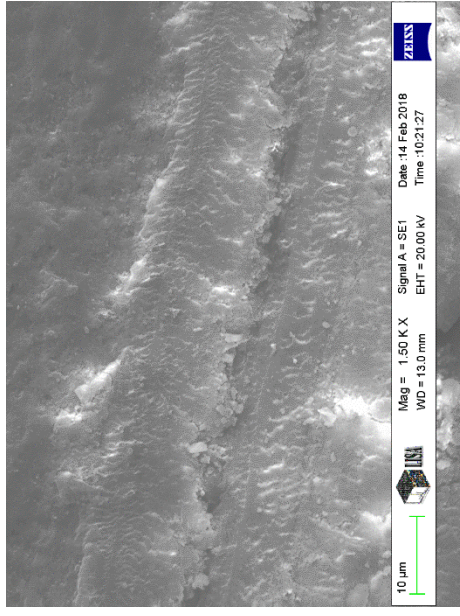
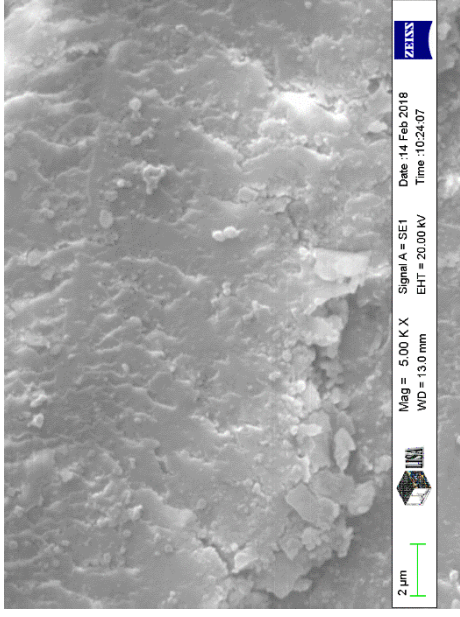
SPS_G0_8B_1pp; SiC, 50 mm/s, 80 N

1/1

		
s08b1pp-01	s08b1pp-02	s08b1pp-03
		
s08b1pp-04	s08b1pp-05	s08b1pp-06

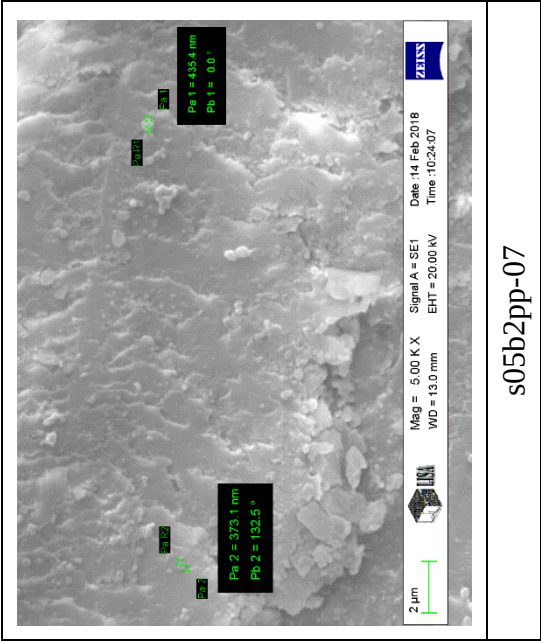
SPS_G0_5A_2pp; SiC, 100 mm/s, 80 N

1/2

		
s05b2pp-01	s05b2pp-02	s05b2pp-03
		
s05b2pp-04	s05b2pp-05	s05b2pp-06

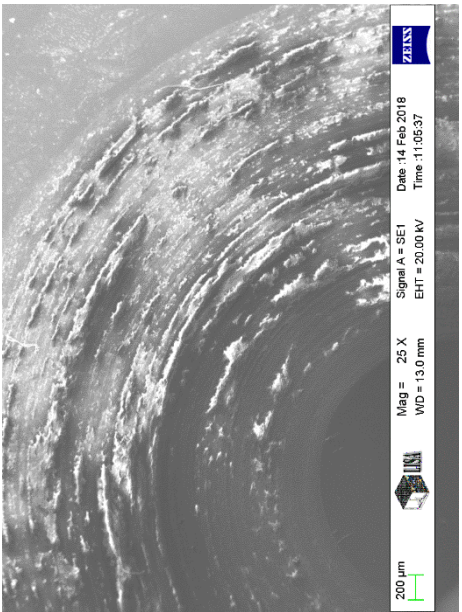
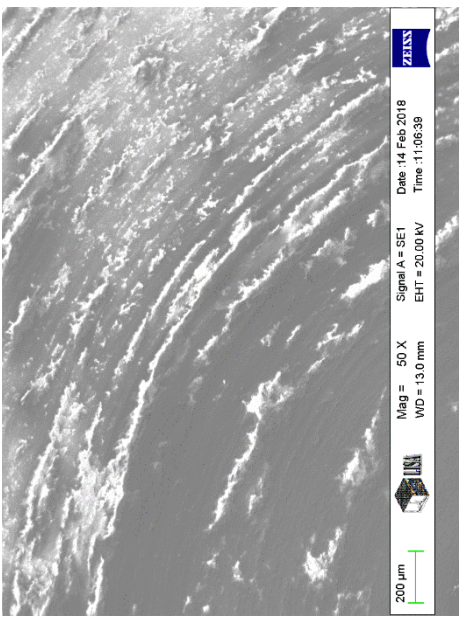
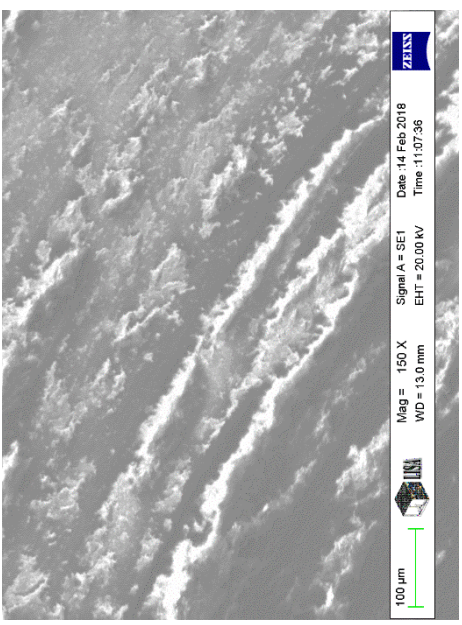
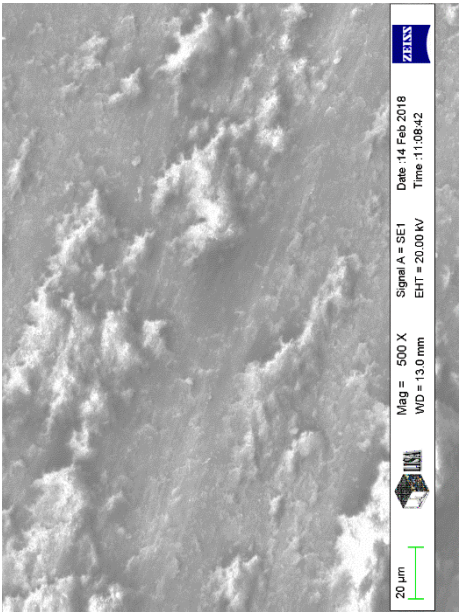
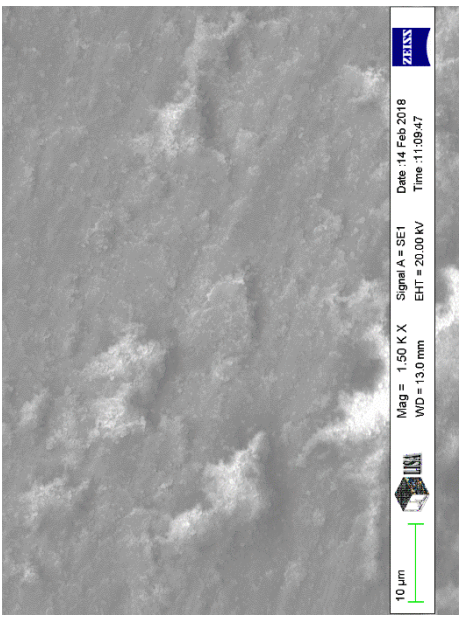
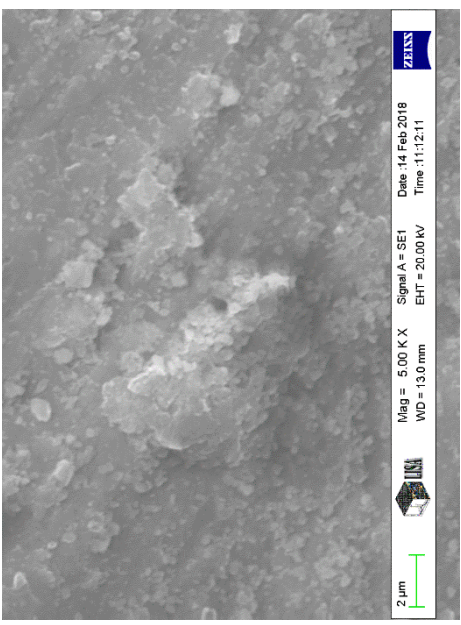
SPS_G0_5A_2pp; SiC, 100 mm/s, 80 N

2/2



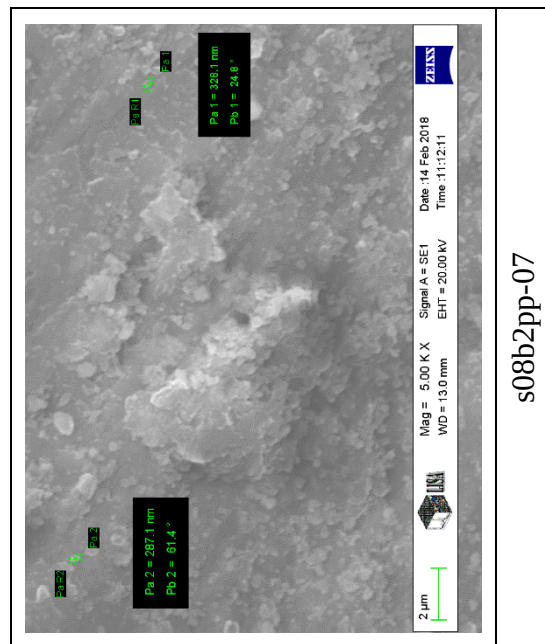
SPS_G0_8B_2pp; SiC, 200 mm/s, 80 N

1/2

		
s08b2pp-01	s08b2pp-02	s08b2pp-03
		
s08b2pp-04	s08b2pp-05	s08b2pp-06

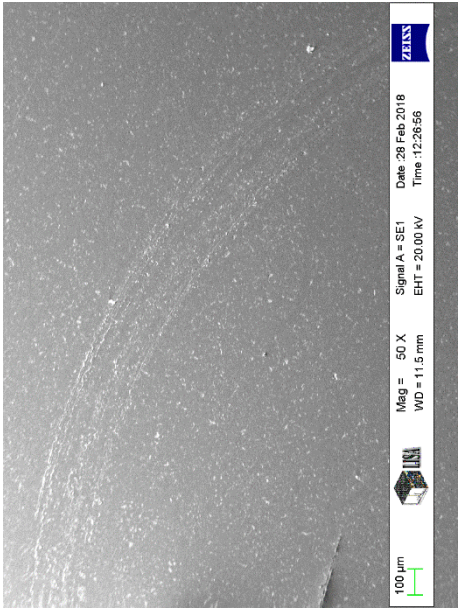
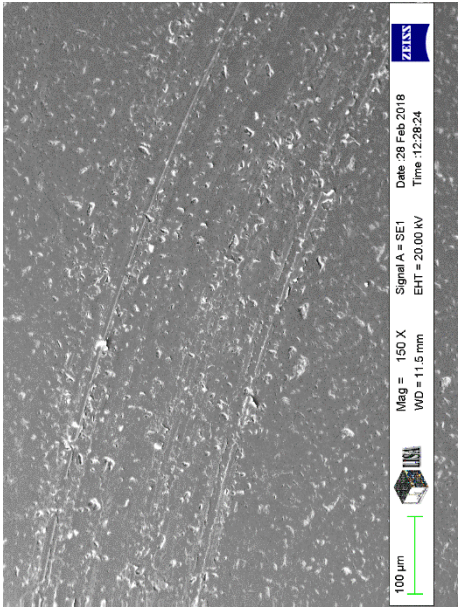
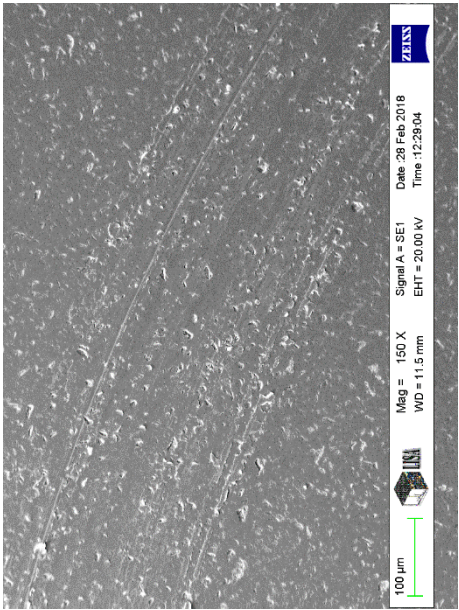
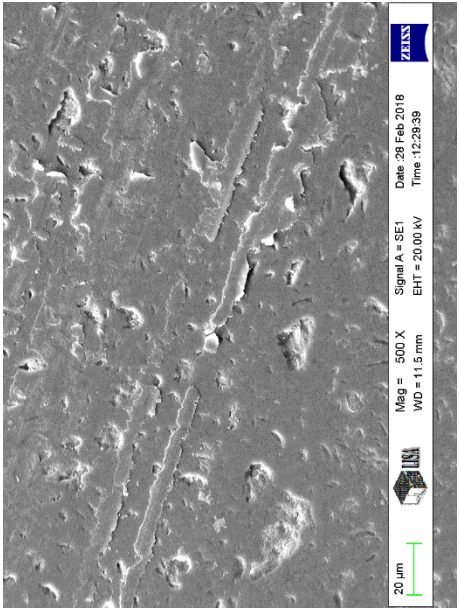
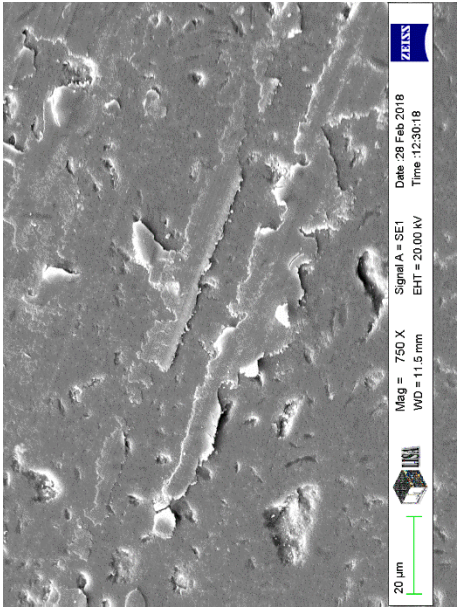
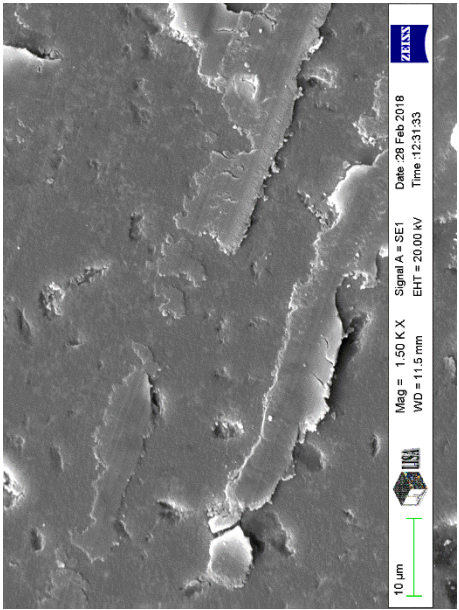
SPS_G0_8B_2pp; SiC, 200 mm/s, 80 N

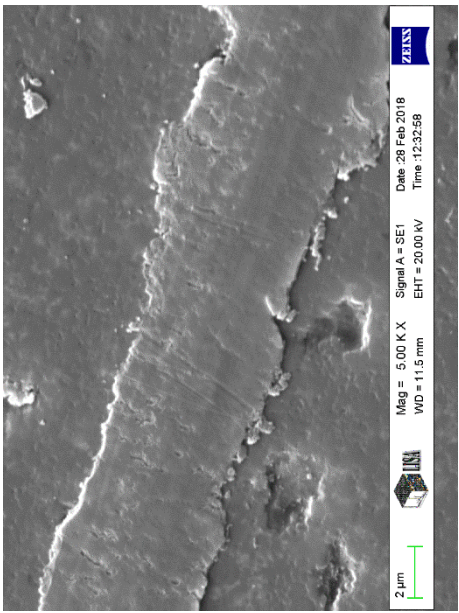
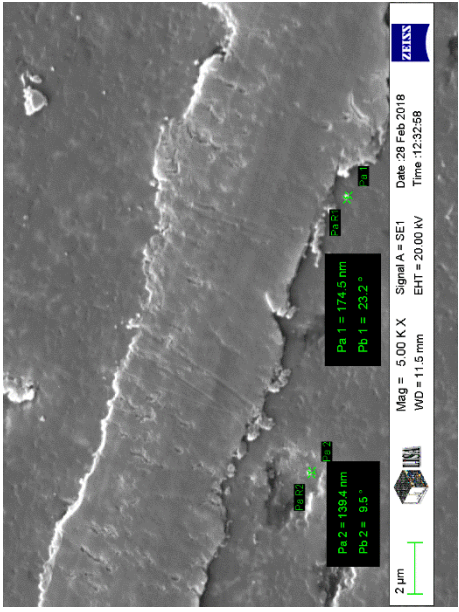
2/2



1/2

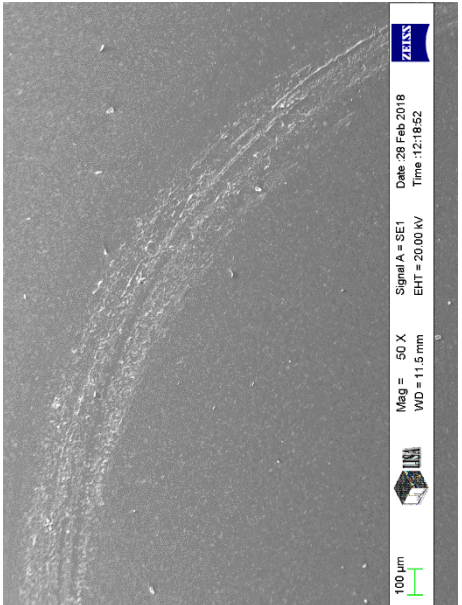
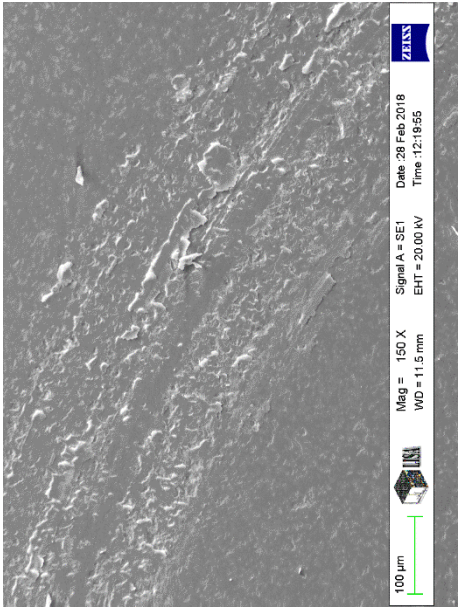
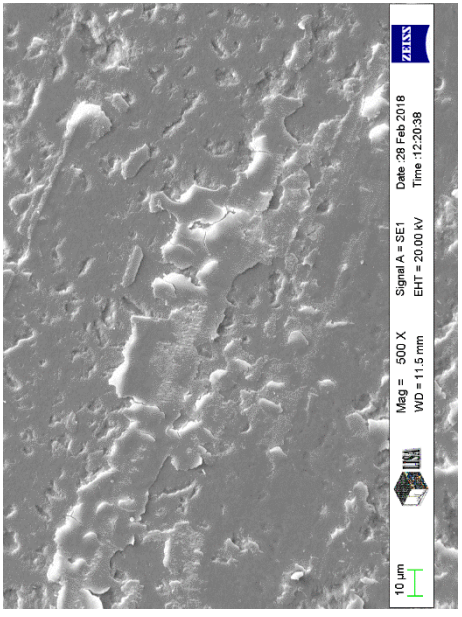
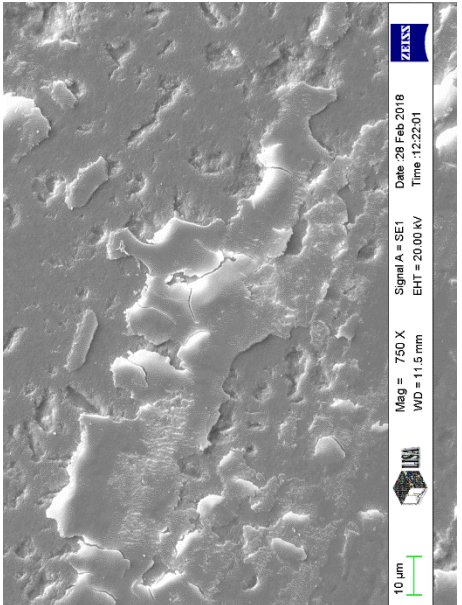
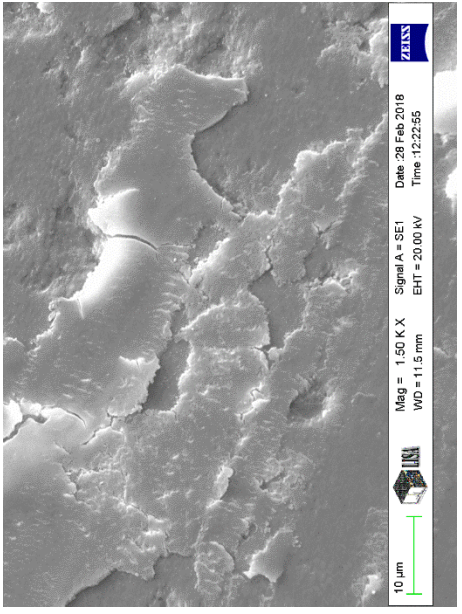
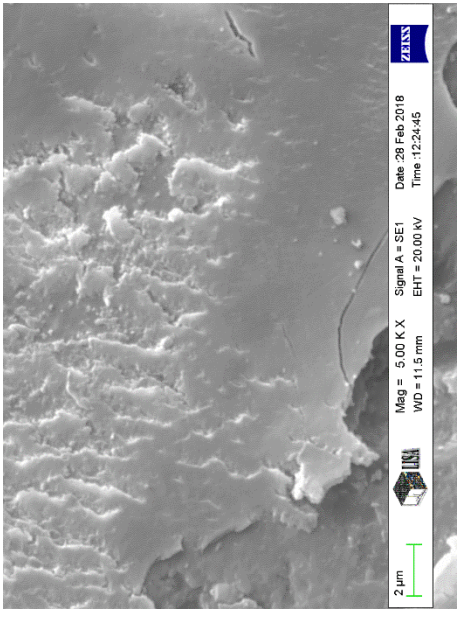
SPS_G3_4B_1p; SiC, 10 mm/s, 10 N

