

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Elasztomer-fém kötés kialakításának
feltételei gépipari hibrid alkatrészek
gyártásánál

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Renner Tamás

Gödöllő
2013

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrár Műszaki Tudomány

vezetője: Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gödöllő

témavezető: Dr. Pék Lajos
főiskolai tanár
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet
Gödöllő

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	3
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	6
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	7
2. 1. A fémfegyverzetek felület előkészítésének hatása	7
2. 2. A szerszámüregi nyomás hatásának vizsgálata	7
<i>A mérőszerszám kialakítása</i>	<i>7</i>
<i>A kompressziós technológiával végzett mérés.....</i>	<i>8</i>
<i>A fröccstechnológiával végzett mérés</i>	<i>8</i>
2. 3. A reológiai jellemzők és a szakítóerő összefüggései.....	8
2. 4. Elemanalitikai vizsgálat	9
2. 5. A profilométeres mérés	9
3. EREDMÉNYEK	10
3. 1. A felület érdességi jellemzők hatása a szakítószilárdságra	10
3. 2. A profilométeres vizsgálat eredményei.....	13
3. 3. A szerszámüregi nyomás hatása a fémkötésre.....	15
3. 4. A reológiai jellemzők változásának hatása a kötés erősségére	17
3. 5. A gumi-fém határréteg elemanalitikai vizsgálata.....	18
3. 6. A gumirugók vizsgálata	18
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	21
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	23
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	24
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	28

JELÖLÉSJEGYZÉK

A dolgozatban használt jelölések:

- s_{\min} : Rotor minimális nyomatéka [Nm]
 s_{\max} : Rotor maximális nyomatéka [Nm]
 t_{02} : 20%-os vulkanizáláshoz szükséges idő [min]
 t_{09} : 90%-os vulkanizáláshoz szükséges idő [min]
 t_{s2} : Beégési idő [min]
 M_{1-5} : Szakító próbatestek
 R_a : Átlagos felületi érdesség [μm]
 R_y : Érdesség mélység [μm]
 R_z : Egyenetlenség magasság [μm]
 S_v : Völgyek középvonaltól mért mélysége [μm]
 S_z : Egyenetlenség magasság 3D [μm]
 S_a : Átlagos felületi érdesség 3D [μm]
 σ : Szórás
 ω : Szögsebesség [1/s]
 m : Tömeg [kg]
 F_t : Terhelő erő [N]
 k_f : Alakítási szilárdság [N/mm^2]
 φ : Alakváltozás foka [%]
 W : Alakváltozási munka [J]
 D : Átmérő [mm]
 t : Idő[s]
 V : Térfogat [m^3]
 P : Teljesítmény [kW]
 E : Rugalmassági modulus [N/mm^2]
 h : Folyadékoszlop magassága [m]
 T : Hőmérséklet [K]
 T_c : Kritikus hőmérséklet [K]
 g : Gravitációs gyorsulás [m/s^2]
 L : Az extrudátum hossza [m]
 ρ : Sűrűség [kg/m^3]
 G_L : Az L hosszúságú extrudátum tömege [kg]
 A : A szerszámnyílás keresztmetszete [m^2]
 V_t : Szerszám töltési térfogat [cm^3]
 V_v : Egy fordulatra eső térfogatváltozás [cm^3]

A dolgozatban használt anyagjelölések:

NR: természetes kaucsuk
NBR: akril-nitril – butadién kopolimer
CR: kloroprén kaucsuk
EPDM: etilén – propilén – dién terpolimer
SBR: butadién – sztírol kopolimer
SI: szilikon kaucsuk
Fe-235: általános acél
GN-50: acélsörét
S-140: acélszemcse
C4C (EN10263): acélhuzal
R155OF1: természetes kaucsuk alapú gumikeverék
EKF-24: korund
1.2312: melegalakító szerszámacél
1.2767: melegalakító előnemesített szerszámacél

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az iparban alkalmazott korszerű gépelemekkel szemben támasztott követelmények megkövetelik, hogy azok magas műszaki színvonalon, meghibásodás nélkül, hosszú ideig üzemeljenek. Ez csak akkor érhető el, ha minden beépülő elemet az előírt műszaki paraméterrel már a tervezéskor megkövetelt, állandó minőséggel állítunk elő. Munkám célkitűzése az, hogy a gumiiparban dolgozó szakemberek számára tudományos kísérleteken, méréseken és számításokon nyugvó, bizonyított kutatási eredményeken alapuló technológiai előírásokat adjak a gumi-fém kötés kialakítására.

Munkám célkitűzései pontokba szedve az alábbiak:

1. A gumitesthez kötendő fémfegyverzetek előkészítési technológiai paramétereinek optimalása (szemcseszóró anyag típusa, felületi érdesség hatása, mikrotopográfia befolyása, stb.).
2. A vulkanizáló szerszámban kialakult nyomás és a létrejött gumi-fém kötőerő matematikai összefüggésének leírása.
3. A vulkanizálódási sebesség és a gyártmányokon mérhető szakítóerő közötti kapcsolat bemutatása.
4. A kaucsukkeverékek tárolhatósági idejének és az ezzel összefüggésbe hozható minőségváltozásnak vizsgálata.
5. A kaucsukkeverékek gumi-fém kötéshez való alkalmasságának számszerű megadása.
6. A gumi-fém határfelületen lejátszódó folyamatok elemanalitikai vizsgálata.
7. A vulkanizálással kialakított térháló rendszer szilárdságnövelésének lehetőségei.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a gumi-fém kapcsolat vizsgálatára kidolgozott eljárásokat, a szerszámüreg nyomásviszonyainak vizsgálatához tervezett hardver és szoftvereszközöket. Végül bemutatom a modellvizsgálatokat az általam vizsgált rendszerben.

2. 1. A fémfegyverzetek felület előkészítésének hatása

A vizsgálatok célja a fémfegyverzetek gumival érintkező felületi jellemzőinek olyan meghatározása, amelyet kialakítva a kialakuló gumi-fém kötés maximális lesz. A modell vizsgálatokat először EKF-24 minőségű korund szóróanyaggal, injektoros szóróberendezéssel, majd GN 50 jelű acélsörét alkalmazása mellett röpitőkerekes szemcseszóró géppel hajtottam végre. A különböző technológiákkal és anyagokkal végzett beavatkozással előállított felületeken R_a átlagos felületi érdességet, illetve S_v (a fémfegyverzetek vizsgált felületén mért legalacsonyabb pont és a középsík távolsága) térbeli felületi jellemzőket mértem, illetve 3 dimenziós mikrotopográfiai térképet készítettem.

A gyártás során a fémfegyverzetek felületi érdességét állandó $20\ \mu\text{m}$ értéken tartottam, hogy utána a mechanikus kezeléssel könnyen ki tudjam alakítani az előkészítési technológia során optimált $S_v=34\ \mu\text{m}$ érdességet. A fémfegyverzet gyártástechnológiájánál a hidegfolyatással kombinált hidegzömítést választottam, mert törési kísérletekkel és a csiszolatok vizsgálatával bizonyítottam, hogy ezzel az eljárással tudom a legnagyobb alakítást elérni a megengedett alakváltozási határon belül.

Első lépésben a galvanikus úton cink-kromát réteggel ellátott kísérleti mintákat 25° beesési szögben $35\ \text{cm}$ -es szórási távolsággal EKF-24 jelű korunddal kezeltem. A szórási időt 5 lépésben változtattam, miközben mértem a sűrített levegő nyomásváltozását, illetve a kialakult felületi érdesség síkbeli és térbeli jellemzőit. Az előzőekhez hasonló kísérleti beállításokkal, röpitőkerekes géppel is végeztem felület előkészítést, majd a fémfegyverzeteket ragasztóanyaggal kezeltem és próbatesteket vulkanizáltam. Ezt követően szakítóvizsgálatnak vettem alá, és a szakadási erőket mértem.

2. 2. A szerszámüregi nyomás hatásának vizsgálata

A mérőszerszám kialakítása

A szerszámhoz GEFTRAN típusú nyomásérzékelőt csatlakoztattam, amely $0-10\ \text{V}$ analóg jelet ad ki a MOXA Logic E1240 jelfogadónak. A regisztráló egység MODBUS TCP berendezés volt, amely strukturált text fájlt hoz létre. Az

alkalmazott szoftver a TCP-ről kiírja az eredményeket CSV formátumba, amit excel segítségével kezelni tudtam. A mérésekhez szükséges nyomásmérő szerszámot célszerűen úgy terveztem, hogy hagyományos préstechnológiánál, és fröccstechnológiánál alkalmazott mérésekhez is alkalmazható legyen, ugyanakkor a vulkanizálási ciklus bármely időszakában a hasznos térfogatot 13,5%-on belül változtatni lehessen.

