

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Elasztomer-fém kötés kialakításának
feltételei gépipari hibrid alkatrészek
gyártásánál

Doktori (PhD) értekezés

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.....	7
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	11
1.1. A választott témakör jelentősége.....	11
1.2. Célkitűzések	11
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	13
2.1. A gumiipar technológiája	13
2.1.1. <i>Az elasztomerekről általában.....</i>	14
2.1.2. <i>A gumigyártás műveletei.....</i>	16
2.1.3. <i>A vulkanizálás gépei</i>	22
2.1.4. <i>A vulkanizálás szerszámai</i>	25
2.1.5. <i>Ultra gyors vulkanizálás.....</i>	26
2.2. Rugók	28
2.2.1. <i>A rugók jellemzői</i>	28
2.2.2. <i>Tányérrugók, mint alakrugók</i>	28
2.2.3. <i>A gumirugók, mint anyagrugók</i>	30
2.3. Gumirugók jelleggörbéi, anyagtulajdonságai.....	30
2.4. A Mooney-Rivlin anyagmodell.....	32
2.4.1. <i>A gumi-fém kötésre alkalmas keverékek.....</i>	34
2.4.2. <i>A gumirugók típusai.....</i>	35
2.5. A gumirugók gyártása	37
2.5.1. <i>A gumi-fém kötés kialakítása</i>	39
2.5.2. <i>A különböző technológiák hiányosságai.....</i>	43
2.6. A gumi-fém kötés kialakításának nehézségei.....	43
2.6.1. <i>Fém előkezelés</i>	44
2.6.1.1 <i>Fém alkatrészek mechanikai előkezelése</i>	44

2.6.1.2 Kémia előkészítés	45
2.6.2. Gumi-fém kötést elősegítő ragasztóanyagok	46
2.6.3. A ragasztóréteg felhordása	46
2.6.4. A gumikeverékek hatása a gumi-fém adhézióra	47
2.6.5. Vulkanizált kötés kialakulása.....	47
2.6.6. A kialakult kötés erősségének vizsgálata	48
2.6.7. A kialakult kötés hibalehetőségei és lehetséges okai	49
2.7. Fémfegyverzetek.....	51
2.7.1. Fémfegyverzetek gyártása.....	51
2.7.2. Fémfegyverzetek előkészítése ragasztószóráshoz	51
2.7.3. Tisztítás injektoros szemcseszóró berendezéssel	52
2.7.4. Tisztítás lapátkerékes szemcseszóró berendezéssel, acélsörét szóróanyaggal.....	53
2.8. Az adhéziós kötés kémiai értelmezése	53
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	65
3.1. A modellvizsgálatok helyszíne.....	65
3.2. A fémfegyverzetek felület előkészítésének hatása	66
3.2.1. A fémfegyverzetek előállítása.....	66
3.2.2. Az injektoros szóró berendezés	69
3.2.3. A röpitőkerekes szemcseszóró berendezés	71
3.3. A szerszámüregi nyomás hatásának vizsgálata	72
3.3.1. A mérőszerszám kialakítása.....	72
3.3.2. A mérőkör elektromos kapcsolási vázlata	75
3.3.3. Az alkalmazott gumikeverék vizsgálata	75
3.3.4. A kompressziós technológiával végzett mérés	79
3.3.5. A fröccstechnológiával végzett mérés.....	81
3.4. A reológiai jellemzők és a szakítóerő összefüggéseinek vizsgálata .	82

3.5. A pásztázó elektronmikroszkóp, és Röntgen emissziós mérés	82
3.6. A profilométeres mérés	83
4. EREDMÉNYEK	85
4.1. A felület érdességi jellemzőinek hatása a szakítószilárdságra	85
4.1.1. <i>Eredmények EKF-24 korund alkalmazása mellett.....</i>	85
4.1.2. <i>Eredmények GN-50 acélsörét alkalmazása mellett</i>	88
4.2. A profilométerrel végzett mélységi paraméterek meghatározása ..	91
4.3. A szerszámüregi nyomás hatása a fémkötésre	95
4.3.1. <i>A kompressziós technológiával végzett nyomásmérés eredményei</i>	95
4.3.2. <i>A fröccstechnológiával végzett nyomásmérés eredményei</i>	98
4.3.3. <i>A matematikai modell helyességének ellenőrzése.....</i>	102
4.4. A reológiai jellemzők változásának hatása a kialakult kötés erősségére	104
4.4.1. <i>DIXON próba alkalmazása.....</i>	105
4.5. A gumi-fém határréteg elemanalitikai vizsgálata.....	108
4.6. A gumirugók vizsgálata	112
4.7. Új tudományos eredmények	116
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	119
6. ÖSSZEFOGLALÁS	121
7. SUMMARY	125
8. MELLÉKLETEK.....	129
M1: Irodalomjegyzék.....	129
M2: A témakörhöz kapcsolódó saját irodalom.....	134
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	136

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]
 k : Rugómerevség [N/m]
 F_t : Terhelő erő [N]
 k_f : Alakítási szilárdság [N/mm^2]
 φ : Alakváltozás foka [%]
 W : Alakváltozási munka [J]
 D : Átmérő [mm]
 α : Beesési szög [$^\circ$]
 t : Idő[s]
 V : Térfogat [m^3]
 P : Teljesítmény [kW]
 s : Zömítési viszony [%]
 E : Rugalmassági modulus [N/mm^2]
 γ : Felületi feszültség [N/m]
 h : Folyadékoszlop magassága [m]
 T : Hőmérséklet [K]
 T_c : Kritikus hőmérséklet [K]
 Θ : Peremszög [$^\circ$]
 k : Eötvös állandó [J/K]
 V_m : Moláris térfogat [m^3/mol]
 g : Gravitációs gyorsulás [m/s^2]
 r : Kapillári cső sugara [m]

s_f : Felület [m^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 első fejezetben a választott téma időszerűségét mutatom be és meghatározom a dolgozat célkitűzéseit.

1.1. A választott témakör jelentősége

A Szent István Egyetem Gépipari Technológiai Intézetében 2009 óta, munkahelyemen gyártmánytervező mérnökként pedig 10 éve a különleges körülmények között üzemelő nagy értékű gumi-fém gépelemek biztonságos gyártásához szükséges mérhető technológiai paraméterek meghatározásával foglalkozom. Ezek az alkatrészek jelentős számban fordulnak elő a műszaki gyakorlatban, mint ütköző-, rezgéscsillapító alkatrészek, csőkompenzátorok, mélytengeri fúró tömlőcsatlakozók¹ stb. 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. Több éves szakmai tapasztalatom szerint, valamint a témában végzett magyar és idegen nyelvű szakirodalmi áttekintés után megállapítom, hogy a gyorsan változó gumi-fém kötési technológiák tudományos leírása nem olyan részletes, ami a témában jártas szakemberek számára a mindennapi munkához szükséges ismereteket bemutatná. Munkám jelentősége tehát az, hogy a gumiipari szakemberek számára kísérleteken, méréseken és számításokon nyugvó, bizonyított kutatási eredményeken alapuló technológiai előírásokat adjak a gumi-fém kötés kialakítására.

1.2. Célkitűzések

Az általam fejlesztett gépelemekre adott esetben extrém hőmérséklet és terhelés viszonyok hatnak, továbbá a személy és vagyonszükséglet a hosszú, biztonságos élettartamot megköveteli, tehát különleges figyelmet kell fordítani a selejttmentes gyártásra. Első lépésben optimalom a gumihoz kötendő fémfegyverzetek előkészítésének technológiai paramétereit (szemcseszóró anyag típusa, felületi érdesség, mikrotopográfia stb.) és a gumikeverék reológiai tulajdonságait. Ezt követően munkámat kiterjesztem a kétfegyverzetes általános

¹ A tömlőgyártás jelentősen különbözik a zárt szerszámban történő vulkanizálástól, ezt kizárólag a szélesebb körű alkalmazási példa miatt említettem meg.

felhasználású rezgéscsillapító gumirugókra, majd meghatározom a gyártás lépéseit, és valóságos viszonyokhoz hasonló körülmények között hőkamrás statikus és dinamikus vizsgálatokat hajtok végre.

Reológiai vizsgálatokkal meghatározom a kötés kialakításához alkalmas kaucsukkeverékek jelleggörbéit és mérhető technológiai paramétereit, a beépülő fémfegyverzetek mechanikus előkészítésének részleteit. Bemutatom a gyakorlatban alkalmazott szemcseszóró anyagok és a kialakult felületi érdesség hatását a szakítóerőre. Mintaszerszámot tervezek és mérőkört készítek, amellyel zárt szerszámban kialakuló nyomás változását mérem az idő függvényében. A határrétegben végbemenő folyamatok tisztázására röntgen emissziós technikát használok, valamint egy- és kétdimenziós laterális elemeloszlást határozok meg.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A gumiipar technológiája

Régészeti ásatások szerint, már a VI. században az amerikai indiánok is ismerték a kaucsukot, ám írásos feljegyzések csak 1495-től, Kolumbusz felfedező útjai kapcsán maradtak (*Bartha, 1988*). Európába 1745-ben került a kaucsuk de la Condamine francia természettudós utazásai nyomán, ám jelentős fejlődés 1819-ben Angliában volt, amikor Hancock T. felfedezte a kaucsuk masztikálhatóságát (a feldolgozhatóság megkönnyítése érdekében végrehajtott molekulatördelését) és olyan keverő berendezést szerkesztett, amely a mai zárt keverők és hengerszékek őseinek tekinthető. 1826-ban Faraday meghatározta a kaucsuk kémiai összetételét, ami komoly tudományos alapot képezett a későbbi kutatásokhoz.

Az iparág legnagyobb eredménye volt, hogy 1839-ben az amerikai származású Goodyear felfedezte, hogy ha a kaucsukhoz ként kevernek és ezt a keveréket hőhatásnak teszik ki, akkor egy merőben új anyag, a gumi keletkezik. 1876-ban Wilckham 70 ezer Hevea Brasiliens magot csempészett Londonba, amelyből 2000 tő cserjét termesztett. Ezzel megkezdődött a kaucsuk iparszerű termelése. Így tehát a gumifa termékét már régen nem Braziliából kapja a világ. A jól telepíthető fa elsősorban Malajzia és Indonézia trópusi ültetvényein virul. A harmincévenként újratelepített ültetvények már a harmadik generáció óta jó megélhetést, és előnyös stratégiai pozíciót biztosítanak a távolkeleti országoknak. Fél-magyarországnyi táj évi 2 millió tonna gumit termel jól szervezett kisgazdaságokban, s a növénynevelés újabb eredményeivel – klónozással – a hozam egyre nagyobb. A hektáronkénti 2 tonnás évenkénti kaucsuktermelés akár évi 3 tonnára is felfuthat (*Czvikovszky et al, 2000*). A XX. században fejlődésnek induló, napjainkban kicsúcsosodó gépjárműipar óriási mennyiségű gumiabroncsot és műszaki gumiarút igényelt, ami a kapcsolódó iparágakban, mint a gumiiipari gépgyártásban, vagy a műkaucsukok előállításában is komoly fejlődést indukált. Az ipari elektronika fejlődésével és a korszerű gyártástechnológiák segítségével robotizált gyártósorok jelentek meg, amelyek segítségével magas műszaki színvonalú termékek tömeggyártása vált lehetővé.

Magyarországon 1882-ben Schottola Ernő alapította meg az első üzemét, aki gumitermékeivel az 1900-as párizsi világkiállításon is sikert ért el. A világháborúk idején kisebb-nagyobb fejlődés volt tapasztalható, azonban az igazi áttörést, az 1973-ban megalapított Taurus Gumiiipari Vállalat hozta, a Semperit cégtől vásárolt eljárás alapján megkezdett acélbetétes radiál

teherabroncsok gyártásával (*Bartha, 1988*). A rendszerváltozást követően a multinacionális cégek megjelenésével jelentősen átrendeződött az iparág, amely a tulajdonosi körök és cégcsoportok állandó változása miatt már nehezen követhető.

2.1.1. Az elasztomerekről általában

A természetes kaucsuk a gumiipar leggyakrabban alkalmazott alapanyaga, amit egyes trópusi fák tejszerű nedvéből (latexből) állítanak elő. A latex kolloid állapotú diszperzió, belőle a kaucsukot ecet- vagy hangyasavval kicsapatják, majd mossák, préselik, szárítják vagy füstölik (*Bartha, 1988*). Ezután minőségi besorolás következik, majd bálákba csomagolják, és az ún. „zöld könyv” szerint kereskedelmi forgalomba hozzák. Ezt a kézikönyvet a Kaucsuk Termelő Országok Nemzetközi Szövetsége 1960-ban fogadta el, amely a mai napig a kaucsukok osztályozásában irányadó kiadvány. További fejlődést jelentett 1965-ben az SMR rendszer bevezetése (Standard Malaysian Rubber), ami egységesítette a kaucsukbálák tömegét, csomagolását stb. Ezáltal lehetőség nyílt arra, hogy a két fő jellemző alapján csoportosíthassuk az SMR fajtákat, nevezetesen

- a) kiindulási alapanyag szerint:
 - latex alapú,
 - hulladék koagulum alapú,
 - latex + hulladék koagulum alapú.
- b) viszkozitás szerint:
 - stabilizált viszkozitású,
 - nem stabilizált viszkozitású.

A természetes gumikeverékek tulajdonságai az alábbiak:

- nagy statikus szakítószilárdság (15-22 MPa),
- nagy nyúlás (600-900%),
- kiváló rugalmasság alacsony hőmérsékleten (-40°C-ig jelentősen nem változik), (*Kempermann, 1981*),
- rossz ózon és öregedésállóság,
- jó konfekcionálhatóság a kiváló nyerstapadás miatt.

Az öregedés a gumitermékeken repedéseket okoz, amelyek azonban receptúrális megoldásokkal és korszerű segédanyagokkal nagymértékben javíthatók, így a kívánt alkalmazásnak legjobban megfelelő keverékek állíthatók elő.

1. táblázat, Gumikeverék összetétele

Megnevezés	Tömegarány [%]
Természetes kaucsuk	75,1
Fakátrány	1,5
Gyantaolaj	0,8
Sztearinsav	1,1
Cinkoxid	18,8
Kén	2,3
Egyéb gyorsítók	0,5

A *butadién-akril-nitril (NBR)* kaucsukok gyakran alkalmazott típusok, jól ellenállnak az ásványi olajoknak és alifás oldószereknek, ezért főleg különböző tömítések, csövek, olajálló műszaki termékek készülnek belőlük. Műszaki tulajdonságaik nagymértékben függenek az akril-nitril tartalomtól, így annak növekedésével nő a hőállóságuk, de hidegállóságuk, rugalmasságuk csökken (Bartha Zoltán, 1988). A korszerű szintetikus NBR kaucsukok fejlesztése manapság odáig jutott, hogy a legnagyobb minőségi igényű precíziós tömítésektől az általános használatú minőségi edzőcipők talprészéig, igen széles körben alkalmazzák (Schuster, 2009).

Az *etilén-propilén (EPDM)* kaucsuk kis sűrűségű szintetikus elasztomer (850-900 kg/m³), keménysége tág határok között (20-99 Sh°) változtatható. Előállításuk bonyolult, keverése akár hengerszéken, akár zárt keverőben, nagy figyelmet igényel. Konfekcionálása a rossz hidegtapadás következtében nehézkes, megfelelő fémkötés kialakítása speciális anyagok alkalmazását igényli (Morlin Bálint, 2004). Vulkanizálásuk peroxidokkal vagy kén és gyorsító vulkanizáló rendszerrel lassabb, mint a természetes kaucsuké (Keller, 1988). A sok nehézség ellenére nagyon elterjedt anyagok, gumiharmonikák, csövek, profilszalagok készülnek belőle, mert a korszerű komplex peroxidokkal végzett gyorsítás miatt gyártáskor a káros anyag kibocsátásuk minimalizálható (K. Naskar, J. W. M. Noordermeer, 2003).

Jellemző tulajdonságai:

- nagyon jó hőállóság (150 °C-ig),
- jó ózonállóság,
- kiváló elektromos szigetelőképeség (átlagos térfogati ellenállása kb. 10¹⁰ Ohm•cm).

A villamos szigetelőanyagok és gumikeverékek egyik legfontosabb jellemzője a szigetelési ellenállása, amelyen az anyagra kapcsolt egyenfeszültség és a

kapcsolást követő 1 perc elteltével leolvasott áramérték hányadosát értjük. Az 1 perces érték megállapodás, a mérések egyszerűsítését és az összehasonlíthatóságot szolgálja. Meg kell azonban jegyezni, hogy az így kapott érték nem azonos az anyag tényleges szigetelési ellenállásával, ami a feszültség és a szivárgási áram hányadosa.

A *kloroprén (CR) kaucsuk* nagy sűrűségű ($1300-1350 \text{ kg/m}^3$), a műszaki gyakorlatban gyakran alkalmazott szintetikus kaucsuk. Beszerzési ára magas, viszont számtalan kedvező tulajdonsággal rendelkezik (*Röthemeyer, 2001*).

- jó időjárás- és ózonállóság,
- közepes hőállóság ($90-100 \text{ }^\circ\text{C}$),
- önkioltó hatású, oxigénindexe 40-50,
- ásványi olajoknak ellenáll.

Egy keverék égési tulajdonságáról az ún. oxigénindex tanúskodik, ami azt mutatja meg, hogy mennyi az a legkisebb mennyiségű oxigén egy szobahőmérsékletű nitrogén-oxigén elegyben, amelynél meggyújtás után az égés fennmarad.

Felhasználási területére főként a csövek, szállítószalag hevederek gyártása.

2.1.2. *A gumigyártás műveletei*

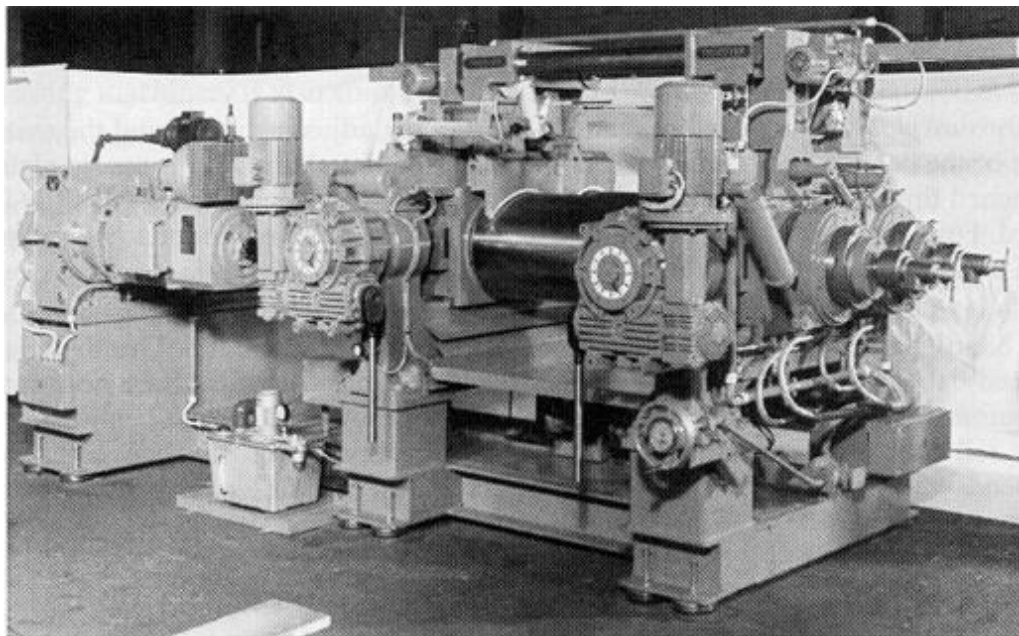
A gumi feldolgozása összetett, bonyolult és költséges folyamat. Gépei nagy teljesítményigényűek, technológiai komoly szakmai elméleti és a korszerű számítástechnikai eszközök bevezetése ellenére is nagy gyakorlati felkészültséget igényelnek. A kaucsuk feldolgozásának fontosabb műveletei a következők:

- keverés,
- kalanderezés,
- extrudálás,
- konfekcionálás,
- vulkanizálás.

A műveletekből természetesen a végtermék jellegétől és a vulkanizálási technológiától függően némely lépés kimaradhat.

A keverés az első a gumiipari technológiai feldolgozó műveletek sorában. Ennek során alakulnak ki azok a reológiai, mechanikai jellemzők, amelyek az anyagot később alkalmassá teszik a kívánt tulajdonságú termék előállítására. A keverést eleinte kizárólag hengersizéken végezték, ám az ipari korszerű termelés

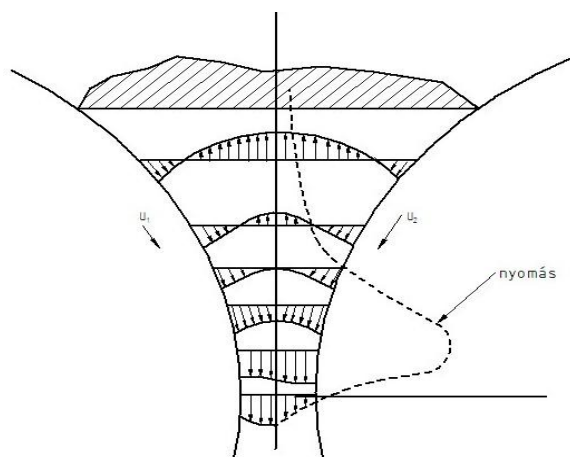
a gyorsabb és tisztább technológiával dolgozó zárt keverőket részesítette előnyben, azonban hengersizékeknek ma is fontos szerep jut, mint követőberendezések a belső keverők után, vagy mint előkészítő, keverék-felmelegítő berendezések a kalanderek vagy előformázók előtt (1. ábra).