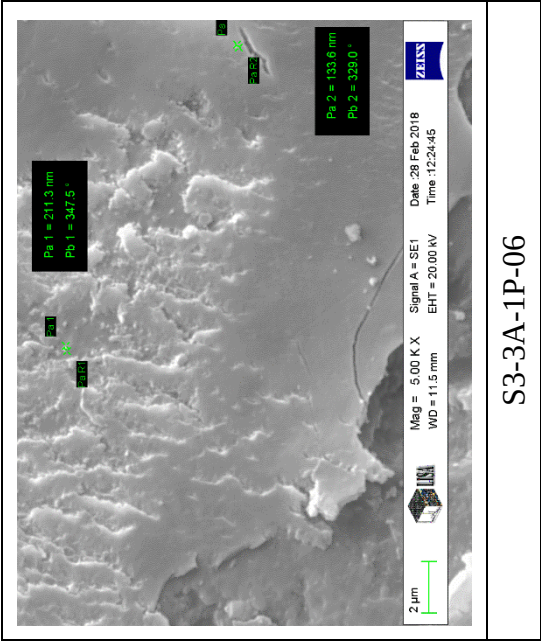
		
S3-4B-1P-01	S3-4B-1P-02	S3-4B-1P-03
		
S3-4B-1P-04	S3-4B-1P-05	S3-4B-1P-06

	
S3-4B-1P-07	S3-4B-1P-08

SPS_G3_3A_1p; SiC, 200 mm/s, 10 N

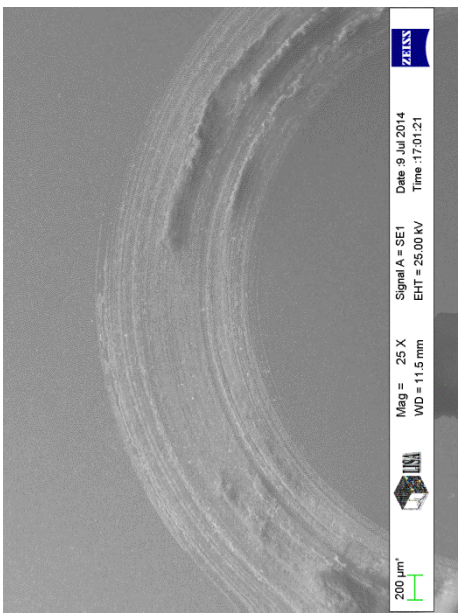
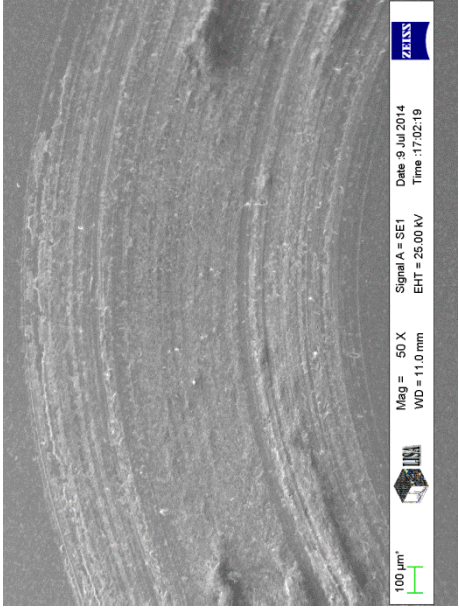
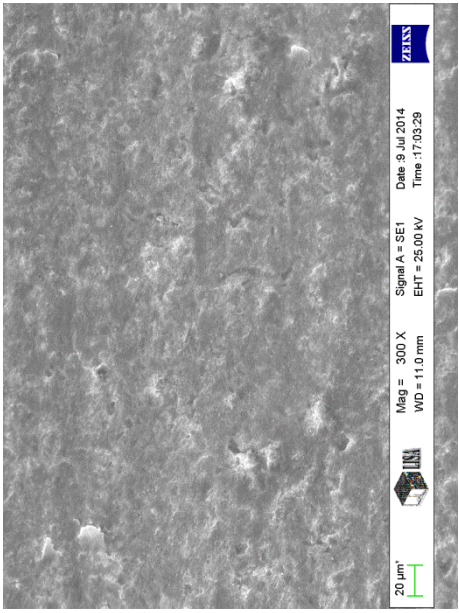
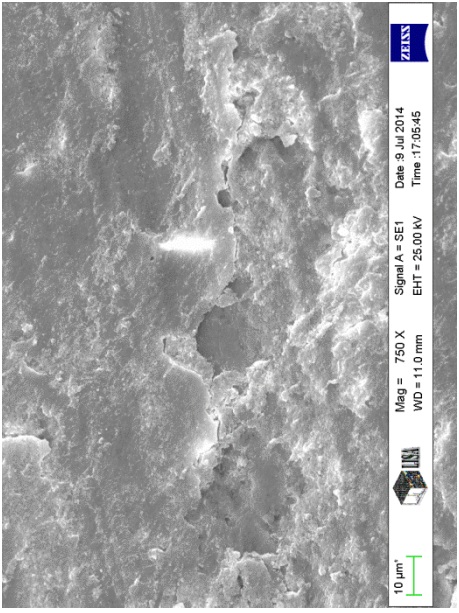
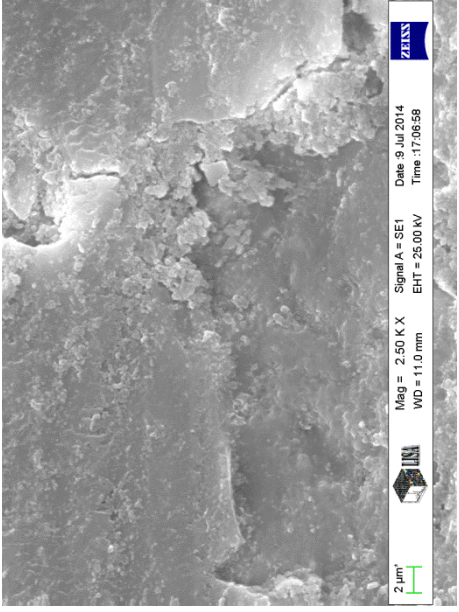
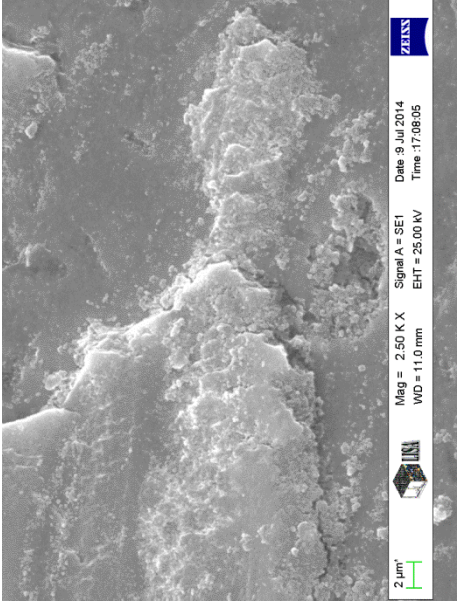
1/2

		
S3-3A-1P-01	S3-3A-1P-02	S3-3A-1P-03
		
S3-3A-1P-04	S3-3A-1P-05	S3-3A-1P-06



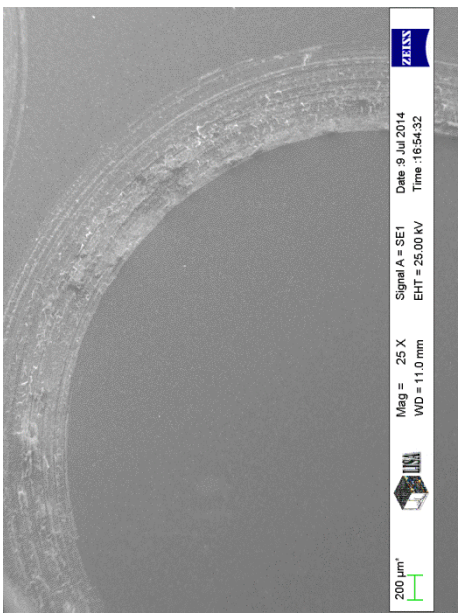
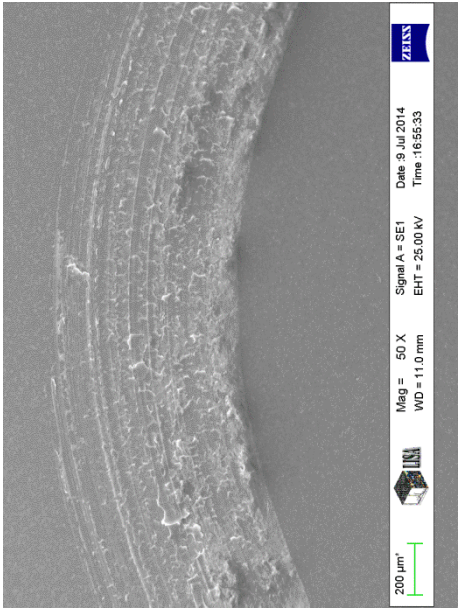
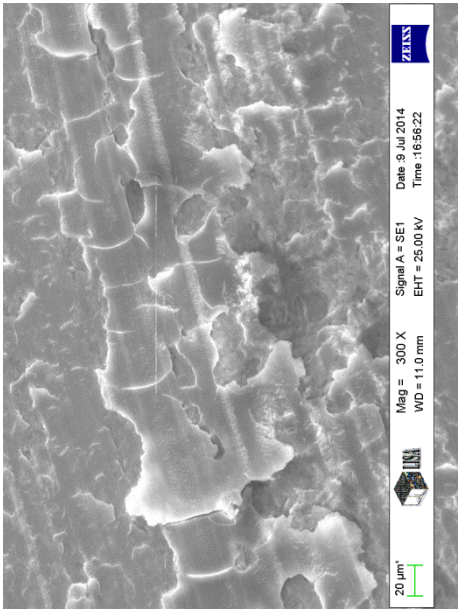
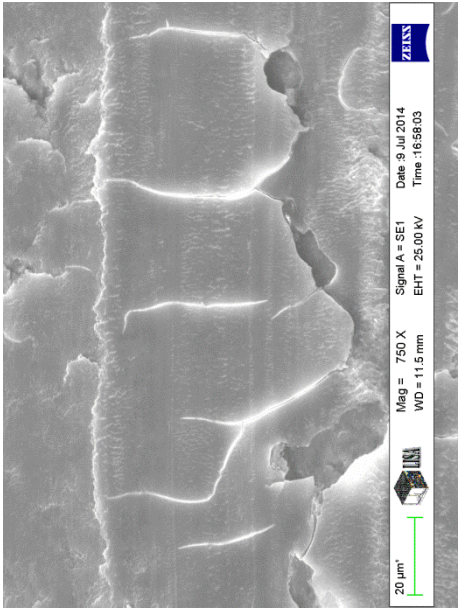
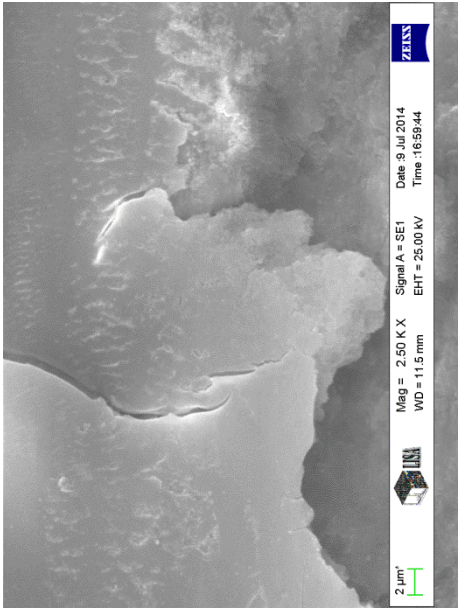
1/1

SPS_G3_4A_4p; SiC, 20 mm/s, 40 N

		
SPS_G3_4A_4p_01	SPS_G3_4A_4p_02	SPS_G3_4A_4p_03
		
SPS_G3_4A_4p_04	SPS_G3_4A_4p_05	SPS_G3_4A_4p_06

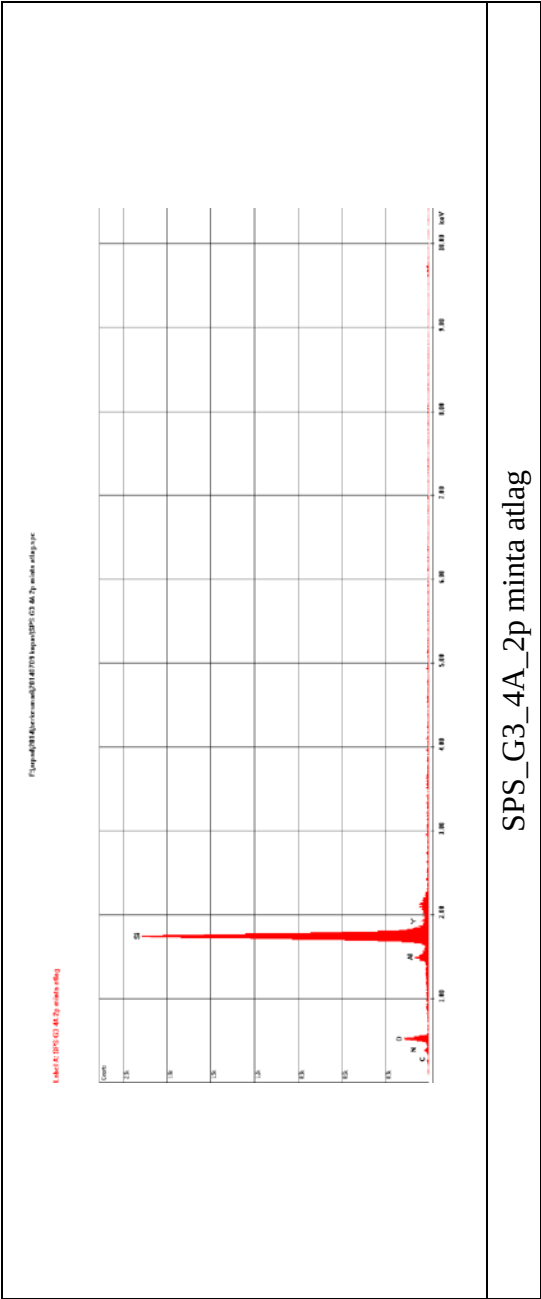
1/2

SPS_G3_4A_2p; SiC, 200 mm/s, 40 N

		
SPS_G3_4A_2p_01	SPS_G3_4A_2p_02	SPS_G3_4A_2p_03
		
SPS_G3_4A_2p_04	SPS_G3_4A_2p_05	

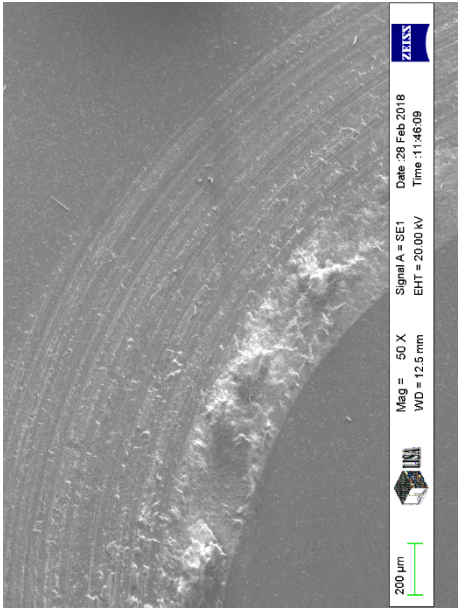
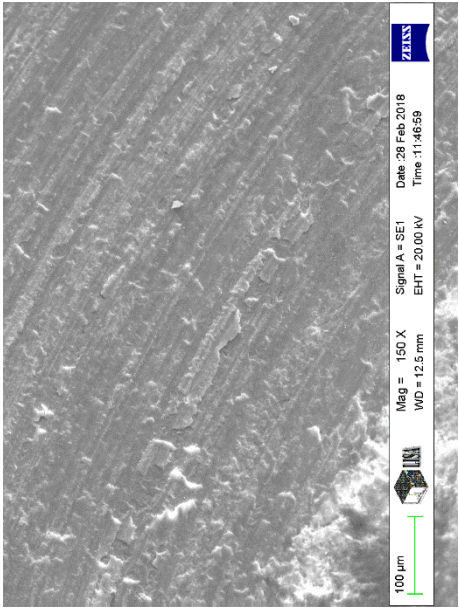
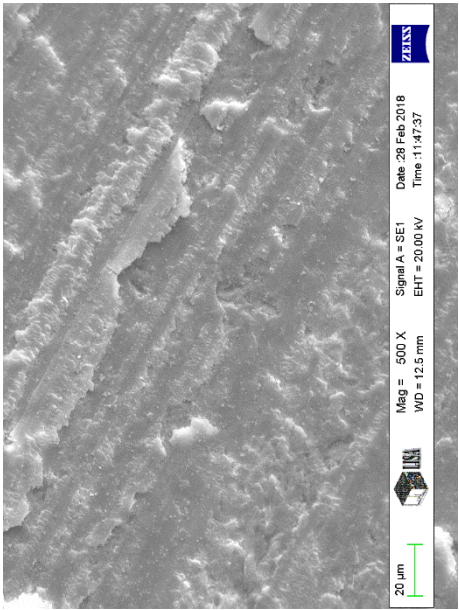
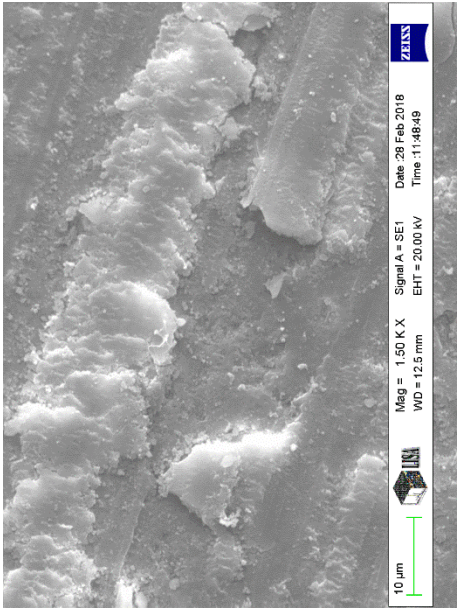
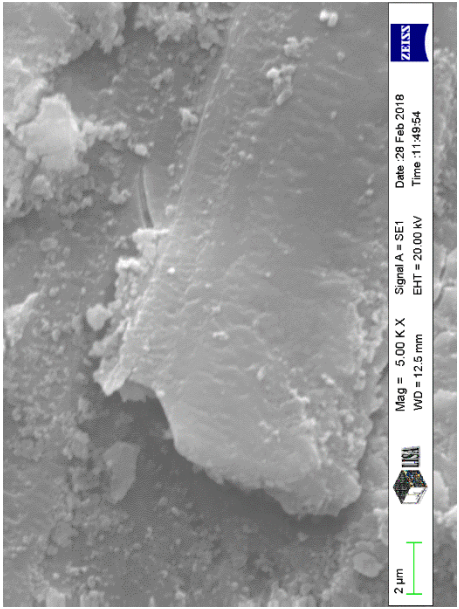
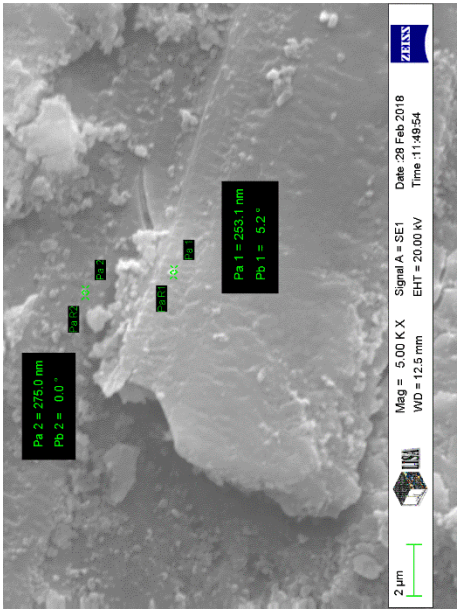
SPS_G3_4A_2p; SiC, 200 mm/s, 40 N

2/2



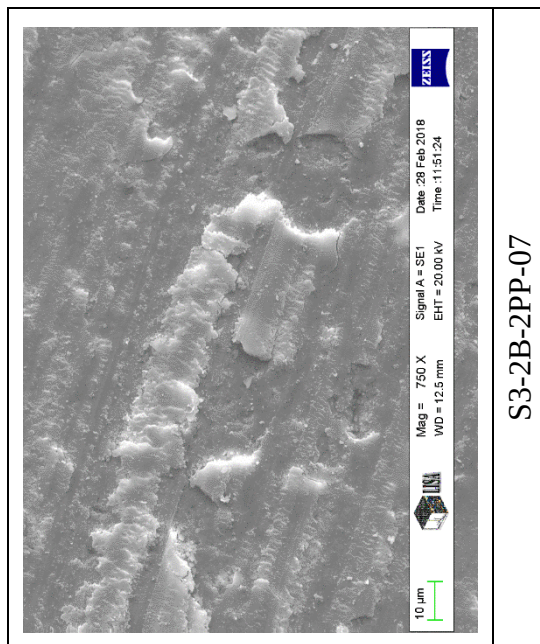
SPS_G3_2B_2pp; SiC, 50 mm/s, 80 N

1/2

		
S3-2B-2PP-01	S3-2B-2PP-02	S3-2B-2PP-03
		
S3-2B-2PP-04	S3-2B-2PP-05	S3-2B-2PP-06

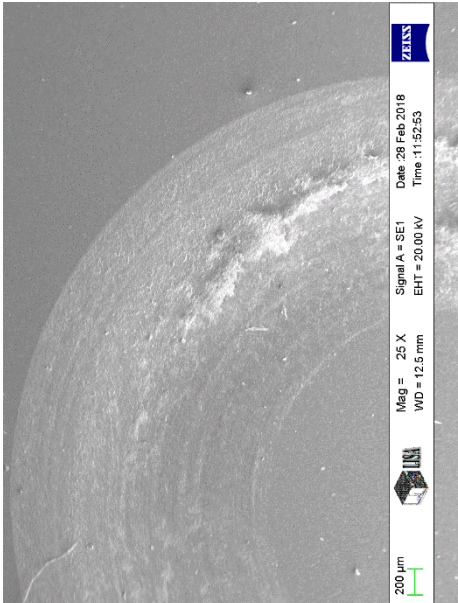
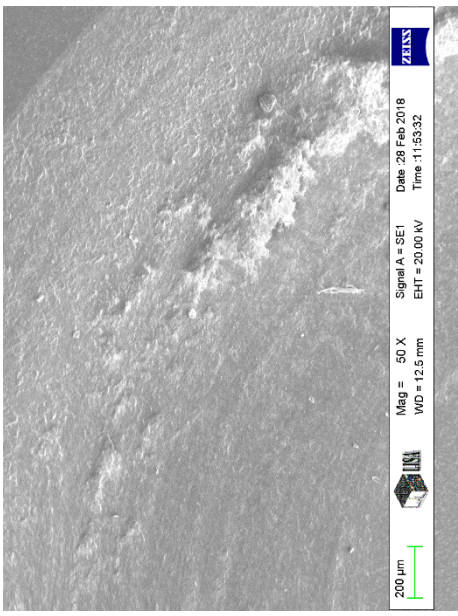
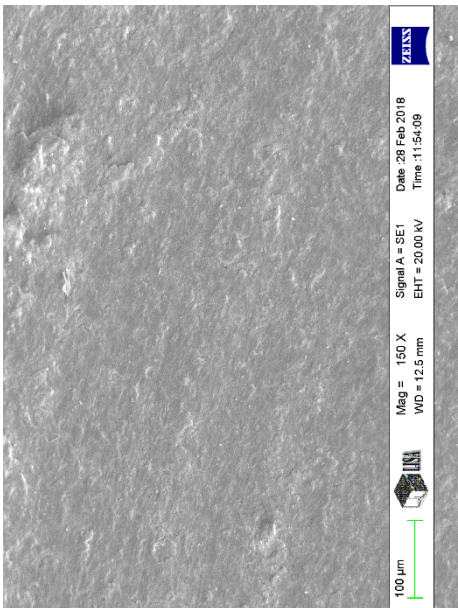
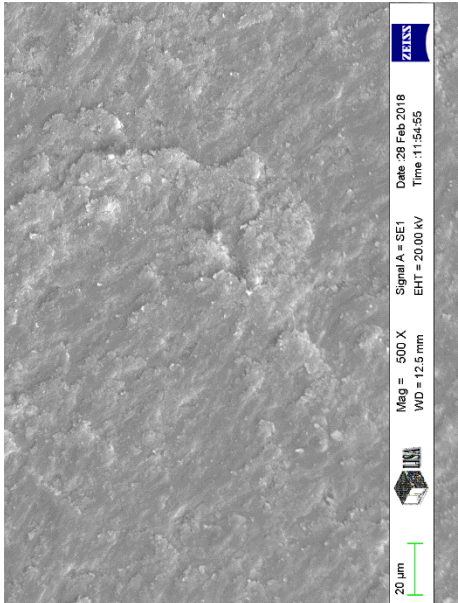
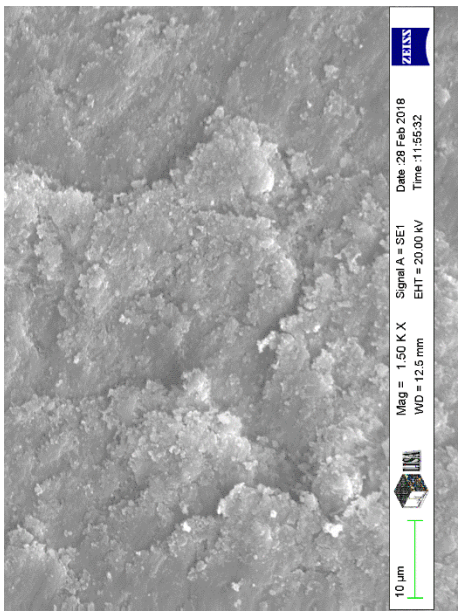
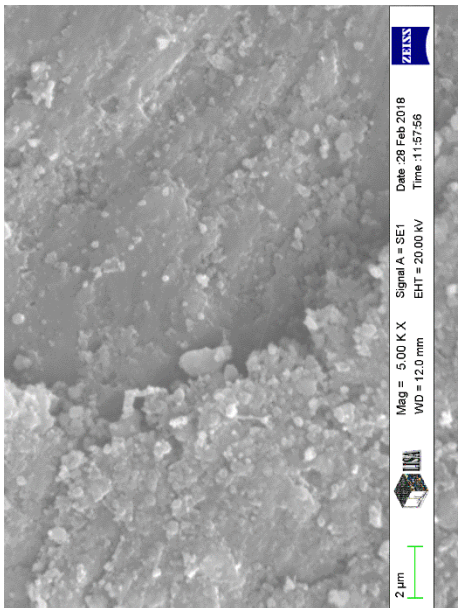
SPS_G3_2B_2pp; SiC, 50 mm/s, 80 N