S 100 Monsanto rheométerrel meghatároztam a kísérleti minták gyártásához alkalmazott keverék reológiai jelleggörbáját, szakítógéppel a szakítószilárdságot és a fajlagos nyúlást, majd a keverék sűrűségét.

A kompressziós technológiával végzett mérés

A szerszámüregben kialakuló nyomásviszonyokat a kiindulási anyagmennyiség módosításával szabályoztam. A beépülő gumikeverék tömegét analitikai mérleggel mértem, majd próbavulkanizálást végeztem, miközben regisztráltam a szerszám hőmérsékletének változását, és a zárónyomás lefutását. A kivulkanizált mintadarabokat 24 óra pihentetés után szakítóvizsgálatnak vettem alá, és a szakítóerőket a kialakult szerszámüregi nyomás függvényében ábrázoltam.

A fröccstechnológiával végzett mérés

Szerszámüregi nyomásmérési vizsgálatokat fröccsprésen is végeztem. A vizsgálat során a befecskendezési nyomás konstans volt, viszont a szerszámba épített állítócsavarral az üregben kialakult nyomásprofilot változtattam. Ezzel különböző nyomást állítottam elő, majd a vulkanizálás végeztével 24 óra pihentetés után szakítógépen szakítóerőt mértem. A kapott eredményeket táblázatba foglaltam, és a matematikai statisztika szabályai szerint kiértékeltem.

2. 3. A reológiai jellemzők és a szakítóerő összefüggései

A gumikeverékek tárolásával és felhasználásával többek között a DIN 53500 számú nemzeti és ISO 1826 számú nemzetközi szabvány foglalkozik. A különböző szabványok a tárolási időt 4 hétben határozzák meg, azonban nem tárgyalják, hogy a tárolás milyen hatással van a reológiai jellemzők változására, illetve azt sem, hogy adott keveréknél a jellemző paraméterek változása (t_{s2} , t_{02}) milyen hatással van a gumi-fém kötés erősségére. Munkám során 20 °C-os tárolási hőmérsékleten, 40% relatív páratartalom mellett 21 hétig tároltam a vizsgált keveréket. A tárolás során először hetente, majd 2 heti rendszerességgel mintát vettem az alapanyagból, és rheométerrel elkészítettem, majd kiértékeltem a vulkanizálási görbét. A mintákból szakítási próbatesteket is vulkanizáltam, és szakítóvizsgálatnak vettem alá.

2. 4. Elemanalitikai vizsgálat

Pásztázó elektronmikroszkópos mérést és karakterisztikus Röntgen-emisszió vizsgálatot végeztem a morfológiai leírás miatt, valamint egy- és kétdimenziós laterális elemtérkép készítése céljából, a határréteg környezetében. A mérés célja annak igazolása volt, hogy a szakirodalmi utalásnak megfelelően dúsul-e fel a keverék összetétele a vizsgált elemekkel, illetve további cél volt annak megállapítása, hogy a kén összetétele számszerűen hogyan változik a határréteg környezetében. A minta egy hosszában félbevágott, 25 mm átmérőjű hengeres gumi-fém alkatrész, melynek fémkomponense Fe-235 minőségi jelű általános acél, gumikomponense a már több esetben is vizsgált R155OF1 natúr kaucsuk alapú keverék, az érintkezési felületet Chemosil 211+411 kombinációjú kötőanyaggal kezeltem. A vizsgálathoz a mintából egy 6x10 mm²-es, 2 mm vastag darabot fűrészelt ki. A minta vizsgálandó felszínét a fűrészelési törmelék eltávolítása céljából analitikai tisztaságú etanollal történő mosással tisztítottam meg (Etanol 96%). A tervezett vizsgálati módszer megkövetelte a minta vizsgálandó felszínének kb. 10 nm vastag aranyréteggel való bevonását is.

2. 5. A profilométeres mérés

Pásztázó elektronmikroszkópos felületvizsgálatot (SEM) 2D morfológiai vizsgálat céljából végeztem, a profilométeres mérést pedig laterális szkennelési módszerrel, 3 és 5 mm hosszúságban, 1D mélységi paraméter meghatározására alkalmaztam. Kiegészítő vizsgálatként optikai mikroszkópos interferometriás-kontrasztos felvételeket készítettem.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A felület érdességi jellemzők hatása a szakítószilárdságra

Eredmények EKF-24 korund alkalmazása mellett

A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy az „R_a” átlagos felületi érdesség kevésbé jellemzi a gumi-fém kapcsolat szakítószilárdságra gyakorolt hatását, mint a mikrotopográfiai vizsgálat, amelyek alakulása egyértelműen követi a szakítószilárdság változását (1. ábra).

1. táblázat, A 2D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő összefüggései

Ssz.	Szórási idő [s]	R _a [μm]	R _y [μm]	R _z [μm]	R _q [μm]	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Szakítóerő átlag [N]	σ	2 σ
1	3	4,78	35,62	29,63	6,05	3184	3135	3304	3205	3200	3207	55	110
2	5	5,1	42,45	31	6,53	3100	3308	3420	3352	3300	3295	107	214
3	8	4,07	29,5	25,82	5,15	3422	3206	3316	3400	3305	3336	77	154
4	15	4,4	31,07	26,97	5,52	3588	3434	3434	3456	3409	3478	64	128
5	30	4,48	31,49	26,2	5,52	2963	3074	3213	3010	3000	3065	88	176

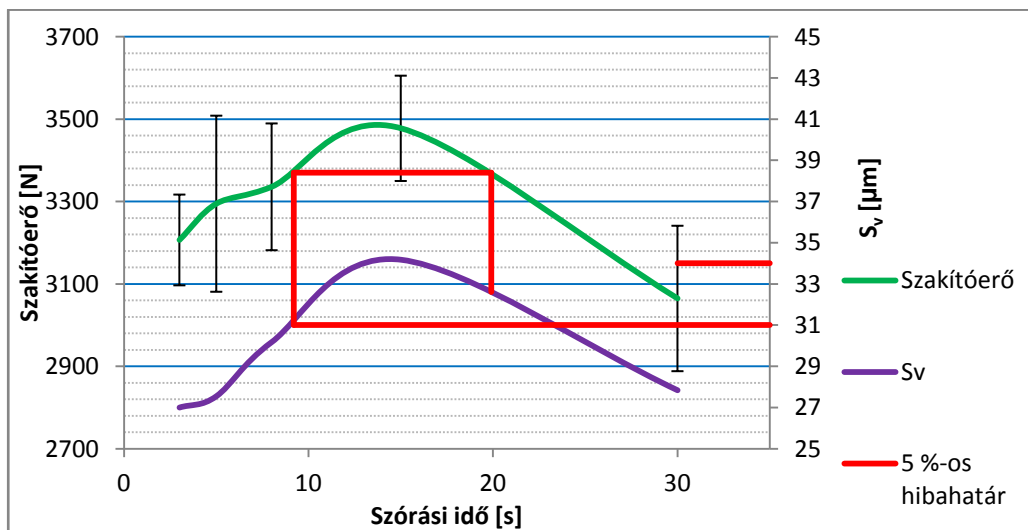
2. táblázat, A 3D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő összefüggései

Ssz.	Szórási idő [s]	S _q [μm]	S _v [μm]	S _z [μm]	S _a [μm]	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Szakítóerő átlag [N]	σ	2 σ
1	3	7	27	61	5,08	3184	3135	3304	3205	3200	3207	55	110
2	5	7	27,55	60,5	5,04	3100	3308	3420	3352	3300	3295	107	214
3	8	7	30,18	54,5	5,4	3422	3206	3316	3400	3305	3336	77	154
4	15	7	34,18	59,08	5,4	3588	3434	3434	3456	3409	3478	64	128
5	30	8	27,84	56,78	5,98	2963	3074	3213	3010	3000	3065	88	176

Az eredmények kiértékelését úgy végeztem, hogy a szakítóerő lefutását bemutató görbe maximumához tartozó értéktől negatív irányban meghatároztam egy 5%-os hibaszávot, amelyen belül kell lenni a kialakult szakítóerőnek. Ezután a görbe 5%-os metszeteihez tartozó S_v metszeteket kivetítettem az S_v tengelyre, amelyről az optimált mikrotopográfia jelzőszámai közvetlenül leolvashatók. Így meghatároztam azt a felületet leíró érdességi tartományt (31

3. Eredmények

$\mu\text{m} < S_v < 34 \mu\text{m}$), amelyet kialakítva a kötőerőnek maximuma van. Az általam elvégzett vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy a kísérleti rendszerben R155OF1 jelű kaucsukkeveréket alkalmazva a bemutatott optimált gyártástechnológia lépéseit és előírásait betartva a hengeres gumigyártmányok szakítószilárdsága 5%-os hibahatáron belül tartható. Megjegyzendő, hogy az eredmények kizárólag síklapú fémfegyverzetek esetében, fröccstechnológia alkalmazása mellett érvényesek.