1. ábra. Hengersizék

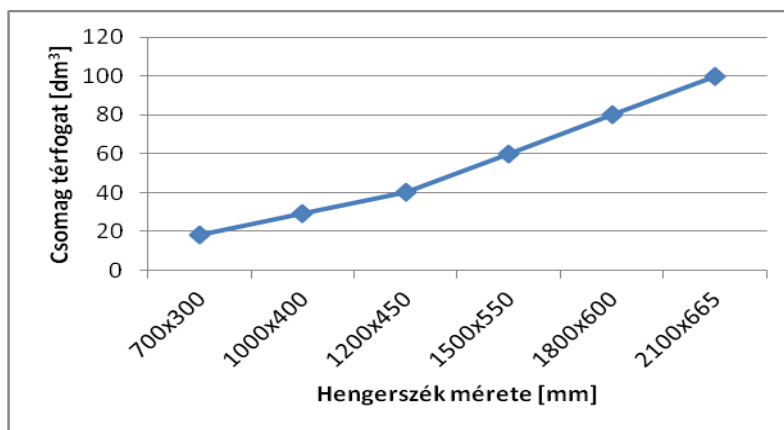
<http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/polimertechnika-alapjai/ch13s02.html>

Szintén fontos szerepük van a természetes kaucsuk (NR) molekulatömegének beállításában, az ún. masztikálásban. (A természetes kaucsuk az optimálisnál nagyobb molekulatömegű polimer. A hosszú polimerláncokat mechanikai munkával, a kaucsuk „gyúrásával” tördelik rövidebb részekre. A folyamat bonyolult, a nyírásen kívül szerepe van benne a levegő oxigénjének és a hőmérsékletnek is.) Ma is hengersizéken állítják elő az egyébként nehezen kezelhető – pl. ragadós – gumikeverékeket (Czvikovszky, 2000). A hengersizékek meghatározó műszaki jellemzőjük a méretük, fordulatszámuk és frikciójuk, ami a két össze felé forgó henger közötti kerületi sebességek aránya. Ez típustól függően 1,05-1,35-ig változik. A hengersizékre adagolt por, folyékony, illetve szilárd anyagok a két henger közötti résen átréselődnek, részben lehullnak, részben pedig palástot képeznek a lassabb hengeren (Hann, 1994). A részben fellépő nyíróerők hatására jelentős anyagáramlás jön létre, amelynek hatására masztikálás és homogenizálás játszódik le (2. ábra).



2. ábra. Nyomásviszonyok a hengersizéken (Czvikovszky, 2000)

A kialakult palástot folyamatosan le kell vágni, és a keverék összeforgatása „babázása” után a hengerek közé visszavezetni a folyamatosan lehulló anyagokkal együtt. Ezt a folyamatot addig kell végezni, amíg megfelelően homogenizált keveréket nem kapunk. Ahhoz, hogy a hengersizékre adagolt anyag megfelelően átkeverhető legyen, ideális csomagterefogatot kell alkalmazni. Ez minden méretű géphez más mennyiséget jelent (3. ábra), (Bartha, 1988). A keverék vastagságát a hengerek közötti távolság állításával lehet szabályozni. Ezt régebbi gépeken csavarorsós elven működő kézi forgatókarral oldották meg, az újabb kiviteleknel már elektromos motort szerelnek az állítóorsóra, ezáltal könnyebben állítható a távolság. Erre azért van szükség, mert a keverés folyamán több alkalommal is kell állítani a keverőrést, hiszen a legritkább esetben lehet olyan réssel kezdeni a keverést, mint amilyen vastag lemezt szeretnénk lehúzni. A túlterhelés elleni védelmet az adott géphez méretezett ún. törőtárcsák biztosítják. Ezek olyan szilárdságúak, hogy amennyiben a megengedettnél nagyobb nyomás lép fel a hengerek között, úgy a hengerek a tárcsák széttörésével szétcsúsznak, ezzel a nagyobb meghibásodás elkerülhetővé válik.



3. ábra. Optimális csomagtérfogat különböző méretű hengerszékeknél

A *kalanderezés* olyan gumiiipari alakadó művelet, ahol a két vagy több henger közé bevezetett keverék lemez alakot vesz fel. A lemez vastagságát a hengerek közötti rés határozza meg, hossza elvileg végtelen lehet. Kalanderezéssel főképpen olyan félkész-terméket állítanak elő, amely egy bonyolultabb gyártmány későbbi konfekcionálásához nyújt segítséget.

Az *extrudálás* olyan folyamatos feldolgozó művelet, ahol egy célszerűen megtervezett csiga vagy dugattyú az előzőleg beadagolt gumikeveréket meghatározott profilú nyíláson keresztül nyomva elvileg végtelen hosszú félkész terméket eredményez. A technológia lehet meleg-, vagy hidegetetésű, attól függően hogy a garaton keresztül az anyagot felcsikozva, vagy előmelegítve adagolják. Az extrudercsiga hossza mentén három különböző zóna található. Az első az etetőzóna, amelynek feladata a keverék könnyű befogadásának elősegítése, és továbbítása a kompressziós zónába. Itt az anyag nyomás alá kerül, ami a csökkenő menettérfogat eredménye. Attól függően, hogy a menetemelkedés vagy a csatornamélység csökken, magprogresszív vagy szögdegresszív csigákat különböztetünk meg. Az első és utolsó menettérfogat aránya a kompresszióviszony, amely az extrudercsiga tömörítő képességére jellemző szám. Ez gumiiipari extrudereknél 1:1,1-1:1,4 között van (*Bartha, 1988*). Az utolsó szakasz a kitolózóna, amelynek feladata az anyag továbbítása a szerszámba (*4. ábra*).



4. ábra. Az extrudercsiga jellemző szakaszai

(http://www.pt.bme.hu/futotargyak/6_BMEGEPTAE0P_2012oszi/Extr+kalland.pdf)

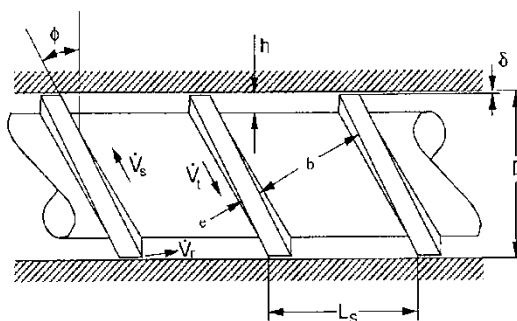
Fontos jellemző továbbá az L/D viszony, vagyis az extrudercsiga hosszának és az átmérőjének aránya, ami gumiiipari berendezéseknél 4:1-6:1 lehet. A csigában kialakuló áramlási viszonyokat az 5. ábra szemlélteti.

V_s = Sodróáram (szállítás irányú)

V_t = Torlóáram (ellentétes)

V_r = Részáram (axiális irányban a résen; kicsi)

$$V_{\text{eredő}} = V_{\text{sodró}} - V_{\text{torló}} - V_{\text{rés}}$$



5. ábra. Az extrudercsigában kialakuló áramlások

Az extrudátum mérete szinte soha nem egyezik meg a szerszámnyílás méreteivel, annál mindig nagyobb, mert a gumitermék a folyamat során kisebb-nagyobb mértékben duzzad. A duzzadás mértéke bonyolultabb profiloknál:

$$\delta = \left(\frac{G \cdot l}{\rho \cdot L \cdot A} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

L az extrudátum hossza, m

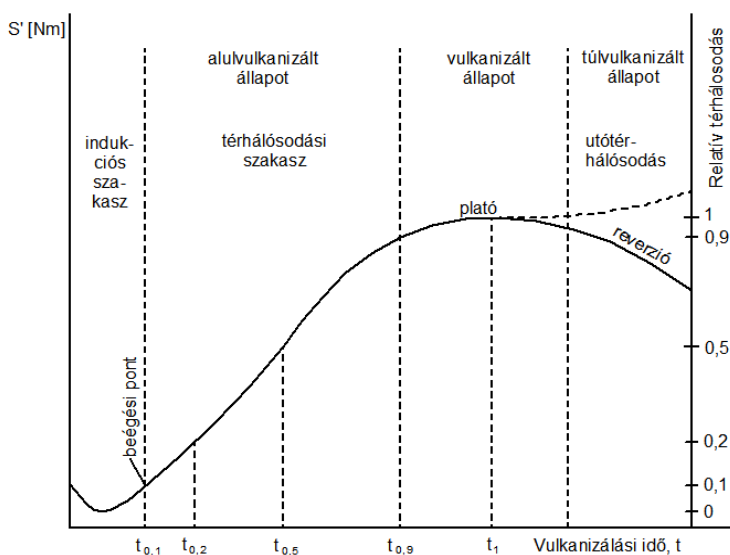
G_L az L hosszúságú extrudátum tömege, kg

ρ az extrudátum sűrűsége, kg/m^3

A a szerszámnyílás keresztmetszete, m^2

A *konfekcionálás* során az elkészített kaucsukkeverék olyan formát nyer, amelyet a további feldolgozó műveletek során alkalmazott technológia megkíván. Ez lehet kézi vagy gépi eljárás.

A vulkanizálás az utolsó lépés a kaucsukkeverékek feldolgozó műveleteinek sorában. Itt válik a viszkoelasztikus kaucsukkeverék elasztikus gumivá, itt kapja meg végleges geometriai alakját, és műszaki tulajdonságait. A vulkanizálás során az elasztomerek hosszú láncmolekulái keresztkötésekkel összekapcsolódnak és sűrű térháló alakul ki. A vulkanizálási folyamat vizsgálatára a különböző reométerek alkalmasak, amelyek a nyírómodulusz időbeli lefolyását szemléltetik (6. ábra) (Morlin, 2004).



6. ábra. Vulkanizálási görbe (Czvikovszky, 2000)

A vulkanizálási görbe jellegzetes szakaszai: (Czvikovszky, 2000)

- Indukciós szakasz (t_0 – t_{s2}): a keverék még jól alakítható, a térhálósodás kismértékű, még szinte elhanyagolható.
- Beégési pont, beégési idő: a t_{s2} időpont után a keverék már nem formázható, nem veszi fel a szerszám alakját, a térhálósodás megindult.
- Térhálósodási szakasz: a t_{s2} – $t_{0,9}$ időtartam után a keverék már egyáltalán nem formázható, nem veszi fel a szerszám alakját, a térhálósodás erőteljesen zajlik.
- Porozitási határnak nevezzük azt az időpontot, ahol a nyomást megszüntetve már nem képződik pórus.
- Plató: a térhálósodás befejeződött, a fizikai-mechanikai tulajdonságok már csak nagyon kis mértékben változnak. A plató után a térhálósodási reakció helyett a lebomlási reakciók (degradáció) erősödnek fel.
- Utótérhálósodás és reverzió: a plató után felerősödő mellékreakciók miatt a természetes kaucsukok lágyulnak (a gumit alkotó

makromolekulák bomlása, *reverziója* miatt), míg egyes szintetikus kaucsuk típusok tovább keményednek, utótérhálósodnak.

A vulkanizálás során a kiindulási kaucsuk szerkezete, továbbá az alkalmazott térhálósítószer függvényében különböző keresztkötés-típusok alakulnak ki, illetve jellemző atomcsoportok jönnek létre. A mono-, di-, polisulfid, valamint a vicinális kötések a dién típusú elasztomerek hagyományos kénes vulkanizálása során alakulnak ki. Ezeknek a kéntartalmú kötéseknek a kötése erőssége a fenti sorrendben csökken. A műszaki gyakorlatban alkalmazott keverékeknél 3-5% ként alkalmaznak (*Bartha, 1988*). A kettős kötések tartalmazó műkaucsukoknál a hagyományos kénes vulkanizálás nem alkalmazható, az ilyen esetekben más vulkanizáló szereket használnak. Ezek lehetnek fém oxidok, peroxidok stb. (*Niewenhuizen, 2000*).

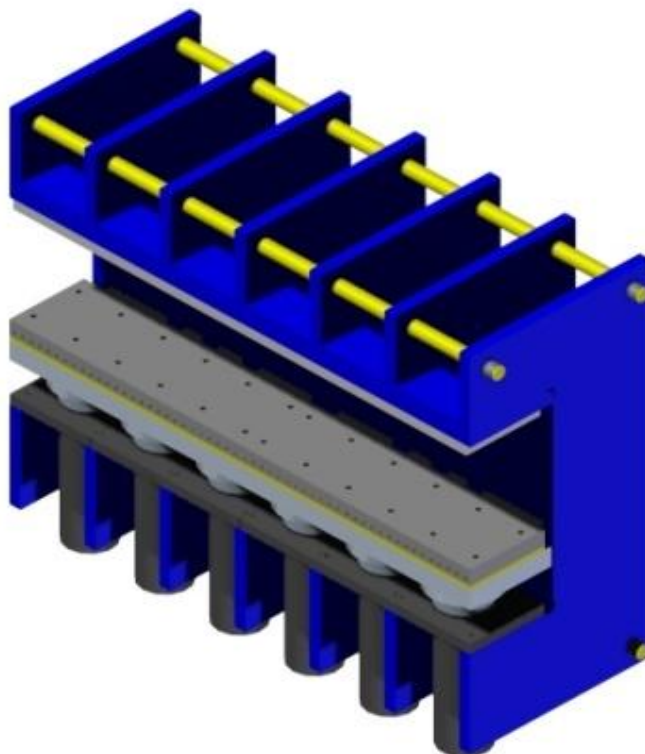
2.1.3. A vulkanizálás gépei

A vulkanizáló gépek a technológiától függetlenül az alábbi funkciókat látják el:

- pontos, könnyen szabályozható laphőmérséklet (max. 200 °C),
- tág határok között szabályozható záró nyomás (4-6 N/mm²),
- merev vázszerkezet,
- hidraulikus szeparátorok, asztalmozgatók alkalmazása,
- korszerű elektronikus diagnosztikai rendszer,
- nagy zárási sebesség (50 mm/s).

Préstechnológia

A préstechnológia a gumiipari termékek gyártásának legrégebbi, de mai napig gyakran alkalmazott technológiája. A fűtött vulkanizáló lapok közé helyezett szerszámot a gyártandó terméknek megfelelő ideig, 4-6 N/mm² nyomással zárva tartjuk, majd nyitjuk, ezután a kész alkatrész a formából kiemelhető. A lapokat korábban gőzzel, ma szinte kizárólag elektromosan fűtik. A korszerű ipari elektronika elterjedésével a hőmérsékletszabályozás könnyen és nagy pontossággal lehetséges. A jó hőstabilitás és gyors felfűtés érdekében 18 kW/m² elektromos teljesítménnyel számolhatunk. A záróerő kialakítása mechanikusan csavarorsóval vagy hidraulikusan valósítható meg. Az alkalmazott szerszámok elkészítése nem túlságosan bonyolult, ezért bármely más eljárásnál olcsóbbak. Hátránya, hogy a gumi rossz hővezető képessége miatt a technológiai idő hosszú. További probléma, hogy a szerszámüreg kitöltéséhez szükséges nyomás kialakítása 10-15%-os túltöltéssel valósítható meg, ami a gazdasági hátrányokon túl vastag sorjaképződéshez vezet. A 7. ábra egy vulkanizáló présgépet mutat.



7. ábra. Vulkanizáló prégép

Fröccstechnológia

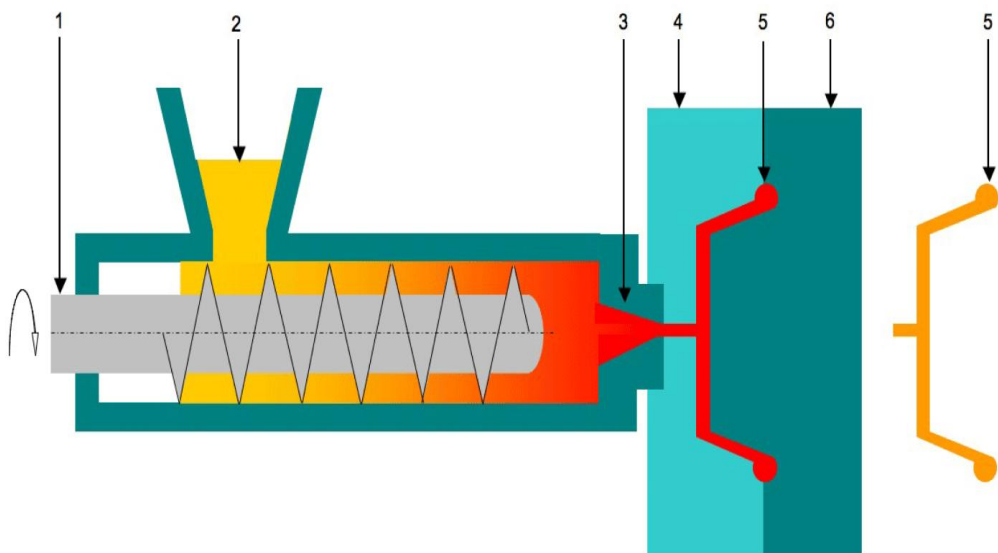
A gumitermékek előállításának legkorszerűbb módja a különböző fröccsprésekkel történő vulkanizálás. Az eljárás lényege, hogy az adagoló csigával a kamrába adagolt gumikeverék mennyiségét egy célszerűen erre a feladatra kialakított dugattyú préseli a zárt szerszámba. Azáltal, hogy a befecskendezés zárt formaüregbe történik, a termékek csaknem sorjamentesen emelhetők ki a szerszámból (Masberg, 2005). A vulkanizálás után a termékek felületén maradt beömlési helyek eltávolítására a cseppfolyós nitrogénnel történő ún. kriogén sorjázási eljárás terjedt el, amely könnyen automatizálható, ezzel az ipari tömeggyártás egyszerűen megvalósítható. Attól függően, hogy a fröccsegység a fűtőlapokhoz képest hol helyezkedik el, beszélünk alsó illetve felső befecskendezésű gépekről.

A fröccstechnológia szabályozható paraméterei a következők:

- befecskendezendő adag mennyisége,
- befecskendezés sebessége és sebességprofilja,

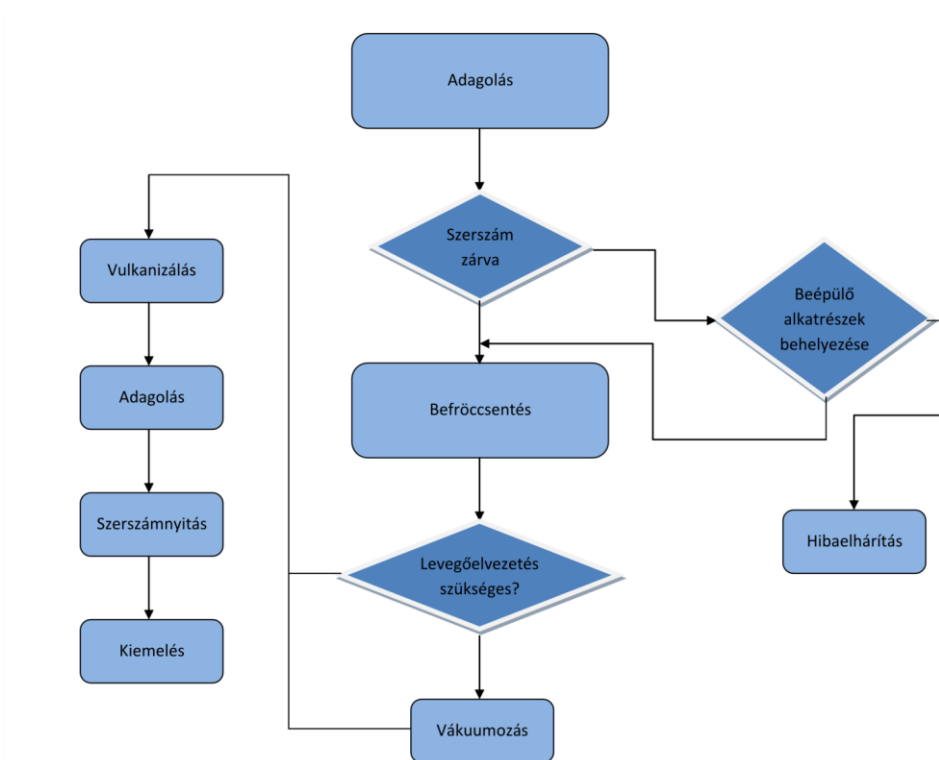
- befecskendezés nyomása és nyomásprofilja,
- a dugattyúkamra és a fűtőlapok hőmérséklete,
- a préslapok sebessége,
- a fűtés ideje,
- a préslapokat összezáró erő nagysága,
- a különböző szeparátorok mozgási iránya és sebessége.

Az 1000-1500 bar befecskendezési nyomás hatására a szűk keresztmetszeteken, beömlő csatornákon áthaladó gumikeverék jelentősen felmelegszik (kb. 100-110 °C), ezáltal a vulkanizálódási idő nagymértékben lerövidül (*Hofmann, 1980*). A technológia további előnye, hogy igen nagy a nyomás a szerszámüregben és ezáltal a gumi-fém kötés nagy biztonsággal valósítható meg. A gépek felépítés szerint lehetnek vertikális és horizontális kialakításúak is. A felügyelet nélküli gyártástechnológia a horizontális kivitelnél alkalmazható, mert a gravitáció segíthet a termékek kiürítésében (*Varga, 1968*). A 8. ábra egy horizontális gumiipari fröccsgép fő részeit mutatja.



8. ábra. A fröccsgép fő egységei

1 csiga, 2 gumikeverék, 3 fúvóka, 4-6 szerszám felek, 5 gyártmány



9. ábra. A fröccsöntés folyamatábrája

2.1.4. A vulkanizálás szerszámai

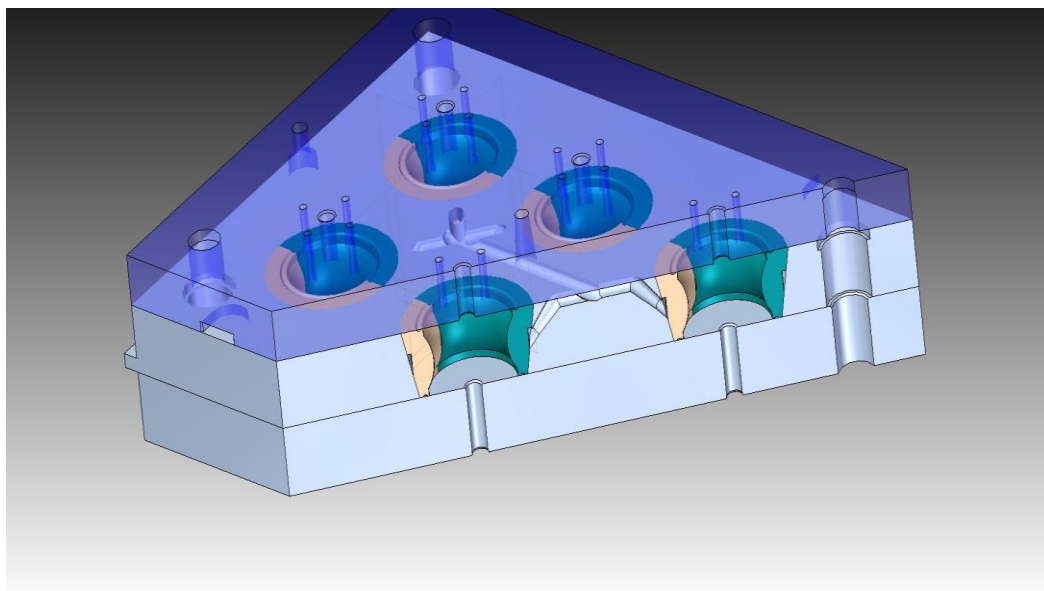
A sikeres vulkanizálás három tényező összehangolt működésének eredménye. A megfelelő méretű gép, a jól elkészített gumikeverék, és a célszerűen kialakított szerszám a selejtmentes termékek gyártásának feltétele.