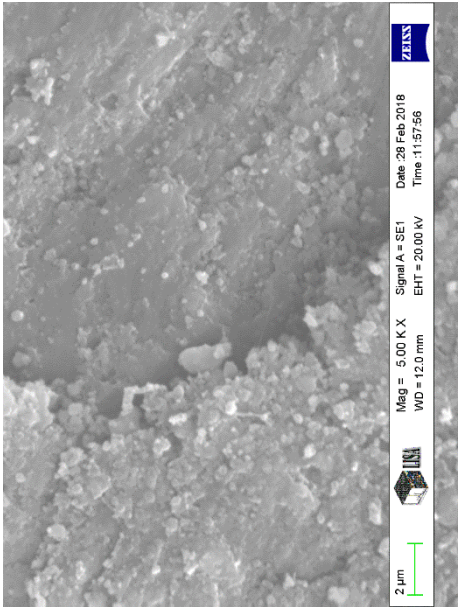
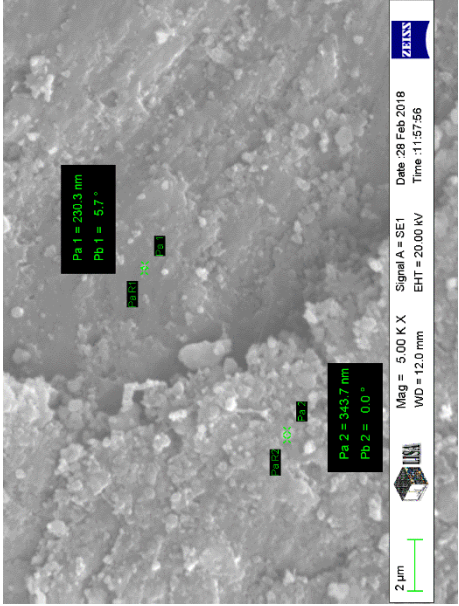
2/2

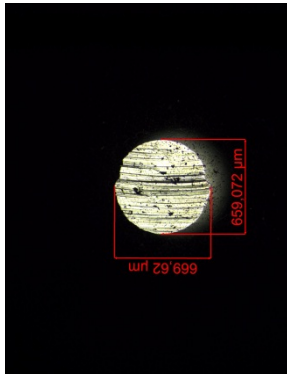
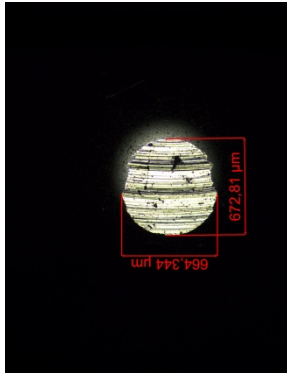
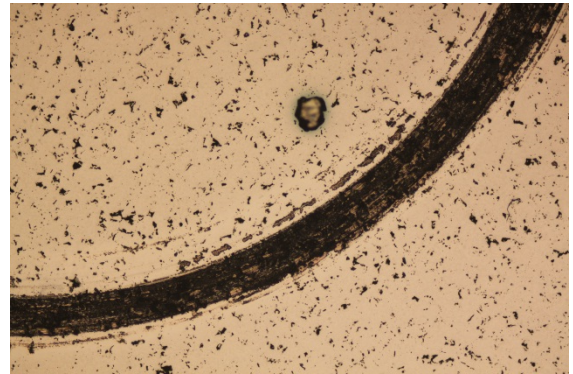
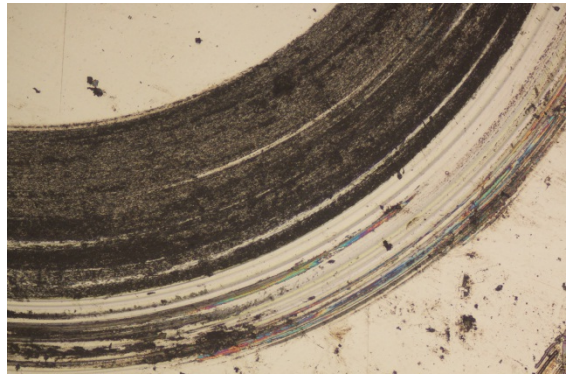
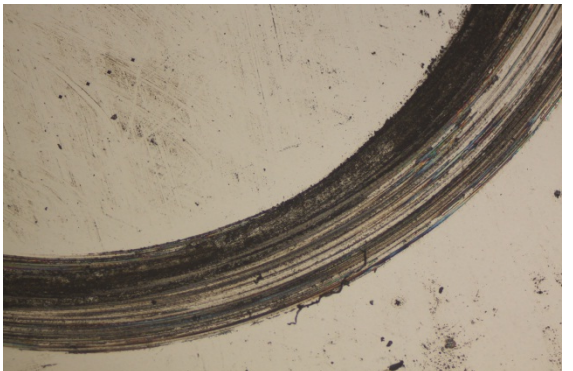


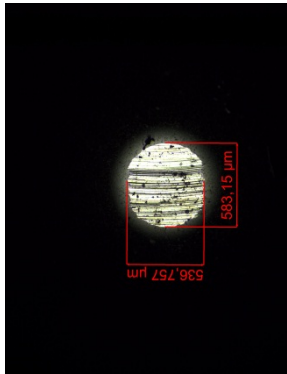
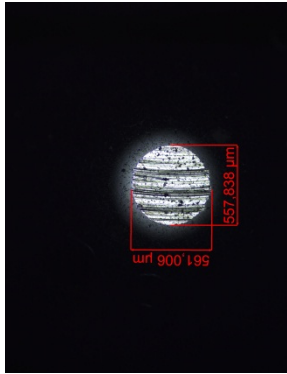
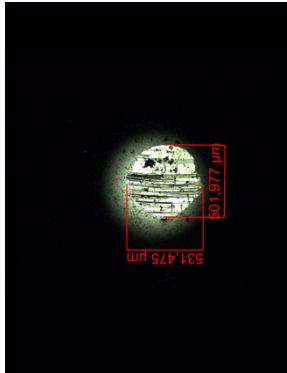
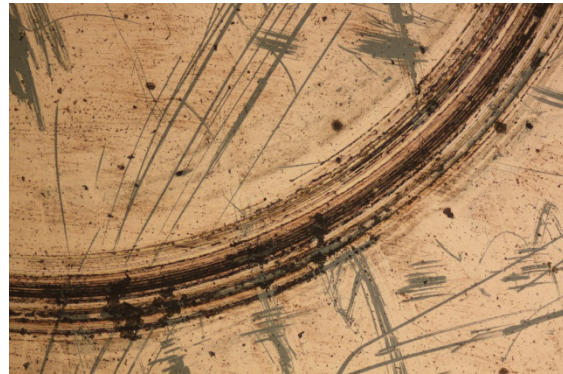
1/2

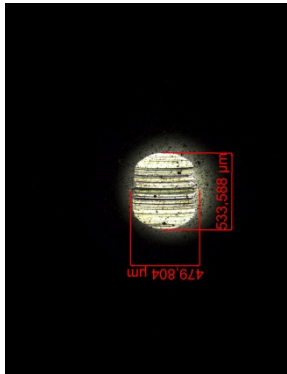
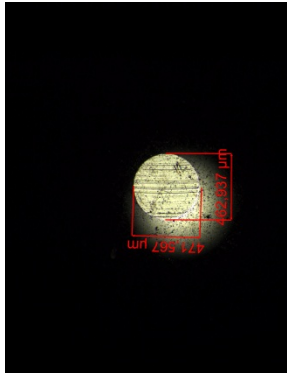
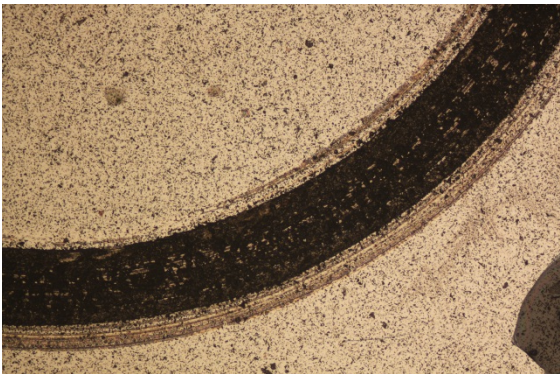
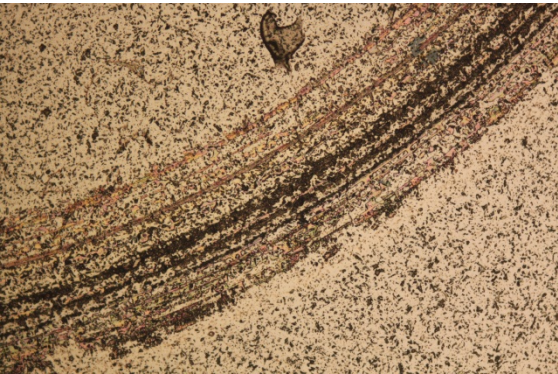
SPS_G3_2B_4pp; SiC, 200 mm/s, 80 N

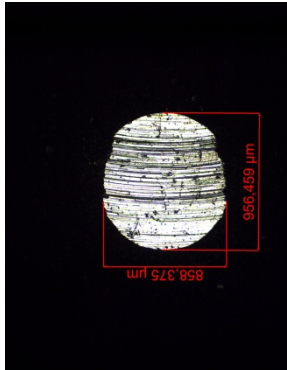
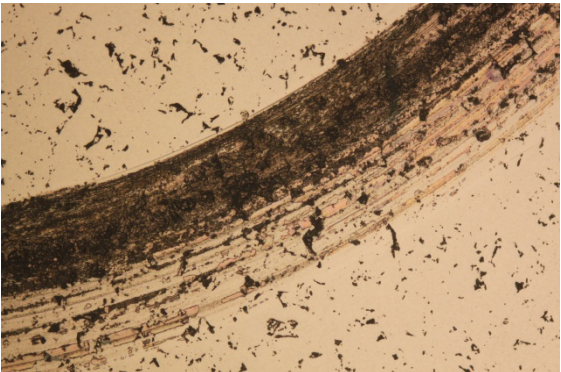
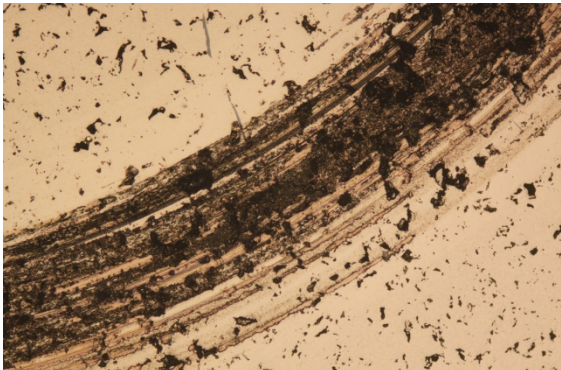
		
S3-2B-4PP-01	S3-2B-4PP-02	S3-2B-4PP-03
		
S3-2B-4PP-04	S3-2B-4PP-05	S3-2B-4PP-06

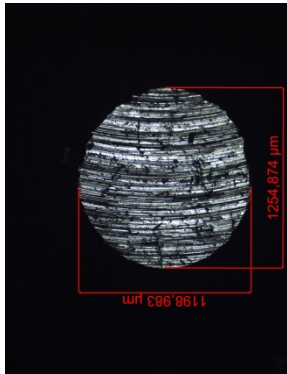
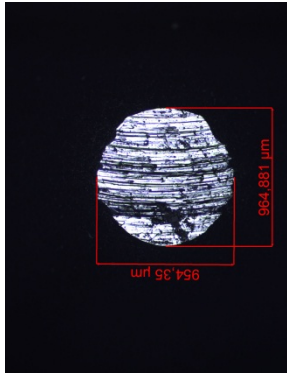
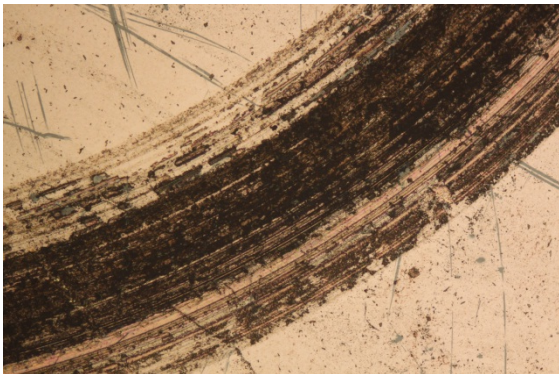
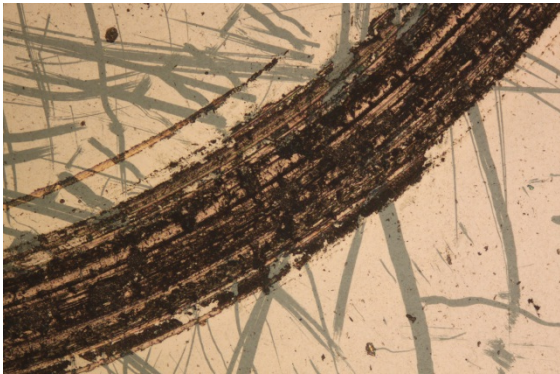
	
S3-2B-4PP-07	S3-2B-4PP-08

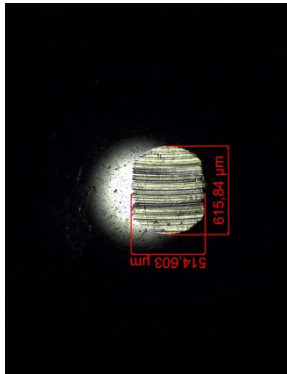
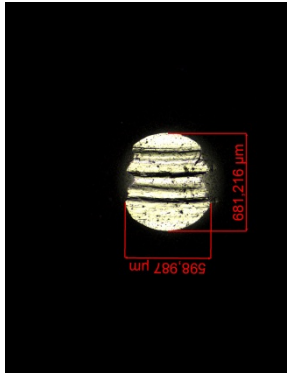
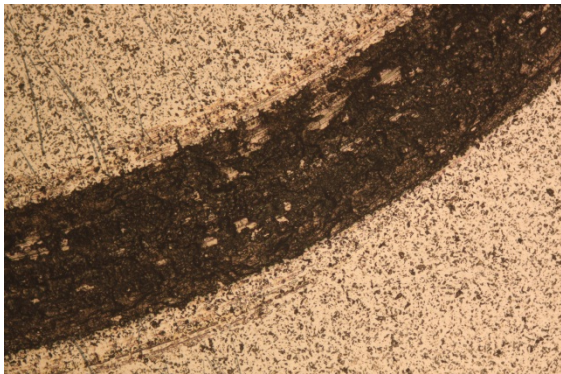
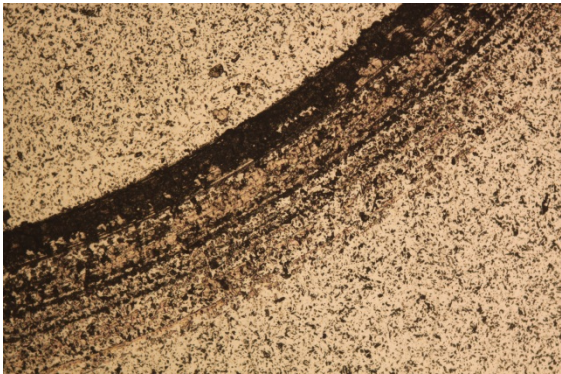
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G0		SPS G0			
F=10 N, v=10mm/s, SiC golyó					
				track: 8A_2p	track: 8A_3p
				track: 7B_1p	track: 9A_1p

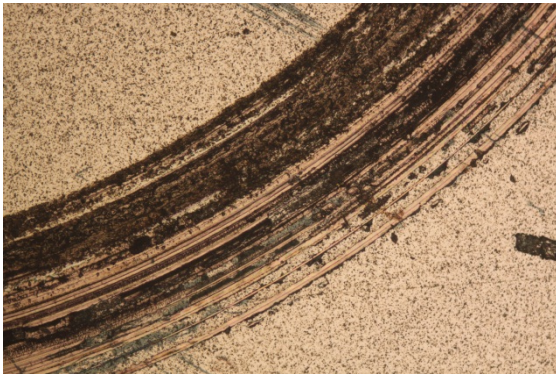
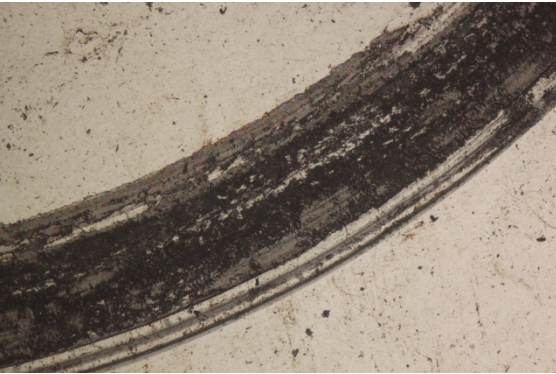
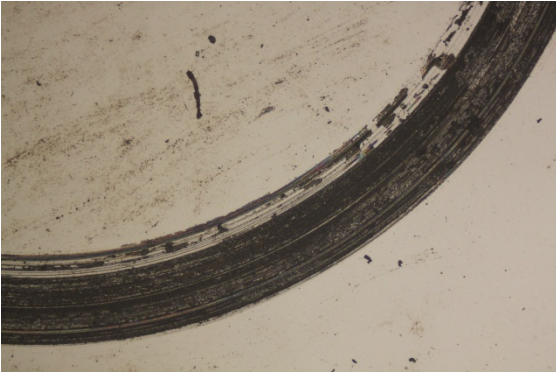
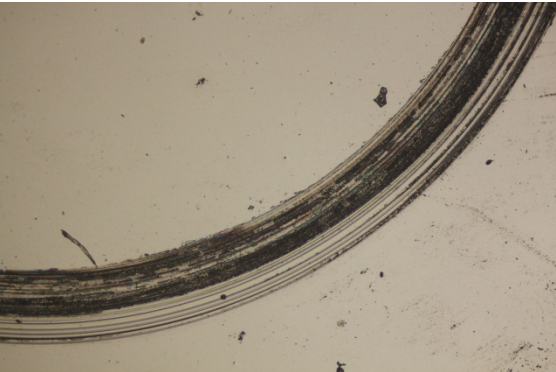
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=10 N, v=10mm/s, SiC golyó				
				
				
track: 1B_1p	track: 6A_3p	track: 1B_1p	track: —	

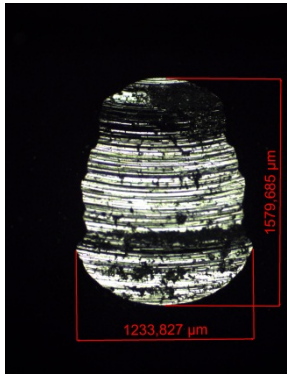
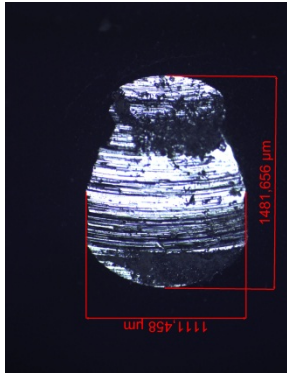
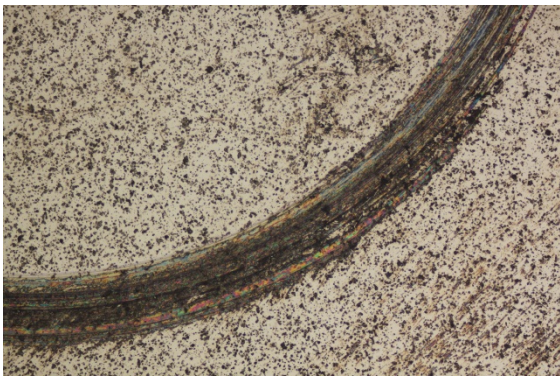
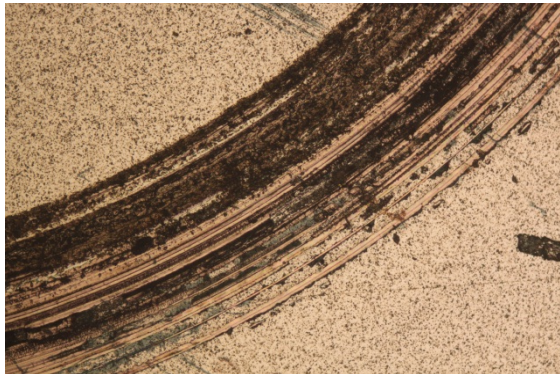
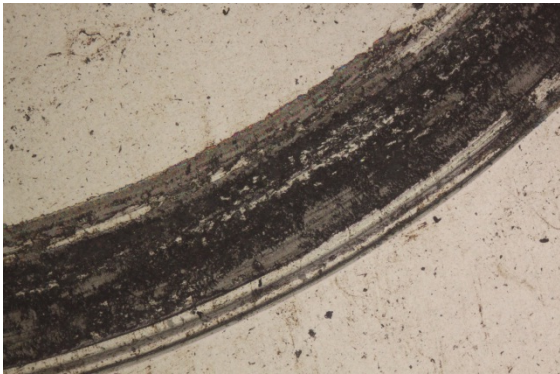
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=10 N, v=10mm/s, SiC golyó				
				
		track: 5A_6p	track: 4B_1p	track: —
track: 5A_5p				

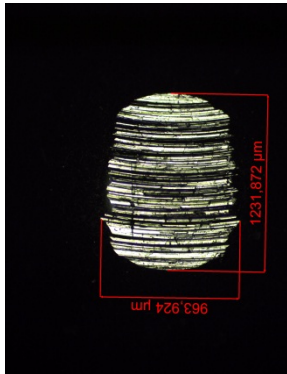
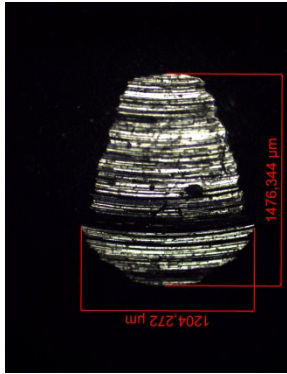
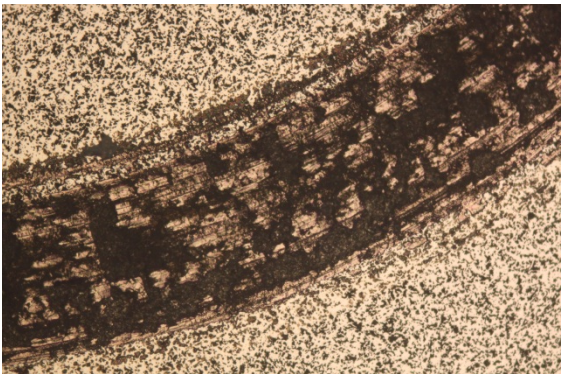
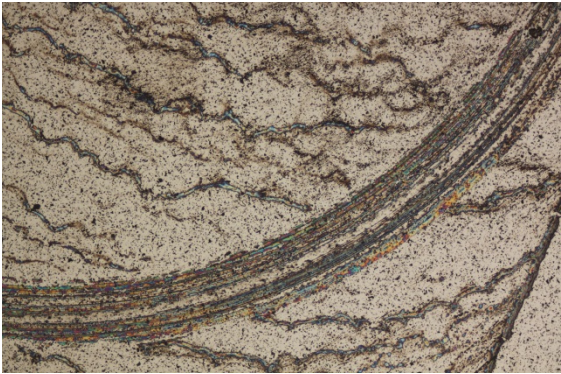
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G0		SPS G0	
F=10 N, v=20mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 10A_1v	track: 8A_1p	track: —	track: —