1. ábra. A hibahatárok értelmezése korund szóróanyag esetében

Eredmények GN-50 acélsörét alkalmazása mellett

A kísérleteim folytatásaként fémelőkészítési technológiát váltottam, és a mechanikus szórást zárt röpitőkerekes szórókabinban GN-50 minőségű acélszemcse alkalmazásával folytattam. Munkám során újabb 50 db fegyverzetet kezeltem, amiből 25 db szakítási próbatestet vulkanizáltam. A felület 2 dimenziós jellemzőinek meghatározására Mitutoyo mérőgépet használtam, DIN Pc5 1990 0,8x5 beállítások mellett. A mérési eredményeket a 3.-4. táblázatban, és a 2. ábrán szemléltetem. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a korunddal végzett mérésorozathoz hasonlóan „ R_a ” átlagos felületi érdesség kevésbé jellemzi a gumi-fém kapcsolat szakítószilárdságra gyakorolt hatását, mint a mikrotopográfiai vizsgálat ezért acélszemcse szóróanyag alkalmazása esetében is a szórt felület 3D-s felületi jellemzőit határoztam meg, amelyek alakulása egyértelműen követi a szakítószilárdság változását (2. ábra).

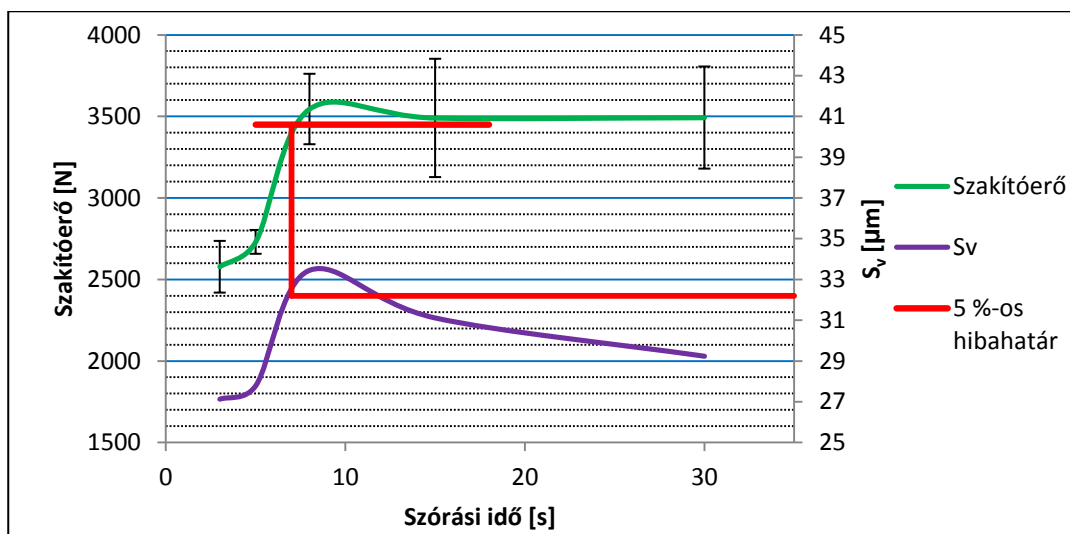
3. Eredmények

3. táblázat, A 2D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő összefüggései

Ssz.	Szórási idő [s]	Ra [μm]	Ry [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Szakítóerő átlag [N]	σ	2 σ
1	3	5,57	45,6	35,65	7,16	2500	2530	2670	2610	2450	2578	79	159
2	5	6,69	49,81	39,76	8,47	2750	2760	2700	2710	2800	2730	37	73
3	8	7,53	58,84	43,83	9,4	3550	3530	3400	3700	3670	3545	108	216
4	15	7,47	48,93	40,82	9,14	3670	3690	3200	3401	3480	3490	181	363
5	30	6,01	42,58	35,07	7,48	3600	3610	3560	3200	3400	3493	157	313

4. táblázat, A 3D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő összefüggései

Ssz.	Szórási idő [s]	S _q [μm]	S _v [μm]	S _z [μm]	S _a [μm]	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Szakítóerő átlag [N]	σ	2 σ
1	3	7,2	27,12	57	5,7	2500	2530	2670	2610	2450	2578	79	159
2	5	7,12	27,78	55	5,57	2750	2760	2700	2710	2800	2730	37	73
3	8	5,96	33,45	36,6	4,82	3550	3530	3400	3700	3670	3545	108	216
4	15	6,27	31,11	40,5	5,02	3670	3690	3200	3401	3480	3490	181	363
5	30	6,82	29,23	51,2	5,41	3600	3610	3560	3200	3400	3493	157	313



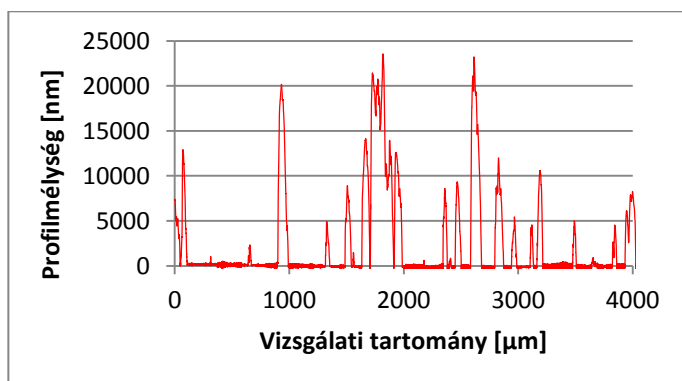
2. ábra. A mérési eredmények kiértékelése

3. Eredmények

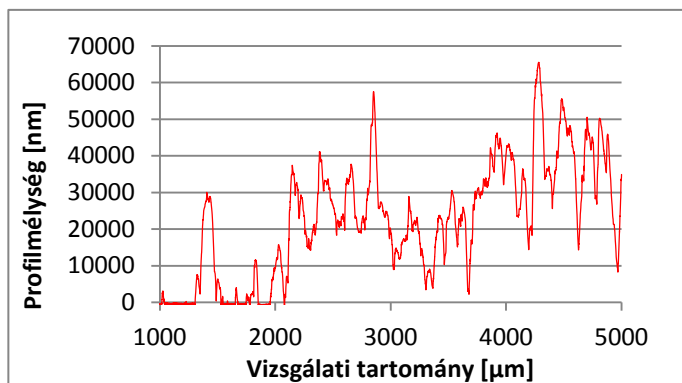
Az eredmények kiértékelését az előző pontban leírtakhoz hasonlóan végeztem. A 2. ábrán megfigyelhető, hogy a szórási idő egy határon túli növelésével (9 s) a felületi mikrotopográfia S_v jelzőszámának mérőszáma csökken. A jelenség magyarázatára profilométeres vizsgálatokat végeztem. A szakítóerő lefutását bemutató görbe 5%-os hibahatárához tartozó értékeket a 2. ábrán mutatom be. Az ábráról meghatározható felületet leíró érdességi tartomány $32 \mu\text{m} < S_v < 34 \mu\text{m}$, amelyet kialakítva a kötőerőnek maximuma van. Megállapítható, hogy az EK-24 korunddal, illetve a GN 50 minőségi jelű acélszemcsével végzett felületelőkészítés ugyanazt az eredményt adja. Ennek gyakorlati jelentősége az, hogy a gépek üzemeltetése során a megadott szórási időket alkalmazva jelentős termelékenység javulás érhető el amellet, hogy a ciklusidő csökkenésével az energia és bérköltések minimalizálhatók.