A szerszámok anyagával szemben támasztott követelmények:

- nagy szakítószilárdság (1100 N/mm²),
- korrózióállóság,
- könnyű megmunkálhatóság,
- polírozhatóság,
- nem túl magas bekerülési költség.

Az anyagválaszték az utóbbi évtizedben jelentősen megnövekedett, köszönhetően a gyártók fejlesztéseinek, azonban még ma is az 1.2312, illetve az 1.2767 jelű acélokat használják leginkább. Ezek általában előnemesített szállítási állapotú, króm-mangán-molibdén ötvözésű szerszámacélok. A kénnel

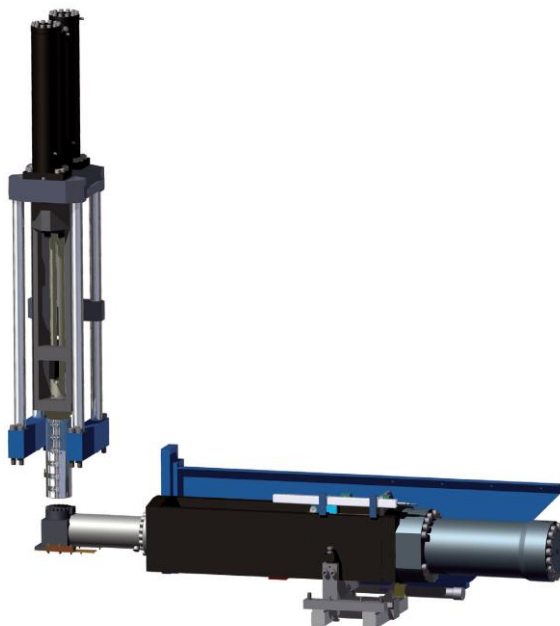
ötvözött acélok lehetővé teszik a kiváló forgácsolhatóságot nemesített állapotban is. A kénötöztetés miatt azonban a szilárdsági értékek anizotrópok, keresztirányban kisebbek mint hosszirányban (Böhler, 2010). Eredményes kísérletek folynak az alumínium formák kialakítására is, mert megmunkálhatóságuk a korszerű maróműveken gyors és könnyű, súlyuk kicsi, ugyanakkor szilárdságuk nagy (Röders, 2008). A fröccstechnológiához alkalmazott szerszámok kialakításuk szerint lehetnek álló vagy fekvő kivitelűek, ez a rendelkezésre álló gépektől, illetve a gyártandó termék formájától függ. A 10. ábra látható, fekvő elrendezésű a szerszám a termék gravitációs úton, kilövő segítségével automatikusan távolítható el. Mivel a fröccsszerszámok igen bonyolultak és költségesek, ezért alkalmazásuk csak tömeggyártásban kifizetődő.



10. ábra. Vulkanizáló fröccsszerszám

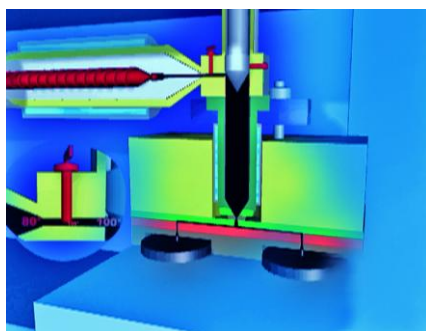
2.1.5. Ultra gyors vulkanizálás

A gumiipari gépek fejlesztése során elsődleges cél volt, hogy a vulkanizáló fröccsgépek egyre rövidebb vulkanizálási ciklussal (USV - Ultra Schnell Vulkanization) dolgozzanak. Ezt elsőként a német LWB Steinl gépek valósították meg, amikor a fröccsgépeket 2007-ben az ún. EFE befecskendező rendszerrel látták el. Az eljárás a már évtizedek óta jól működő „E” rendszert az „EF” rendszerrel kombinálták (11. ábra), (Arning, 2007).



11. ábra. Az „EFE” befecskendező rendszer

A vízszintesen fekvő EF rendszert egy dugattyúba integrált plasztikáló csiga egységgel kombinálják, ezzel az elsődleges (vízszintes) hengerbe bejuttatható a gumikeverék. A vulkanizáláshoz szükséges teljes térfogatot ez az egység fogadja be. A függőleges, egy kisebb térfogatú ún. „E” egység feladata az, hogy állítható túszelepként, a kezelő által beállított mértékben lezárja a vízszintes befecskendezőből kiáramló keverék útját, amellyel a frikciós hő tovább növelhető. Ennek hatására a keverék 120 °C-ra is könnyen felmelegíthető, aminek következtében a vulkanizálódási ciklus akár 60%-kal is csökkenthető (12. ábra).



12. ábra. Az „EFE” rendszer működési vázlatja

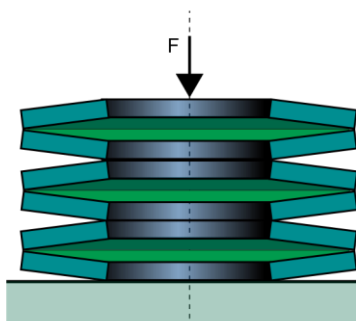
2.2. Rugók

2.2.1. A rugók jellemzői

Rugónak nevezzük azokat a gépelemeket, amelyek adott irányú erőhatás következtében rugalmas alakváltozásra képesek, az erőhatás megszűnése után pedig visszanyerik eredeti alakjukat, miközben a külső erők munkáját belső, deformációs munkává alakítják. Kis rugalmasságú anyagokból célszerűen megtervezett alak esetén is tudunk nagy rugalmas deformációra képes gépelemet létrehozni, ekkor alakrugóról beszélünk, ha azonban maga az alapanyag képes az említett alakváltozásra, akkor anyagrugónak hívjuk. A következő fejezetekben bemutatok egy-egy példát mindkét típusra.

2.2.2. Tányérrugók, mint alakrugók

A tányérrugók vagy *Belleville*-rugók csonka kúp alakúra sajtolt és edzett lemezekből állnak. Ezek nagyon merevek, ezért több elem összeépítésével állítják be a rugó keménységét. Különböző rugókapcsolási módokat ismerünk (13. ábra). Lehet a lemezeket sorba, illetve párhuzamosan szerelni, ennek megfelelően változik karakterisztikájuk. A rugóoszlopot általában a belső furatuknál fogva vezetőcsapra fűzik fel, vagy hengeres házba építik, ahol a megvezetés az elemek kerületén valósul meg. Terhelés alatt a párhuzamosan kapcsolt elemek egymáson elcsúsznak, jelentős súrlódást okozva. A rugóoszlop karakterisztikája nem lineáris, mert a rugóelemek a terhelés hatására alakváltozást szenvednek (14. ábra), a súrlódás miatt pedig jól észlelhető mechanikai hiszterézis lép fel, vagyis a felterhelés és leterhelés jelleggörbéje különbözik. Emiatt a tányérrugókat olyan helyen célszerű alkalmazni, ahol energiaelnyelésre is szükség van, az ilyen rugóoszlop jó lökés abszorberként (ütközőként) működik (*Muttnyánszky, 1981*).



13. ábra. Sorba kapcsolt tányérrugók (*Kolossos, 2006*)

A húzó-nyomó vagy nyírásra terhelhető fémrugók többségében a fellépő F erő arányos az s elmozdulással (*Pattantyús, 1961*).

$$F = k \cdot s$$

A k arányossági tényezőt *rugómerevségnek* nevezik [N/mm].

Torziós rugónál a fentiekkel analóg módon a φ szögelfordulással arányos a fellépő M nyomatékkal:

$$M = k \cdot \varphi \quad (2)$$

A rugómerevség reciproka a c *rugóállandó*:

$$c = \frac{1}{k} = \frac{s}{F} \text{ [mm/N]} \quad (3)$$

Az ilyen rugók jelleggörbéje az elmozdulás-erő diagramban egyenes, melynek iránytangense a rugómerevség.

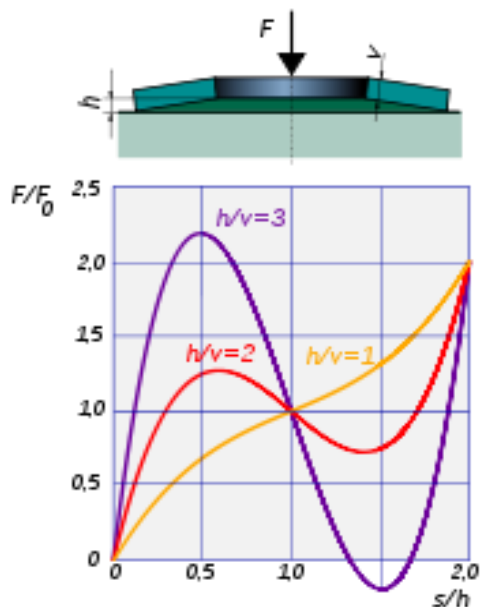
Az f_{\max} értékkel összenyomott rugóban felhalmozott munka:

$$L = \int_0^{s_{\max}} F \cdot ds = \int_0^{s_{\max}} k \cdot s \cdot ds \quad (4)$$

Lineáris karakterisztikájú rugó esetén:

$$L = \frac{s^2_{\max}}{2 \cdot c} = \frac{F^2_{\max}}{2 \cdot k} \quad (5)$$

Fontos megjegyezni, hogy a rugók kiválasztása (így a tányérrugóké is) nagy körültekintést igényel, hiszen a pontos kiválasztás alapvetően határozza meg a beépítés sikerét. Tekintettel arra, hogy az alkalmazás körülményei sok esetben nem teszik lehetővé a kezdeti és peremfeltételek pontos tisztázását, illetve, hogy részben ebből kifolyólag, részben a rugók anyagjellemzőinek bizonytalanságából (gumirugók) adódóan a matematikai számítás igen bonyolult, ezért sok esetben diagramos és nomogramos tervezési segédletek állnak rendelkezésre. A 14. ábra egy ilyen diagramot szemléltet (s [mm] az elmozdulást jelenti, F_0 [N] pedig a síkká deformáláshoz szükséges erőt).



14. ábra. Tányérrugók jelleggörbéje a h/v függvényében

2.2.3. A gumirugók, mint anyagrugók

A gumirugók az anyagrugók csoportjába sorolhatók, amelyek felhasználása a modern gépépítésben igen elterjedt.

A gumirugók alkalmazásának előnyei:

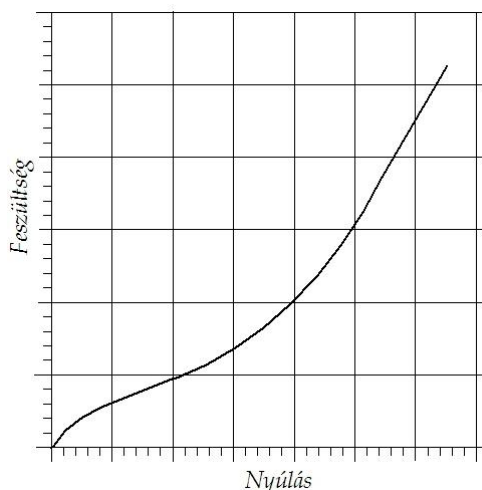
- kiváló csillapítás,
- kedvező beszerzési ár,
- széles alkalmazhatósági tartomány,
- jelentős belső súrlódás miatti jó munka elnyelő képesség,
- elektromos és hangszigetelő képesség.

2.3. Gumirugók jelleggörbéi, anyagtulajdonságai

Mint már arról az előzőekben szó volt, az F erővel terhelt gumirugó f deformációt szenved. A deformáció függvényében ábrázolva az erőt kapjuk a rugókarakterisztikát. Gumirugóknál ez a görbe degresszív lefutású, ezért rugalmassági moduluszon a görbe egyes pontjaihoz tartozó érintő iránytangensét értjük ($\text{tg}\alpha=E$). A görbe felvételekor feltétlen ismerni kell a Mullins jelenséget (Ihlemann, 2005), ami azt jelenti, hogy egy pihentetett gumitömb adott erővel ciklikusan terhelve majd tehermentesítve az első deformáció

esetében mindig meredekebb jelleggörbét eredményez, mint a többi terhelésnél. Ez a különbség minden terhelésszámnál egyre csökken, ezért a vizsgálat előtt 3-4 előterhelést kell végezni (*Diani et al, 2009*). A szilárdságtan ismert Hooke-törvénye (a deformáció arányos az erővel) a guminál csak a τ nyírófeszültségre érvényes, amiből következik, hogy a gumi rugalmassági anyagállandója a G nyírási modulusz. A gumi nagyrugalmas alakváltozása miatt a feszültség és alakváltozás közötti kapcsolat csak kis alakváltozási tartományon belül lineáris viselkedés (kb. 40%-on belül), ezen kívül nemlineáris a kapcsolat (*15. ábra*). Ez megnehezíti a gumitermékek viselkedésének matematikai modellezését.

A gumi rugalmas alakváltozásának leírására számos elméletet dolgoztak ki, melyek alapja a hiperelasztikus anyagoknál az alakváltozási energiasűrűség. Ezeket az anyagmodelleket a legtöbb mai végeselemes szoftverbe már beépítették, hogy lehetővé tegyék a gumi alkatrészek tervezését.



15. ábra. Elasztomerek elméleti nyúlás-feszültség görbéje

Gent szerint az egyenletek két kategóriára különíthetők el. Az egyik típusnál az alakváltozási energiasűrűség az alakváltozás jellemzésére használt három fő alakváltozási komponens ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) invariánsainak polinomiális függvénye. Ezeket *Rivlin* anyagnak vagy *Mooney-Rivlin* anyagnak hívják. A másik típusnál az alakváltozási energiasűrűség a három fő nyúlásnak elkülöníthető függvénye, ebbe a kategóriába tartoznak például az *Odgen*, *Peng*, és a *Peng-Landel* anyagmodellek.

2.4. A Mooney-Rivlin anyagmodell

Mint ahogy azt a 2.2.4. fejezetben már említettük, a kaucsuk hosszú láncmolekuláit kénhidak kapcsolják össze és ezek a keresztkötések hozzák létre a gumi térhálós szerkezetét. A háló elasztikus tulajdonságát az egységnyi térfogatra vonatkoztatott W alakváltozási energiasűrűség fejezi ki.

Ha a háló n darab láncot tartalmaz, amelyek $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ nyúlási arányokkal jellemezhetők a három alakváltozási főirányban, akkor az energiasűrűség a következő

$$W = \frac{n \cdot A \cdot r_0^2}{6} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (6)$$

ahol r_0 jelenti a láncvég távolság négyzetes átlagát deformálatlan állapotban.

A gumyszerű szilárd anyagok feszültség-alakváltozás közötti kapcsolat meghatározása *Rivlin* nevéhez fűződik, aki feltételezte, hogy az anyag rugalmas tulajdonságai deformálatlan állapotban izotropok és a deformáció alatt térfogata változatlan. Szimmetriai megfontolásból a deformáció mértékének jellemzésére a három fő invariánst használta:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Mivel a gumi térfogata összenyomás esetén is állandó, azaz $I_3 = 1$, ezért a deformáció két független értékkel, I_1 és I_2 , jellemezhető, következésképpen az alakváltozási (deformációs) energiasűrűség csak két változó függvénye:

$$W = f(I_1, I_2) \quad (8)$$

Deformálatlan állapotban

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1 \quad (9)$$

$W = 0$, $I_1 = I_2 = 0$, tehát W az $(I_1 - 3)$ és $(I_2 - 3)$ függvénye. Ezért kis deformációk esetén

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (10)$$

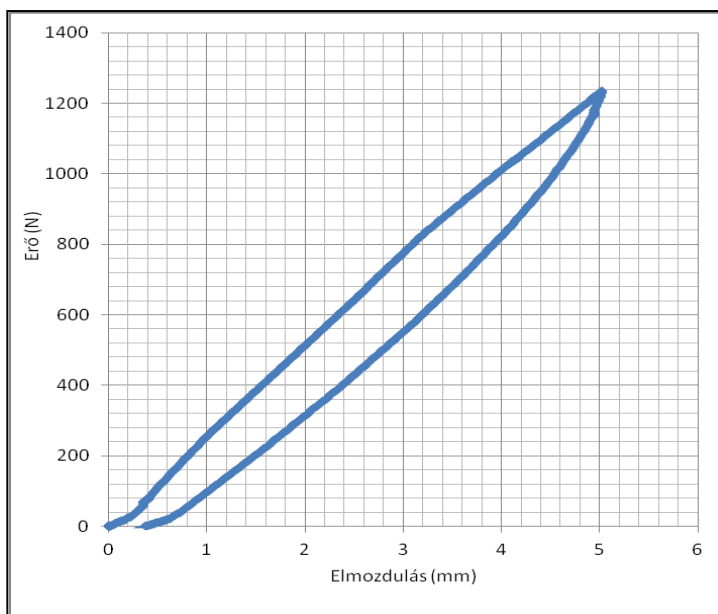
ahol C_1 és C_2 együtthatók, más szokásos jelölésük még a $C_1 := C_{10}$ és a $C_2 := C_{01}$ is. A deformációs energiafüggvény ezen alakját *Mooney* javasolta, ezért az irodalomban *Mooney-Rivlin-egyenlet* néven említik, és az ebből származó anyag modellt *Mooney-Rivlin* anyagmodellnek nevezik. A gumirugók fő jellemzője a keménység, amit az ún. Shore-keménységgel határoznak meg. Egy tompa végű tűt nyomnak a gumi felületére, ami 100 részre osztott skála előtt mozgat egy mutatót. Ily módon a keménység közvetlenül leolvasható. A gyakorlatban 25-90 Sh° közötti értékekkel dolgoznak. Egyszerűbb alkalmazásoknál a konstruktőr a terhelő erőből és a megengedhető összenyomódásból, mint alapjellemzőkből kiindulva diagramból választja ki a megfelelő keménységű gumielemet. Bonyolultabb beépítéseknél nem lehet az ágyazat tervezését ennyire leegyszerűsíteni, hanem a lengéstan mechanikai módszereivel, számításokkal kell a kedvező rezgési viszonyokat megalapozni.

Megtévesztő lehet, hogy a műszaki gyakorlatban a különböző keverékek rugalmasságát Shore A keménységgel jellemzik, ez azonban csak tájékoztató értéket ad a rugalmasságról, az irodalomban közzétett (*Bartha, 1988*),

$$G = 3,24 \cdot x - 90 \quad (11)$$

összefüggés segítségével, ahol x jelenti az Sh keménység mérőszámát.

A gumikeverékek az ideális folyadékokhoz hasonlóan összenyomhatatlanok, vagyis térfogatuk állandó. Ezt a beépítésnél figyelembe kell venni, mert ha a terhelés hatására létrejövő kidomborodásnak nincs hely, úgy a rezgés csillapítás nem lesz kielégítő. Amennyiben ez nem lehetséges, úgy ún. íves rezgés csillapítókat kell alkalmazni.



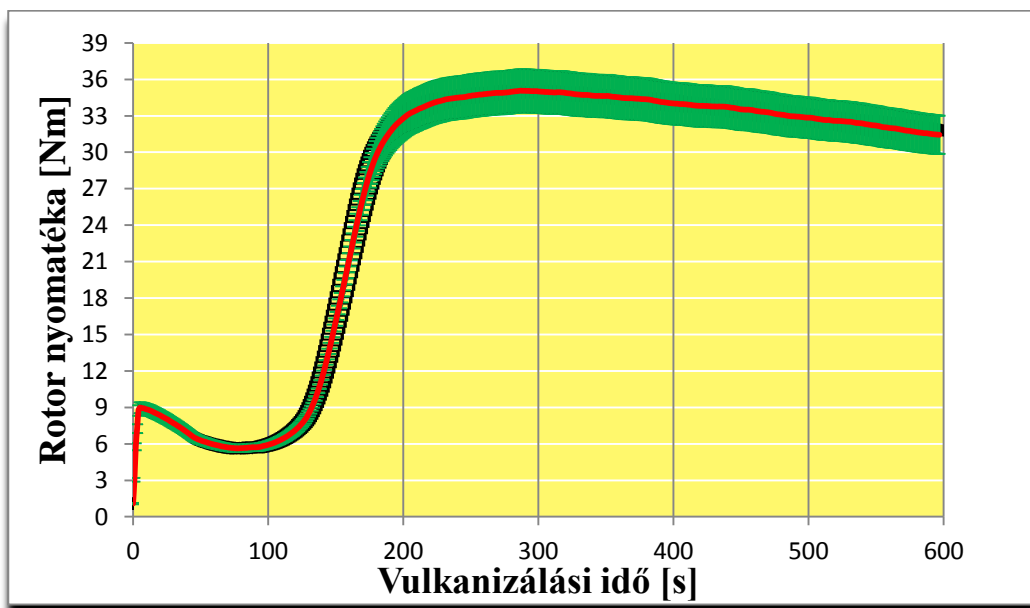
16. ábra. Statikus hiszterézishurok

A fel és leterhelést jelölő két görbe közötti terület a hiszterézis (16. ábra), az ún. belső súrlódás (Szendrő, 1997). Az, hogy adott gumirugó milyen belső súrlódású lesz, alapvetően a gumikeverék összetételétől függ. Mivel a rezgés csökkentő hatás nemcsak a belső súrlódáson múlik, hanem egy célszerűen méretezett lengőrendszer kialakításán, ezért fontos a felhasználóknak, hogy hogyan és milyen fizikai mechanikai jellemzők alapján válasszák ki a gumi elemeket a gyártó cégek katalógusaiból.