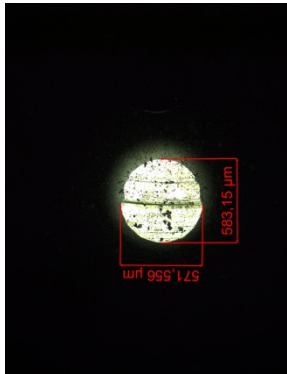
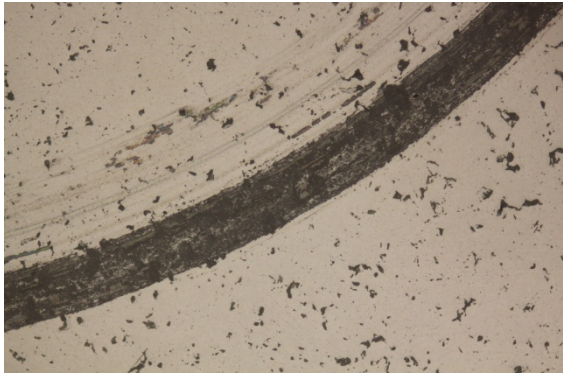
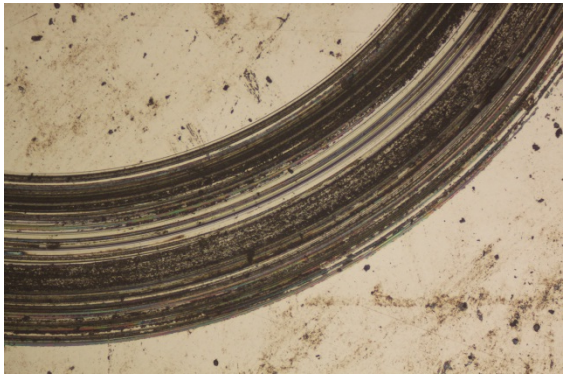
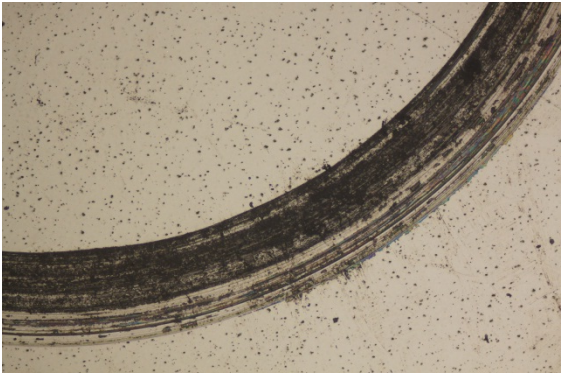
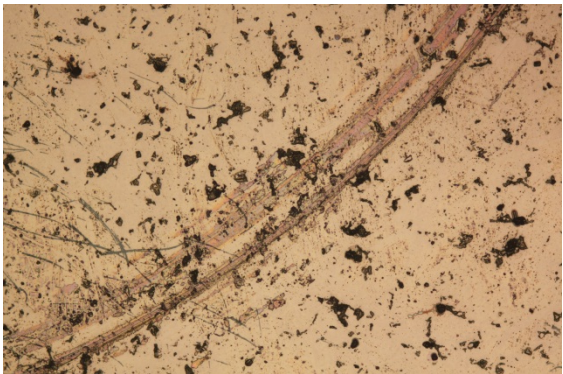
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G1		SPS G1	
F=10 N, v=20mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 6A_4p	track: 6A_5p	track: —	track: —

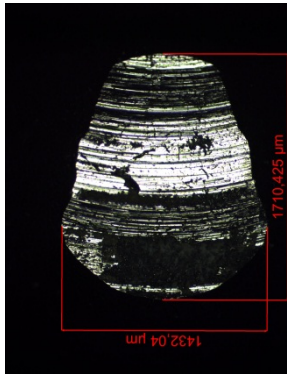
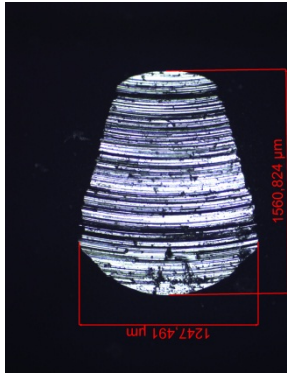
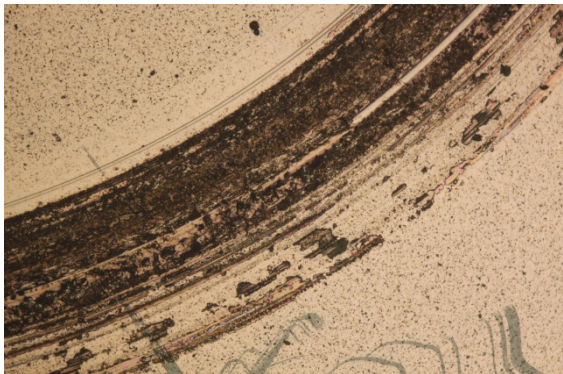
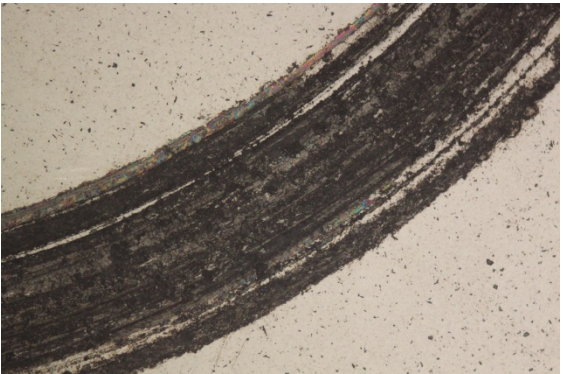
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G3		SPS G3	
F=10 N, v=20mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 5A_1p	track: 5A_2p	track: —	track: —

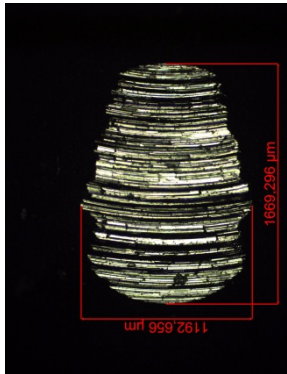
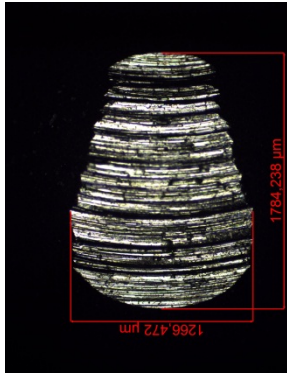
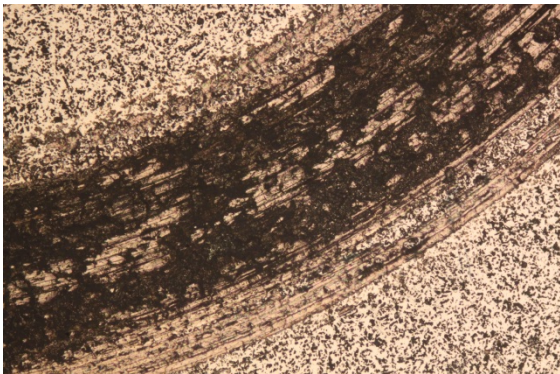
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=10 N, v=50mm/s, SiC golyó				
				
track: 3A_3p	track: 5A_3pp	track: 6B_1p	track: 9A_2p	

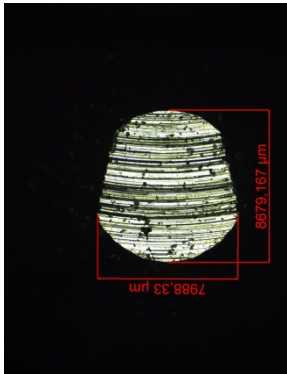
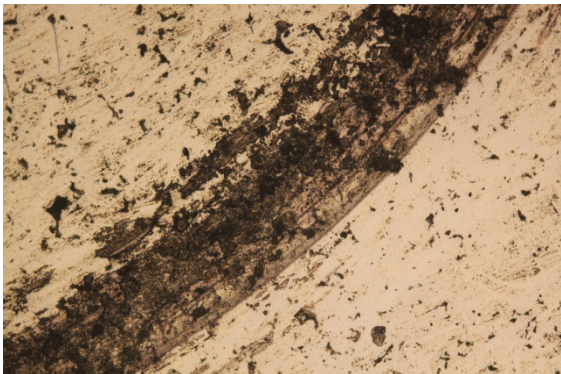
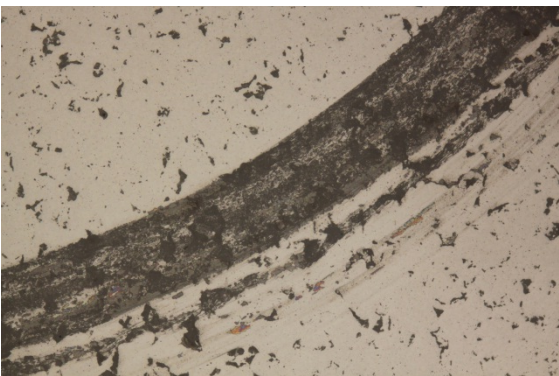
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=10 N, v=50mm/s, SiC golyó				
				
				
track: 3A_3p	track: 5A_pp3	track: 1B_2p	track: —	

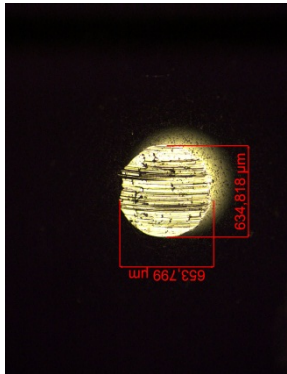
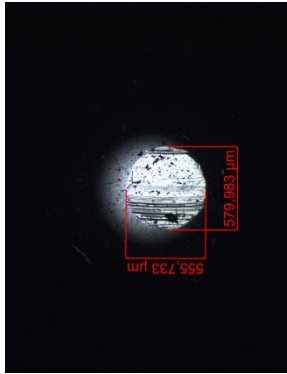
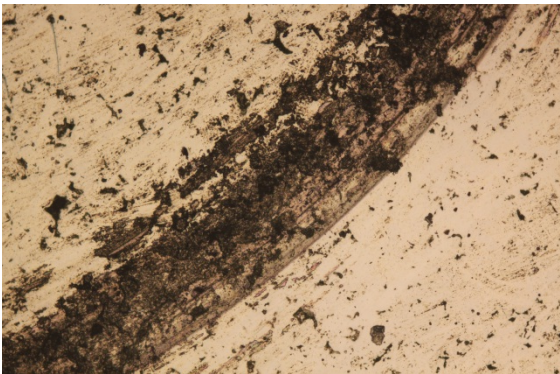
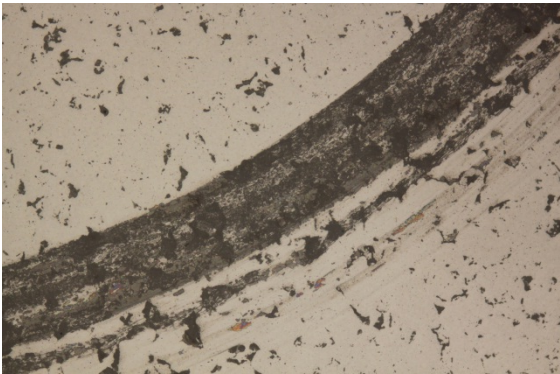
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=10 N, v=50mm/s, SiC golyó				
				
			track: 4B_2p	track: —
		track: 3A_3p		
		track: 2A_p1		

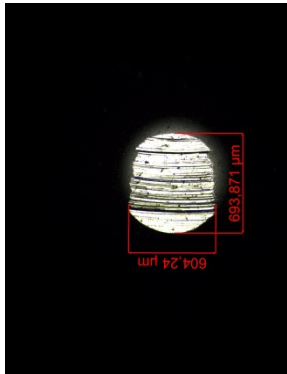
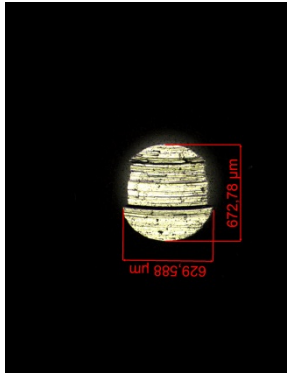
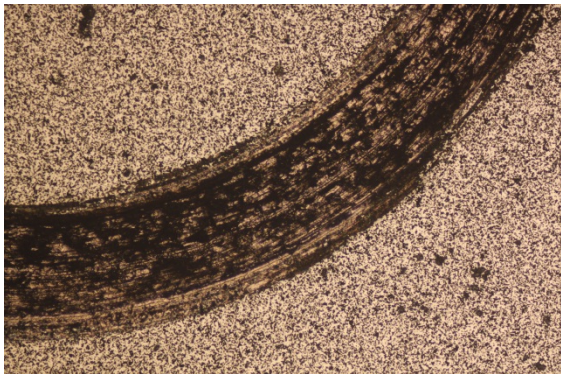
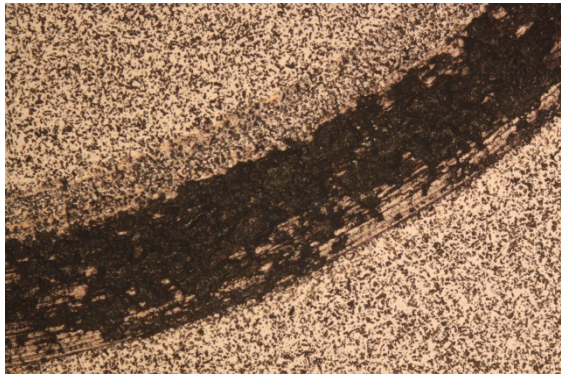
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=10 N, v=100mm/s, SiC golyó				
				track: 11B_1p track: 6B_2p track: 8A_2p
				track: 11A_2p

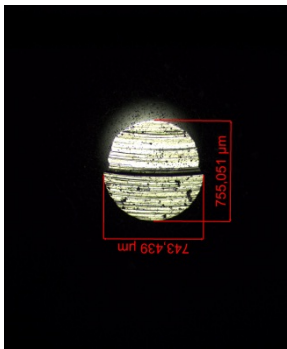
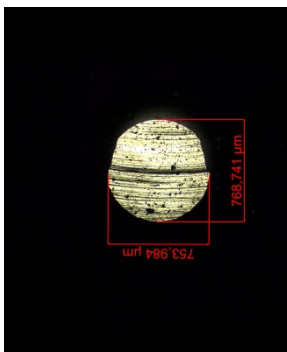
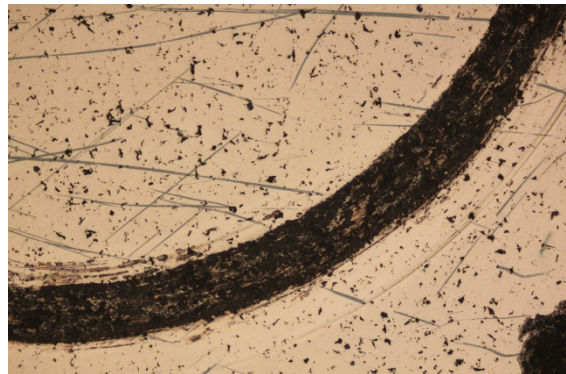
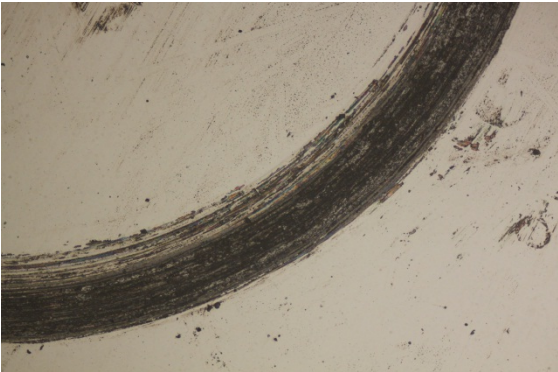
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G1		SPS G1	
F=10 N, v=100mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 3A_p1	track: 5A_2p	track: —	track: —

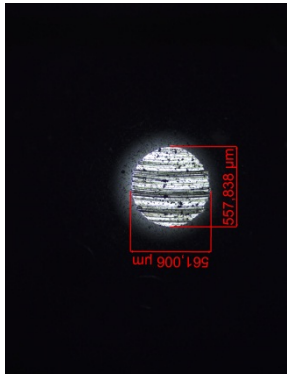
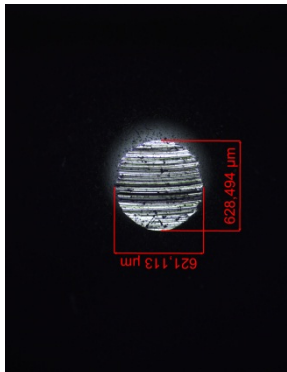
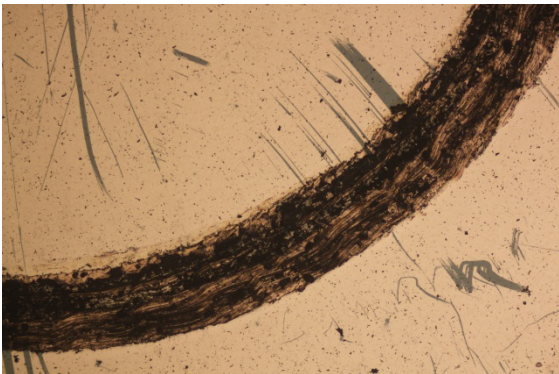
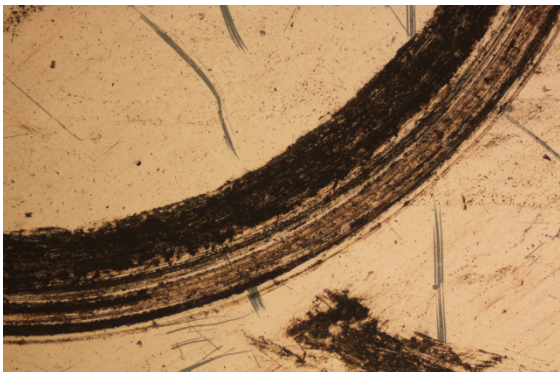
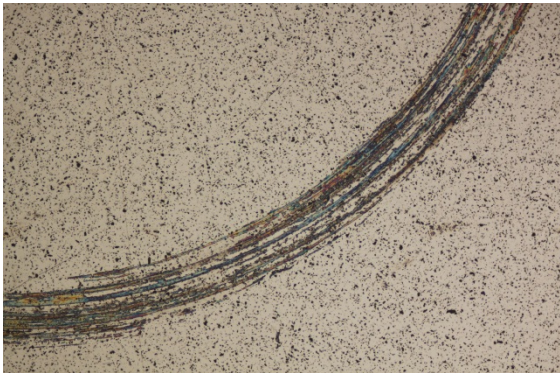
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G3		SPS G3	
F=10 N, v=100mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 2A_p2	track: 3A_2p	track: —	track: —

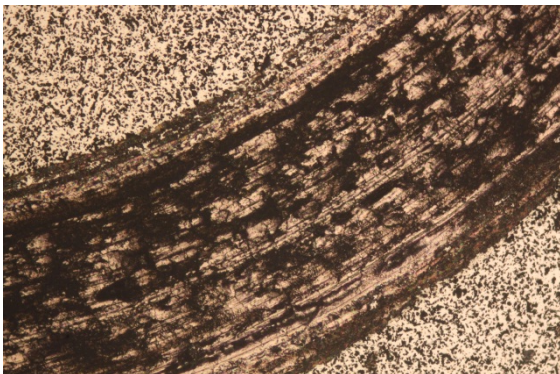
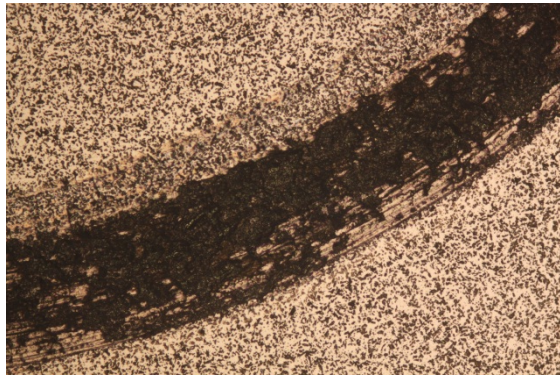
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G0		SPS G0	
F=10 N, v=150 mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 11A_1p	track: 11B_2p	track: —	track: —