3. 2. A profilométeres vizsgálat eredményei

A profilométeres mérést laterális szkennelés módszerrel, a mechanikusan előkezelt felületen, 3 és 5 mm hosszúságban, 1D mélységi paraméter meghatározására alkalmaztam. A mérés jelentősége abban áll, hogy a szemcseszórási idő növelésével az R_a átlagos felületi érdesség állandósult annak ellenére, hogy a kezelést tovább folytattam. Megfigyelhető viszont, hogy a mikrotopográfia jellemző S_v értéke a kezelési idő nyújtásával csökkenő tendenciát mutatott. A profilométerrel végzett felületelemzés során arra kerestem a bizonyítékot, hogy a szórási idő növelésével valóban változik-e a felület „csúcsossága”. Amennyiben ez így van, ez azt jelenti, hogy a feltételezésemnek megfelelően a szórási idő egy határon túli növelése valóban a szakítóerő csökkenéséhez vezet. A bemutatott eredmények Fe-235 minőségű acél fegyverzetek EKF-24 korunddal történő kezelése mellett, szobahőmérsékleten és 45% relatív páratartalom mellett, a kezelést követő 24 órán belüli mérésre vonatkoznak.



3. ábra. A mért 8 s-os profilkép



4. ábra. A mért 15 s-os profilkép

A profilométeres mérések az elektronmikroszkópos megfigyelésekkel konzisztensek, a szemcseszórási idővel arányosan a laterális durvaság frekvenciája kis mértékben, bár nem szignifikánsan nő, a normális (felületre mérőleges) rms durvaság tendenciája viszont nem egyértelmű. A 3.-4. ábrák a különböző időre kezelt minták szkenjének négyzetes eltérését mutatja egy tetszőlegesen kiválasztott tartományban. A fémfegyverzet ragasztóval történő kezelésének és a gumiréteg felvitelének technológiai részleteit vizsgálva feltételezem, hogy a felületi morfológia szemcseszórás következtében kialakított változásai a szakítószilárdsággal a gumirétegen alkalmazott szakítóerő következtében fellépő erőhatások és belső szerkezeti változásokon keresztül hozható összefüggésbe. A profilométerrel készített felvételeken a kezdeti feltevésem beigazolódott, ugyanis valóban a 8 s-os és 15 s-os kezelt felületek közötti esetben észlelhető a legnagyobb csúcs-völgy távolság. Ennek ismeretében a 3D felvételek és a szakítóerő összefüggése magyarázható. Megfigyelhető, hogy a szakadási felszín nem a gumi-fém határfelület, ami alapján vélhető, hogy a szakadást a gumirétegen belüli makroszkópikus (0.1-1 mm nagyságrendű) korrelációs távolságok határozzák meg. Ezek valószínűleg termodinamikus természetűek, amelyek a nagy mechanikai stressz következtében disszipált hő mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával hozhatók kapcsolatba. A szakítószilárdság erősen hőmérsékletfüggő, amit a fémfegyverzet jó hővezetőképessége is befolyásolhat. A fémfegyverzet a határréteg hővezetőképességtől függő vastagságú környezetének hőmérsékletét stabilizálhatja, más szóval a disszipált hőt elvezeti, és a szakadás a gumirétegen belül fog megtörténni. Annak oka, hogy a felületi durvaság milyen módon határozza meg a határréteg és környezetének termodinamikus tulajdonságait (hődisszipáció, hővezetőképesség, szakítószilárdság-hőmérséklet függvény),

3. Eredmények

még nem egyértelmű, és figyelembe kellene venni a gumiréteg felvitele során esetlegesen fellépő szerkezeti változásokat. Emellett a szakítópróba külső fizikai paraméterei (pl. hőmérséklet, szakítóerő növekedési sebessége), azok stabilitása is fontos szerepet játszhat a mérés során.

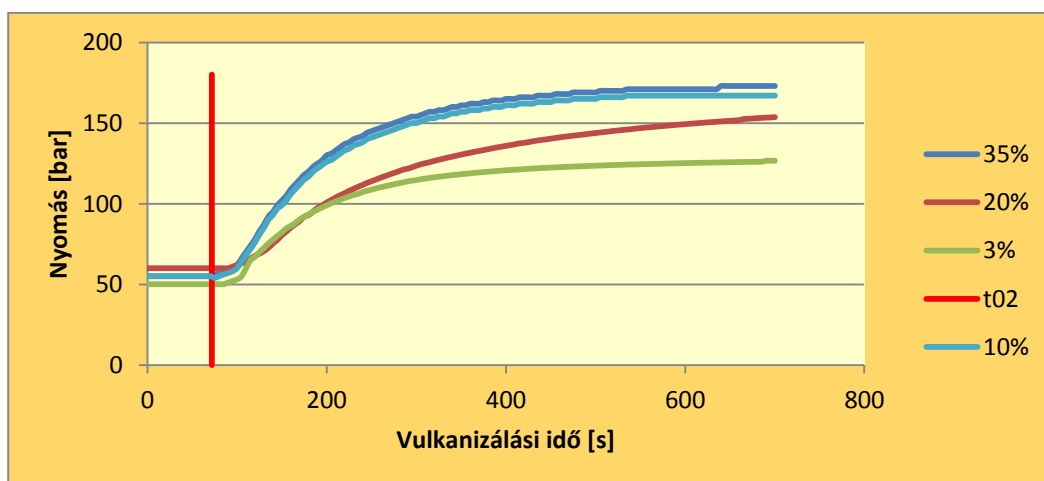
3.3. A szerszámüregi nyomás hatása a fémkötésre

A kompressziós technológiával végzett nyomásmérés eredményei

A kísérlet során a vizsgált gumikeverékből az optimált felületi érdességgel előkészített fegyverzetekre gumitesteket vulkanizáltam, majd mértem a kialakult szakítóerő nagyságát. A vulkanizáló szerszám fészekben különböző tömegű töltetekkel eltérő nyomásokat állítottam elő. A préselő erő hatására a fészekben kialakult nyomásokat különböző túltöltések esetén az 5. táblázat, a nyomás időbeli lefutását pedig az 5. ábra szemlélteti.

5. táblázat, A kompressziós technológia

Sorszám	Túltöltés	A kiindulási gumikeverék	A t_{02} -nél kialakult	Erő
1	3	10,3	50	1100
2	10	11	55	1670
3	20	12	60	2080
4	35	13,5	55	1700



5. ábra. Kompressziós technológiánál, t_{02} -nél mért nyomásértékek

3. Eredmények

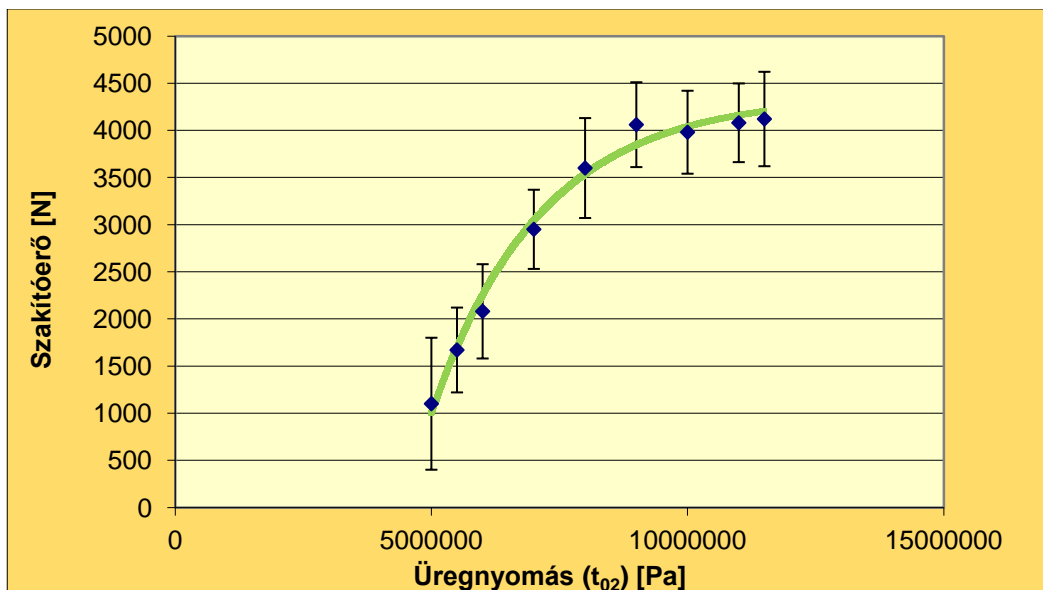
A fröccstechnológiával végzett nyomásmérés eredményei

A vulkanizáló fröccsszerszámban kialakult nyomásokat különböző kísérleti beállításoknál a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat, Az üregnyomás hatása a szakítóerőre

Üregnyomás [bar], (t_{02})	Szakítóerő [N]	Szakítóerő [N]	Szakítóerő [N]	Szakítóerő átlag [N]	σ	2σ	Szórásnégyzet
70	2650	2956	3250	2952	300,02	600,04	90012
80	4330	3327	3152	3603	635	1270	403225
90	4263	3555	4364	4061	440	880	193600
100	3731	3960	4249	3980	260	519,16	67381
110	3973	3901	4366	4080	250	500	62500
115	4363	4003	4000	4122	208	416	43264

A 6. ábra a t_{02} -nél mért üregnyomás és a kialakult szakítóerő összefüggését mutatja.