2.4.1. A gumi-fém kötésre alkalmas keverékek

A jó receptúra a megfelelő tulajdonságok elérésének csupán egy lehetőségét jelenti. Ha a keverési technológia a receptúrával és a gépi adottságokkal nincs összhangban, nem biztosíthatók az összetétel illetve a laboratóriumi vizsgálatok által elvárt fizikai tulajdonságok, a termék műszaki értéke csökken. A gumirugók gyártásához leginkább natur kaucsuk alapú keverékeket használnak, mivel ez a típus rendelkezik a legjobb reológiai, csillapítási tulajdonságokkal, illetve beszerzési ára is alacsony. Hátránya, hogy rosszul viseli az időjárás hatásait, főleg ózonállósága gyenge. Erős napfény hatására gyorsan öregszik, repedezik. Napjainkban egyre inkább terjednek a műkaucsuk keverékekből készülő gyártmányok, mert speciális tulajdonságok elérése ily módon lehetséges (olajállóság, hőállóság, vegyszerállóság stb.). A gumigyártmányok biztonságos gyártásához fontosak a reométeres vizsgálatok és az ezek

eredményeként kapott görbék. A receptúra kidolgozása után ún. etalon keveréket kell készíteni, amelyekről a laboratóriumban etalon görbéket kell felvenni. Amennyiben az előállított keverék minden tekintetben megfelel a követelményeknek, a későbbi felszabadíthatóság érdekében a vulkanizálási görbén ki kell jelölni $\pm 15\%$ -os sávot a 17. ábra szerint. Ezt követően az üzemi keverék ellenőrzése során a felszabadítás számszakilag meghatározható (Masberg, 2007). Természetesen nem minden keveréknek kell ugyanolyan tulajdonságokkal rendelkezni, hiszen léteznek alacsonyabb műszaki előírásokkal rendelkező vevői igények is. Ebben az esetben a kaucsukkeverékek megfelelő szakmai irányítás mellett átsorolhatók más felhasználásra. A vékony falú gumi formacikk gyártásakor éppen az lehet a keverékekkel szemben támasztott követelmény (ellentétben a gumi-fém kötéshez készített anyagokhoz), hogy azok a vulkanizáló szerszámba kerülés után minél gyorsabban, erőteljesen vulkanizálódjanak, és a szakítószilárdságuk gyorsan érje el a maximum értéket. A vulkanizáló maggal gyártott üreges termékeknél az is szem előtt tartandó, hogy a keverék ne legyen reverzióra hajlamos, mert ebben az esetben nagyobb a lehúzási szakadás veszélye.

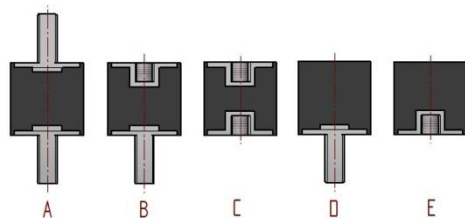


17. ábra. A vulkanizálási görbe a felszabadítási sávokkal

2.4.2. A gumirugók típusai

A rezgés csillapító gumirugók a legáltalánosabban elterjedt elemek, anyag és méretválasztékuk igen széles. Jellemző kivitelüket a 18. és 19. ábra szemlélteti. Statikus terhelhetőségük közepes, dinamikus terhelhetőségük kicsi.

Élettartamuk hosszú, de csak nyomásra és nyírásra vehetők igénybe (*Makhult, 1963*). Anyaguk rendszerint természetes kaucsuk alapú keverék, mivel a szintetikus kaucsukkeverékek közül még mindig a természetes kaucsuknak a legjobbak a szilárdsági és reológiai tulajdonságai beszerzési árához képest. A környezeti hatásokkal szembeni ellenállósága nem túl jó, de recepturális megoldásokkal jelentősen javítható. Amennyiben a beépítési körülmények indokolják, szintetikus kaucsukokkal vegyszer- és olajállóság is elérhető.



18. ábra. Különböző gumirugó típusok



19. ábra. Rezgéscsökkentő gumirugók

Abban az esetben, ha nagy tömegű, ezáltal jelentős tehetetlenségű alkatrészek vagy gépelemek megállítását vagy végállás határolását merev ütközőkkel valósítanánk meg, ez a kialakuló ütközési feszültségek miatt az alkatrészek gyors károsodásához, nem kívánt zajhoz vezetne. A 20. ábrán az *elasztikus ütközők* (*ütköző gumirugók*) láthatók. Ezek az elemek a nagy tömegű alkatrészek ütközése során fellépő mozgási energiát deformációs munkává alakítják, azt elnyelik, ezzel a káros hatásokat a minimálisra csökkentik. Alakjuk olyan, hogy rugókarakterisztikájuk progresszív legyen, vagyis az egyre

nagyobb elmozdulásokhoz mind nagyobb csillapítás tartozzon. Így egy hirtelen ütközésszerű fékezés helyett lágy, de intenzív lassítás következik be.



20. ábra. Ütköző gumirugók

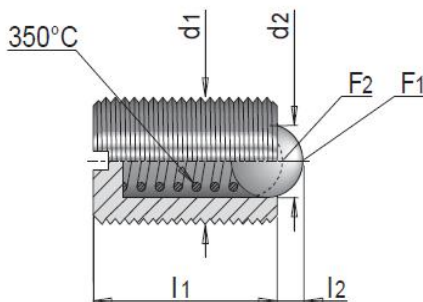
Az *erőátviteli gumirugók* a különböző tengelykapcsolók rugalmas betételei, melyeknek igen jók a statikus és dinamikus tulajdonságai. Előállításuk viszonylag egyszerű, nincs bonyolult szerszám- és keverékigényük.

2.5. A gumirugók gyártása

A műszaki gumitermékek előállítása, a berendezések üzemeltetése komoly elméleti és gyakorlati felkészültséget igényel. A feldolgozó és előkészítő műveletek során alkalmazott eszközök munkabiztonsági szempontból veszélyes gépek, drága és jelentős energiaigényű berendezések. Ahhoz, hogy rövid határidővel, állandó, a vevői igényeknek és előírásoknak megfelelő minőségű termékeket lehessen előállítani, több szakma szoros együttműködése szükséges. Nemcsak a vegyszeti kérdéseket, hanem a gépészeti vonatkozásokat is jól kell ismerni ezért komoly tapasztalattal rendelkező szerszámkészítő üzem is szükséges a vulkanizáló szerszámok elkészítéséhez, azok adott gépre történő adaptálásához és esetenként ezek javításához.

A gumirugók gyártása alapvetően két részből áll. Egyrészt el kell készíteni a fémfegyverzeteket, illetve a kaucsukkeveréket, majd a vulkanizálási folyamat során a kaucsukot gumivá kell alakítani és a fémfegyverzetek valamint a gumitest között megfelelő kötést kell létrehozni. A vulkanizáló szerszámok kialakításánál figyelembe kell venni a gyártástechnológiát. Tekintettel arra, hogy a két fémfegyverzettel készülő gumirugókat is álló szerszámokban célszerű vulkanizálni, ezért transzfer- illetve fröccs eljárásnál a felső fémek rögzítéséről is gondoskodni kell (Frenkel, 1982). Préselésnél ez nem feltétlenül szükséges, mert a konfekcionált töltet préselés előtt megtámasztja a fegyverzeteket, ezáltal

azok nem tudnak kiesni a fészekből. A rögzítésre golyós szorítót (21. ábra), vagy mágneseket alkalmaznak.



21. ábra. Golyós szorító

Mint arról már az előzőekben szó volt, a tervezés legfontosabb kérdése, az adott termék előállításához alkalmazandó gyártástechnológia eldöntése. A technológia kiválasztását a következő szempontok figyelembevételével kell eldönteni.

A gumi színe: az általánosan alkalmazott műszaki gumitermékek feketék. Ezek mindkét technológiával gond nélkül gyárthatók, azonban színes gumi esetében a prés technológia részesítendő előnyben, mert gyorsabb és olcsóbb a szerszám tisztítása.

Az elasztomer típusa: préstechnológia esetén ez nem jelent különösebb problémát, mivel kézi erővel kell a kaucsukkeveréket a fészkekbe helyezni, ezért a konfekcionálási technikák mindig a megfelelő elasztomer tulajdonságainak figyelembe vételével alakulnak ki. Fröccsöntésnél azonban már nem mindegy, hogy milyen keverékből készül a termék, mert a fröccsgép csak bizonyos alapanyagokat tud megfelelően bejuttatni a szerszámba anélkül, hogy a termék károsodna.

A szükséges lökettérfogat: a szerszám megtervezése előtt pontosan össze kell hangolni a gép hengerűrtartalmát és a szerszám térfogatát, mert csak egyszeri lökettel számolhatunk befecskendezéskor. Gyakori hiba, hogy a csatornák térfogatával nem számolnak.

A termék méretei: a kompressziós technológia szerszámjai jellemzően kisebb méretűek, mint a fröccstechnológia szerszámjai, mert a kompressziós szerszámban gyártott termékek cseréjéhez az egész szerszámot el kell távolítani a vulkanizáló gép fűtőlapjairól, ami legtöbbször kézi úton valósul meg. Ezért törekedni kell a szerszám minél kisebb tömegére is.

Az alkatrész geometriája: amennyiben a gyártandó munkadarab geometriája olyan, hogy kézi konfekcionálással nem biztosítható maradéktalanul a folyáshibák kiküszöbölése, úgy a fröccstechnológia alkalmazása javasolt.

A szerszám merevsége: mint minden gyártószerszámnak, a vulkanizáló szerszámnak is megfelelő merevségűnek kell lennie, hogy a fellépő jelentős mechanikai és termikus igénybevételt elviselje. A megfelelő merevséget a szerszám anyagának megfelelő megválasztásával és geometriai méreteivel lehet biztosítani. A fröccsszerszámok anyaga 1.2312 vagy 1.2767 minőségű szerszámacél. A vezetőcsapok edzett acélból készülnek, 58-60 HRC keménységűre edzve. Kialakítása olyan, hogy 2-3 mm legyen a vezető része, ezáltal a megvezetés biztos lesz, de a bontás sem okoz nehézséget. A szerszám geometriájának a merevség biztosítása mellett, a szerszám hőkapacitásában is fontos szerepe van, mivel a zárólapok vastagsága befolyásolja a lap hőstabilitását. A szerszám méretének kialakításánál figyelembe kell venni a gép minimális szerszámmagasság igényét. Amennyiben ez nem teljesül, úgy a gép nem tudja a kívánt nyomást felépíteni. Másik fontos szempont a szerszám levegőző csatornáinak szakszerű kialakítása, ami a nem kívánt zárványok kialakulását hivatott megelőzni. Ezt külső vákuumozással vagy gépi levegőztetéssel (a szerszám zárás utáni 3-4 alkalommal történő megnyitása) lehet elérni. A levegőztetés kiválasztása és a kivezető csatornák helyének meghatározása komoly tapasztalatot igényel.

2.5.1. A gumi-fém kötés kialakítása

A gumirugók és egyéb gumi-fém kötésű gyártmányok kényes gépelemek, élettartamuk nagymértékben függ a kötés kialakításának minőségétől. A kötés erősségének legalább olyanoknak kell lennie, mint az alap elasztomer szakítószilárdsága. A kapcsolat akkor megfelelő, ha a szakítóvizsgálat során a termék úgy szakad el, hogy a fegyverzetek felülete gumis marad, vagyis nem látszik sík, fémes felület (DIN 53531). A kötés alapvetően két módon alakítható ki, a vulkanizált gumitest és a fémfegyverzet utólagos ragasztásával vagy vulkanizálással.

Sorozatgyártásnál kizárólag a vulkanizálást alkalmazzák.

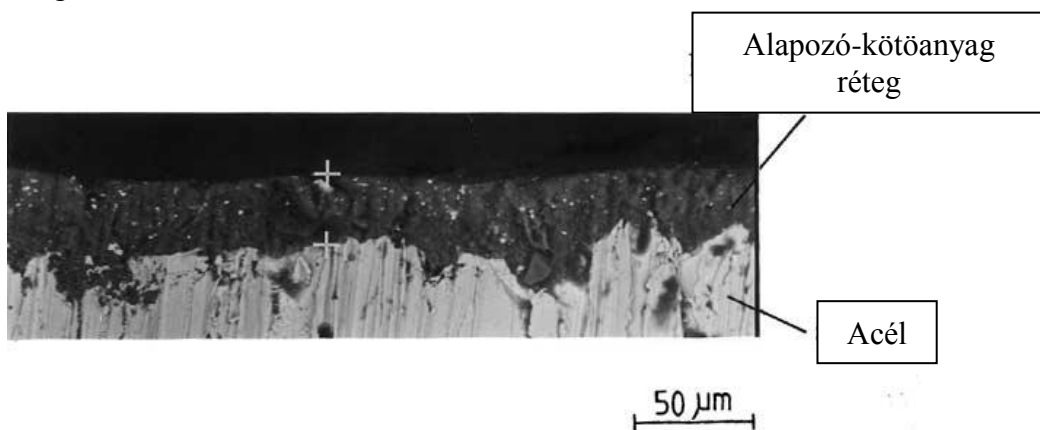
A kötőrendszer elemzésekor alábbi részfolyamatokra kell kitérni:

- a fémfegyverzetek előkészítése,
- a termék alakjának kialakítása,
- a vulkanizáló szerszám kialakítása.

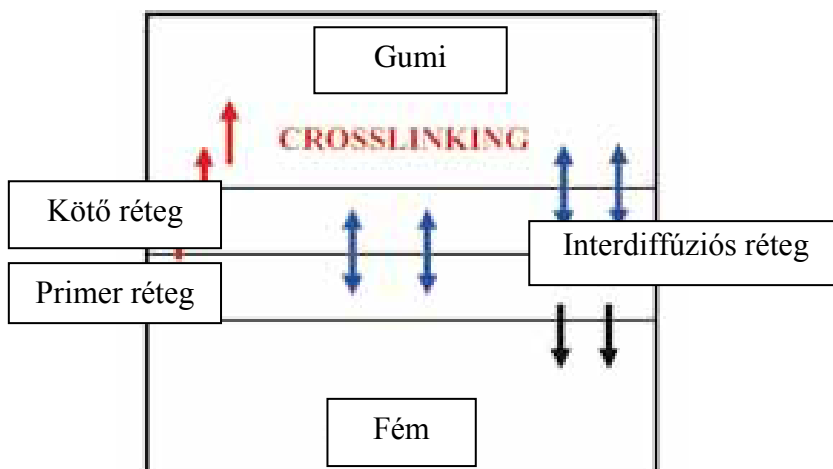
A kötési mechanizmusok jelentőségük sorrendjében a következők (*Springer, 1957*).

A. Kötés kialakítása vegyi úton előállított kötőanyaggal

A vegyi úton előállított kötőanyagokkal történő gumi-fém kötés az iparszerű tömeggyártás legkorszerűbb módszere. Az eljárás lényege, hogy a megfelelően előkészített fémfegyverzetek felületét két rétegű ragasztóval kell kezelni, majd egy alkalmas gumikeverékkel, előírt vulkanizálási technológia betartásával a két komponens (gumi-fém) egy gépelemmé egyesíthető. A kötőanyag első rétege, az alapozó réteg, amely az alapfémhez kapcsolódik, a második réteg pedig az elasztomerrel tud kémiai kötést kialakítani. A két réteg között az ún. interdiffúziós rétegben szintén kémiai kötések alakulnak ki, ezzel biztosítva a kötőréteg stabilitását (Zellner, 1997).



22. ábra. Acél-primer réteg csiszolati képe (Cole, 1997)



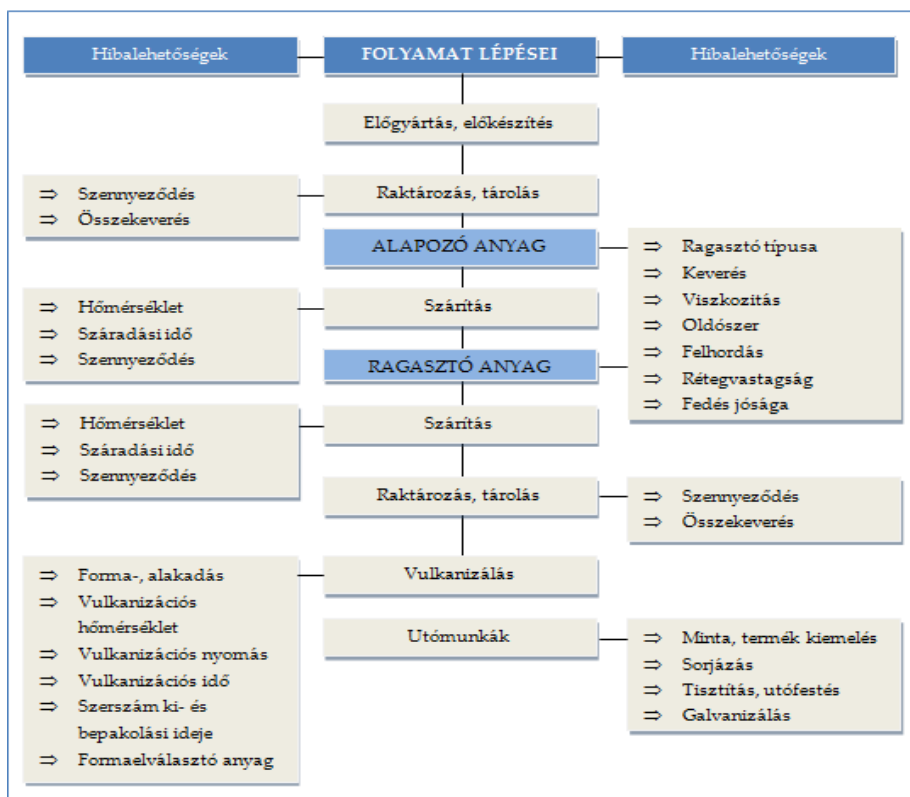
23. ábra. Az elasztomer-fém kötés vázlatja

A fémfegyverzetek bevonása szórással és mártással történhet. Szórás esetében a száraz rétegvastagság 15-20 μm lehet rétegenként. A fémkötéshez alkalmazott kaucsukkeverékekkel szemben támasztott követelmények:

- megfelelő legyen a vulkanizálási sebességük ($t_{s2} > 0,7$ min),
- ne tartalmazzon kicsapódó lágyítókat,
- lehetőleg tartalmazzon kötést segítő anyagokat,
- kicsi legyen az olajtartalma,
- ne legyen reverzióra hajlamos.

Az elasztomer-fém kötés erősségének további befolyásoló tényezői:

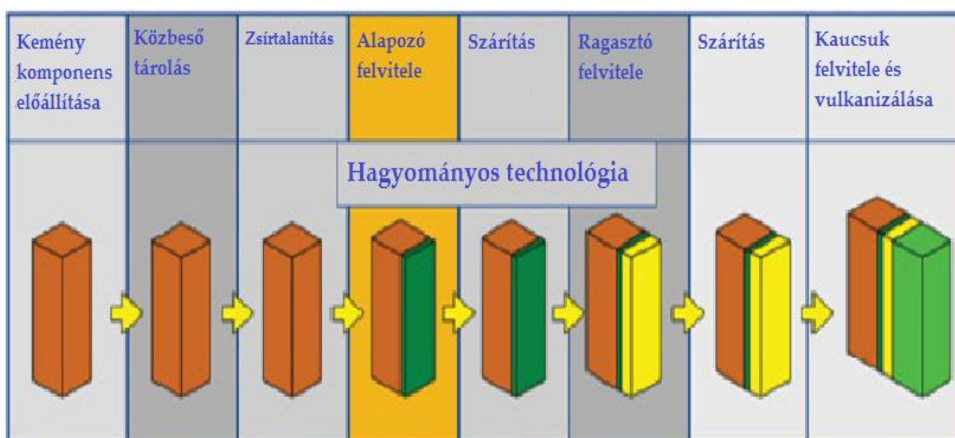
- az elasztomer típusa,
- az elasztomer keménysége,
- a szerszámüregi nyomás,
- a vulkanizálás hőmérséklete,
- a fémfegyverzetek szemcseszórásának minősége,
- a szemcseszórási anyagok mérete, fajtája.



24. ábra. A kötési folyamat kialakításának lépései és hibalehetőségei (Henkel, 2006)

B. Keménygumis eljárás

A legrégebben alkalmazott eljárás, melynek során a fémfegyverzetek felületét mechanikus eljárásokkal durván érdesítik, vagy forgácsolószerszámokkal bordázzák, majd zsírtalanítják. Ezt követően keménygumi oldat réteget visznek fel a felületre egy vagy több lépcsőben, majd vulkanizáláskor ez a réteg képez átmenetet a lágygumi és a fémfegyverzetek között. Mivel a kemény és lágygumi nehezen köthető össze, ezért azt az átmenetet is bordázni kell. A vulkanizálást lépésenként emelkedő hőmérséklettel kell végezni, és $1-2 \text{ N/mm}^2$ nyomást kell biztosítani. A keménygumis technológiát bonyolultsága és megbízhatatlansága miatt ma már csak alig alkalmazzák.



25. ábra. A hagyományos technológia lépései

C. Sárgarézes eljárás

A természetes és némely műkaucsuk keverék a sárgarézes fegyverzetre közvetlenül rávulkanizálható. Gazdasági és mechanikai okokból ennél az eljárásnál nem készítik az egész fegyverzetet sárgarézből, hanem valamilyen eljárást alkalmaznak annak érdekében, hogy a beépülő fém alkatrészek gumival érintkező felülete sárgarézes bevonatot kapjon. Erre legalkalmasabbak a különböző galvanizálási eljárások. A galvanizált fegyverzetek felületét óvni kell az oxidációtól, ezért közvetlen a bevonás után benzinnel kell tartani, vagy rögtön feldolgozni. A technológia munkaigényessége és bonyolultsága miatt háttérbe szorult (Draexler, 1983).

D. Klórkaucsukos eljárás

Mivel a természetes kaucsuk kettőskötései könnyen vesznek fel klórt, ezért ezekből a kaucsukokból készített oldatokat fém-gumi kötés kialakítására lehet

alkalmazni. Nem minden keménységi tartományban és csak némely elasztomer esetében alkalmazható.

E. Ciklizált kaucsuk

A természetes kaucsukkeverékek hő hatására tömény kénsav vagy p-toluolszulfonsav jelenlétében ciklizált kaucsuknak nevezett termoplasztikus anyaggá alakul át, amely *pepren* néven került kereskedelmi forgalomba. A kötés kialakítása az előzőekben ismertetett eljárásokhoz hasonlóan valósítható meg, vagyis a megtisztított felületeken közbelső oldatréteget kell képezni az adott anyagból, majd újbóli oldat és kaucsuklemez fegyverzetekre helyezésével kivitelezhető a vulkanizálás. A kötés hőstabilitása gyenge, szilárdsága közepes.

2.5.2. *A különböző technológiák hiányosságai*

Az elasztomer-fém kötés kialakítására alkalmas technológiákat áttekintve megállapítható, hogy sorozatgyártásra csak az első, nevezetesen a vegyi úton előállított kötőanyaggal végzett eljárás alkalmas. Ebben az esetben tudjuk a folyamatokat automatizálni, mert a részfolyamatok kvantitatív jellemzőkkel egyértelműen meghatározhatók. Így a felület előkészítést követő rétegvastagság a primer és a szekunder réteg esetében, a vulkanizálás hőmérséklete, a hígítás mértéke, mind előírt érték, amelyek a különböző gyártók kiadványaiban rögzítettek. A probléma viszont ezzel még koránt sincs megoldva. A sikeres elasztomer-fém kötés még további paraméterek függvénye lehet, amelyek nincsenek definiálva.

Ezek az alábbiak:

- mi legyen a szemcseszóró közeg,
- milyen legyen a mechanikus előkészítés esetében a felületi érdesség,
- meddig tárolható az előkezelt fegyverzet,
- meddig tartózkodhat az előkezelt fegyverzet a meleg szerszáműregben,
- mekkora legyen a szerszáműregben a kritikus minimális nyomás,
- milyenek legyenek a kaucsukkeverék reológiai jellemzői.