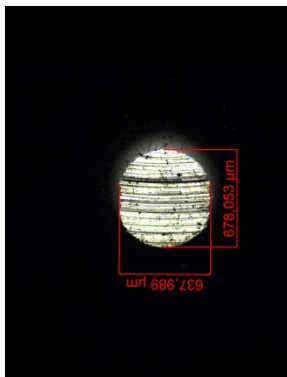
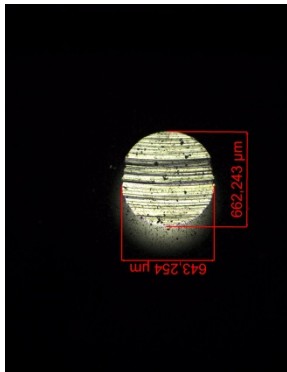
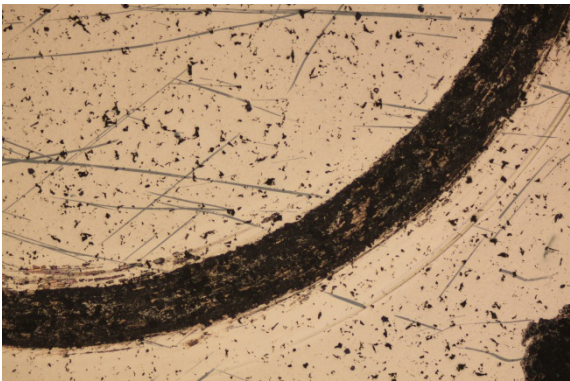
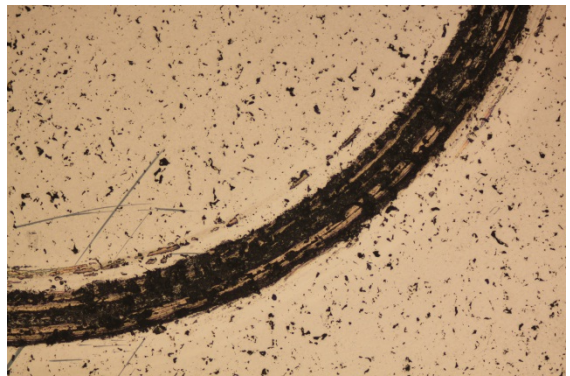
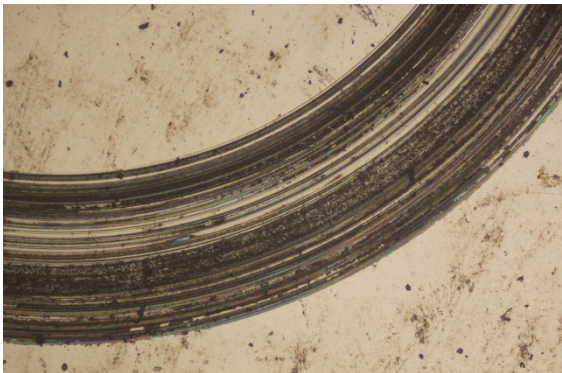
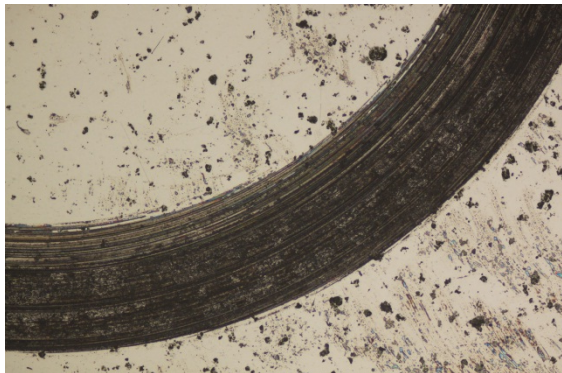
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G1		SPS G1	
F=10 N, v=150 mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 3A_p2	track: 5A_p1	track: —	track: —

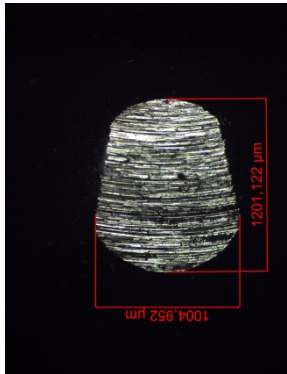
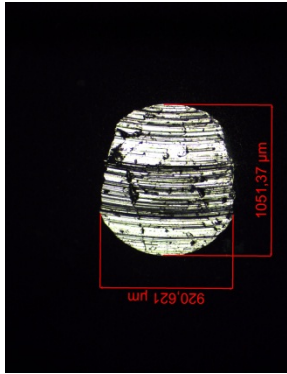
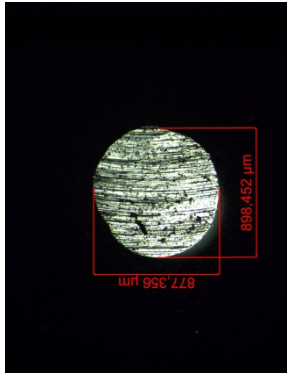
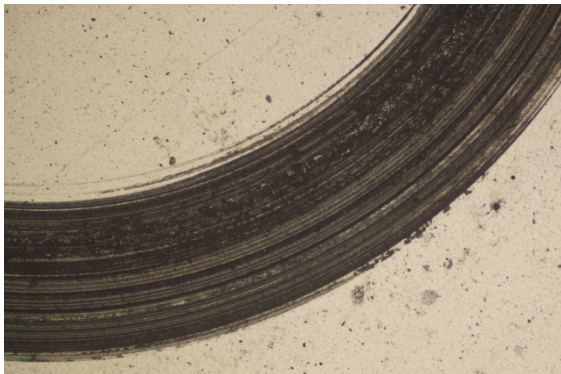
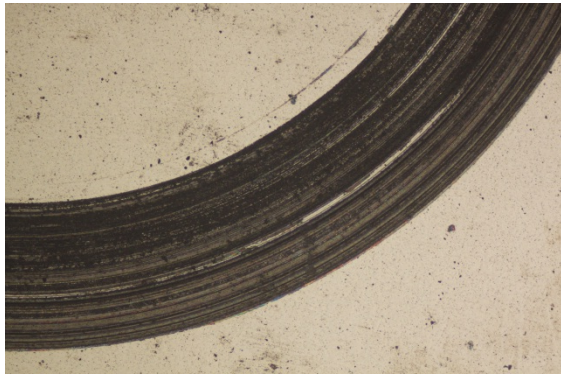
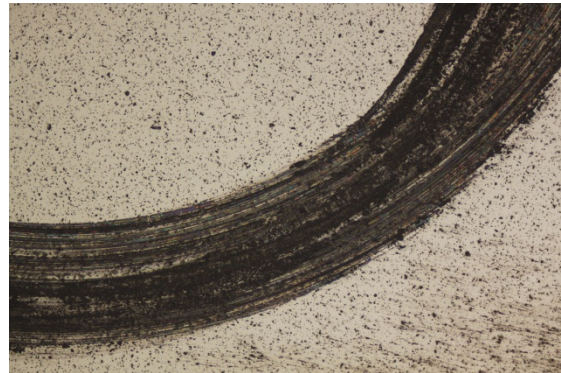
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G3		SPS G3	
F=10 N, v=150 mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 2A_p3	track: 3A_p1	track: —	track: —

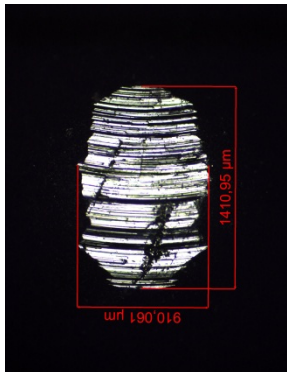
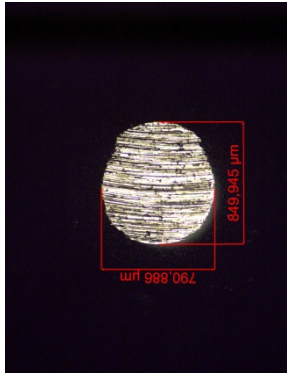
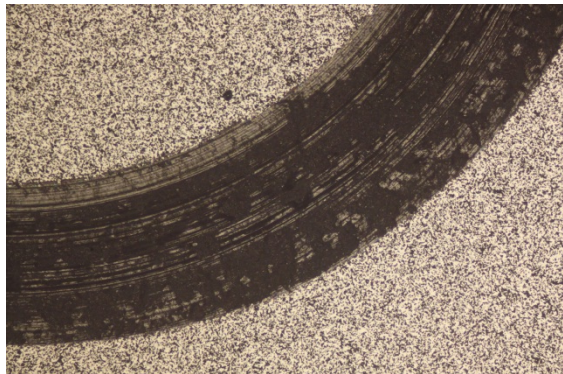
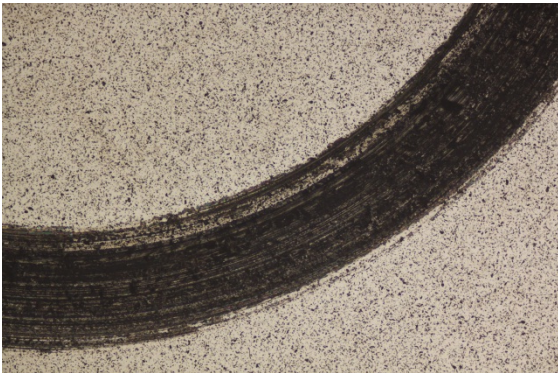
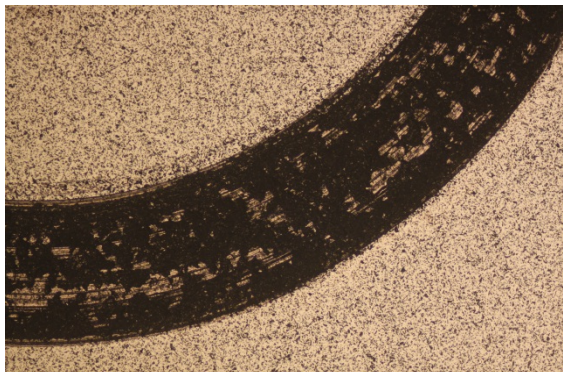
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G0		SPS G0			
F=10 N, v=200 mm/s, SiC golyó					
					track: 8A_4p
					track: 8A_5p
					track: 5B_1p
					track: 5B_2p

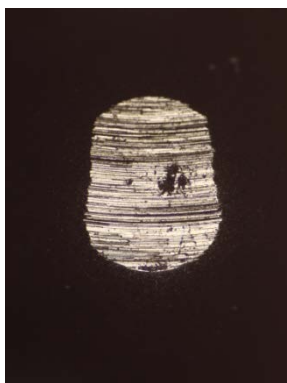
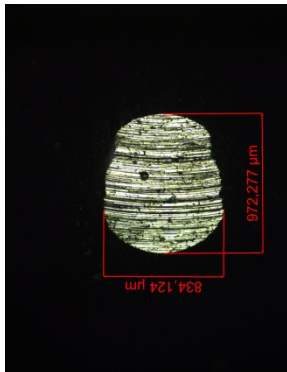
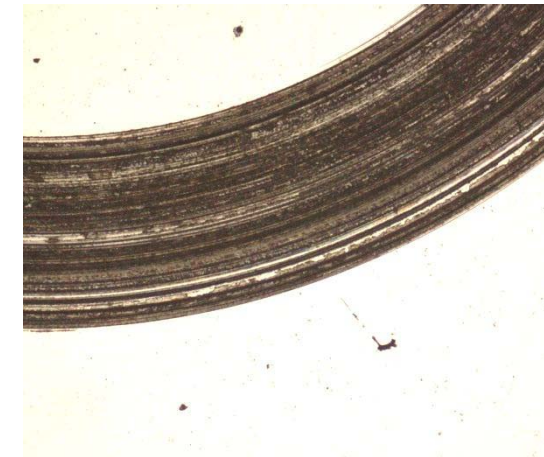
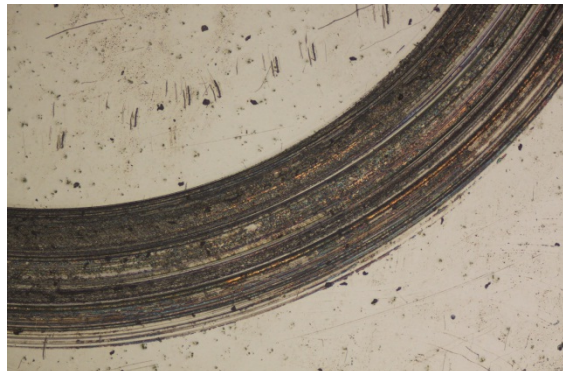
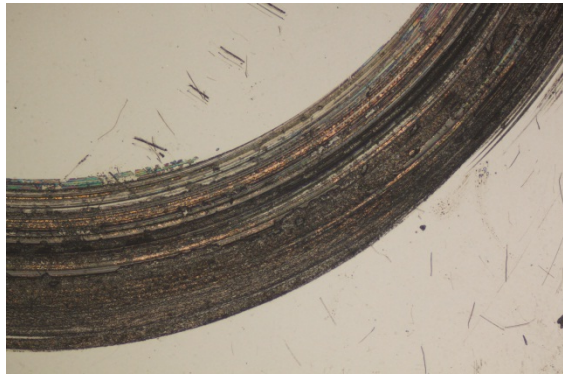
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=10 N, v=200 mm/s, SiC golyó				
				
			track: 1A_1p	track: —
track: 6A_1p	track: 6A_2p			

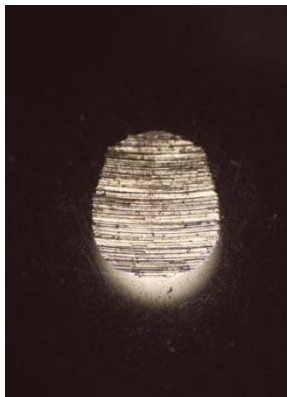
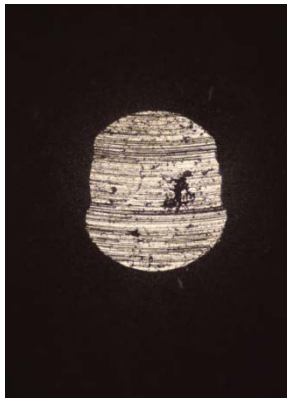
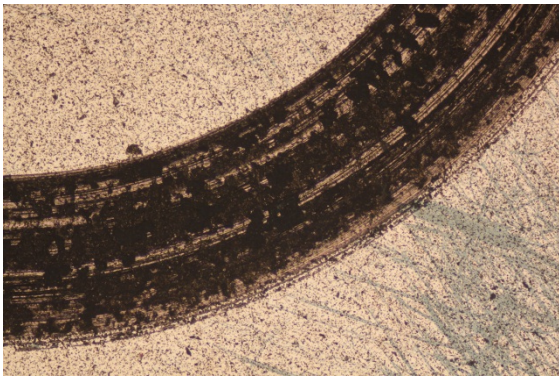
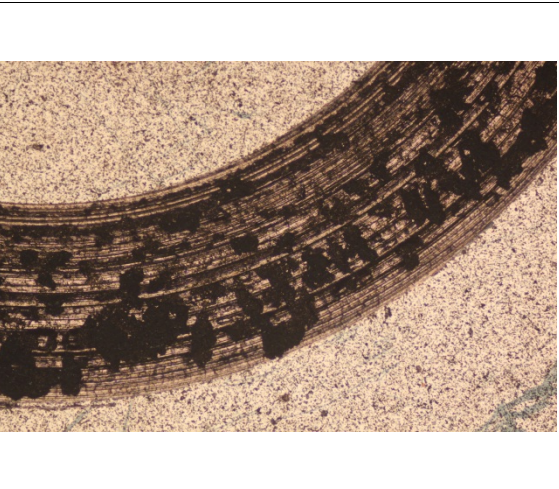
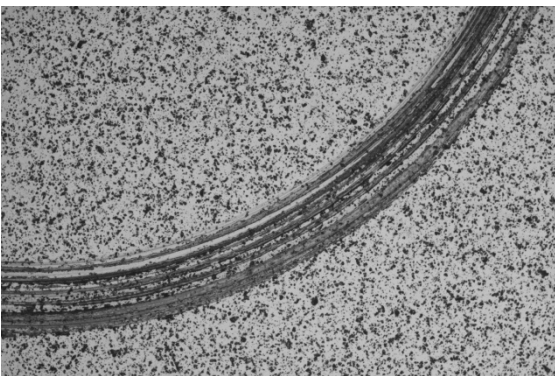
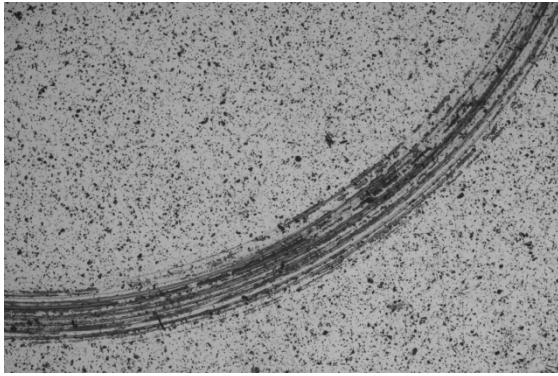
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=10 N, v=200 mm/s, SiC golyó				
			track: —	
track: 2A_p3	track: 3A_p1	track: 3A_1p	track: —	

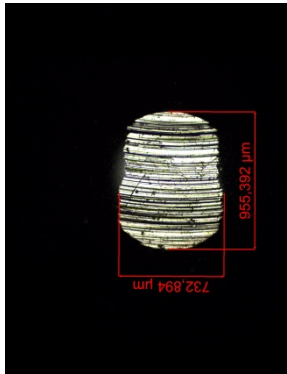
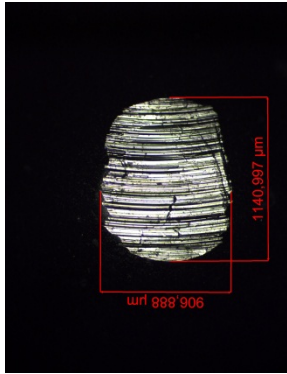
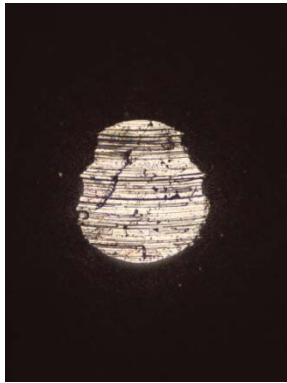
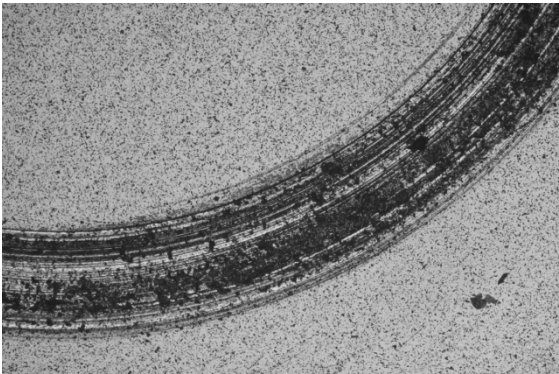
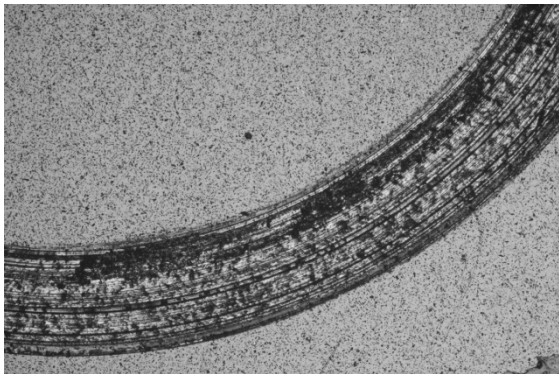
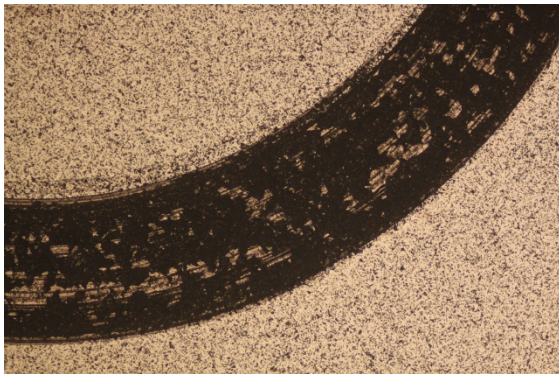
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G0		SPS G0			
F=10 N, v=200 mm/s, SiC golyó					
				track: 8A_4p	track: 8A_5p
				track: 6B_2v	track: 8B_2v