6. ábra. A kezdeti üregnyomás és a szakítóerő összefüggése

3. Eredmények

A matematikai modell helyességének ellenőrzése

Annak igazolására, hogy az általam felállított nullhipotézis, vagyis hogy a jelenséget egy telítődési görbe írja le, statisztikai módszerekkel próbára tettem. A statisztikai próbát egy próbafüggvény segítségével végeztem. A próbafüggvény táblázatnak megfelelő értéke alapján döntöttem a nullhipotézis megfelelősége mellett. A döntést a $p=10\%$ szignifikancia szinten hoztam meg. A jelenséget leíró telítődési görbe matematikai alakja:

$$f(x) = a \cdot (1 - e^{-(c+b \cdot x)}) \quad (1)$$

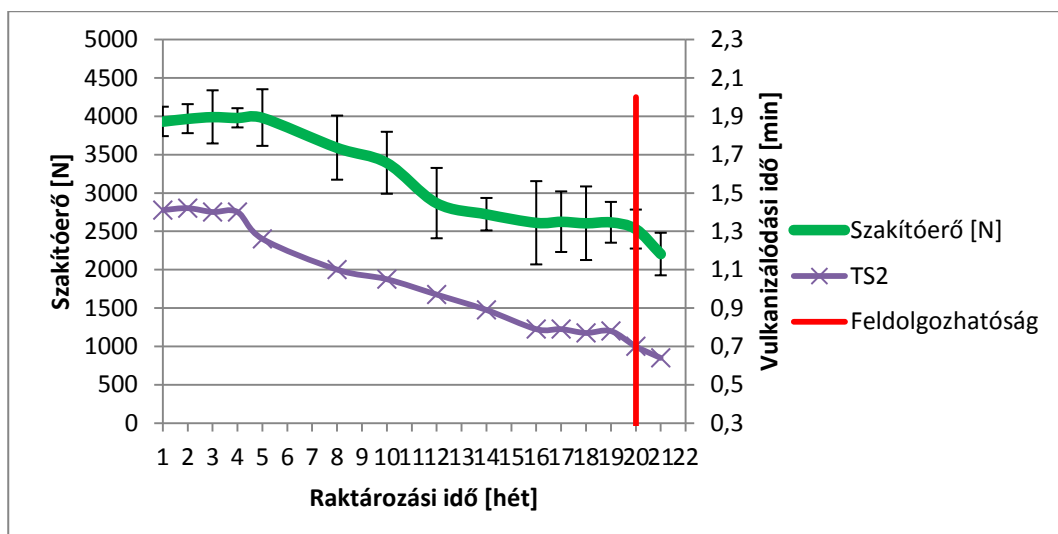
ahol:

- a, b, c fizikai tartalommal nem rendelkező paraméterek,
- x pedig a nyomást jelenti.

3. 4. A reológiai jellemzők változásának hatása a kötés erősségére

A sikeres gumi-fém kötés kialakításának nem csak a megfelelően előkészített fémfegyverzetek, az alkalmas gumikeverék, és a gyártási technológia betartása a záloga, hanem más tényezők is befolyásolják. Ilyen például a gumikeverék kora is. Kísérleteim során azt vizsgáltam, hogy a keverék korának előrehaladtával hogyan változnak bizonyos vizsgált reológiai jellemzői, és ezen értékek változása hogyan befolyásolja a kialakult szakítóerő nagyságát.

Az eredményeket grafikus formában a 7. ábrán mutatom be.



7. ábra. Szakítóerő és a ts_2 változása a tárolási idő függvényében 20 °C-on

3. Eredmények

Eredményként megállapítható, hogy a szabvány utalásainak megfelelően a keverék jelentős szilárdságsökkenés nélkül 4 hétig tárolható. Figyelemre méltó azonban, hogy a ts_2 -vel jelölt reológiai jellemző (beégési pont) változása jó közelítéssel követi a szakítószilárdság változását.

3. 5. A gumi-fém határréteg elemanalitikai vizsgálata

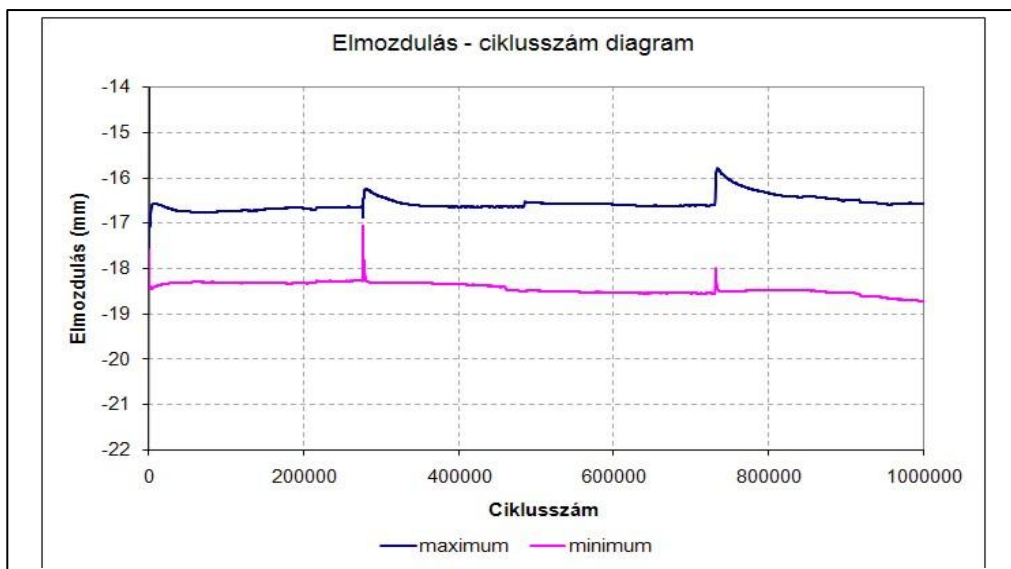
A gumi-fém kapcsolatrendszer több paraméter egyidejű megfelelőségén múlik, ezért vizsgálni kell a határréteg, vagyis a fém-ragasztóanyag, illetve a ragasztóanyag-gumi felületein lejátszódó folyamatokat is. Ennek tisztázására a gumi-fém határrétegre merőlegesen felvett egydimenziós elem-eloszlásokat vizsgáltam. A vizsgálat során a Röntgen berendezés által készített diagram függőleges tengelyén a relatív röntgen intenzitás látható, a vízszintes tengelyen pedig a különböző vizsgált elemek vannak feltüntetve. A kísérlet eredményeit felhasználva megállapítottam, hogy a határfelületen anyagkompozíciós módosulatok nem jönnek létre, ezért a nanoszálakkal végzett továbbfejlesztési kísérletek eredményesek lehetnek.