2.6. A gumi-fém kötés kialakításának nehézségei (Compaunder info, 2011)

A megfelelő gumi-fém kapcsolatnak különös jelentősége van a korszerű ipari gyakorlatban. Ezeknek a gépelemeknek szigorú műszaki követelményeknek kell megfelelniük. A rezgéscsillapítók, motortartó bakok, tömítések és sok egyéb alkatrész esetében kiváló tapadást kell biztosítani a gumi és fém között. Annak ellenére, hogy az ipar nagy jelentőséget tulajdonít a gumi-fém

termékeknek, sajnos nem léteznek könnyen alkalmazható roncsolásmentes módszerek, amelyekkel a tapadást ellenőrizni lehetne. Alapvető elvárás, hogy megértsük a különböző hatásokat a kötés fizikájában, ki tudjuk választani a megfelelő kötőanyag rendszert és az alkalmas gumikeveréket. A korszerű keverő berendezésekkel előállított kaucsukkeverékek, minden tekintetben megfelelnek a gyártására vonatkozó követelményeknek, kiváló minőségűek és reprodukálhatóak. Ez is alapja egy sikeres gumi-fém kötések.

2.6.1. Fém előkezelés

Az előírt technológia szerint végzett fémelőkészítés az egyik előfeltétele a tartós és korrózióálló, nagy szilárdságú kötésnek. Az előkezelés történhet mechanikusan vagy vegyi úton.

Alapvetően a fegyverzetek kémiai tisztítása minden gumi-fém kötés első lépése, függetlenül attól, hogy melyik eljárást alkalmazzuk. A tisztításra elsősorban szerves oldószerek, zsírtalanítók és vízben oldódó anyagok (tenzidek) használhatóak.

A felület zsírtalanítása alapvető feltétele a későbbi ragasztás sikerének. A szigorú környezetvédelmi előírások miatt a hatékony, de környezetre és az egészségre káros klórozott szénhidrogén vegyületek (Perklór, Triklór) nem alkalmazhatóak. Manapság halogénmentes szénhidrogének, vagy lúgos zsírtalanító szerek kínálnak alternatívát a tisztításban. A fém alkatrészek kémiai tisztítása után mechanikus előkezelés ajánlott, mivel ez a művelet kémiailag aktív, fémtiszta felületet eredményez.

2.6.1.1. Fém alkatrészek mechanikai előkezelése

A fém felületének mechanikai úton történő érdesítése, egyrészt a laza mechanikusan tapadó szennyeződések (rozsdá, reve) eltávolítása miatt, másrészt felület kémiai aktivitásának növelése érdekében ajánlott.

Az így kezelt érdes felületen számos aktív hely alakul ki, ahol a kötőanyag (primer) az alapfémmel kapcsolódási pontok kialakítására képes. Amennyiben a szemcseszórást sűrített levegő segítségével végezzük, úgy alapvető követelmény, hogy az száraz és zsírmentes legyen. Különösen fontos ez alacsony hőmérsékleten, amikor a pára lecsapódik a fémfegyverzetek felületén, ezzel oxidációt okoz a frissen kezelt alkatrészekben. Ez rozsdaképződéshez is vezethet, ami különösen káros a végeredmény tekintetében. Ezen okok miatt az alapozó réteget (primer) rövid időn belül, de mindenképpen ugyanazon a napon kell felhordani, amikor a fémen a mechanikai kezelést végeztük. A primer réteg felhordása után gondoskodni kell a tiszta tárolásról (zsírmentes, pormentes), így a fegyverzetek akár két-három hétig is raktározhatók.

2.6.1.2. Kémia előkészítés

A fémfegyverzetek kémiai előkezelési módszere nem olyan általánosan alkalmazható, mivel a megfelelő felületkezelési eljárás nagyban függ az alapfém típusától, ötvözöttségi fokától, valamint a hozzá vulkanizálandó gumikeverék tulajdonságaitól. A gyakorlatban leginkább a vékony lemezalkatrészek és a kis termékek esetében alkalmazzák, különösen, ha vékony a falvastagság vagy bonyolult a geometria. Előnyös a kémiai kezelés azokban az esetekben is, amikor a mechanikus kezelés során bevitt nagy mechanikai energia miatt az alkatrészek vetemednének, vagy a megadott gyártási tűrésből kiesnének.

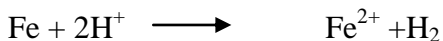
A gyakorlatban az alábbi módszereket alkalmazzuk:

- foszfátózás,
- kromatózás,
- pácolás.

A legfontosabb kémiai előkezelési módszer a foszfátózás. Ez főleg az acél alkatrészek előkezelése esetében alkalmazható. Az elektrokémiai folyamat ebben az esetben a cink-foszfát réteg felhordását jelenti.

Fellépő kémiai reakciók:

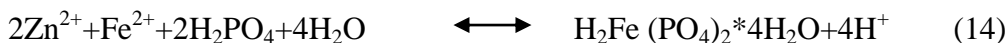
Pácolás:



Rétegek kialakítása:



Hopeit



Phosphophyllit



ZnMn-phosphat

Izapképződés:



Annak érdekében, hogy jó tapadási szilárdság alakuljon ki az alapfém és a primer réteg között, 2-5 mikrométer vastagságú finom kristályos szerkezetet kell kialakítani. A pácolás, főleg a friss felületek létrehozására alkalmas. A pácoláshoz gyakran használt anyag a kénsav, a foszforsav és sósav, melyek

koncentrációja 5 - 20%. Savas kezelés után a fémrészeket alaposan öblíteni, majd szárítani kell, ami megakadályozza a felület revésedését.

2.6.2. *Gumi-fém kötést elősegítő ragasztóanyagok*

Alapvetően léteznek egyrétegű és kétrétegű ragasztók. Ezek az anyagok általában a halogénezett polimerek és fenolgyanták szerves oldószerekben oldott keverékei. A művelet a primer réteg felhordásával, majd annak megszáradása után a kötőréteg kialakításával kezdődik. Fontos, hogy a rétegek ne keveredjenek egymással, vagyis a ragasztóanyagokra megadott száradási idők betartása elemi követelmény. A ragasztó biztosítja a kapcsolatot a fémfegyverzet és a gumikeverék között oly módon, hogy a primer rész az alapfémhez, a kötőréteg pedig a gumikeverékhez kapcsolódik. A vulkanizálás során a kötőanyag beépül a gumimátrixba, ezáltal kémiai kötés alakul ki a két réteg között. A diffúziós folyamatok is fontos szerepet játszanak a kötés kialakulásában. Nem minden gumikeverék igényli azonban a kétrétegű ragasztóanyagot. Az összetett rendszer különösen akkor jár technikai előnyökkel, ha magas követelményeket támasztanak a dinamikus szilárdsággal vagy a korrózióállósággal szemben. A megfelelő ragasztó rendszer kiválasztás sok tényezőtől függ. Befolyásolja például a felhasznált fém típusa, a gumikeverék bázisa, a szükséges üzemi hőmérséklet és vegyi ellenállás.

2.6.3. *A ragasztóréteg felhordása*

A ragasztóanyag felhordására az alábbi módszerek alkalmasak:

- kenés,
- mártás,
- merítés,
- szórás,
- hengerelés.

A kenési eljárás igényli a legkevesebb beruházást, azonban a kis termelékenysége, illetve a bizonytalan rétegvastagság miatt csak kis szériáknál alkalmazható. A hengerelés főleg sík felületek bevonására alkalmas, azonban a kialakult ragasztócsíkok, sávok hátrányosan befolyásolják a szakítóerő irányfüggőségét.

A szórópisztollyal végzett kijuttatás a legfejlettebb technológiai eljárás. Ez a módszer az ipari tömeggyártás technológiája, mert nagyfokú automatizálás lehetséges, azonban hátránya a magas beruházási költség. Az eljárásnál fontos megbizonyosodni arról, hogy a sűrített levegő teljesen kondenzvíz és olajszármazék mentes legyen.

Az oldószerben diszpergált pigmentek viszonylag rövid tárolási idő alatt a tartály aljára ülepednek, ezáltal megváltozik a koncentráció. Ezért a ragasztót felhordás előtt homogenizálni kell.

2.6.4. *A gumikeverékek hatása a gumi-fém adhézióra*

A technológia szigorú betartásán túl az elastomer típusának is nagy jelentősége van.

A polimerek tapadási hajlama a következő sorrendben alakul:

NBR > CR > NR > SBR > IIR > EPDM

Különösen a sorban hátrább álló polimereknél fontos a körültekintő ragasztórendszer választás, és a fémelőkészítés technológiájának szigorú betartása. Szinte bármely keménységű gumikeverék felhasználható gumi-fém kötésű alkatrészek gyártására, azonban általában elmondható, hogy a 70 Sh keménységű anyagok a legalkalmasabbak a feladatra. Nagyon kemény anyagok (> 90° Shore A) esetében nehézkes az eljárás, mert a keverék folyási képessége korlátozott, és a ragasztóanyag is nehezen tud beépülni a gumi mátrixba. Nagyon lágy keverékek (<35° Shore A) esetében azért mutatkozik a probléma, mert a szükséges nyomást a formaüregben csak nehezen vagy alig lehet kialakítani.

A gumikeverékekben lévő vulkanizáló szerek és egyéb lágyítók vagy töltőanyagok szintén hatással vannak a kötésre. A polimerek és a lágyítók közötti esetleges összeférhetetlenség a tárolás alatt „izzadáshoz” vezet, amely a rendszer rövid időn belüli, akár raktározás alatti tönkremenetelét is okozhatja. Ez a jelenség különösen igaz a lágy NBR alapú keverékek esetében.

A vulkanizálás ideje is befolyásolja a tapadás mértékét. Meg kell tudni választani, hogy megfelelően hosszú indukciós szakasszal rendelkezzen a keverék, hogy a ragasztóanyag szublimálódásához legyen elég idő, mielőtt a vulkanizálás megkezdődik. Gyakran megfigyelhető az alacsony kéntartalmú rendszereknél a gyenge tapadás, ami a kötőrétegben kialakuló kevés kénhíddal magyarázható. A peroxid térhálós keverékek általában jó tapadást mutatnak.

2.6.5. *Vulkanizált kötés kialakulása*

Az alapozó és ragasztóréteg, valamint a ragasztó és gumikeverék között intramolekuláris kémiai kötés jön létre.

Ezen kívül "van der Waals" kötések jönnek létre a fázishatárokon. A fém és gumi között diffúziós folyamat is zajlik molekuláris szinten, mert kb. 15 mikron mélységben mutatható ki ragasztó a gumimátrixban. Elengedhetetlenül fontos a jó tapadási kapcsolat a gumi-ragasztó- fém szakasz határain, amelynek alapvető meghatározója a gumikeverék reológiai viselkedése. A sikeres kötés záloga egy

alkalmas keverék, egy megfelelő fémelőkészítés, és a vulkanizálási technológia betartása (nyomás, idő, hőmérséklet).

Vulkanizálás során a zárt formaüregben kialakuló nyomás a megfelelő szerszám, az elegendő túltöltés és a sajton keresztül ható záró erő függvénye. Mint más feldolgozási módszereknél biztosítani kell a megfelelő szellőzést, mert különben a légzárvány miatt a gumi-fém kötés károsodott lehet.

Olyan alkalmazásoknál, ahol nem vagy csak alacsony nyomást lehet biztosítani az érintkező felületek között, speciális ragasztási technológia szükséges.

A magas hőmérséklet hatására gyors térhálósodási reakció lép fel, ami gátolja a kívánt kötés kialakulását. Ilyen esetben a keresztkötések között csak részleges diffúziós folyamat zajlik le.

Az optimális vulkanizálási hőmérsékleti tartomány 140-180 °C. Speciális esetekben, főként nagyobb méretű termékeknél előnyös lehet a gumikeverék és a fémfegyverzetek max. 80 °C-os előmelegítése. Ily módon elkerülhető a hosszú vulkanizálási idő, illetve az átvulkanizálódás is egyenletesebb lesz. A fröccstechnológia alkalmazásával a belépő gumikeverék magas hőmérséklete miatt a vulkanizálási idő jelentősen csökkenthető. Az optimális vulkanizálási idő meghatározása nagyon fontos, hiszen az alulvulkanizált keverék az elégtelen keresztkötések miatt ragasztási problémákhoz vezethet, továbbá nem biztosítja a tervezéskor megkövetelt mechanikai előírásokat és a maradó deformációja is elfogadhatatlanul nagy lesz.

Egy másik fontos tényező a ragasztó film csúszási ellenállása. Előfordulhat ugyanis, hogy helytelenül tervezett szerszám vagy rossz gépbeállítás esetén a nagy sebességgel és rossz szögben érkező keverék lesodorja a ragasztóanyagot a fegyverzetről. Befecskendezés során a keverék a ragasztóréteg nem mozgathatja. Ezt a tényt már a gyártóeszközök tervezésénél figyelembe kell venni. Általános előírás, hogy a befecskendező furatokon érkező gumikeverék a szerszám üreg falával érintkezzen először, ezáltal a mozgási energiája csökken, ami a ragasztóréteg káros lesodródásának veszélyét csökkenti.

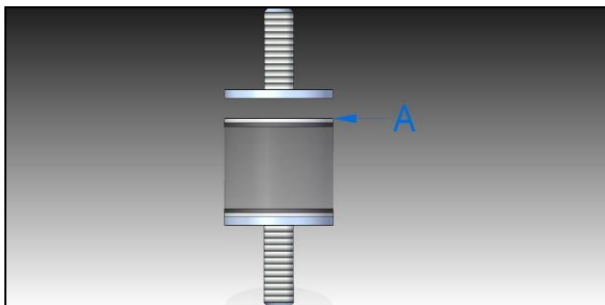
2.6.6. A kialakult kötés erősségének vizsgálata

A mai fejlett technológia mellett sem létezik olyan vizsgálati eljárás, amellyel az elkészített hibrid alkatrészek minőségét tönkremenetel nélkül ellenőrizni lehetne. Amellett azonban, hogy a kész alkatrészeket roncsolásos vizsgálati módszereknek vetik alá, kialakult egy szabványos laboratóriumi eljárás is a próbatestek kötési erősségének vizsgálatára. Ez azonban csak arra elegendő, hogy a gyártómű ki tudjon adni egy nyilatkozatot arról, hogy a ragasztókeverék alkalmas az adott célra. Gyakran a DIN 53531 számú szakítóvizsgálatot használják, amelynek során a fegyverzeteken maradt gumimaradékok felületre eső arányával jellemzik a kötést. Az említett szabvány a szobahőmérsékleten

végzett szakítóvizsgálat során 500 mm/min szakítósebességet ajánl. A próbatestek méreteit és kialakítását a különböző szabványok tartalmazzák.

2.6.7. A kialakult kötés hibalehetőségei és lehetséges okai

- a) Szakadás a fémfegyverzet és a primer réteg között



26. ábra. Primerszakadás

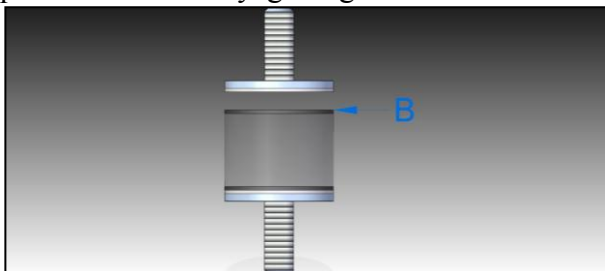
Fémfelület hibalehetőségei:

- helytelen zsírtalanítás,
- helytelen mechanikus kezelés,
- helytelen tárolási módszer,
- tárolási idő túllépése.

Primer felhordásának hibalehetőségei:

- a réteg kimaradása,
- helytelen rétegvastagság,
- a primer kötőanyag inhomogenitása,
- rövid szárítási idő,
- rossz anyagmegválasztás.

- b) Szakadás a primer és a kötőanyag réteg között:

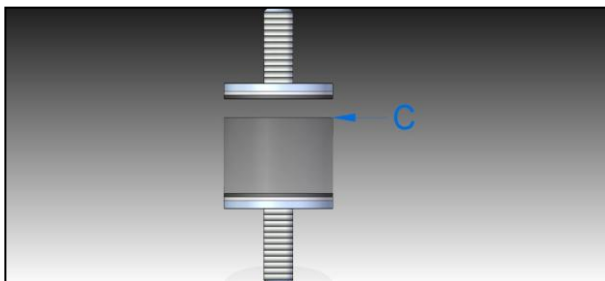


27. ábra. Rétegeközi szakadás

Hibalehetőségek:

- a primer vagy a ragasztó réteg száraz felhordása,
- a ragasztó korai felhordása (folyékony primerre),
- a ragasztó inhomogenitása,
- helytelen anyagválasztás.

c) Szakadás a ragasztó és a gumi között:



28. ábra. Ragasztószakadás

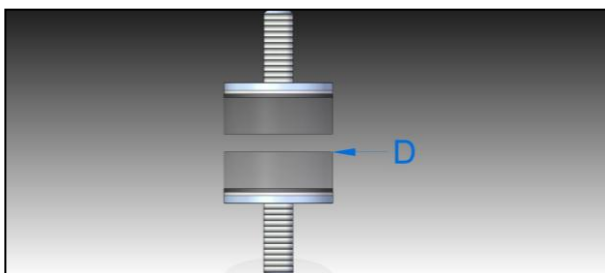
Kötőanyag hibalehetőségei:

- a réteg kimaradása,
- rossz anyagválasztás,
- inhomogén ragasztókeverék,
- túltárolás,
- magas szárítási hőmérséklet.

A kaucsukkeverék hibalehetőségei:

- túltárolt keverék,
- magas hőmérsékleten tárolt keverék,
- alulvulkanizált állapot előidézése,
- szennyezett fémfelület,
- rövid folyási idővel rendelkező keverék alkalmazása.

d) Gumiszakadás (A sikeres gumi-fém kötés)



29. ábra. Gumiszakadás

2.7. Fémfegyverzetek

2.7.1. Fémfegyverzetek gyártása

A fémfegyverzetekkel a gumi elemeket rögzíthetjük a beépítésnek megfelelő vázszerkezethez. Némely konstrukciónál a terhelés átadásának egyenletesebbé tétele miatt alkalmazzuk, de sok esetben ezek a feladatok együtt is megvalósítandók. Kivételük legtöbb esetben valamilyen sík vagy mélyhúzott, esetleg hajlított lemezből készített, egy vagy több csavarral ellátott tárcsa vagy szögletes alakú lemezek. Gyártásuk hagyományosan kivágó-lyukasztó szerszámokkal, többütéses sajtológépekkel történik (30. ábra), a kötőelemeket pedig hegesztéssel rögzítik. A lézertechnika elterjedésével az egyedi gyártás sok esetben már CNC vágógépekkel történik, azonban a tömeggyártás ma is hagyományos körhagyós sajtókon valósul meg. A lemezalkatrészek anyaga előírás hiányában Fe 235 minőségű 2-4 mm vastagságú acéllemezekből készül, ám gyakori esetben a nagy igénybevételű, nagy méretű alkatrészek akár 20 mm vastag durvalemezből is gyárthatók.



30. ábra. 2 ütéses hidegalakító gép

2.7.2. Fémfegyverzetek előkészítése ragasztószóráshoz

Az elasztomer-fém kötés kialakítása, - mint arról már szó volt - a fémfegyverzetek előkészítésével kezdődik. A kötni kívánt fém alkatrészek felületének kémiaiag aktívvá tételével alkalmassá válnak a ragasztóanyag primer rétegének fogadására.

A fémelőkészítés lépései:

- fegyverzetek zsírtalanítása,
- szemcseszórával történő mechanikus kezelés,
- kémiai úton foszfátréteg felvitele.

Mivel a fémfegyverzetek gyártás után az esetek döntő többségében galvanikus bevonatot, általában kék vagy sárga cink-kromát réteget kapnak, ezért csak a mechanikus tisztítás jöhet szóba. Amennyiben a fémfegyverzeteket beépítés után festik vagy nem látják el felületvédelemmel, a foszfátréteg felhordása javasolt, mert olcsóbb és termelékenyebb. A bevonatkészítés után ezek azonnal a ragasztószórá üzembe kerülnek, és nyomban beszórják a primer réteggel. A ragasztóanyagok felhordása történhet mártással vagy szórással is. Utóbbi eljárás az iparban elterjedtebb, mert a ragasztóanyag rétegvastagsága jobban szabályozható. A száraz rétegvastagság betartása fontos (12-16 μm), hiszen amennyiben az jelentősen változik, úgy a gyártmányok szakítószilárdsága is nagymértékben ingadozik.

2.7.3. Tisztítás injektoros szemcseszórá berendezéssel

A szemcseszórá során nagy nyomású levegővel korund vagy acél szemcséket keverünk, és ezzel a szórjuk a munkadarabot. A kezelendő anyag minősége határozza meg a fúvatás maximális sebességét valamint a szemcseanyag minőségét és nagyságát. A nagyobb méretű (1 méternél hosszabb) fegyverzetek felület előkészítése nagyméretű szemcseszórá kabinban történik, zárt vagy átmenő, ún. alagút rendszerben. A korunddal végzett felület előkészítés hatására Nitzsche szerint az alábbi eredmények érhetők el (33. ábra), (Nitzsche, 1983).

1. Szemcseszórá acélsöréttel 0,7-0,8 mm
2. Szemcseszórá korunddal 0,4-0,7 mm
3. Szemcseszórá acélsöréttel 1,0 mm



31. ábra Különböző szóróanyagok hatása a szakítóerőre (Nitzsche, 1983)

2.7.4. Tisztítás lapátkerekes szemcseszóró berendezéssel, acélsörét szóróanyaggal

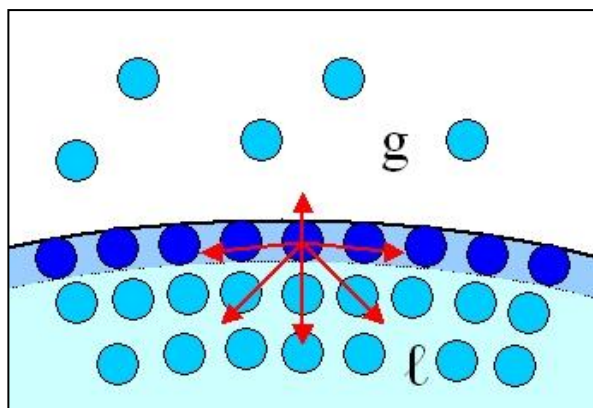
A technológiai folyamat eredménye és célja tulajdonképpen ebben az esetben is az, mint az injektoros berendezéssel végzett kezelésnél, különbség azonban mégis tapasztalható. Lényegi eltérés abból adódik, hogy a forgó lapátkerékekkel végzett szórás csak olyan szóróanyaggal végezhető, amelynek jelentős relatív tömege van, vagyis nem por frakciójú, mert a lapátkerékeknek kell a szemcsét felgyorsítani, nem pedig a nagy térfogatú sűrített levegőnek. Ezért korlátozott a használható szóróanyagok minősége. Tapasztalati úton kell kiválasztani azt a szóró közeget, amelyet alkalmazva biztosítható a korunddal elért kötési eredmény. A technológia alkalmazása során nagy figyelmet kell fordítani az 1 m² felületre kijuttatott anyag mennyiségére, ugyanis a jelentős energia bevitel miatt a vékonyabb lemezek (0,5-1 mm) károsan deformálódhatnak.