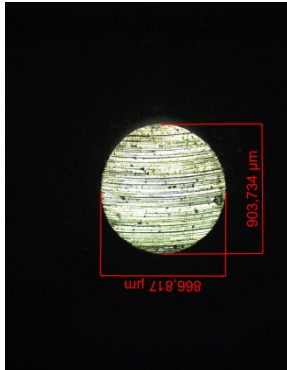
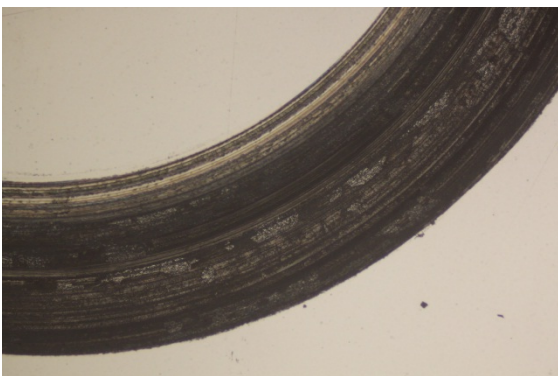
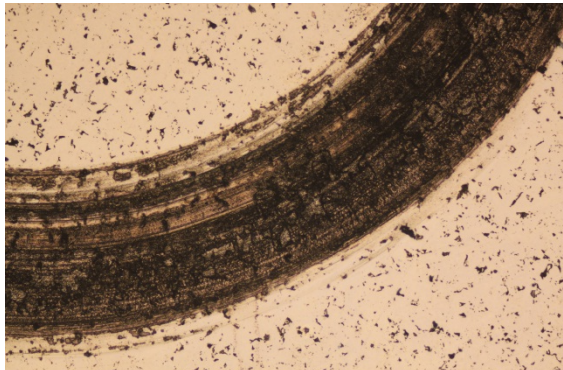
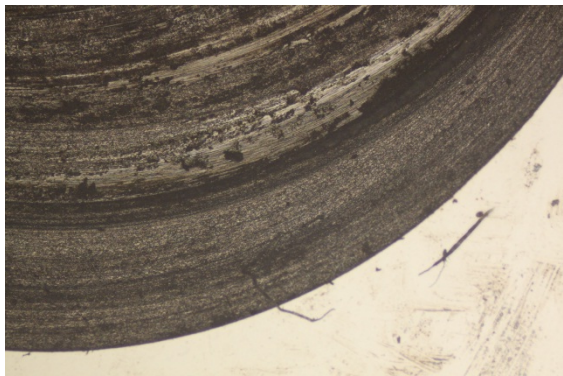
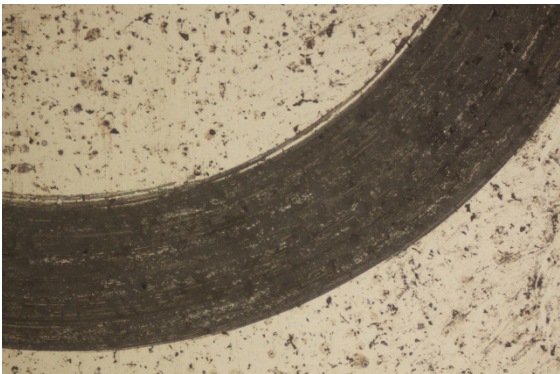
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=40 N, v=10 mm/s, SiC golyó				
				
			track: 4B_1v	track: —
track: 1B_1v		track: 1B_2v		

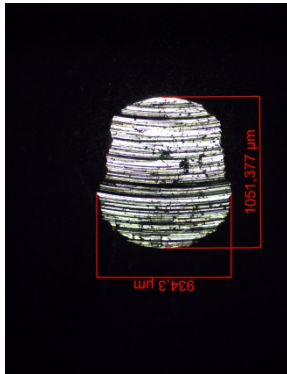
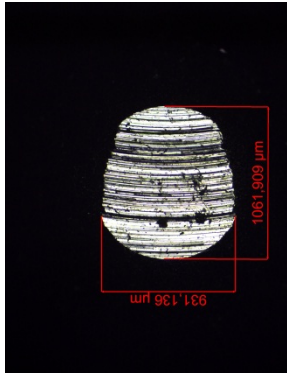
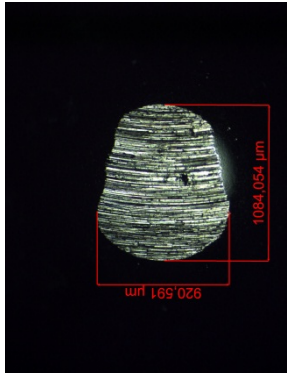
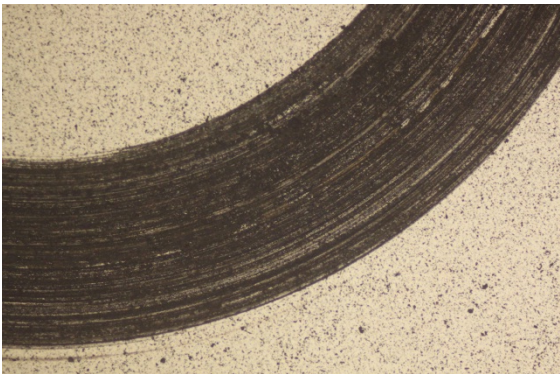
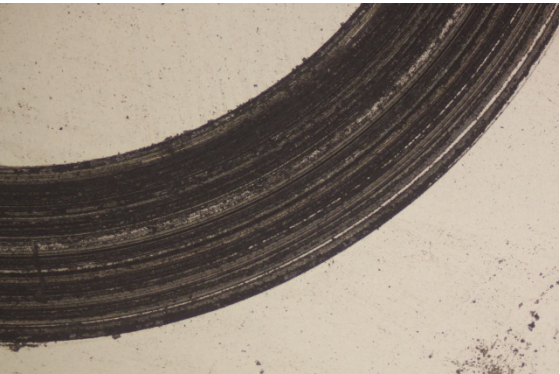
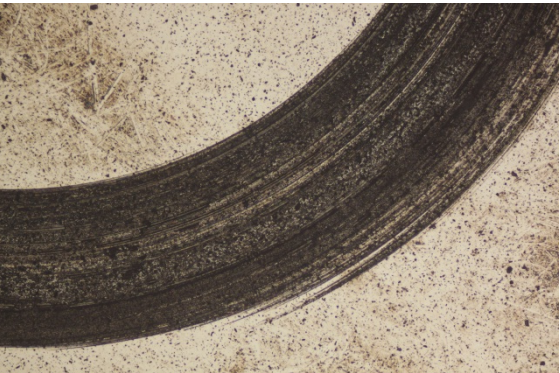
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=40 N, v=10 mm/s, SiC golyó				
				
	track: 5A_1v	track: 6A_1v	track: 4B_1v	track: —

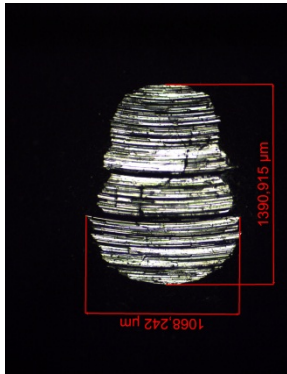
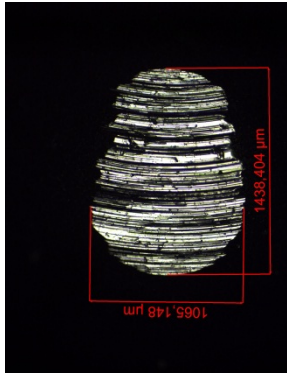
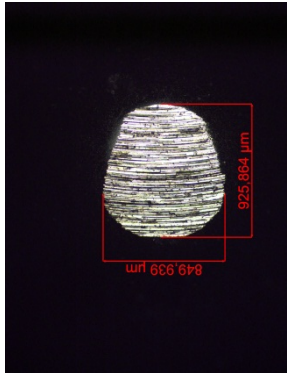
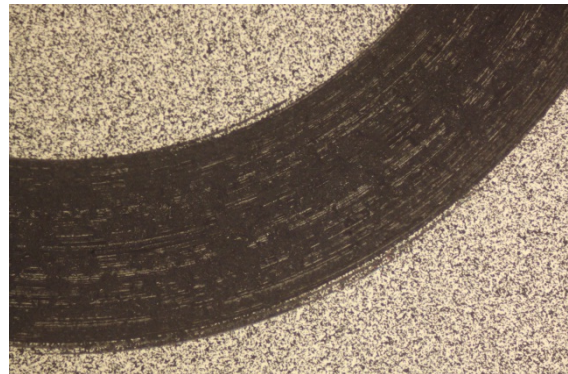
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G0		SPS G0			
F=40 N, v=20 mm/s, SiC golyó					
					
track: 2B_1p		track: 9A_2v		track: 6A_1v	
				track: 6A_2v	

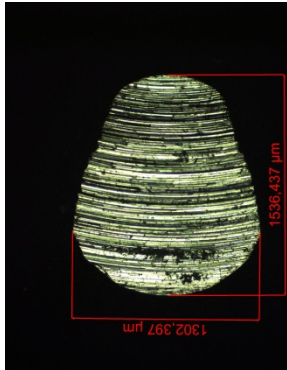
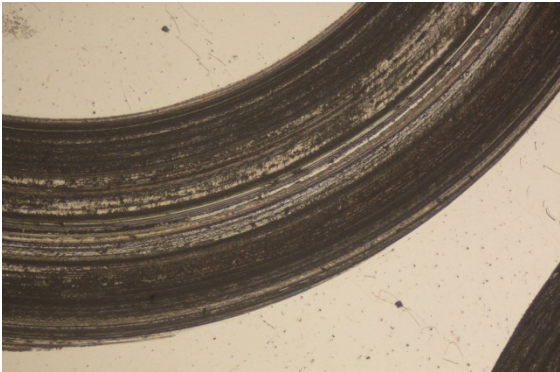
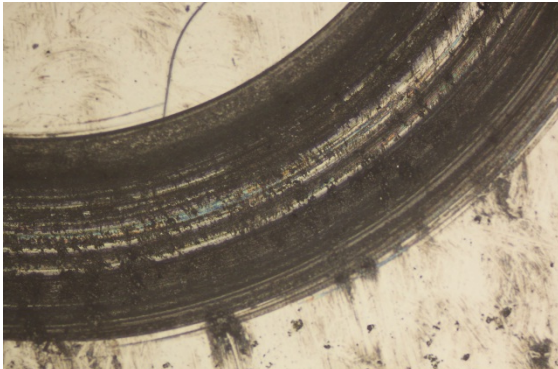
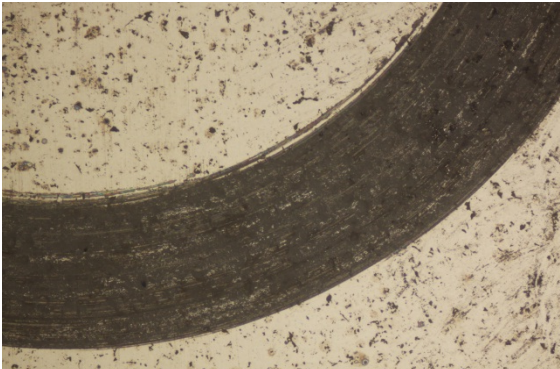
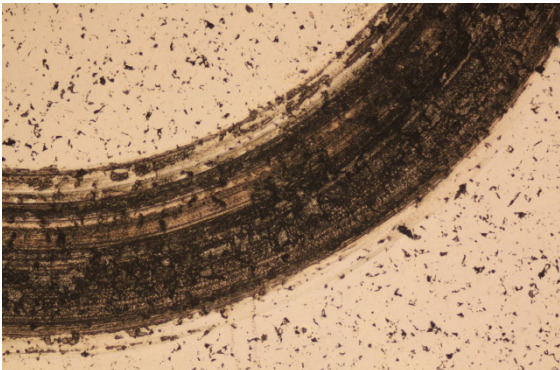
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G1		SPS G1			
F=40 N, v=20 mm/s, SiC golyó					
					
					
track: 4A_1p	track: 4A_2p	track: 4A_3p	track: 4A_4p		

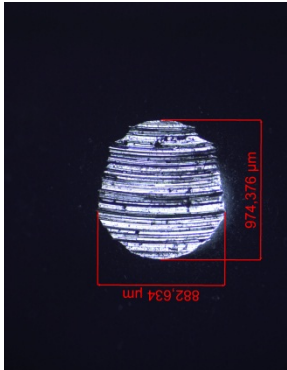
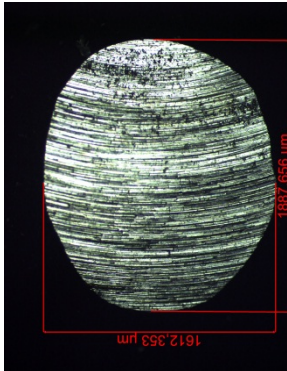
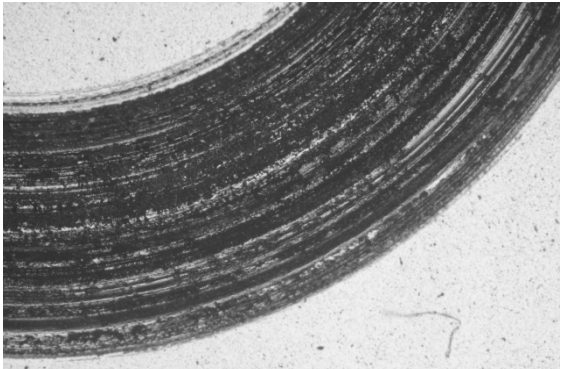
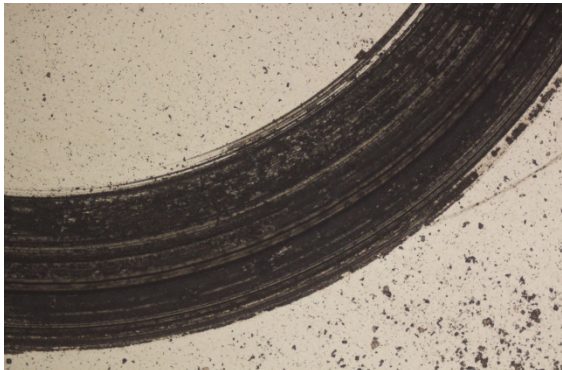
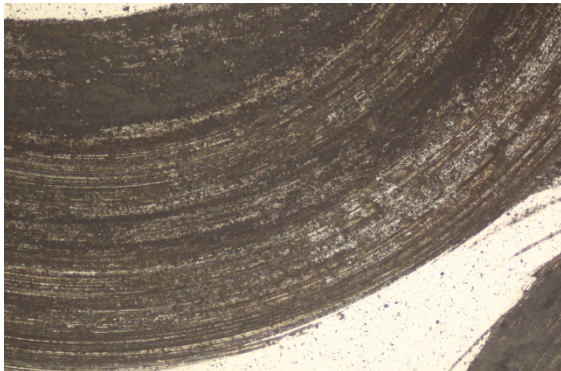
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G3			SPS G3		
F=40 N, v=10 mm/s, SiC golyó					
					
track: 4A_1p			track: 4A_2p		
track: 4A_3p			track: 4A_3p		

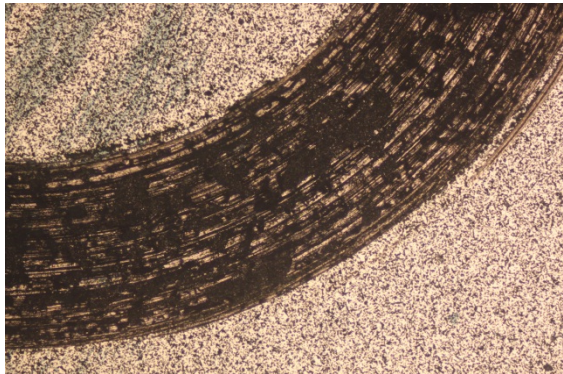
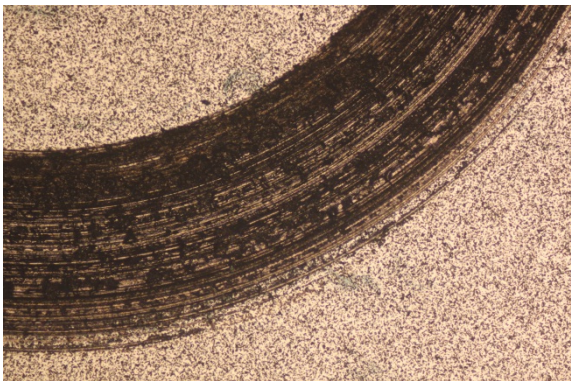
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=40 N, v=50 mm/s, SiC golyó				
				track: 6B_1v
				track: 8B_1v
			track: 11A_3v	track: 10B_2v

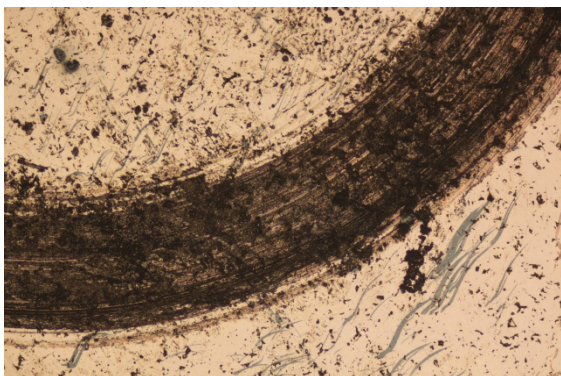
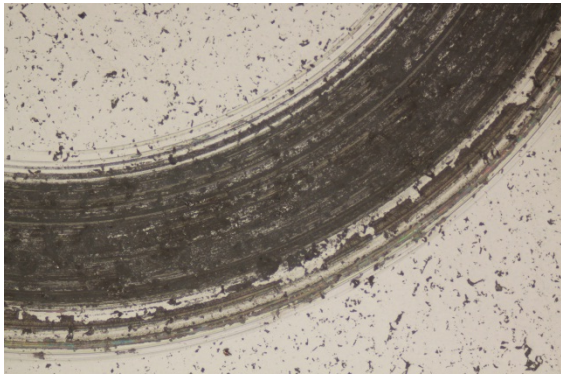
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=40 N, v=50 mm/s, SiC golyó				
				
			track: 1A_1v	track: —
			track: 1A_3v	track: —

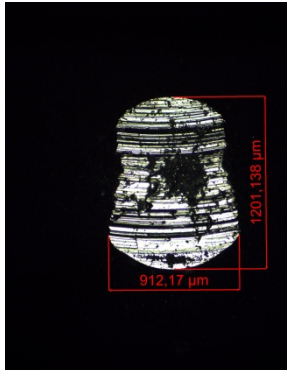
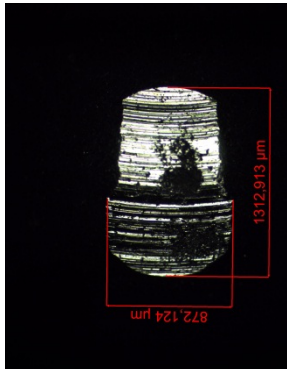
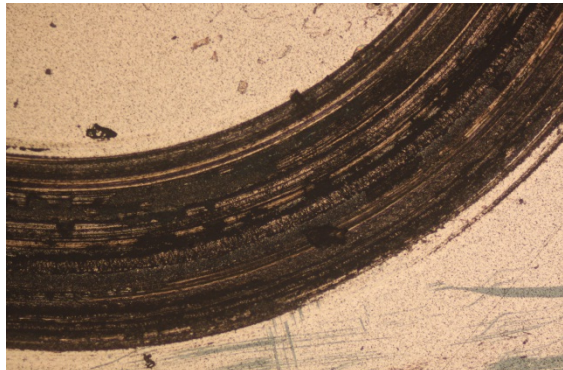
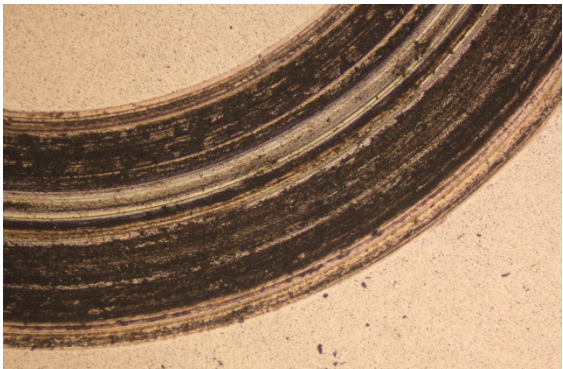
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=40 N, v=50 mm/s, SiC golyó				
				
			track: 6A_3v	track: 6A_4v
			track: 4B_v2	track: —

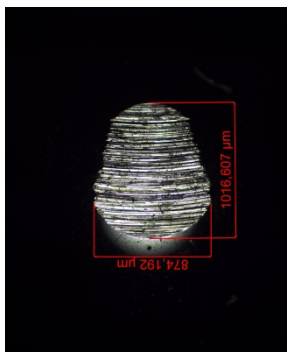
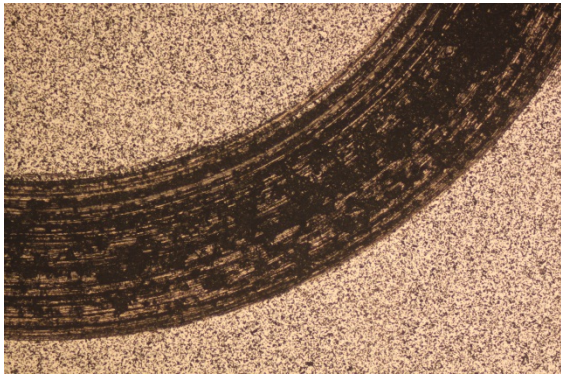
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=40 N, v=100 mm/s, SiC golyó				
				track: 7A_1v
				track: 8A_1v
				track: 10B_2v
				track: 11A_3v

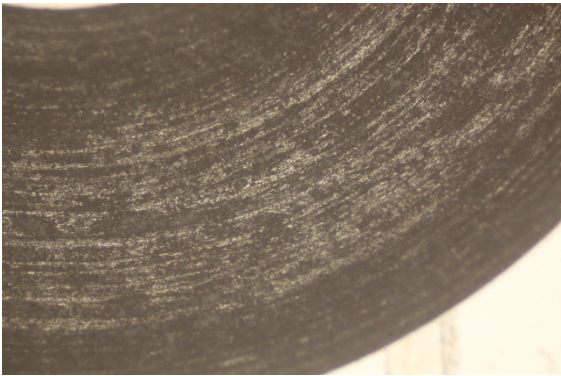
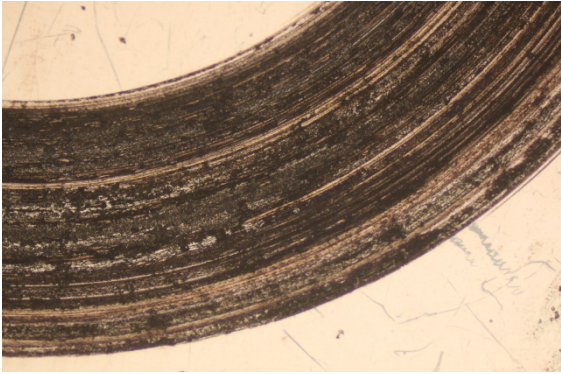
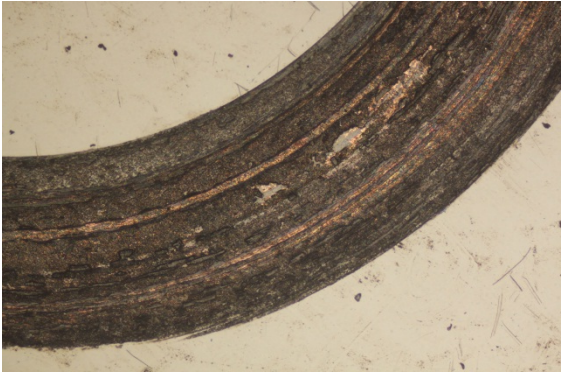
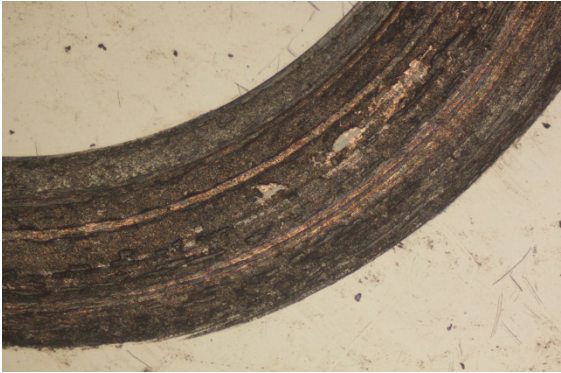
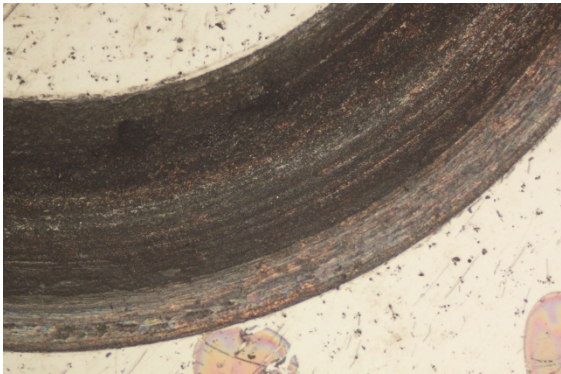
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=40 N, v=100 mm/s, SiC golyó				
				