3. 6. A gumirugók vizsgálata

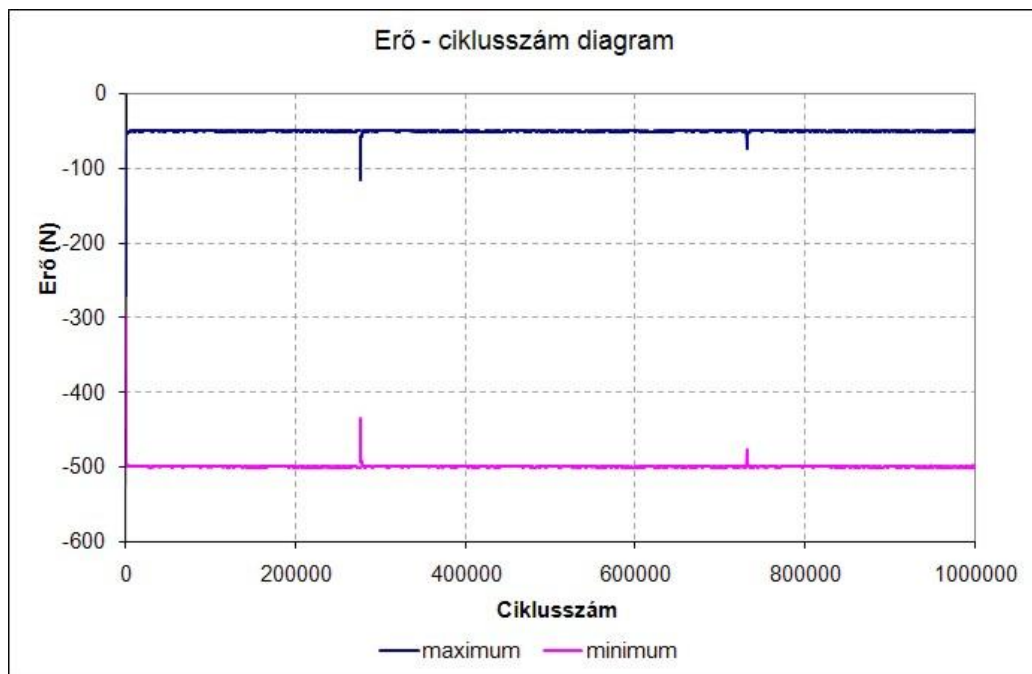
A gumi, mint szerkezeti anyag modellezése és vizsgálata igen összetett matematikai problémát jelent. A gumiiipari vizsgálatokat tovább bonyolítja, hogy a mérések eredménye nagymértékben függ a deformáció sebességétől, a próbatest alakjától, a hőmérséklettől, stb. Ezen okok miatt szinte minden jellemző tulajdonság numerikus meghatározására különböző szabvány alakult ki, amely a legfontosabb vizsgálati paramétereket rögzíti. A húzófeszültségnyúlás vizsgálatra a DIN 53504 illetve az ISO 37 szabvány utalásai vonatkoznak. Munkám során két berendezést használtam. Statikus vizsgálatokra LLYOD LR30K gépet, dinamikus hőkamrás vizsgálatra pedig INSTRON berendezést használtam. A termikus vizsgálatokra azért volt szükség, mert a vizsgált gépelem üzemi körülmények között tág hőmérsékleti határban dolgozik. A negatív hőmérsékletet cseppfolyós nitrogén alkalmazásával biztosítottam. A pozitív tartományban elektromos fűtésű hőkamra állt rendelkezésemre.

A 8. és 9. ábrák a gumirugó vizsgálatának eredményeit mutatják. A vizsgálat az általam bemutatott kísérleti rendszerben ismertett anyagminőségekre és geometriára vonatkozik.

3. Eredmények



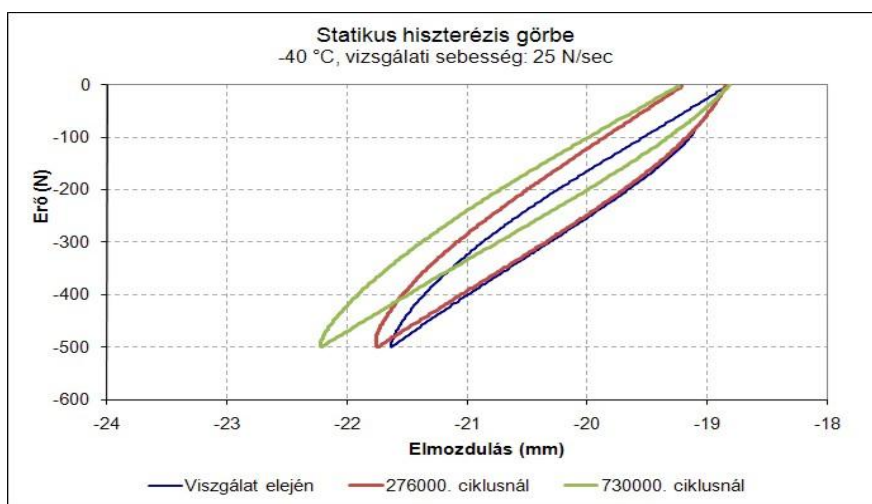
8. ábra. Elmozdulás-ciklusszám diagram



9. ábra. Erő-elmozdulás diagram

3. Eredmények

A diagramokon a két „kiugrás” a cseppfolyós nitrogén palack cseréje miatt látható. Megjegyezendő, hogy a palackok cseréje 15 perc vizsgálati üzemszünetet idézett elő, azonban a hőszigetelt vizsgálókamrában ez idő alatt a hőmérséklet jelentősen nem változott. Tekintettel a vizsgálati próbadarab viszonylag nagy méretére ezzel együtt jelentős hőkapacitására, az üzemszünet nem módosította számottevően a kísérlet végeredményét. A görbékről megállapítható, hogy a munkám során optimált gyártási eljárással előállított gumirugók az elvárt élettartam alatti 1 millió fárasztási ciklust még $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os környezetben is károsodás nélkül elviseltek. A 10. ábra a dinamikus fárasztás közbeni statikus hiszterézis hurkokat mutatja különböző fárasztási ciklusnál.



10. ábra. Statikus hiszterézis hurok különböző fárasztási állapotban

A hiszterézis hurkok elemzése után megállapítható, hogy a fárasztás után a gumielem kissé kilágylt, ami a térhálós szerkezetre jellemző keresztkötések részleges szakadásával magyarázható. Ez azonban az üzemeltetésnél nem okoz problémát, és mint láttuk a fémkötésre sincs jelentős hatással, hiszen a dinamikus, hőkamrás fárasztás után is a szakítóerő a gyártás utáni érték 95%-át érte el.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Mikrotopográfiai vizsgálattal megállapítottam, hogy a kétdimenziós „ R_a ” (átlagos felületi érdesség) nem jellemzi jól a gumi-fém kapcsolat szakítószilárdságra gyakorolt hatását. Ezért a GN 50 minőségű acélszemcsével, illetve EKF-24 minőségű korunddal előkészített szórt felület térbeli jellemzőit határoztam meg 25° beesési szögben 35 cm-es szórási távolsággal. Ezek alapján megállapítottam, hogy a kialakuló gumi-fém tapadási szilárdság összefügg az acél fegyverzet „ S_v ” térbeli mikrotopográfiai jelzőszámával (a felület legmélyebb pontja és a középsík távolsága). A vizsgált gumi-fém kötőszilárdság szempontjából a $31 \mu\text{m} < S_v < 34 \mu\text{m}$ az optimális érdességi tartomány.
Kísérleteim alapján megállapítottam, hogy EN10263 acél fegyverzet esetén a gumi-fém kötőszilárdság nem hozható összefüggésbe a szemcseszóró anyag típusával. A kötőszilárdságot csak a kialakított felület térbeli morfológiája befolyásolja.
2. Olyan komplex mérőrendszert dolgoztam ki fém-gumi kapcsolat kötőszilárdságának meghatározására, amellyel igazoltam valós technológiai folyamatra, hogy a gumikeverék 20%-os vulkanizálódásánál (t_{02} -nél) mért üregnyomás összefüggésben áll a 155°C -os vulkanizálási hőmérsékleten kialakult kötés szilárdságával. A reológiai jellemzőnek tekintett 20%-os vulkanizálásnál mért szerszámüreg-nyomás és a kialakult szakítóerő között a $p_{fv} = a \cdot (1 - e^{-(c+b \cdot x)})$ alakú, 3 paraméteres telítődési függvényvel írható le a kapcsolat, ahol a, b, c fizikai tartalommal nem rendelkező paraméterek, x pedig a nyomást jelenti.
A vulkanizálási ciklus közben változtatható térfogatú mérőszerszámmal végzett vizsgálataim során kimutattam, hogy a kialakuló gumi-fém tapadás független a nyomásprofil lefutásától, azt kizárólag a t_{02} -nél mért üregnyomás befolyásolja.
Kapcsolatot állapítottam meg - kompressziós technológia alkalmazása mellett - a vulkanizáló fészekbe behelyezendő előgyártmány tömege és a szakítóerő között. 20% anyagtömeg többletig növelhető eredményesen a szerszámba helyezett előgyártmány mennyiség, utána az osztósíkban kialakuló sorjaképződés nem kívánt nyomásingadozáshoz vezet, ami miatt a szakítóerő értéke bizonytalanává válik, szórása megnő.
3. Vulkanizálási kísérletekkel kimutattam, hogy különböző térhálósodási sebességű keverékek esetében a szakítóerő $0,7 \text{ min} < t_{s2} < 1,4 \text{ min}$

4. Új tudományos eredmények

tartományban nem független a keverék vulkanizálási sebességétől. Lineáris kapcsolatot találtam a vizsgált reológiai jelzőszám és a próbavulkanizálás után kialakult tapadóerő között.