2. táblázat, *Mechanikus és kémiai kezelő eljárások különböző fegyverzeteknél* (Henkel, 2006)

Kötendő anyag	Szóróanyag	Kémiai eljárás
Acél	Acélsörét	Foszfátózás
Nemes acél	Korund	Zsirtalanítás
Alumínium	Korund	Kromátolás
Réz	Korund	Zsirtalanítás
Bronz	Korund	Zsirtalanítás

2.8. Az adhéziós kötés kémiai értelmezése

Közismert jelenség, hogy a nyugalomban lévő folyadékok a legkisebb felületű alakot veszik fel, például a vízcsepp gömb alakú, mert a gömb a lehető legkisebb felületű állapot. Ennek oka a felületen fellépő, ún. felületi feszültség. Felületi feszültségnek (γ) a felületben működő összehúzó erőt értjük, és a felület 1 m hosszúságú vonalára vonatkoztatjuk. Az elnevezése csak részben helytálló, ugyanis nem feszültség jellegű mennyiség, hanem mint a definíciós összefüggésből kitűnik: a felületben, annak egységnyi hosszúságú vonalában ható erővel (N/m), vagy egységnyi nagyságú felület létrehozásához szükséges munkával (J/m²), az ún. felületi munkával egyenlő. A 32. ábrán a folyadék felületi rétegét szemléltetem (Berecz, 1991).

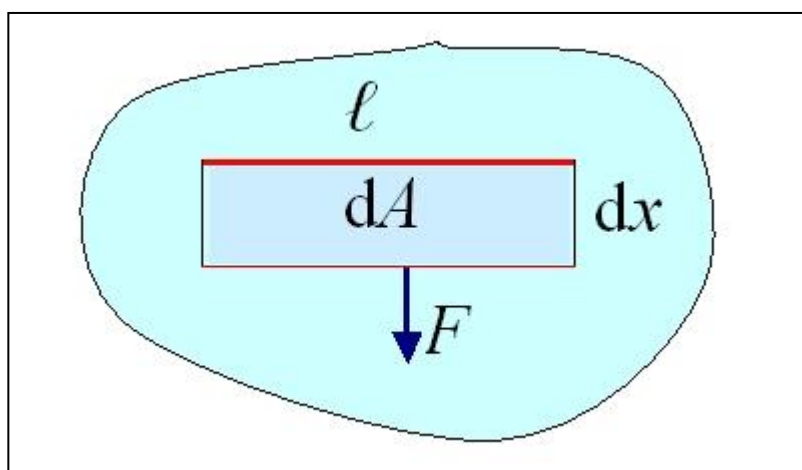


32. ábra. A folyadék felületi rétege (Báder, 2007)

Ahhoz, hogy a folyadék belsejéből molekulákat juttassunk a felszínre, ezáltal a felszín dA -val növekedjék, a felszín kifeszítő erői ellenében $d\omega$ munkát kell végeznünk (33. ábra). A felület valamely ℓ hosszúságú vonala mentén, arra merőlegesen a szomszédos részecskék között F erő hat, amely ellenében $\ell dx = dA$ új felület létrehozásához $Fdx = d\omega$ munka befektetése szükséges:

$$\gamma = \frac{d\omega}{dA} = \frac{Fdx}{\ell dx} = \frac{\omega}{A} = \frac{F}{\ell}, \text{ mértékegységei: } \frac{J}{m^2} = \frac{N}{m} \quad (17)$$

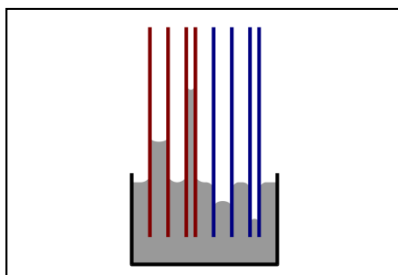
Azt is mondhatjuk: a γ felületi feszültség a folyadék egységnyi felületének *energiatöbblete* a folyadék belsejéhez képest.



33. ábra. A felületi munka értelmezése (Báder, 2007)

Felületi feszültség folyadék és szilárd test között is felléphet, amit határfelületi feszültségnek nevezünk. Úgyszintén a felületi feszültséggel függ össze az ún. **kapilláris emelkedés** és **kapilláris süllyedés** jelensége.

A vékony csövekben (kapillárisokban) a folyadékok nem követik a közlekedőedényekre vonatkozó törvényt: a nedvesítő folyadék szintje magasabb, nem nedvesítő folyadéké pedig alacsonyabb, mint nagy felületű edényben (34. ábra). Az előbbi jelenséget kapilláris emelkedésnek, utóbbit kapilláris süllyedésnek nevezzük. Üveg kapillárisban kapilláris emelkedést mutat például a víz, és kapilláris süllyedést a higany. Kapilláris emelkedés akkor következik be, ha a folyadék nedvesíti a kapilláris falát, vagyis a folyadék és a szilárd anyag részecskéi között nagyobb a vonzóerő, mint az azonos folyadék molekulák között. A nedvesítési peremszög $\Theta < 90^\circ$. Ha ezek az erők kisebbek, vagyis a folyadék és a szilárd részecskék taszítják egymást, akkor kapilláris süllyedés lép fel. A nedvesítési peremszög $\Theta > 90^\circ$.



34. ábra. A kapilláris emelkedés és süllyedés (Báder, 2007)

A 35. ábra segítségével kiszámíthatjuk az emelkedés, illetve a süllyedés nagyságát. Ha például a nedvesítő folyadék a csőben h magasságba emelkedik fel, akkor a folyadékoszlop súlya (F_g) miatt egy lefelé ható erő működik, amelynek nagysága a folyadékoszlop súlyával egyenlő:

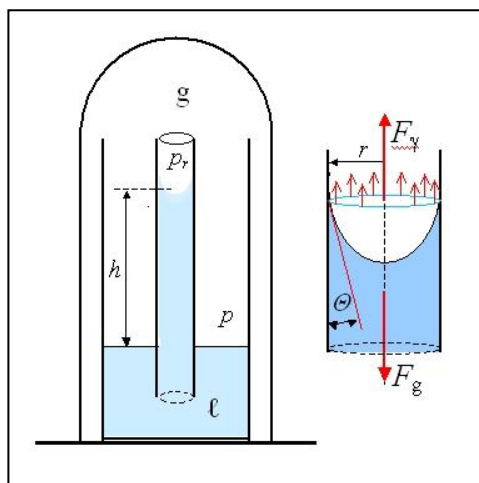
$$F_g = r^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot g \cdot h \quad (18)$$

Ezt az erőt ellensúlyozza a folyadék és az üveg részecskéi között működő adhéziós erő felfelé mutató komponense (F_γ):

$$F_\gamma = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \gamma \cdot \cos\theta \quad (19)$$

A két erő egyenlősége esetén a folyadék emelkedésének vagy süllyedésének mértéke, a h kiszámítható:

$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (20)$$



35. ábra. A kapilláris emelkedés és a folyadék felszíne a kapillárisban (Báder, 2007)

A felületi feszültség a folyadék anyagi minőségén kívül a hőmérséklettől is függ. A kritikus hőmérsékleten megszűnik a folyadék és annak gőze közötti különbség, a fázishatár is eltűnik, a felületi feszültség nullára csökken. A felületi feszültség hőmérséklettel való változásából következtetni lehet a folyadék állapotbeli molekulák állapotára. A T hőmérsékleten mért felületi feszültség, a folyadék moláris térfogata és a hőmérséklet között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\gamma \cdot V_m^{2/3} = k(T_c - T) \quad (21)$$

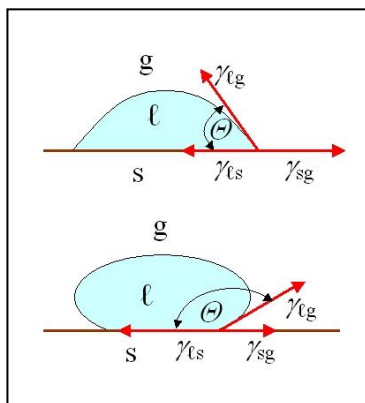
ahol

- V_m a folyadék moláris térfogata, m^3/mol ,
- γ a folyadék felületi feszültsége, N/m
- T a hőmérséklet, K
- T_c az anyag kritikus hőmérséklete, K
- k az Eötvös-féle állandó, J/K

Ez a kifejezés az **Eötvös-szabály**. Az ún. normális folyadékok esetén az Eötvös-féle állandó értéke $2,1 \times 10^{-7} \text{ J}/(\text{K mol}^{2/3})$. A legtöbb folyadék esetében a felületi feszültség már $6 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal a kritikus hőmérséklet alatt gyakorlatilag nulla, ezért az Eötvös-szabály alábbi alakja pontosabb eredményt ad:

$$\gamma \cdot V_m^{2/3} = k(T_c - 6 - T) \quad (22)$$

A $V^{2/3}$ mennyiség a folyadék 1 móljának a felületével arányos (mólfelület), ezért a $\gamma V^{2/3}$ szorzatot mólfelületi energiának nevezzük. Ez arányos annak a munkának a nagyságával, amely ahhoz szükséges, hogy 1 mólnyi folyadéknak megfelelő felületet létrehozzunk, vagyis 1 mól folyadékot teljes mértékben szétterítsünk. A k állandó értékeit különböző anyagokra táblázatban találjuk. Azt a jelenséget, amikor a határfelületen valamely anyag koncentrációja megváltozik, adszorpciónak nevezzük. Ha a folyadék szabad felületén nagyobb az oldott anyag koncentrációja, mint az oldat belsejében akkor csökken, ha pedig kisebb a koncentráció, akkor növekszik a felületi feszültség. Azokat az anyagokat, amelyek a felületi feszültséget csökkentik, tenzideknek, felületaktív anyagoknak nevezzük. A tenzidok molekulái a hosszú szénláncú apoláris gyök mellett poláris, s így egyben hidrofil gyököt is tartalmaznak, amelyek úgy helyezkednek el, hogy a lehető legfolytonosabb átmenetet alkossák a két érintkező fázis között (Berecz, 1991). A tenzidok erős felületi feszültségcsökkentő hatásának rendkívüli gyakorlati jelentősége van, mivel ezzel befolyásolhatók a folyadékoknak szilárd test felületén történő szétterülési viszonyai, vagyis a felület nedvesítésének mértéke. Ha folyadékot cseppentünk valamely szilárd testre, az vagy egyenletesen szétterül, vagy csupán lencse alakúra deformálódik, vagy egyáltalán nem terül szét.



36. ábra. A nedvesítés értelmezése

A folyadék molekuláira a felületet körülvevő más anyag molekulái is vonzóerőt fejthetnek ki. Ez a jelenség az **adhézió**, az ebből származó erő pedig az adhéziós erő. Ha ezeknek az erőknek a folyadék molekuláira kifejtett hatása elhanyagolható (pl. levegő, g) a kohéziós erőkhöz képest, akkor a felületen lévő folyadékrészecskék a kohéziós erők hatására a folyadék belseje felé igyekeznek elmozdulni, vagyis a felület valóban csökkenni igyekszik. Ha ezeknek az erőknek a folyadék (l) molekuláira kifejtett hatása nem hanyagolható el – például egy szilárd (s) felületen helyezkedik el –, akkor a folyadék jobban, vagy kevésbé terül szét azon, nedvesíti, vagy kevésbé nedvesíti azt, attól függően, hogy a vonzó (vagy taszító) erők mekkorák. A nedvesítés mértékét a **nedvesítési peremszög**gel (θ) jellemezzük. Ha a peremszög kisebb mint 90° , akkor részleges nedvesítésről, ha nagyobb 90° -nál, akkor részleges nem nedvesítésről beszélünk. A közös határon fellépő erőket a **határfelületi feszültséggel** jellemezzük (γ_{sg} , γ_{ts} , γ_{tg}). Értelmezése hasonló a felületi feszültségéhez, csak itt a kohéziós erőkhöz kívül az adhéziós erők is közreműködnek. A folyadék addig terül a felületen, amíg az erőegyensúly beáll. Az erőegyensúly feltétele (**Young-egyenlet**):

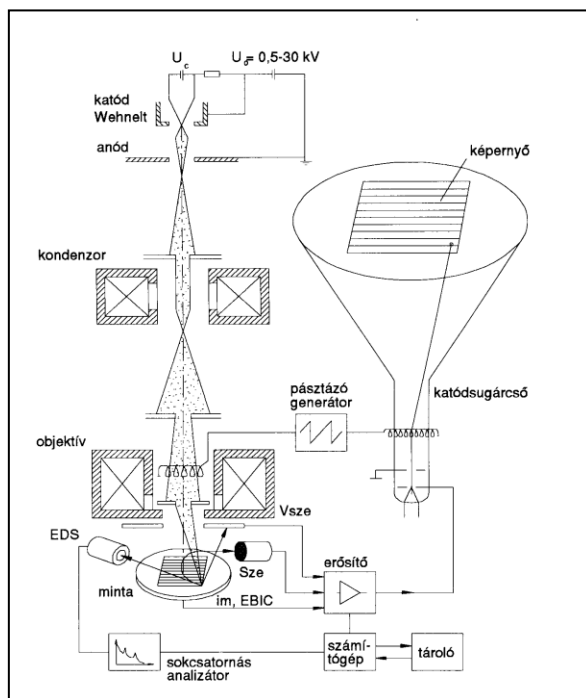
$$\gamma_{sg} - \gamma_{ls} - \gamma_{lg} \cdot \cos\theta = 0 \quad (23)$$

Nyilván való tehát, hogy a felület folyadék általi nedvesítő képessége megfelelő tenzidekkel szabályozható. A ragasztott kötés szilárdságát a fizikai erők illetve kémiai kötések következtében kialakult felületi tapadás (adhézió) és a ragasztóban magában, illetve a folyamatban létrejövő összetartó erők (kohézió) határozzák meg. A ragasztott kötés létrejöttének feltétele, hogy a ragasztó anyag molekuláinak egymás közötti kohéziója kisebb legyen, mint a ragasztó anyag és az illeszkedő anyag közötti adhézió nagysága. A gyakorlatban ugyanakkor csak olyan anyagok alkalmasak ragasztóként, amelyek felületi feszültsége kisebb, mint a ragasztandó alkatrészek határfelületi feszültsége, tehát megfelelő nedvesedést is biztosítanak. A ragasztó hatás úgy jön létre, hogy a ragasztó anyag behatol, bediffundál a ragasztandó testek pórusaiba, és ott megszilárdulva biztosítja a kötést, részben pedig a határfelületeken létrejövő erős adszorpció járul hozzá a kötéshez (*Berecz, 1991*).

A pásztázó elektronmikroszkóp működési elve

A pásztázó elektronmikroszkópban (37. ábra) az elektronforrás vagy elektronágyú (benne többnyire izzó katód) állítja elő a vizsgálathoz szükséges elektronokat, amelyeket nagyfeszültség gyorsít a vizsgálandó minta felé, és egy elektromágnesekből álló lencserendszer (kondenzor és objektív) fókuszál

tűhegyű nyalábbbá. Az elektronok a minta anyagával kölcsönhatásba lépve számos olyan jelet (szekunder elektronokat, visszaszórt elektronokat, röntgensugárzást, fényt stb.) hoznak létre, amelyek visszatükrözik a vizsgálandó minta valamilyen tulajdonságát az adott pontban. Ezen jelek detektálására különféle detektorokat alkalmaznak. A nyalábot a minta felületén pásztázva, a televíziós készülékben szokásos módon, a minta felületi tulajdonságai pontról pontra feltérképezhetők. Egy-egy detektorból vett jel megjelenítésére televíziós képernyő használható, amelyben az elektronnyaláb szinkronban mozog a pásztázó elektronmikroszkóp elektronnyalábjával. Kicsit leegyszerűsítve, a mintáról pontról pontra vett információt ugyanabban a sorrendben jelenítjük meg egy TV-képernyőn és így áll elő a kép. A pásztázó elektronmikroszkóp egyik leggyakoribb feltétje a röntgen spektrométer (lásd 64. ábrán, a készülék bal oldalán elhelyezve), a karakterisztikus röntgensugárzás detektálásával meg tudjuk állapítani, hogy a felnagyított mintarészlet milyen kémiai elemeket tartalmaz.



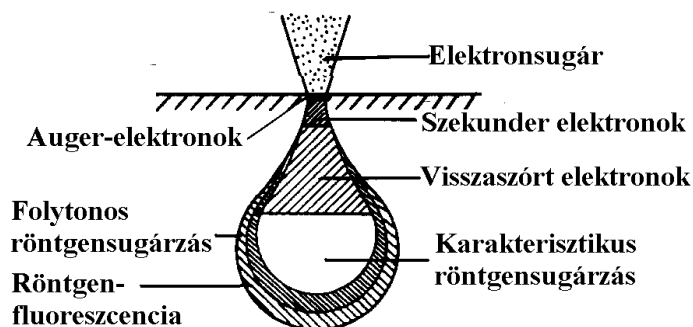
37. ábra. A pásztázó elektronmikroszkóp vázlatos felépítése (Pozsgai, 1995)

A pásztázó elektronmikroszkópban vákuum van, hogy az izzó katód ki ne égjen és a besugárzó vagy a mintából kilépő elektronok a levegő atomjaival ütközve ne szóródjanak, mert ez rontja a kép minőségét. A modern

elektronmikroszkópok egy csoportja olyan felépítésű, hogy mintaterükbe gázokat vagy gőzöket lehet beengedni, de ezekben az esetekben a mikroszkóp konstrukciója meggátolja, hogy a gázok vagy gőzök bejussanak a katód környezetébe. A pásztázó elektronmikroszkópok katódja rendszerint hajtú alakú izzó volfrám szál. Nagy vákuum uralkodik a katód körül. A katód várható élettartama kb. 50 óra, de ettől erősen eltérő értékekkel is találkozhatunk. A katód fényessége, az egységnyi térszögre vonatkoztatott elektron-áram sűrűsége meghatározó jellegű a mikroszkóp teljesítményére nézve: pl. a nagy felbontóképességhez, nagy fényességű katódra van szükség. A normál SEM mintaterében 10^{-3} Pa nyomás van. Az ún. környezetszimuláló pásztázó elektronmikroszkóp (ESEM) volt az első, amelynek mintaterében nem nagy vákuum volt, hanem a gáz- vagy gőznyomást akár 6600 Pa-ig is lehetett növelni. Létezik egy kisebb tudású, ún. kisvákuumú pásztázó elektronmikroszkóp is, amelynek mintatérben a nyomás csak 300 Pa-ig növelhető. Az kis- vákuumú mikroszkópra a változtatható nyomású elnevezést is használják és VPSEM-mel rövidítik. Így elkerülhető, hogy a LVSEM rövidítés mind kifestültségű mind pedig kisvákuumú pásztázó elektronmikroszkópot is jelentse. A konvencionális pásztázó elektronmikroszkóp gyorsító feszültsége a 0,2-30 kV tartományába esik. A kis feszültségen készült képek inkább tükrözik a felület tulajdonságait, mint nagyobb gyorsító feszültsége. A gyorsító feszültség csökkentésével csökken termikus volfrám katódok fényessége, ezzel együtt a mikroszkóp felbontóképessége és erősebben érvényesülnek a külső zavaró mágneses terek hatásai.

Elektronnyaláb és mintafelület kölcsönhatása

A gerjesztési térfogatok vizsgálatával megérthetők a pásztázó elektronmikroszkópia és mikroanalízis alapvető tulajdonságai, valamint hogy e két módszer mikor és mennyiben szolgáltat felületi információt.



38. ábra. Elektron sugár és anyag kölcsönhatása

Képzeld el, hogy egy elektronnyaláb felülről éri el a vízszintes síkban lévő mintafelületet (38. ábra). A felszínhez legközelebb eső 1-2 nanométeres rétegből az ún. Auger- elektronok szabadulnak ki.

Az Auger-elektronok úgy keletkeznek, hogy az ionizált atom nem röntgensugárzás, hanem elektron kibocsátásával adja le azt az energiatöbbletet, amellyel akkor rendelkezik, amikor egy külső héjról elektron ugrik be egy ionizált belső héjra. Az Auger-elektron emisszió és a röntgenemisszió komplementer folyamat, azaz a kettő valószínűségének összege 1. Alacsony rendszámú elemek az Auger emissziót, magasabb rendszámú elemek a röntgenemissziót részesítik előnyben. A 30-as rendszám (Zn) az, ahol az Auger-elektron és a röntgen foton emissziója ugyanolyan valószínű.

A felülethez második legközelebbi gerjesztési térfogat (38. ábra) a szekunder elektronoké. Megegyezés alapján szekunder elektronoknak tekintjük azokat a kisenergiájú elektronokat, amelyek energiája kisebb, mint 50 elektronvolt (eV). Az 50 eV-nál nagyobb energiájú elektronokat visszaszórt elektronoknak nevezzük. Jól lehet a felosztás önkényes és nincs módszer, amivel el tudnánk dönteni, hogy pl. egy 40 vagy 60 eV-os elektron a primer elektronnyalábból visszaszórás útján került a detektorba vagy a minta anyagából váltottuk ki másodlagos elektronként, mégis hasznosnak bizonyul e felosztás. A kisenergiájú elektronok a mintafelszínhez közeli helyekről jönnek, ezért szekunder elektron detektorral jobb felbontású képet készíthetünk, mint visszaszórt elektronokkal (*Pozsgai, 1995*).

A nagyenergiájú elektronok intenzitása monoton növekvő rendszámfüggést mutat, következésképpen lehetőséget ad olyan visszaszórt elektronkép készítésére, amelyből azonnal látható, hogy a fényesebb terepen nagyobb rendszámú elemek, a sötétebb terepen kisebb rendszámú elemek helyezkednek el. Ennek a visszaszórt elektron üzemmódnak különösen nagy hasznát vesszük elektronsugaras mikro analízis előtt, mert hozzásegít ahhoz, hogy a mintán megfelelő terepet kiválasszuk. Például a vörösréz és sárgaréz közötti átlagrendszám-különbség kisebb, mint 1, a visszaszórt elektronkép mégis erősen jelzi a két fázis közötti különbséget.