				
	track: 3A_1v	track: 5A_1v	track: 4B_4v	track: —

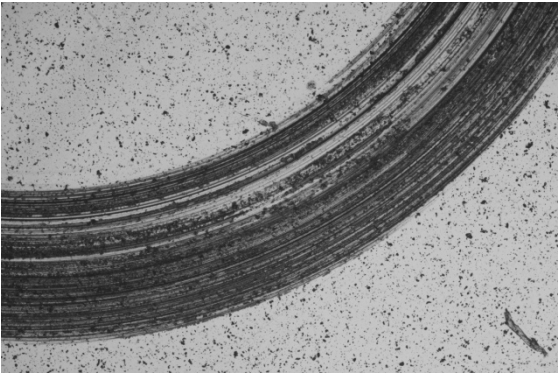
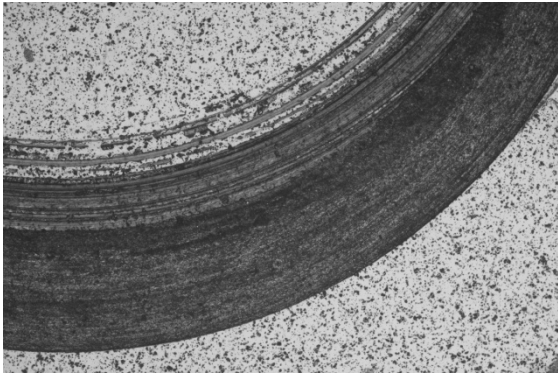
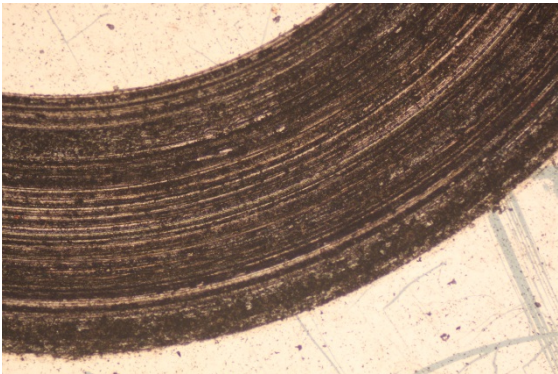
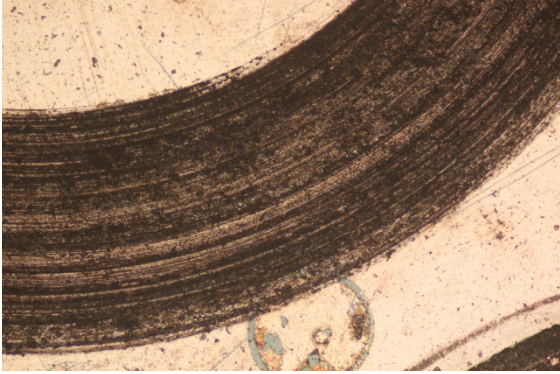
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=40 N, v=100 mm/s, SiC golyó				
				
track: 2A_2v	track: 3A_2v	track: —	track: —	

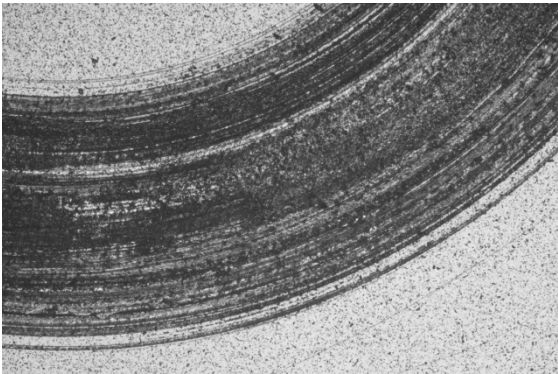
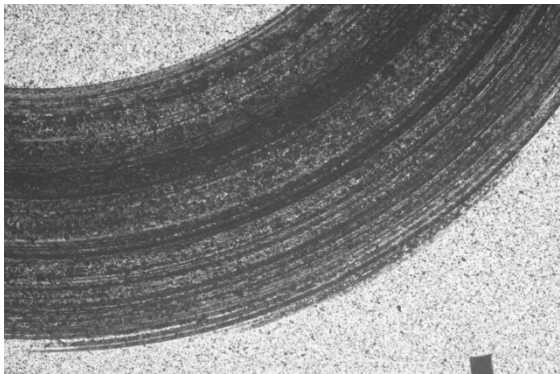
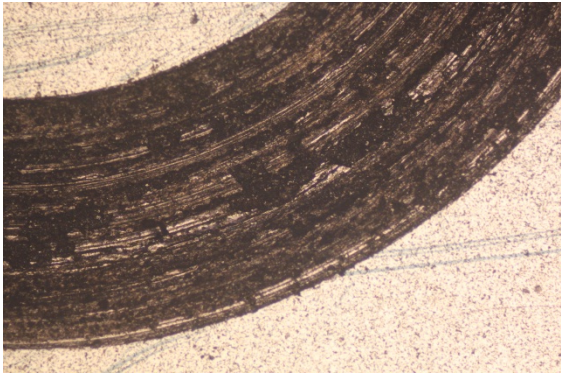
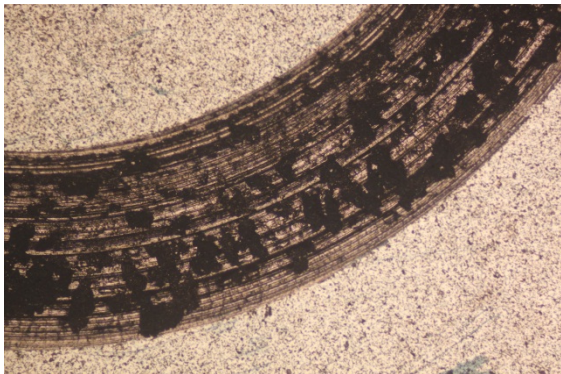
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=40 N, v=150 mm/s, SiC golyó				
				
track: 11A_1v	track: 11B_1v	track: —	track: —	

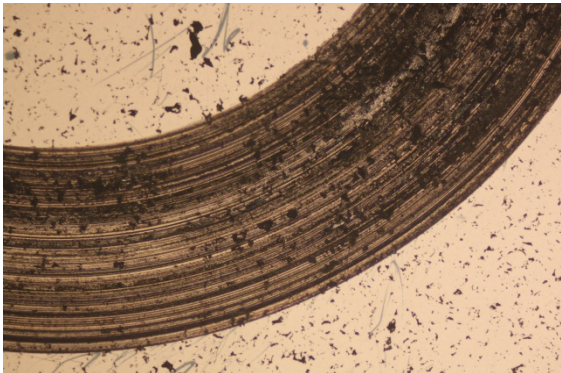
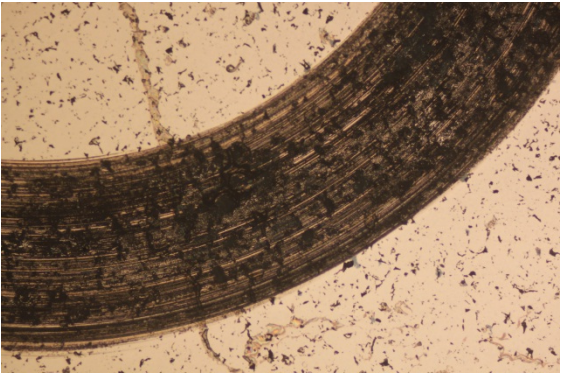
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G1		SPS G1	
F=40 N, v=150 mm/s, SiC golyó			
			
track: 3A_2v		track: 3A_3v	
track: —		track: —	

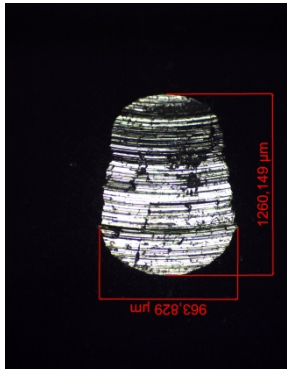
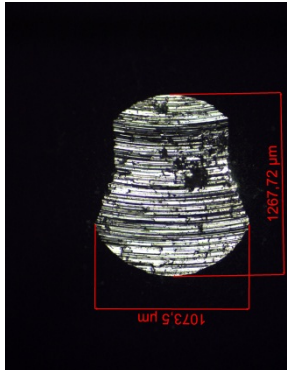
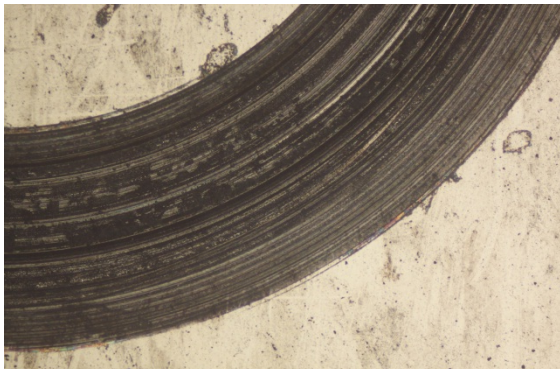
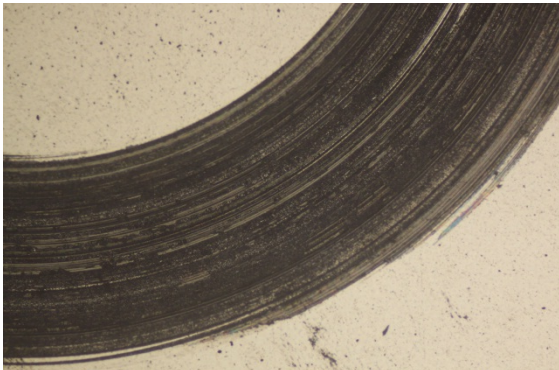
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=40 N, v=150 mm/s, SiC golyó				
				
	track: 2A_1v		track: 3A_1v	track: —

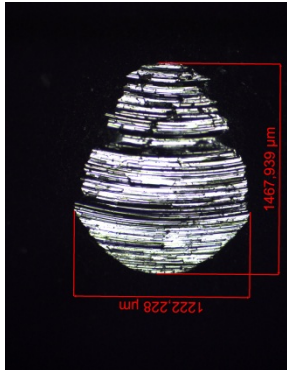
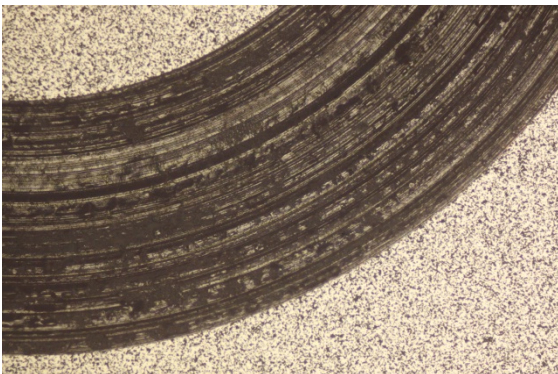
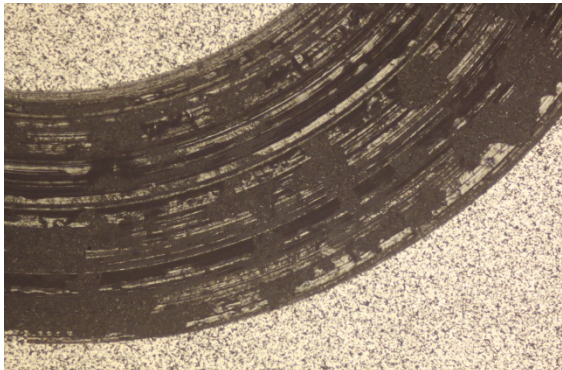
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
		F=40 N, v=200 mm/s, SiC golyó		
				track: 1A_kv
				track: 4A_2kp
				track: 6A_v3
				track: 6A_v4

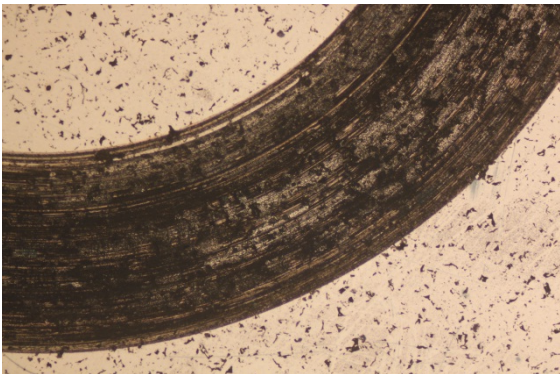
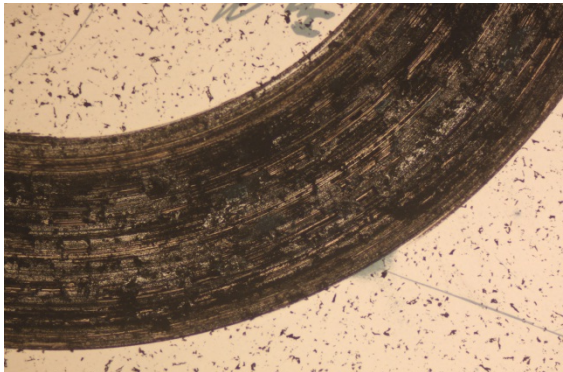
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
		F=40 N, v=200 mm/s, SiC golyó		
				track: 4A_1p
				track: 4A_2p
				track: 4A_3p
				track: 4A_4p

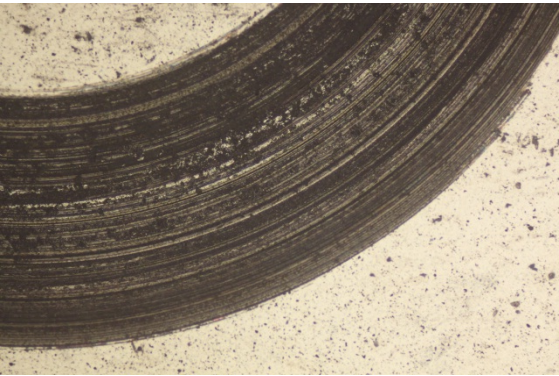
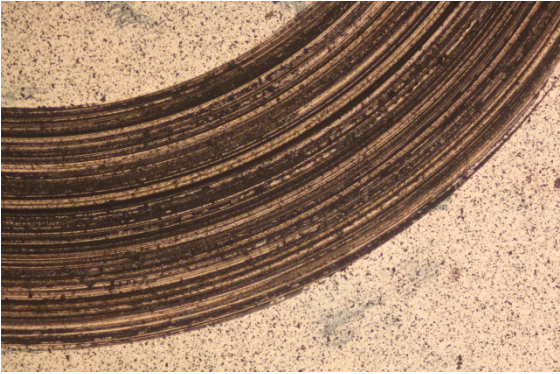
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)					
HIP G3		SPS G3			
F=40 N, v=200 mm/s, SiC golyó					
					track: 4A_1p
					track: 3A_3p
					track: 4A_4p
					track: 4A_3p

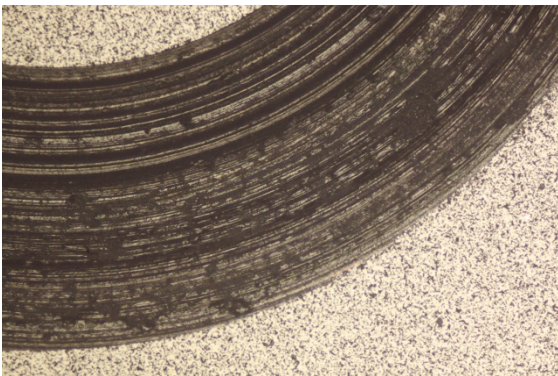
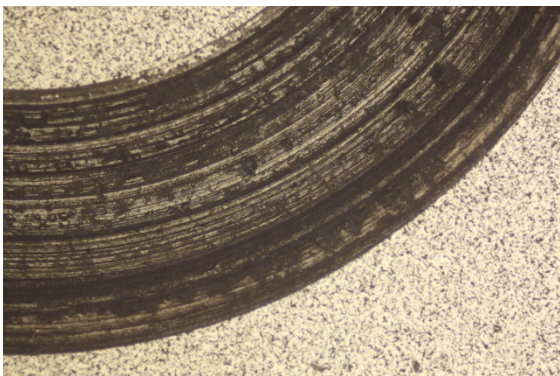
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=80 N, v=10 mm/s, SiC golyó				
				
track: 10A_3pp	track: 10A_4pp	track: —	track: —	

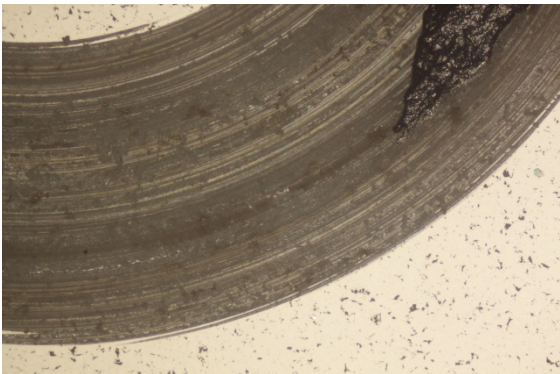
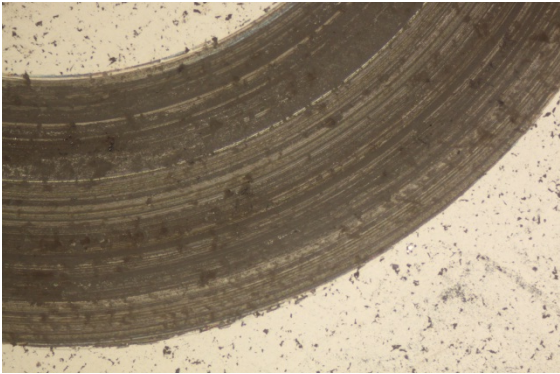
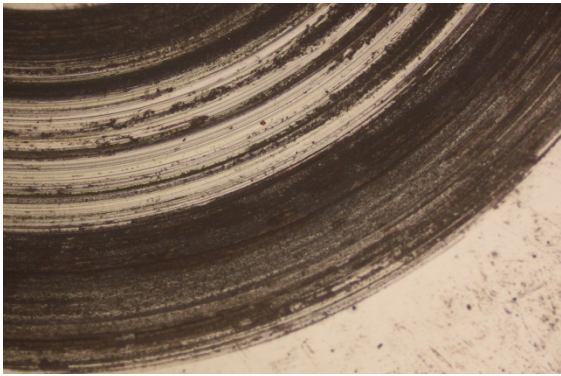
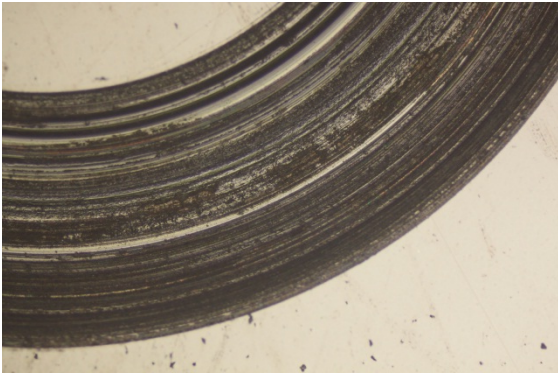
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)			
HIP G1		SPS G1	
F=80 N, v=10 mm/s, SiC golyó			
			
			
track: 1B_2pp	track: 1B_2pp	track: —	track: —

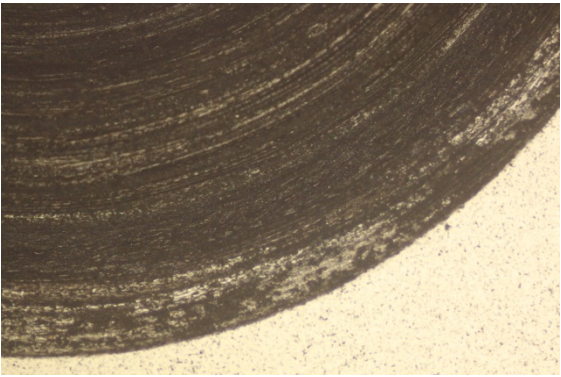
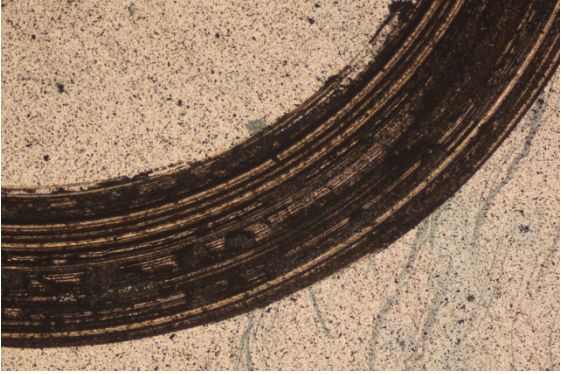
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=80 N, v=20 mm/s, SiC golyó				
				
				
track: 6A_3pp	track: 6A_4pp	track: —	track: —	

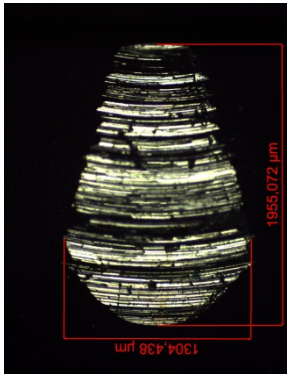
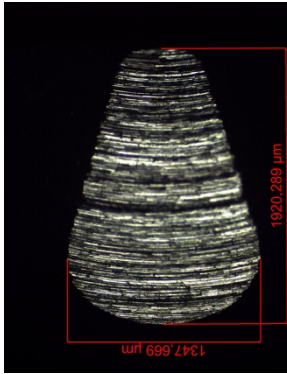
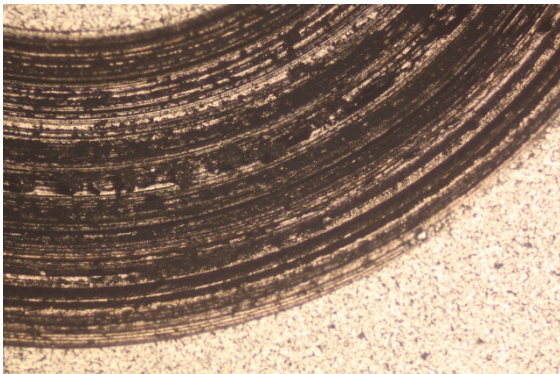
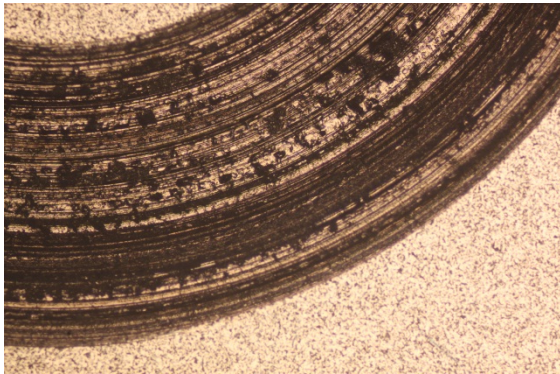
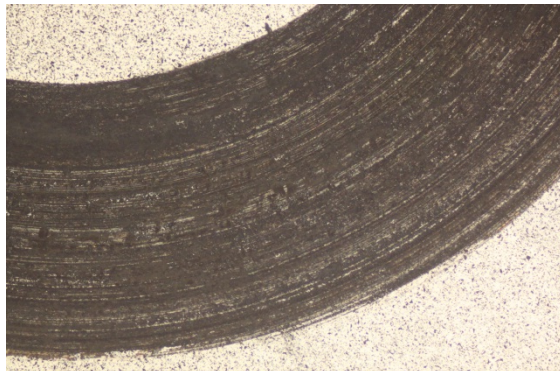
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=80 N, v=20 mm/s, SiC golyó				
				