4. Méréseimmel igazoltam, hogy a vonatkozó szabványok előírásainak megfelelően a keverék négy hétig tárolható minőségváltozás nélkül. Megállapítottam, hogy 20 °C-os tárolási hőmérsékleten a vizsgált natúr kaucsuk alapú keverék esetében a t_{s2} -vel jellemzett beégési pont közel lineáris kapcsolatban van a kialakuló kötésszilárdságra. Ennek ismeretében a keverékek felhasználhatósága, illetve alkalmazhatóságának határa egyszerű mérési és számítási módszerrel meghatározható.
5. Megállapítottam a kísérleti rendszerben, hogy a gumi-fém gyártmányok előállításának szükséges, de nem elégséges feltétele, a $t_{s2} > 0,7$ min egyenlőtlenség fennállása.
6. A fémfegyverzetek gumival érintkező felületének leírására elektronmikroszkópos vizsgálatot, a határréteg környezetében létrejövő anyagszerkezeti változások nyomonkövetésére karakterisztikus röntgenemisszió mérést alkalmaztam. Egy- és kétdimenziós laterális elemtérkép alapján kimutattam, hogy a kén és klór jelentősen feldúsul a határréteg közelében. A laterális elemtérképek segítségével megállapítottam, hogy a gumi-fém kötés kialakítására alkalmas keverékek maximális, összes kéntartalma 4% lehet.
7. Az optimált gyártástechnológia esetében megállapítottam, hogy a szakítóvizsgálattal előállított tönkremenetel esetén a szakadási felszín nem a gumi-fém határfelület, hanem a gumiréteg belső kontrakciója. Ez elsősorban termodinamikai természetű, amely a jelentős mechanikai feszültségek következtében disszipált hő mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával hozható kapcsolatba.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Munkám során számos olyan információt szereztem a kaucsukkeverékek, illetve a gumi-fém kötésű alkatrészek viselkedéséről, amelyeknek sok elméleti és gyakorlati haszna van. A fémelőkészítés technológiáját a vizsgált kísérleti rendszerben számszerűen megadtam, amely hiánypótló az adott szakterületen. Kísérletekkel meghatároztam azt a függvényt, amely a szerszámüregben uralkodó nyomás és a kialakult szakítóerő között teremt kapcsolatot. Ez szintén fontos eredmény, hiszen ennek ismeretében a gumi-fém gyártmányok gyártási biztonsága jelentős mértékben javítható, a kialakult kötés szakítószilárdságának szórása minimálisra csökkenthető. Az elemanalitikai vizsgálatok során meghatároztam a kötőzóna jellemzőit, annak szélességét, illetve elemösszetételét. Ennek ismeretében bemutattam, hogy az utóbbi évtized jelentős nanotechnikai fejlesztése a gumigyártmányok szerkezettani erősítésében miért nem jutott eredményre. A szénláncokat összekapcsoló kénhidakból álló térhálós szerkezettel ugyanis nem képesek az inert szénnanocsövek kémiai kötést kialakítani, ezáltal a szakítószilárdságra gyakorolt növelő hatás sem érvényesül. Eredményeim alapján további biztató kutatásokat végzek azonban arra vonatkozóan, hogy melyek azok a nanostruktúrák, amelyek kémiai kötést tudnak kialakítani az ismertett térhálós szerkezet valamely elemével. A gumiipari vállalatok jelentős anyagi áldozatot hoznak azért, hogy a raktározás során tárolt kaucsukkeverékek felhasználhatóságát meghatározzák. A gyakorlatban elterjedt vizsgálatok azonban nem adnak korrekt összefüggéseket az élettartam, illetve a kialakult mechanikai jellemzők valamelyike között. Mivel a szóban forgó anyag az idő múlásával folyamatosan veszít minőségi jellemzőiből, továbbá ezt a tárolási körülmények is rendkívüli módon befolyásolják, ezért a felhasználhatósági határ számszerű meghatározása nagy segítséget jelent a technikusok számára. Dolgozatomban bemutatom azt az összefüggést, amely szerint a ts_2 -vel jelölt, beégési pontnak nevezett reológiai jelzőszám korrelál a gyártás során kialakuló gumi-fém szakítóerő nagyságával. Napjainkban zajló gazdasági válság és ennek hatására erősödő piaci verseny minden vállalatot arra kényszerít, hogy a gyártási folyamatait optimalja, a selejtglyártást minimálisra szorítsa, valamint az alapanyagok minőségi osztályozását számszerűleg is megadja. Ez csak akkor érhető el, ha valamennyi említett munkafolyamatra létezik mérhető technológiai paraméter, amellyel adott részfolyamat minősíthető. Munkám során meghatározott új tudományos eredmények ennek a törekvésnek kívánnak elméleti alapot adni.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori munkám kezdetén arra a kérdésre kívántam választ adni, hogyan lehet a repülőgépiparban alkalmazott gumi-fém kötésű alkatrészek gyártási biztonságát növelni. Ennek elérése érdekében az egymástól fizikai tulajdonságaiban nagyon különböző gumi és fém komponensek határfelületén kialakuló kapcsolat vizsgálatára kísérleteket és mérőberendezést terveztem, azok adatait összegyűjtöttem és a matematikai statisztika szabályai szerint kiértékeltem. Munkám során felhasználtam üzemi mérőberendezéseket, és az egyetemi mérőgépek mellett kutatóintézetek szolgáltatásaira is támaszkodtam. A szerszámüreg nyomásméréshez változtatható térfogatú mérőszerszámot készítettem. A szerszámhoz GEFAN típusú nyomásérzékelőt csatlakoztattam, így mérési eredményeimet számítógépes szoftverrel tudtam kezelni és feldolgozni.

A rezgéscsökkentő gumirugók és egyéb gumi-fém alkatrészek iparszerű gyártása során, vegyi úton előállított kötőanyag felhordásával valósul meg a gumikeverék fémfegyverzetekhez történő kötése. Az eljárás a fém alkatrészek zsírtalanításával kezdődik, amit mechanikus fémelőkészítés követ. Ez a fém anyagától függően korunddal vagy acélsöréttel történő szemcseszórást jelent. A ragasztóanyag technológia szerinti felhordásán túl nagy befolyása van a kialakult kötőerőre egy alkalmas gumikeveréknek is. A keverék köthetősége jelentős mértékben függ annak keménységétől és az elasztomer típusától is. A fémfegyverzetek mechanikus előkészítésének mértékét szemcseszórási próbákkal elemeztem. A beépülő fém alkatrészek különböző szóróanyaggal, eltérő szórási idővel más-más felületi érdességeket állítottam elő, a mintákon átlagos felületi érdességet mértem, majd a fémfegyverzeteket ragasztóanyaggal kezeltem és a próbatesteket vulkanizáltam. Ezt követően szakítóvizsgálatnak vettem alá és a szakadási erőket mértem, a kísérleti beállításoknál (*Pék, 2000*) irodalmi utalásait vettem figyelembe.

A rezgéscsökkentő gumirugó modellezésére az irodalomban használatos Kelvin modellt alkalmaztam. A felület előkészítési mérések során 23 mm átmérőjű Fe-235 anyagból hidegalakítással gyártott M6x18 mm-es menetes szárral ellátott fémfegyverzetek felületét korund szóróanyaggal szemcseszórtam, majd a mintákon 2D-s és 3D-s módszerrel felületi jellemzőket mértem, illetve elemeztem a mikrotopográfiát. Ezt követően a próbatesteket kétrétegű ragasztóanyaggal kezeltem, majd R155OF1 jelű természetes kaucsuk alapú gumikeverékkel próbavulkanizáltam azokat. A próbatesteket gyártás után statikus szakítóvizsgálattal teszteltem, és az eredményeket táblázatos és diagramos formában adtam meg.

A mérésekhez szükséges nyomásmérő szerszámot célszerűen úgy terveztem, hogy hagyományos préstechnológiánál, és fröccstechnológiánál alkalmazott mérésekhez is alkalmazható legyen, ugyanakkor a vulkanizálási ciklus bármely időszakában a hasznos térfogatot 13,5%-on belül változtatni lehessen. Először prés technológiával dolgoztam, amikor is a nyitott szerszámüregbe különböző mértékű túltöltésekkel hajtottam végre a próbavulkanizálásokat, miközben a teljes folyamat alatt mértem a nyomás változását. Ezt követően fröccstechnológiával változtatott befecskendezési nyomással is dolgoztam, majd a mintadarabokat mindkét esetben szakítóvizsgálattal minősítettem. Az eredményeket kiértékelve megállapítottam, hogy a vulkanizálás során a végső nyomás mindkét technológia esetében hasonló, azonban jelentős különbség mutatkozik a folyamat elején. Vizsgálataim további részében arra kerestem a választ, hogy (most már a technológiákat az összehasonlíthatóság miatt külön vizsgálva) az alapvető reológiai jellemzőnek tekintett t_{02} -nél az üregnyomás hogyan befolyásolja a kialakult kötés szilárdságát.