A visszaszórt elektronok mélyebbről jönnek, mint a szekunder elektronok és még nagyobb mélységből jönnek a röntgensugarak. Azt az R_x mélységet ameddig a röntgengerjesztési térfogat elér (*Reed, 2003*) szerint a következő képlettel határozhatjuk meg:

$$R_x = 0,077(E_0^{1,5} - E_c^{1,5}) \frac{1}{\rho} \quad (24)$$

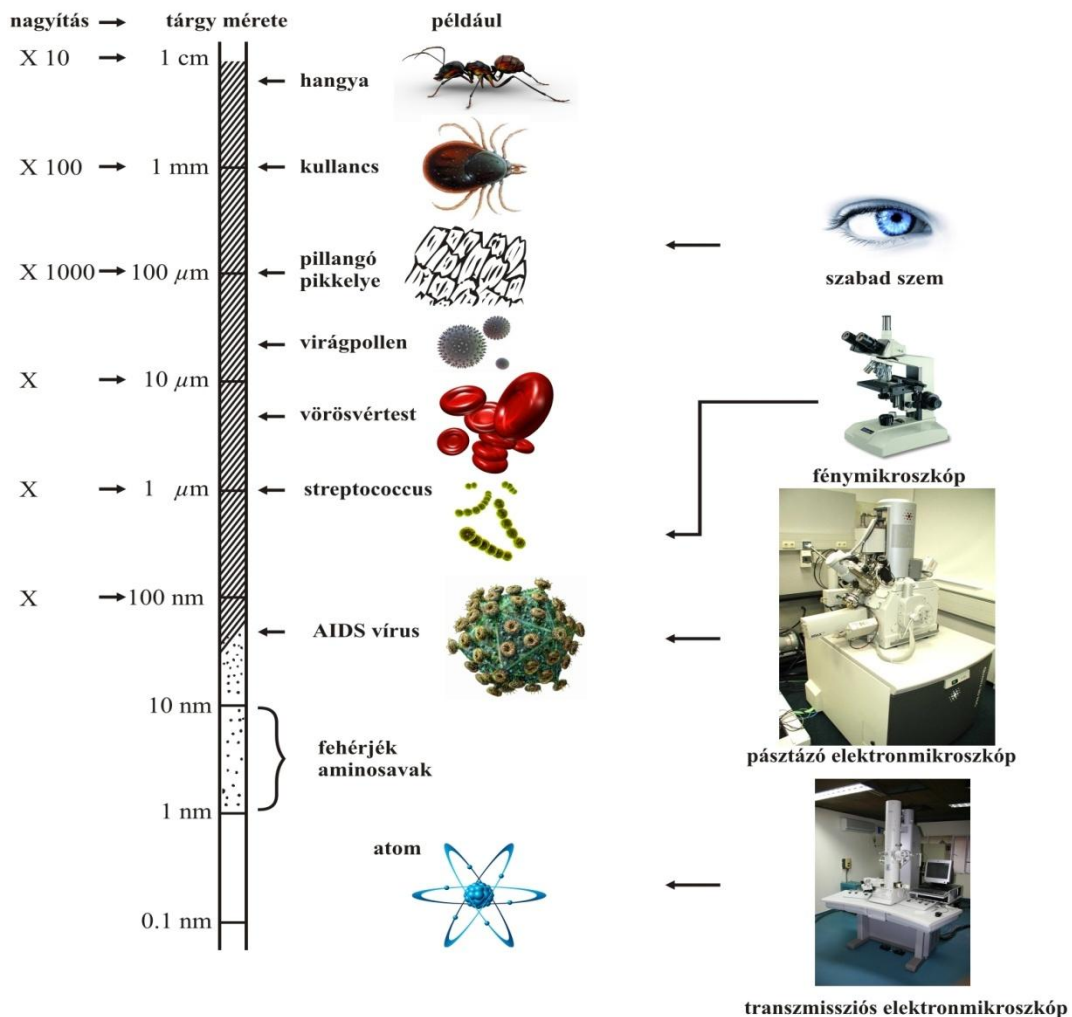
ahol E_0 - besugárzó elektronok energiája keV egységben kifejezve,

E_c - a vizsgált röntgenvonalhoz tartozó kritikus gerjesztési energia szintén keV egységekben kifejezve,

ρ - a vizsgált anyag sűrűsége [g/cm^3].

A vizsgált minta sűrűségét adottnak tekintve, a mikroszkóp gyorsító feszültségét változtathatjuk, hogy az (24) egyenletben a zárójelben lévő különbséget minimalizáljuk, de ha E_0 túl közel kerül az E_c -hez, akkor nem kapunk elég nagy röntgenintenzitást. A tapasztalat szerint az E_0 -nak kb. 1,5-3-szor nagyobbak kell lenni E_c -nél, hogy optimális gerjesztési viszonyok alakuljanak ki. Az egyenlet zárójeles részének értékét még úgy is csökkenthetjük, hogy K-vonal helyett L-vonalat választunk analízisre, mert az L-héj kritikus gerjesztési energiája E_{cL} kisebb, mint a K-héj kritikus gerjesztési energiája E_{cK} , és ez az E_0 nagyobb mértékű csökkentését engedi meg. Gyakorlatilag az R_x minimális értéke $0,5 \mu\text{m}$ körül van. A mikroszkóp gyorsító feszültségének változtatási lehetőségét a $0,2\text{-}30 \text{ kV}$ tartományban hasznosíthatjuk a szekunderelektron képek készítésénél is. Kis gyorsító feszültségeknél a kép információ-tartalma inkább a felületre jellemző, mint magasabb feszültségeknél.

Összefoglalva a gerjesztési térfogatokról leírtakat, azt mondhatjuk, hogy a pásztázó elektronmikroszkóppal szekunderelektron üzemmódban a minta felületének közeléből ($5\text{-}50 \text{ nm}$) nyerhetünk információkat és az elektronsugaras mikroanalízissel kapott információ $0,5\text{-}10 \mu\text{m}$ -es mintamélységből származik. Előnyös, hogy a gyorsító feszültség változtatásával bizonyos korlátok között változtathatjuk az információs mélységet is.



39. ábra. Az optikai, pásztázó elektron- valamint transzmissziós elektronmikroszkópiák összehasonlítása nagyítás és felbontóképesség határa alapján (Pozsgai, 1995)

Az elektronsugaras mikroanalízis helye az analitikában

Az elektronsugaras mikroanalízis annak a röntgensugárzásnak a mérésén alapul, amelyet az analizálandó mintában elektronsugárzás gerjesztett. A gerjesztett karakterisztikus röntgensugárzás energiája vagy hullámhossza arra az elemre jellemző, amely kibocsátotta, intenzitása pedig a kibocsátó elem koncentrációjával arányos.

Az elektronsugaras mikroanalízis roncsolásmentességével, nagy érzékenységgel és nagy laterális felbontóképességével kitűnő eredményeket produkál ipari alkalmazásokban.

Az elektronsugaras mikroanalízis azon alapszik, hogy a mintát érő elektronnaláb röntgensugárzást gerjeszt. A kémiai analízis alapja Moseley törvénye, amely szerint a karakterisztikus röntgensugárzás frekvenciája (ν) és a sugárzást kibocsátó kémiai elem rendszáma között szoros kapcsolat áll fenn:

$$\nu = 2,48 \times 10^{15} (Z - 1)^2 \quad (25)$$

Mint hogy a sugárzás energiája, frekvenciája és hullámhossza felírható

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (26)$$

alakban,

ahol h a Planck állandó, c - a fény sebessége,

a kémiai elemazonosítás elvégezhető a röntgensugárzás hullámhosszának vagy energiájának mérésével. A sugárzás intenzitása a nulladik közelítésben arányos a kibocsátó elem koncentrációjával. Ezen vizsgálat is nagyban hozzájárult, hogy a gumi-fém kötőrétegben lejátszódó folyamatokat elemezni tudjuk.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a gumi-fém kapcsolat fémfegyverzeteinek gyártásához fejlesztett új technológiát, ezek vizsgálatára kidolgozott eljárásokat, a szerszámüreg nyomásviszonyainak vizsgálatához tervezett hardver és szoftvereszközöket. Végül bemutatom a modellvizsgálatokat és a modell validálását az általam vizsgált rendszerben.

3.1. A modellvizsgálatok helyszíne

Doktori munkámat a Renner Bt jánoshalmi telephelyén végeztem. Ennek során Fe-235 minőségű acél fémfegyverzeteket és R1550F1 jelű gumikeveréket használtam.

A fémfegyverzetek felületi érdesség mérésére a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, Gépipari Technológiai Intézet Laboratóriumában került sor. Az acél fémfegyverzeteken végrehajtott vizsgálatok célja a különböző felületi érdességek szakítóerőre gyakorolt hatásának megállapítása volt. A temperált kamrában végzett dinamikus fárasztóvizsgálatokat és a Röntgen emissziós méréseket a Debreceni Atommag Kutató Intézet végezte, az általam adott irányelvek felhasználásával. Munkám során kidolgozott gyártási eljárással a 40. ábrán bemutatott repülőgépekben is biztonságosan alkalmazzák a rezgéscsillapító gumirugókat.



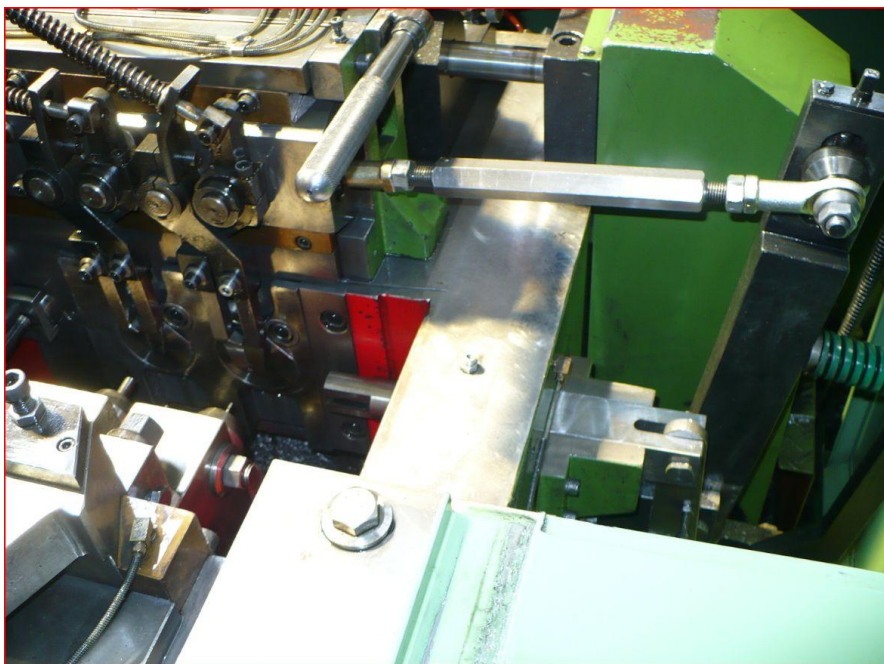
40. ábra. Rezgéscsökkentők légi alkalmazása (a kép illusztráció)

3.2. A fémfegyverzetek felület előkészítésének hatása

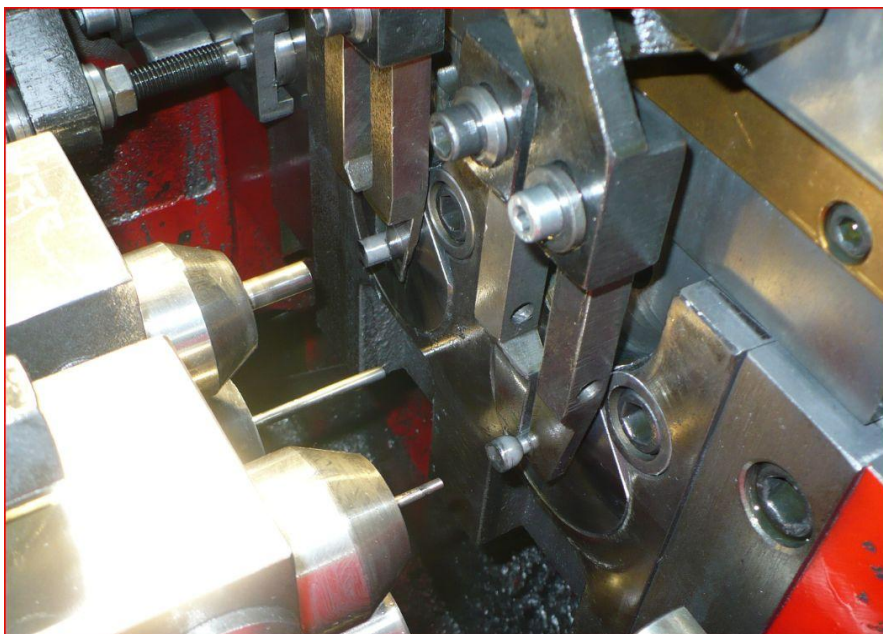
A vizsgálatok célja a fémfegyverzetek gumival érintkező felületi jellemzőinek olyan meghatározása, amelyet kialakítva a kialakuló gumi-fém kötés maximális lesz. A modell vizsgálatokat először EKF-24 minőségű korund szóróanyaggal, injektoros szóró berendezéssel, majd GN 50 jelű acélsörét alkalmazása mellett röpitőkerekes szemceszóró 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 mérési pont és a középsík távolsága) térbeli felületi jellemzőket mértem, illetve 3 dimenziós mikrotopográfiai térképet vettem fel.

3.2.1. A fémfegyverzetek előállítása

A fémfegyverzeteket hidegalakítással, 2 ütéses, 4 fészkes sajtológépen állítottam elő (41.-42. ábra).



41. ábra. Sajtológép munkatere



42. ábra. A fémfegyverzetek gyártása

A gyártás során a kialakult fémfegyverzetek felületi érdességét állandó $20\ \mu\text{m}$ értéken kell tartani, hogy utána a mechanikus kezeléssel könnyen ki tudjuk alakítani az előkészítési technológia során optimalizált $34\ \mu\text{m}$ érdességet. Különös figyelemmel kell lenni arra, hogy hidegalakításkor a szilárdsági tulajdonságok megváltoznak. A szakítószilárdság, a keménység és a folyáshatár nő, míg a nyúlás és a kontrakció csökken (Billigmann, 1977). A keményedéssel általában úgy kell számolni, hogy a zömítésben részt vevő anyagot egységesnek tekintjük és feltételezzük, hogy az anyag egész köbtartalma egyenletesen alakult (Takáts, 1953). A korszerű gyártógépek alkalmazásával lehetőség nyílt arra, hogy a fémfegyverzet különböző részeit különböző alakítási fokkal készítsem, ezzel a kritikus helyeken (menettő, érintkező felület) nagyobb szilárdságot érjek el. 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. Az eljárás során közbenső újrakristályosító lágyítást nem alkalmaztam, ezzel a gazdaságosság rendkívül nagy mértékben javult. Az eljárás további előnye, hogy a minden keresztmetszetében azonos mértékben alakított munkadarab egyenszilárdságú lesz, belső feszültségek nem

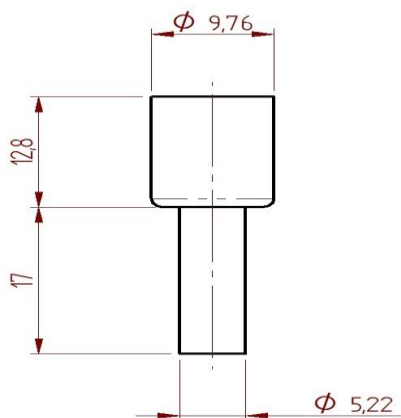
keletkeznek. A fémfegyverzet anyaga: C4C (EN10263) jelű, kis széntartalmú ($C < 0,005\%$), csillapítatlan, húzott, tekercsben lágyított és foszfátózott acél.

A hidegen folytatott munkadarab műveleti lépései az alábbiak.

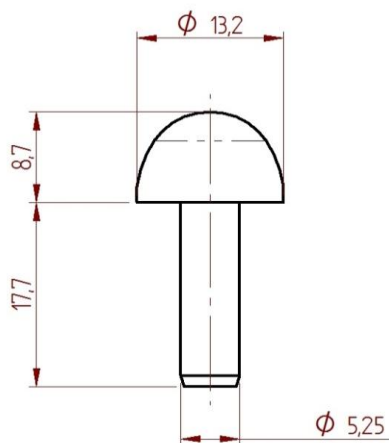
Levágás 9,76 mm átmérőjű anyagból, 18 mm hosszban, előrefolyatás, előfejezés, készre fejezés.



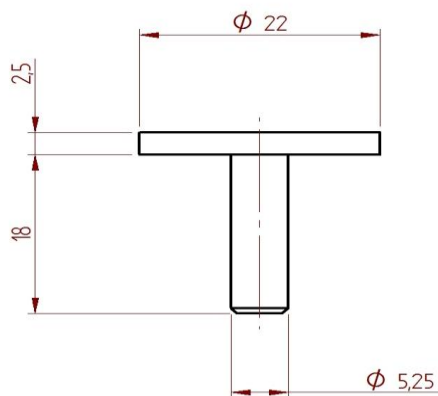
43. ábra. Levágott előgyártmány



44. ábra. Előrefolytatott alkatrész



45. ábra. Előfejezett alkatrész



46. ábra. Kész alkatrész (menet nélkül)



47. ábra. A gyártott fémfegyverzet alakított gyártmányai

A hidegalakítással előállított fémfegyverzetek gyártásának utolsó lépéseként síktárcsás menetmángorlóval alakítottam ki az M6-os meneteket.

3.2.2. Az injektoros szóró berendezés

Fémfegyverzet előkészítési kísérleteimet korund szóróanyag alkalmazásával a 48. ábrán bemutatott szemcseszóró kabinban végeztem.



48. ábra. Injektoros szemcseszóró kabin

A berendezés adatai:

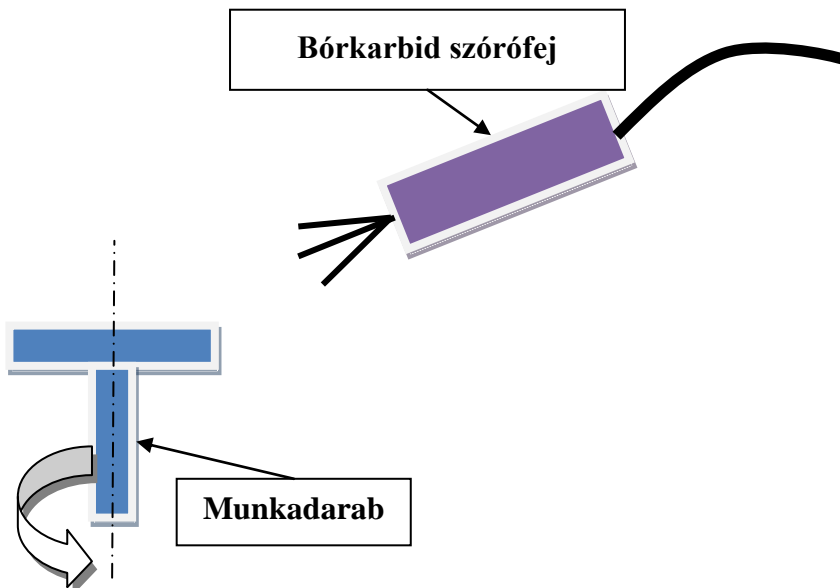
- típus: Büffel 140
- sűrített levegő igény: 800 - 1000 l/min
- anyag fúvóka mérete: 8 mm
- levegő fúvóka mérete: 3,5 mm

A vizsgálati paraméterek megválasztásakor a mérhető technológiai és környezeti jellemzőket vettem figyelembe. A paramétereket a 3. táblázat tartalmazza. Ezek alapján határoztam meg azt az optimális felületi érdességi tartományt, amelyet kialakítva a kialakuló szakító erőnek maximuma van. A vizsgálat időtartama maximum 60 s volt.

3. táblázat, Vizsgálati paraméterek

Vizsgálati paraméterek	Szemcseszórési próbák
Kiinduló felületi érdesség, R_a [μm]	20 μm
Sűrített levegő nyomás, p [bar]	8 bar
Beesési szög, ξ [$^\circ$]	25 $^\circ$
Vizsgálati időtartam, t [ciklus], [h]	5 ciklus / 60 s
Szórási távolság, z [mm]	35 \pm 2 cm
Környezeti hőmérséklet, T [$^\circ\text{C}$]	24 $^\circ\text{C}$
Relatív páratartalom, RH [%]	50%

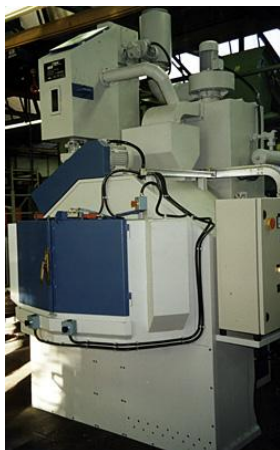
A galvanikus úton cink-kromát réteggel ellátott kísérleti mintákat 25 $^\circ$ beesési szögben 35 cm-es szórási távolsággal EKF-24 jelű korunddal kezeltem. A szórási időt 5 lépésben változtattam, miközben mértem a sűrített levegő nyomásváltozását, illetve a kialakult felületi érdesség síkbeli és térbeli jellemzőit. A 49. ábrán a kísérlet elrendezésének vázlatát szemléltetem.



49. ábra. Injektoros szemcseszórési kísérlet vázlatja

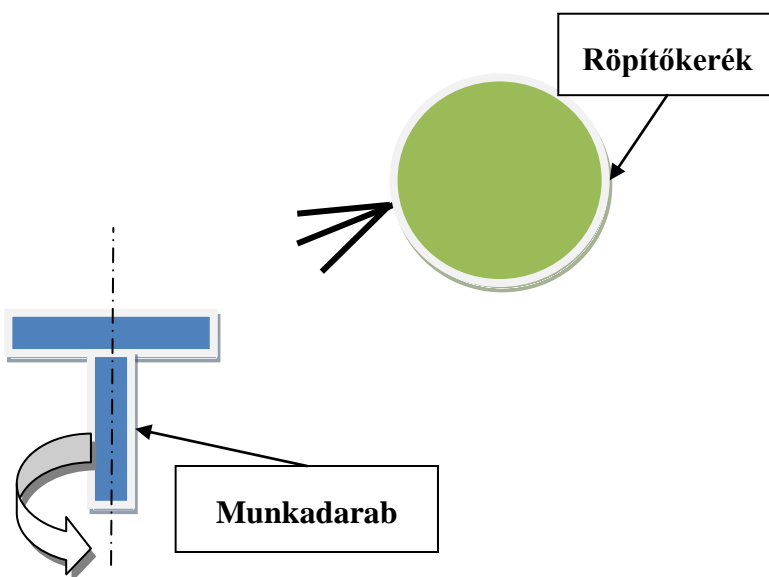
3.2.3. A röpítőkerekes szemcseszóró berendezés

Az előzőekhez hasonló kísérleti beállításokkal, röpítőkerekes géppel is végeztem felület előkészítést. A szórási időt 5 lépésben változtattam, miközben mértem a kialakult felületi érdesség síkbeli és térbeli jellemzőit.