track: 10A_1pp	track: 10A_2pp	track: —	track: —	track: —

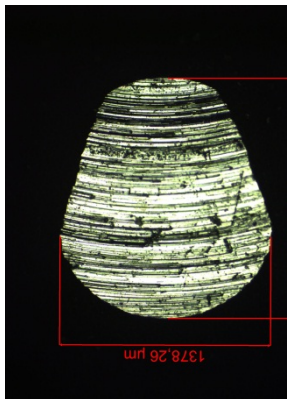
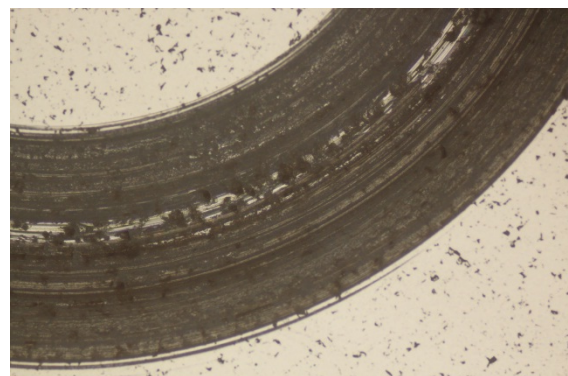
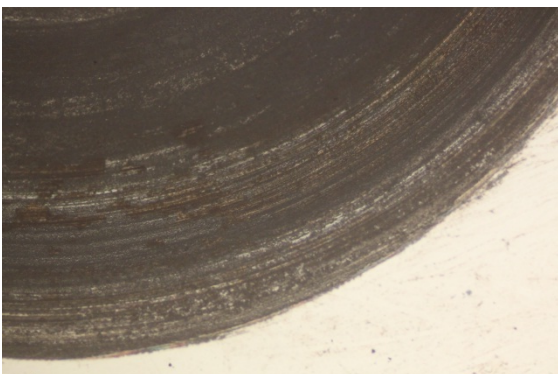
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
		F=80 N, v=20 mm/s, SiC golyó		
				
track: 1B_1pp		track: 2B_1pp		track: —

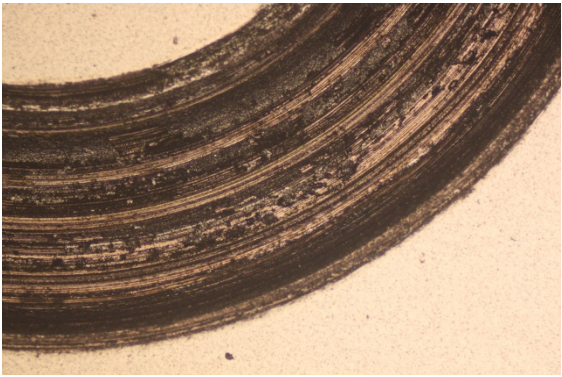
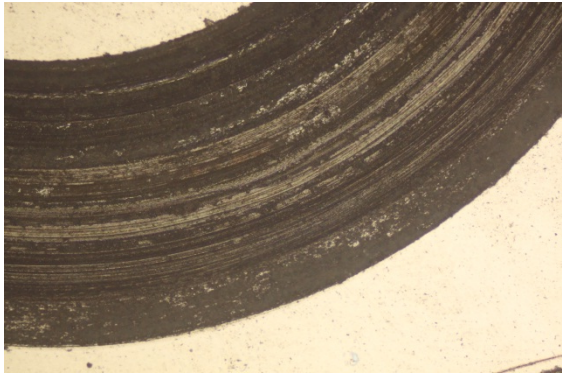
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=80 N, v=20 mm/s, SiC golyó				
				
	track: 6A_1pp	track: 6A_2pp	track: —	track: —

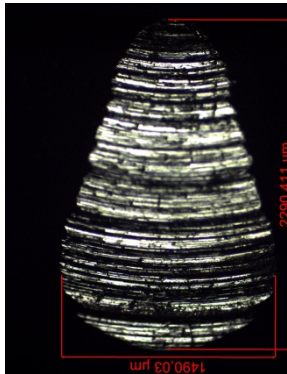
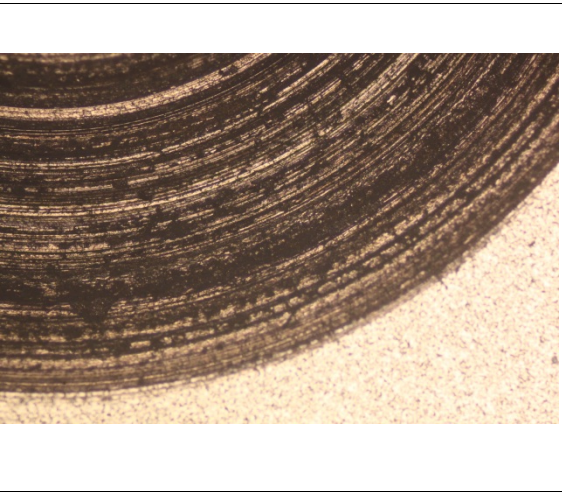
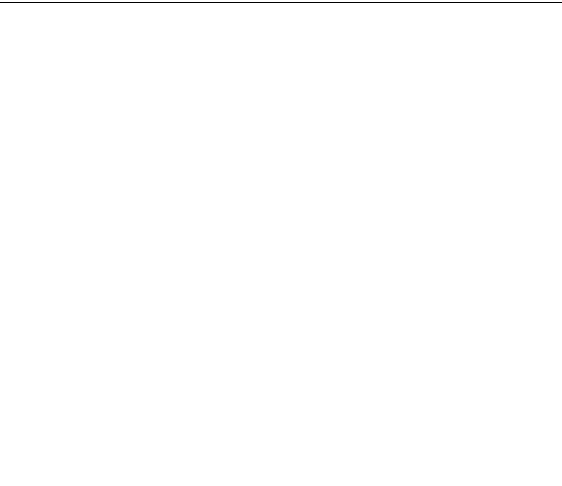
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=80 N, v=50 mm/s, SiC golyó				
				
track: 10B_1pp	track: 10B_3pp	track: 5B_1pp	track: 8B_1pp	

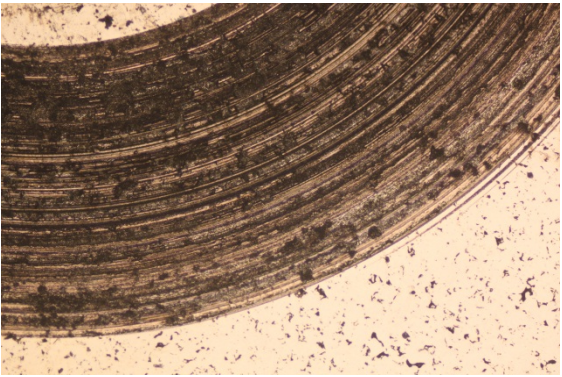
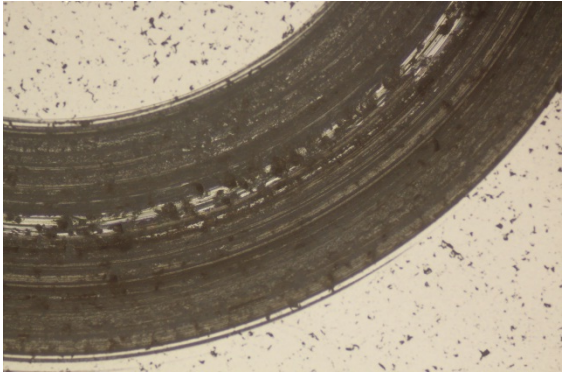
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
		F=80 N, v=50 mm/s, SiC golyó		
				
	track: 1A_4pp	track: 2A_2pp	track: —	track: —

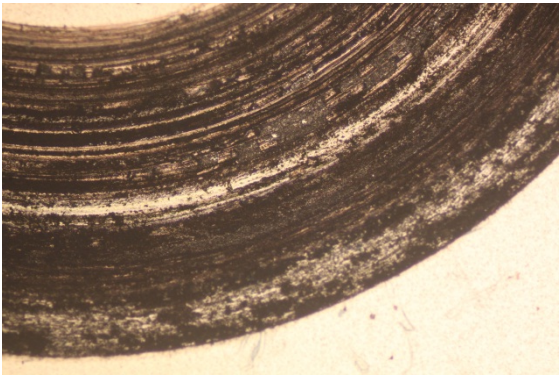
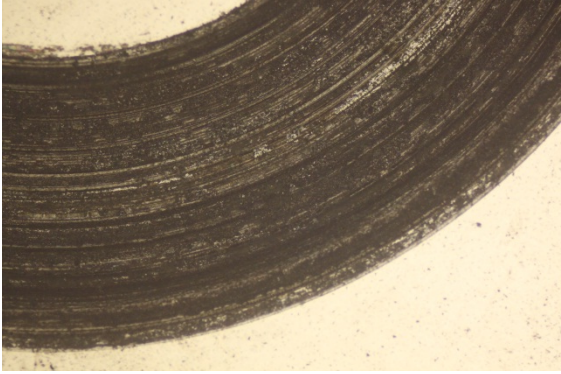
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=80 N, v=50 mm/s, SiC golyó				
				
			track: 2A_1pp	track: 2B_2pp
			track: 3A_3pp	track: —

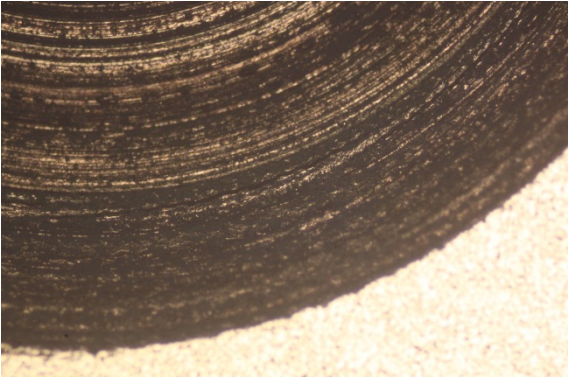
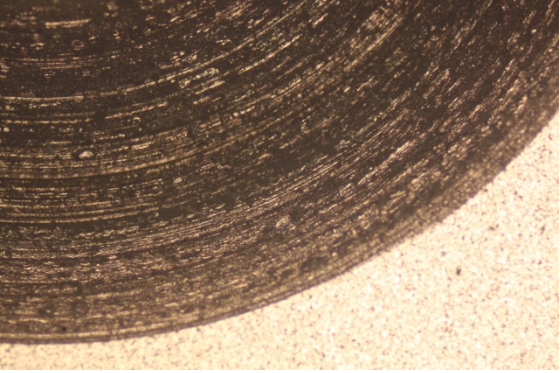
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
F=80 N, v=100 mm/s, SiC golyó				
				
track: 11A_2pp	track: 11B_2pp	track: 5B_2pp	track: 8A_1pp	

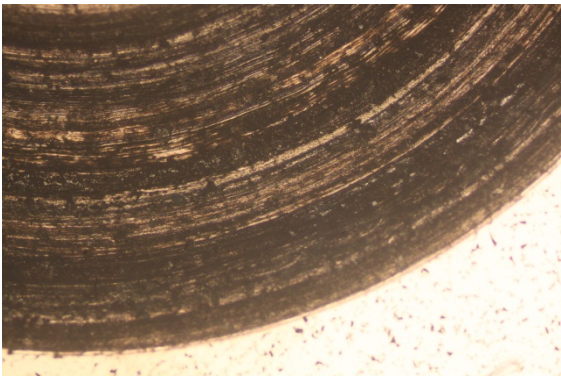
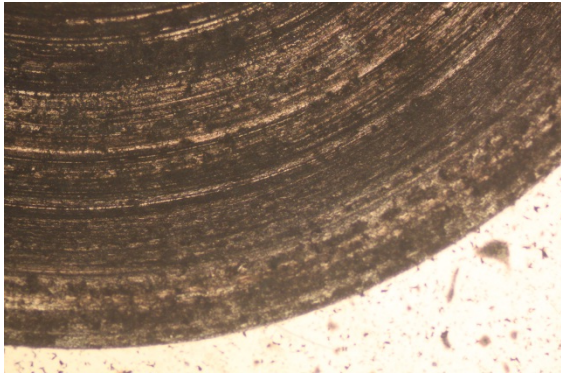
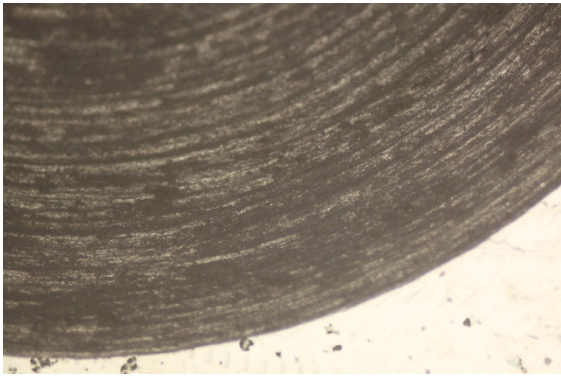
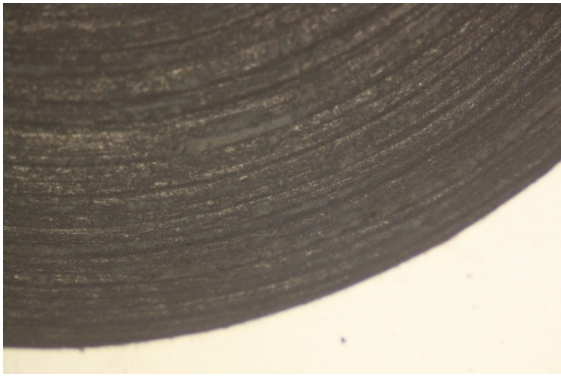
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
		F=80 N, v=100 mm/s, SiC golyó		
				
track: 3A_1pp		track: 5A_2pp		track: —

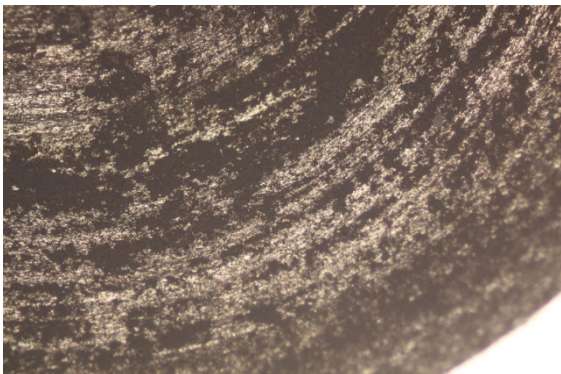
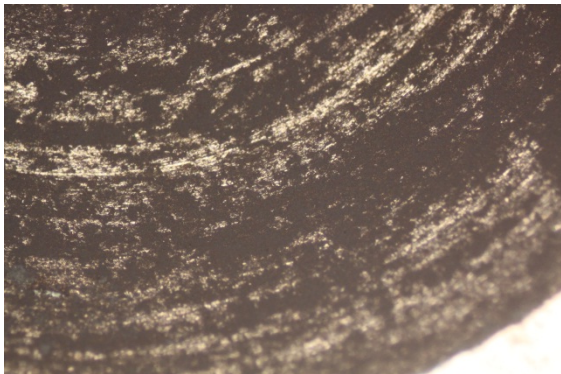
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=80 N, v=100 mm/s, SiC golyó				
				
				
track: 2A_2pp	track: 3A_2pp	track: —	track: —	

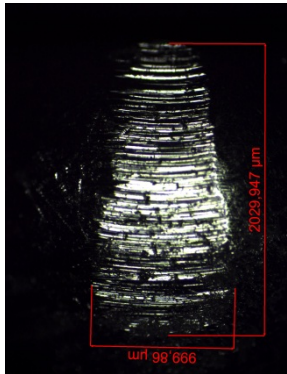
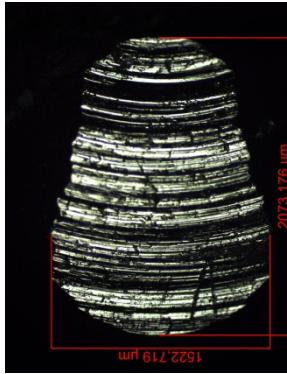
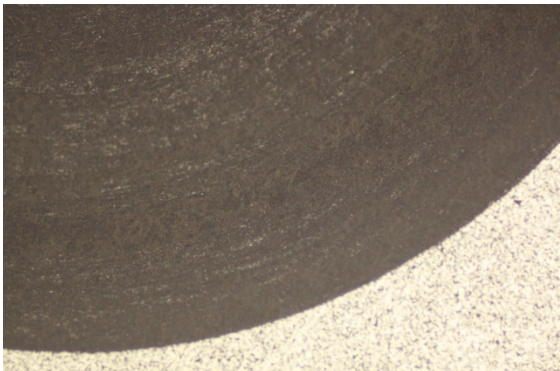
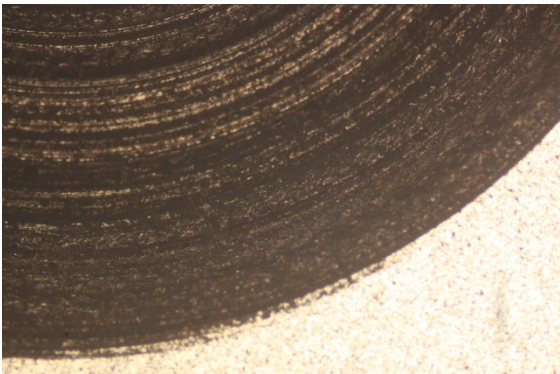
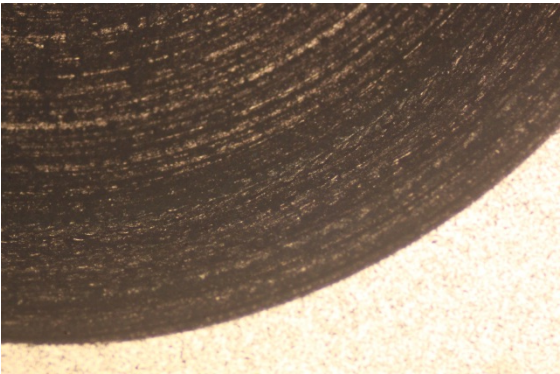
Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
		F=80 N, v=100 mm/s, SiC golyó		
				
	track: 11A_2pp	track: 11B_2pp	track: —	track: —

Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
		F=80 N, v=150 mm/s, SiC golyó		
				
				
track: 3A_2pp		track: 5A_1pp		track: —

Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
		F=80 N, v=150 mm/s, SiC golyó		
				
track: 2A_3pp		track: 3A_1pp		track: —

Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G0		SPS G0		
		F=80 N, v=200 mm/s, SiC golyó		
				
				
				
	track: 10A_5pp	track: 10A_6 pp	track: 7A_1pp	track: 8B_2pp

Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G1		SPS G1		
F=80 N, v=200 mm/s, SiC golyó				
				
track: 2A_3pp	track: 2A_4pp	track: —	track: —	

Gyártástechnológia hatásának vizsgálata (inverz mikroszkóp, N=50)				
HIP G3		SPS G3		
F=80 N, v=200 mm/s, SiC golyó				
				
				
track: 1B_3pp	track: 1B_4pp	track: 2B_4pp	track: —	

1. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 10$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	10	10	0,0046	0,0067	0,0612
	1			0,0059	0,0079	0,0624
	3			0,0119	0,0033	0,0883
	0		40	0,0726	0,1065	0,2913
	1			0,0776	0,1104	0,2967
	3			0,1736	0,0989	0,4200
	0		80	0,2730	0,3284	0,6353
	1			0,3388	0,3195	0,6472
	3			0,6000	0,3411	0,9161

2. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 20$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	20	10	0,010	0,022	0,061
	1			0,011	0,022	0,062
	3			0,012	0,014	0,088
	0		40	0,104	0,213	0,291
	1			0,104	0,184	0,297
	3			0,191	0,208	0,420
	0		80	0,355	0,469	0,635
	1			0,292	0,455	0,647
	3			0,681	0,573	0,916

3. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 50$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	50	10	0,0116	0,0324	0,0612
	1			0,0127	0,0408	0,0624
	3			0,0212	0,0413	0,0883
	0		40	0,1243	0,2378	0,2913
	1			0,0933	0,2405	0,2967
	3			0,2057	0,2963	0,4200
	0		80	0,5368	0,5531	0,6353
	1			0,3172	0,5716	0,6472
	3			0,9511	0,7468	0,9161

4. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 100$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	100	10	0,0029	0,0428	0,0612
	1			0,0096	0,0567	0,0624
	3			0,0323	0,0589	0,0883
	0		40	0,1235	0,2570	0,2913
	1			0,3569	0,2704	0,2967
	3			0,1707	0,3532	0,4200
	0		80	0,5871	0,5943	0,6353
	1			0,7731	0,6104	0,6472
	3			1,9588	0,8318	0,9161

5. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 150$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	150	10	0,0078	0,0495	0,0612
	1			0,0141	0,0540	0,0624
	3			0,0342	0,0680	0,0883
	0		40	0,1038	0,2682	0,2913
	1			0,3192	0,2799	0,2967
	3			0,2280	0,3757	0,4200
	0		80	0,7288	0,6065	0,6353
	1			0,8961	0,6198	0,6472
	3			3,1130	0,8602	0,9161

6. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 200$ mm/s csúszási sebesség esetén (HIP)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v, mm/s	F, N	V, mm ³	V _{M-T} , mm ³	V _{E-M} , mm ³
HIP	0	200	10	0,0099	0,0548	0,06123
	1			0,0189	0,0559	0,06238
	3			0,0382	0,0761	0,08830
	0		40	0,4347	0,2796	0,29128
	1			0,2865	0,2826	0,29674
	3			0,5066	0,3961	0,42002
	0		80	1,2943	0,6163	0,63529
	1			7,8776	0,6325	0,64719
	3			5,2797	0,8792	0,91607

7. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 10$ mm/s csúszási sebesség esetén (SPS)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v , mm/s	F , N	V , mm ³	V_{M-T} , mm ³	V_{E-M} , mm ³
SPS	0	10	10	0,01315	0,00607	0,05657
	1			0,00106	0,00017	0,05044
	3			0,00077	0,00013	0,05537
	0		40	0,06304	0,10891	0,26908
	1			0,07756	0,01309	0,23994
	3			0,03344	0,01339	0,26340
	0		80	—	—	—
	1			—	—	—
	3			—	—	—

8. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 20$ mm/s csúszási sebesség esetén (SPS)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v , mm/s	F , N	V , mm ³	V_{M-T} , mm ³	V_{E-M} , mm ³
SPS	0	20	10	—	—	—
	1			—	—	—
	3			—	—	—
	0		40	0,0638	0,23135	0,1345
	1			0,0627	0,06005	0,1200
	3			1,7453	0,06060	0,1317
	0		80	—	—	—
	1			—	—	—
	3			—	—	—

9. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 50$ mm/s csúszási sebesség esetén (SPS)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v , mm/s	F , N	V , mm ³	V_{M-T} , mm ³	V_{E-M} , mm ³
SPS	0	50	10	0,0146	0,0593	0,0707
	1			0,0016	0,0129	0,0631
	3			0,0008	0,0058	0,0692
	0		40	0,2085	0,4471	0,3364
	1			0,1611	0,1352	0,2999
	3			0,0740	0,1252	0,3292
	0		80	0,7301	1,1241	0,7336
	1			—	—	—
	3			0,3107	0,3727	0,7181

10. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 100$ mm/s csúszási sebesség esetén (SPS)

Gyártási eljárás	MLG, m%	v , mm/s	F , N	V , mm ³	V_{M-T} , mm ³	V_{E-M} , mm ³
SPS	0	100	10	0,0152	0,0896	0,0707
	1			—	—	—
	3			—	—	—
	0		40	0,4483	0,5588	0,5382
	1			0,5709	0,1780	0,4799
	3			—	—	—
	0		80	1,4431	1,2926	1,1737
	1			—	—	—
	3			—	—	—

11. táblázat. A mért valamint a becsült értékek $v = 200 \text{ mm/s}$ csúszási sebesség esetén (SPS)

Gyártási eljárás	MLG, m%	$v, \text{mm/s}$	F, N	V, mm^3	V_{M-T}, mm^3	V_{E-M}, mm^3
SPS	0	200	10	0,0168	0,1137	0,0566
	1			0,0014	0,0354	0,0504
	3			0,0068	0,0379	0,0554
	0		40	0,3939	0,6114	0,2691
	1			0,2200	0,2135	0,2399
	3			0,2556	0,2323	0,2634
	0		80	6,9017	1,3991	0,5869
	1			—	—	—
	3			1,7453	0,5331	0,5745