A módosított befecskendezési adagmennyiségekkel és befecskendezési nyomásokkal változtatott szerszámüreg nyomás mérés során megállapítottam, hogy a kialakult szakítóerő független a túltöltés mértékétől, azt csupán a kezdeti üregnyomás befolyásolja. A t_{02} -nél, mint jellemző reológiai paraméternél mért kezdeti üregnyomás és a kialakult szakítóerő $p_{fv}=a \cdot (1-e^{-(c+b \cdot x)})$ formában felírt 3 paraméteres telítési függvény szerint változik.

A gumi-fém kapcsolatrendszer több paraméter egyidejű megfeleléségén múlik, ezért vizsgálni kellett a határréteg, vagyis a fém-ragasztóanyag, illetve a ragasztóanyag-gumi felületein lejátszódó folyamatokat is. Ennek analitikai tisztázására a gumi-fém határrétegre merőlegesen felvett egydimenziós elemeloszlásokat vizsgáltam.

A minta egy hosszában félbevágott, 25 mm átmérőjű hengeres gumi-fém alkatrész volt. A vizsgálathoz a mintából 60 mm² területű 2 mm vastag darabot fűrészelt ki. A minta vizsgálandó felszínét a fűrészelési törmelék eltávolítása céljából analitikai tisztaságú (96%-os) etanollal történő mosással tisztítottam meg. A vizsgálati módszer a minta vizsgálandó felszínének kb. 10 nm vastag aranyréteggel való bevonását is megkövetelte.

Megállapítottam, hogy a gumi-fém határrétegek környezetében az elemeloszlások korlátozott információt szolgáltatnak a gyártástechnológia és/vagy öregedési folyamatokra (pl. transzport-jelenségek), amelynek elsődleges oka a határréteg érdessége a vágási felületen. Ez mérés technikai szempontból kritikus, ugyanis a pásztázó elektronnyaláb becsapódás körüli

információs térfogatát statisztikusan befolyásolja, és az elemeloszlások kiszélesedését okozza, ezért a gumi-fém határreteg környezetében a kétdimenziós elemeloszlásokat elektronmikroszkóppal vizsgáltam meg. A további felületelemzés miatt végzett profilométeres mérések az elektronmikroszkópos megfigyelésekkel konzisztensek, a szemcseszórás idővel arányosan a laterális durvaság frekvenciája kis mértékben, bár nem szignifikánsan nő, a normális (felületre merőleges) durvaság tendenciája viszont nem egyértelmű.

A felületi morfológia szemcseszórás következtében kialakított változásai a szakítószilárdsággal a gumirétegen alkalmazott szakítóerő következtében fellépő erőhatások és belső szerkezeti változásokon keresztül hozható összefüggésbe. Megfigyelhető, hogy az optimalizált gyártástechnológia esetében a szakadási felszín nem a gumi-fém határfelület, ami alapján megállapítható, hogy a szakadást a gumirétegen belüli makroszkópikus (0.1-1 mm nagyságrendű) korrelációs távolságok határozzák meg. Ezek valószínűleg termodinamikai természetűek, amelyek a jelentős mechanikai feszültségek következtében disszipált hő mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával hozhatók kapcsolatba. A szakítószilárdság erősen hőmérsékletfüggő, amit a fémfegyverzet jó hővezetőképessége is befolyásolhat. A fémfegyverzet a határreteg hővezetőképességtől függő vastagságú környezetének hőmérsékletét stabilizálhatja, más szóval a disszipált hőt elvezeti, és a szakadás a gumirétegen belül következik be. Annak oka, hogy a felületi durvaság milyen módon határozza meg a határreteg és környezetének termodinamikai tulajdonságait (hődisszipáció, hővezetőképesség, szakítószilárdság-hőmérséklet függvény), még nem egyértelmű, és figyelembe kellene venni a gumiréteg felvitele során esetlegesen fellépő szerkezeti változásokat. Emellett a szakítás külső fizikai paraméterei (pl. hőmérséklet, szakítóerő növekedési sebessége), továbbá azok stabilitása is fontos szerepet játszhat a mérés során.

Reológiai vizsgálataim során a gumikeveréket Monsanto S100 mérőműszerrel vizsgáltam. A keverékből 40 kg mintamennyiséget készítettem, és azt 20 °C-os temperált raktárhelyiségben tároltam. Az első mérésre 2012. március 6.-án került sor és ezt követően minden héten lemetszettem a keverékből 1,6 kg-ot, és reológiai vizsgálatnak, illetve a vulkanizált próbatesteket szakítóvizsgálatnak vettem alá. Reológiai és vulkanizálási mérésekkel kimutattam, hogy a különböző térhálósodási sebességű keverékek esetében a kialakult szakítóerő nem független a keverék vulkanizálási sebességétől, a $t_{s2} = 0,7-1,4$ min tartományban, R1550F1 keverék esetében.

A mechanikus fegyverzet előkészítési kísérletek eredményeiből egyértelműen megállapítható volt, hogy az R_a átlagos felületi érdesség nem alkalmas a gumi-fém kötés erősségének jellemzésére. A szórási idő (ezáltal a változó felületi érdesség) és a kötési szilárdság között ugyanis nem lehet egyértelmű összefüggéseket kimutatni. Fontos mérési eredmény azonban, hogy található olyan 3 dimenziós felületet jellemző mérhető paraméter (S_v), amelynek változása összefüggésbe hozható a szakítóerő változásával.

A szerszámüregben kialakult nyomás-idő görbe lefutása hasonlít a Monsanto-görbékhez, a nyomás maximuma a teljes térhálósodáskor lép fel. A kapott eredmények ismeretében a vulkanizáló szerszámok szilárdsági méretezése biztonságosan elvégezhető. A nyomásértékek 50 kN záróerővel, max. 5 min zárási idővel végzett sajtolás esetén érvényesek.

Az elemeloszlás vizsgálati eredményei arra utalnak, hogy a klór feldúsul a határréteg két oldalán, a vas és a szén mennyisége nem változik a határrétegben. A klór a kötőanyag kipárolgása miatt dúsul fel, melynek ismerete azért fontos, hogy meg tudjam állapítani a megengedett maximális szerszámnyitási időt, ugyanis ha az túl hosszú, akkor a kipárolgás a környezetbe és nem a határrétegbe történik, ami szintén gyengíti a kötetést. A későbbiekben a kén, a szilícium és a nátrium elem-eloszlást is indokolt meghatározni annak megállapítására, hogy további kénhidak kialakulnak-e a határrétegben illetve a fémbe, valamint a gumiban lévő szennyező és segédanyagok milyen mértékben dúsulnak fel a vizsgált zónában.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven:

1. **Renner T.** – Pék L. (2011): Comparing strength properties of natural and synthetic rubber mixtures, Sustainable Construction and Design Volume 2, 2011, pp. 134-141. ISSN 2032-7471
2. **Renner T.** – Pék L. (2013): Entwicklung der Produktion der Gummi-Metallersatzteile für die Fahrzeugindustrie, GAK, 11/2013 (in press)
3. Barányi I. – **Renner T.** – Kalácska G. – Baets P. (2013): Influence of surface preparation on roughness parameters and tensile strength of steel/rubber bonded shock absorber parts, Applied Surface Science, (under review)

Lektorált cikk magyar nyelven:

4. **Renner T.** – Pék L. (2009): Természetes és szintetikus kaucsukkeverékek szilárdsági tulajdonságainak összehasonlítása, Műanyag és Gumi 46/12, A9-A12 o. HU-ISSN 0027-2914
5. **Renner T.** – Pék L. (2011): Gumi-fém kötés kialakításának feltételei gépipari hibrid alkatrészek gyártásánál, Műanyag és Gumi 48/3, 89-92 o. HU-ISSN 0027-2914
6. **Renner T.** – Pék L. (2011): Gumi-fém kötés optimalizálása repülőgépipari hibrid alkatrészek gyártásánál, Műanyag és Gumi 48/12, 473-475 o. HU-ISSN 0027-2914