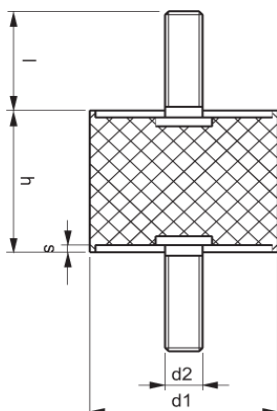
50. ábra. Röpítőkerekes szemcseszóró berendezés

A 50. ábrán az alkalmazott berendezést, az 51. ábrán a kísérlet elrendezésének vázlatát szemléltetem.



51. ábra. A röpítőkerekes szemcseszórási kísérlet vázlata

A fémfegyverzetek mechanikus előkészítésének hatását szemcseszórási próbákkal elemeztem az 52. ábrán látható próbatesten.



52. ábra. A szemcseszórás után vulkanizált próbatest és méretei

$$d1 = 25 \text{ mm}, h = 20 \text{ mm}, s = 2 \text{ mm}, l = 18 \text{ mm}, d2 = M6$$

Az alkatrészeken felületi érdességet mértem, majd a fémfegyverzeteket ragasztóanyaggal kezeltem és próbatesteket vulkanizáltam. Ezt követően szakítóvizsgálatnak vettem alá, és a szakadási erőket mértem. A kísérleti beállításoknál (Pék, 2000) utalásait vettem figyelembe (4. táblázat, 51. ábra).

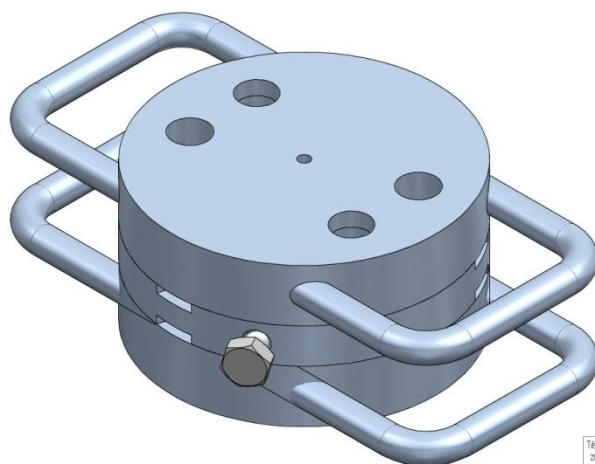
4. táblázat, Vizsgálati paraméterek

Vizsgálati paraméterek	Késztermék szakító vizsgálat
A szakítógép típusa,	Lloyd LR 30K
A szakítás sebessége, v [mm/min]	500 mm/min
A próbatest jele,	25/20-1 M6x18
Vizsgálati időtartam, t [ciklus], [h]	5 db/ciklus
Környezeti hőmérséklet, T [°C]	25°C
Relatív páratartalom, RH [%]	

3.3. A szerszámüregi nyomás hatásának vizsgálata

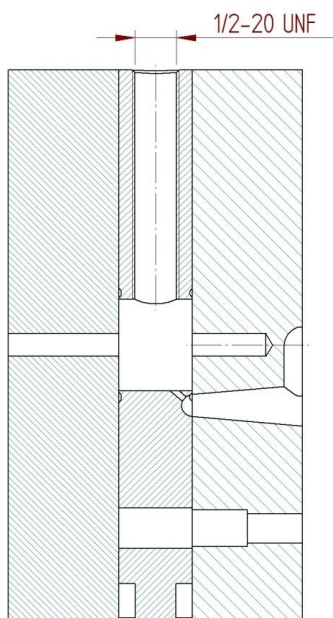
3.3.1. A mérőszerszám kialakítása

A szerszámüreg nyomás mérésére az 53. ábrán bemutatott mérőszerszámot terveztem és gyártottam.

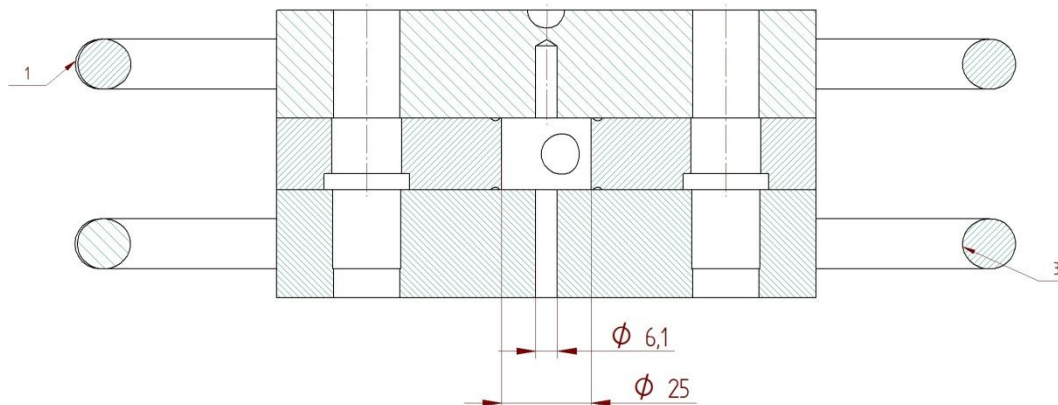


53. ábra. Szerszámműregi nyomásmérő mintaszerszám

A szerszámhoz GEFRAN típusú nyomásérzékelőt csatlakoztattam (56. ábra), amely 0-10 V analóg jelet ad ki a MOXA Logic E1240 jelfogadónak (57. ábra). 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.



54. ábra. A nyomásmérő csatlakoztatása



55. ábra. A nyomásmérő szerszám metszete



56. ábra. GEFRAN nyomásérzékelő



57. ábra. MOXA jelfogadó

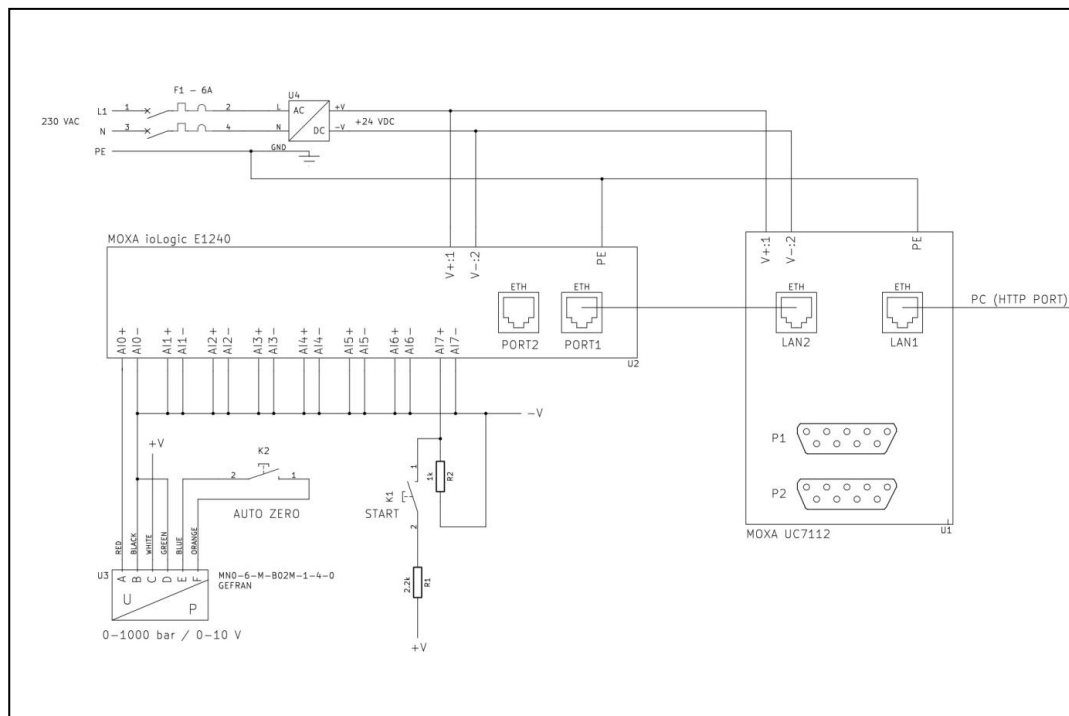
A mérésekhez szükséges nyomásmérő szerszámot célszerűen úgy terveztem, hogy hagyományos prés technológiánál, és fröccs technológiánál alkalmazott mérésekhez is alkalmazható legyen, ugyanakkor a vulkanizálási ciklus bármely időszakában a hasznos térfogatot 13,5%-on belül változtatni lehessen. Ezt egy M12x100 mm-es szabványos 8.8 szilárdsági jelű csavar folyamatos ki- illetve becsavarásával tudtam elérni.

A szerszámüreg töltési térfogata $V_t=18 \text{ cm}^3$

Az M12-es csavar menetemelkedése, $p=1,75 \text{ mm}$

Az orsómenet középátmérője, $d_2=9,85 \text{ mm}$

Az egy fordulatra eső térfogatváltozás: $V_v=0,133 \text{ cm}^3$

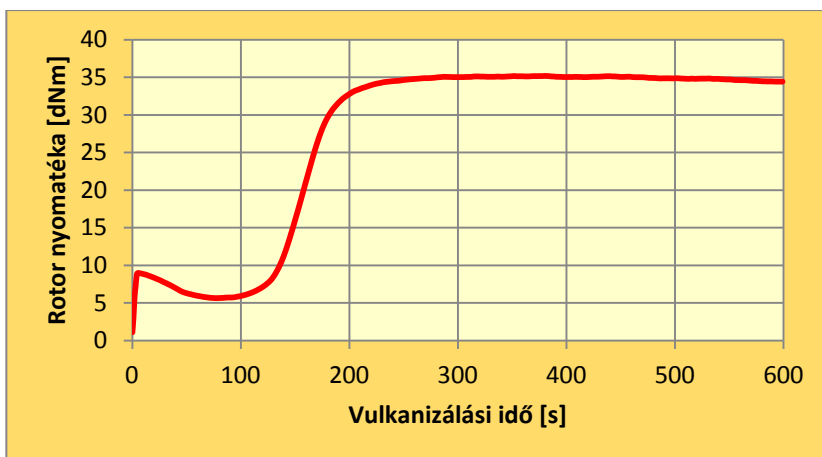
3.3.2. *A mérőkör elektromos kapcsolási vázlat*

58. ábra. A mérőkör vázlat

3.3.3. *Az alkalmazott gumikeverék vizsgálata*

A rezgéscsökkentő gumirugók és egyéb gumi-fém alkatrészek iparszerű gyártása során, vegyi úton előállított kötőanyag felhordásával, valósul meg a gumikeverék fémfegyverzetekhez történő kötése. A ragasztóanyag felhordásán túl jelentős befolyást gyakorolnak a kötőerőre a gumikeverék fizikai-kémiai tulajdonságai is. A keverék köthetősége nagyban függ annak keménységétől és az elasztomer típusától. Vizsgálataimhoz natúr kaucsuk alapú 55 Sh° keménységű általános gumikeveréket használtam.

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



59. ábra. Monsanto diagram

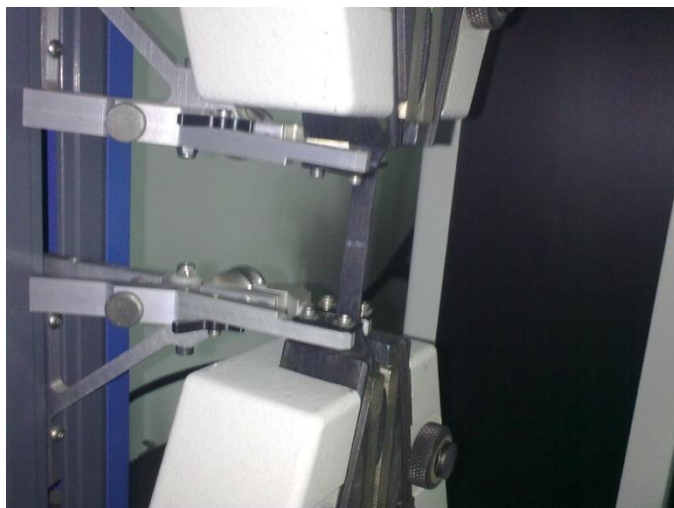
A kiértékelés általános elve szerint (*Bartha, 1988*) a nyomatékgörbe minimumához rendelik a zérus térhálópontot, a maximumához a maximumot. Mivel a maximum pont nehezen definiálható, ezért elfogadott gyakorlat szerint a nyomatékgörbe minimumától számított 90%-os emelkedéshez tartozó időt (t_{90}) tekintik az anyag vulkanizálási idejének (itt van a szakítószilárdság maximuma is). A minimumtól számított 20%-os emelkedéshez tartozó időt t_{02} -vel jelöljük. A 5. táblázatban a görbéről leolvasható sarokszámok szerepelnek, amelyekből a vulkanizálási idő, és a gumikeverék további alkalmazhatósága meghatározható. (Figyelembe véve a vonatkozó irodalmi munkák ajánlásait, amelyek a gumikeverékek feldolgozhatóságára utalnak)

5. táblázat, A Monsanto diagramról leolvasott adatok

Keverék	S_{\min} [dNm]	S_{\max} [dNm]	t_{02} [min]	t_{90} [min]
R155OF1	7,41	37,14	1,2	1,77



60. ábra. Szakítási próbatest



61. ábra. Szakító vizsgálat

A vizsgálatok elvégzése után az 5. táblázat szerinti adatokkal folytattam a kísérleteket.

6. táblázat, A keverék adatlapja

Keverék kódja		Felhasználás			
R155OF1		gumi-fém kötéshez (Proj. Nr.:16652)			
Bázis	Keménység	Készítette			
SMR-10	55 Sh °	Renner Tamás okl. gépészmérnök			
Megnevezés	Teoretikus formula	Kalkulációs formula	Üzemi csomag tömege		
			10 kg	22 kg	40 kg
SMR-10	100	54,0	5,4	11,9	21,6
Zno II	10,0	5,4	0,5	1,2	2,2
Stearinsav	1,9	1,1	0,1	0,2	0,4
Ippd	1,0	0,5	0,1	0,1	0,2
Fenyőgyanta	1,3	0,7	0,1	0,2	0,3
Korom 772	62,6	33,8	3,4	7,4	13,5
Orsóolaj párlat OP-15	4,9	2,6	0,3	0,6	1,1
TMQ	1,0	0,5	0,1	0,1	0,2
CBS	1,2	0,7	0,1	0,1	0,3
TMTD	0,6	0,3	0,0	0,1	0,1
Kén	0,6	0,3	0,0	0,1	0,1
Megjegyzések					
MV-GAM-REN projekt, 16652 számú légi alkalmazáshoz kifejlesztve					
Vulkanizálási adatok			Fizikai adatok		
Vulkanizálási idő [min]:	8	Szakítószilárdság:	15,5	MPa	
(mintalap)					

Vulkanizálási hőmérséklet [°C]:	165	Nyúlás:	550	%
Üzemi recept kiadva 2011.08.01	Fajsúly:	1,16	g/cm ³	
	Keménység:	55	Shore A°	
	t _{S2} :	1,3	min	
Üzemi recept visszavonva	t ₀₂ :	1,2	min	
	t ₅₀ :	1,8	min	
	t ₉₀ :	1,77	min	
Dátum/Aláírás	S _{min} :	7,41	dNm	
	S _{max} :	37,14	dNm	

3.3.4. A kompressziós technológiával végzett mérés

A repülőgép iparban alkalmazott és általam is kutatott rezgéscsillapító gumielemelek gyártása nagy részben fröccsprésen valósul meg, azonban a kísérleti eredmények kiterjesztése érdekében, valamint a két technológia összehasonlíthatósága miatt préselési eljárással is végeztem kísérleteket. A kísérleti beállításokat a 7. táblázatban foglaltam össze.

7 .táblázat, A préstechnológia paraméterei

Beállítási paraméterek	Késztermék szakító vizsgálat
A vulkanizáló gép típusa,	RCP-50
A préselés sebessége, v [mm/min]	400 mm/min
A próbatest jele,	25/20-1 M6x18
Vulkanizálási időtartam, t [ciklus], [min]	8 min
Vulkanizálási hőmérséklet, T [°C]	155 °C
Relatív páratartalom, RH [%]	40 %

A szerszámüregben kialakuló nyomásviszonyokat a kiindulási anyagmennyiség változtatásával szabályoztam. A beépülő gumikeverék tömegét analitikai mérleggel mértem, majd próbavulkanizálást végeztem, miközben mértem a szerszám hőmérsékletének változását, és a záró nyomás csökkenését. Az eredményeket diagramon szemléltettem. A kivulkanizált mintadarabokat 24 óra

pihentetés után szakítóvizsgálatnak vettem alá, és a szakítóerőket a kialakult szerszámüregi nyomás függvényében ábrázoltam.



62. ábra. A préstechnológiával végzett szerszámüregi nyomásmérés

8. táblázat, A préstechnológia kiindulási paraméterei

Sorszám	Töltés mértéke [%]	A kiindulási gumikeverék tömege [g]
1	3	10,3
2	10	11
3	20	12
4	35	13,5

3.3.5. A fröccstechnológiával végzett mérés

Szerszámüregi nyomásmérési vizsgálatokat fröccsprésen is végeztem, amelynek a vizsgálati paramétereit, illetve a mérés körülményeit a 9. táblázatban szemléltetem. A prés főbb beállítási jellemzőit a 8. táblázatban mutatom be. A vizsgálat során a befecskendezési nyomás konstans volt, viszont a szerszámba épített állítócsavarral a kialakult nyomásprofilot változtattam. Ezzel különböző szerszámüregi nyomásokat 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.

9. táblázat, A fröccstechnológia beállítási paramétereit

Beállítási paraméterek	Késztermék szakító vizsgálat
A vulkanizáló gép típusa,	LWB-VRE 1600/600
A préselés sebessége, v [mm/min]	400 mm/min
A próbatest jele,	25/20-1 M6x18
Vulkanizálási időtartam, t [ciklus], [s]	240 s
Vulkanizálási hőmérséklet, T [°C]	155°C
Relatív páratartalom, RH [%]	40%



63. ábra. LWB-VRE fröccsprés mérés közben

3.4. A reológiai jellemzők és a szakítóerő összefüggéseinek vizsgálata

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 keverékeknél ezen paraméterek változása (t_{s2} , t_{02}) milyen hatással van a gumi-fém kötésre. 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. Az eredményeket a 19. táblázatban szemléltetem.

3.5. A pásztázó elektronmikroszkóp, és Röntgen emissziós mérés

Pásztázó elektronmikroszkópos mérést, és karakterisztikus Röntgen-emisszió vizsgálatot végeztem a morfológiai leírás miatt, valamint egy- és kétdimenziós laterális elemtérkép készítése céljából a határreteg környezetében. A pásztázó elektronmikroszkópia olyan korszerű anyagtudományi vizsgálati módszerek, melyek elsősorban az anyagok felületéről, ill. a minták felszíne alatti néhány nano- ill. mikrométerről szolgáltatnak információt. A mérés célja az volt, hogy igazoljam, 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 határreteg környezetében. A minta egy hosszában félbevágott, 25 mm átmérőjű hengeres gumi-fém alkatrész, melynek fémkomponense St-37 minőségi jelű általános acél, gumikomponense a már több esetben is vizsgált R155OF1 natúr kaucsuk alapú keverék, az érintkezési felület Chemosil 211+411 kombinációjú kötőanyaggal kezeltem. A vizsgálathoz a mintából egy 6x10 mm²-es, 2 mm vastag darabot fűrészelt ki. Az eljárás során kenőanyagot nem alkalmaztam. 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. A vizsgáló berendezés a 64. ábrán látható (*Pozsgai, 1995*).



64. ábra. Röntgen detektor (a készülék bal oldalán)

3.6. 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. Az elektronmikroszkópos és profilométeres felvételeket a 71-75. ábrákon szemléltetem. Az elektronmikroszkópos felvételek összehasonlítása alapján a szemcseszórás hatására a kiindulási állapot, szabad kristályos felszínei erodálódnak, a 30 másodperces mintákon nagyméretű (5-20 μm) felszínek már alig figyelhetők meg. A kristályfelszínek valószínűleg a fémfegyverzet előzetes megmunkálása során alakulnak ki, és nem a szemcseszórás következtében.

4. EREDMÉNYEK

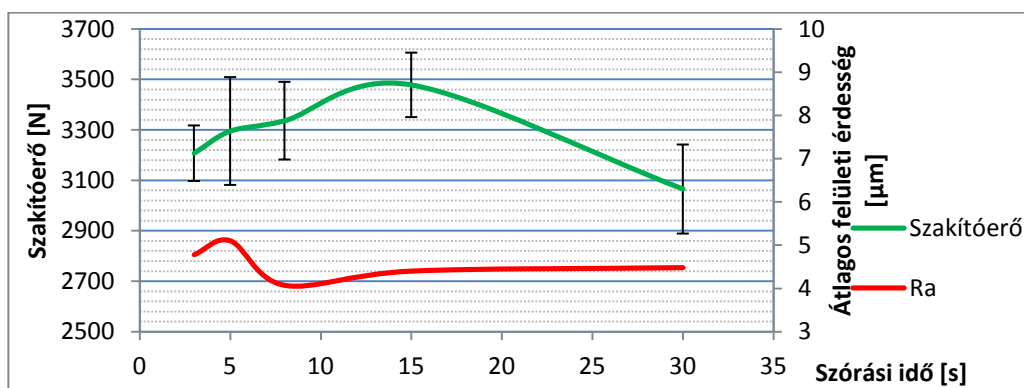
4.1. A felület érdességi jellemzőinek hatása a szakítószilárdságra

4.1.1. Eredmények EKF-24 korund alkalmazása mellett

A felület előkészítési kísérleteim során próbatesteket vulkanizáltam különböző módon előkészített fegyverzetekkel, és szakítóvizsgálattal ellenőriztem a kialakult kötés erősségét. Munkám során szóróanyag csoportonként 50 db fém alkatrészt készítettem elő. A kialakult felület jellemzőit (felületi érdességek, mikrotopográfia) és az ezzel összefüggésben kialakult kötőerő számszerű értékét a 10. és 11. táblázatokban, valamint a 65.-66. ábrákon mutatom be.

10. 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	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

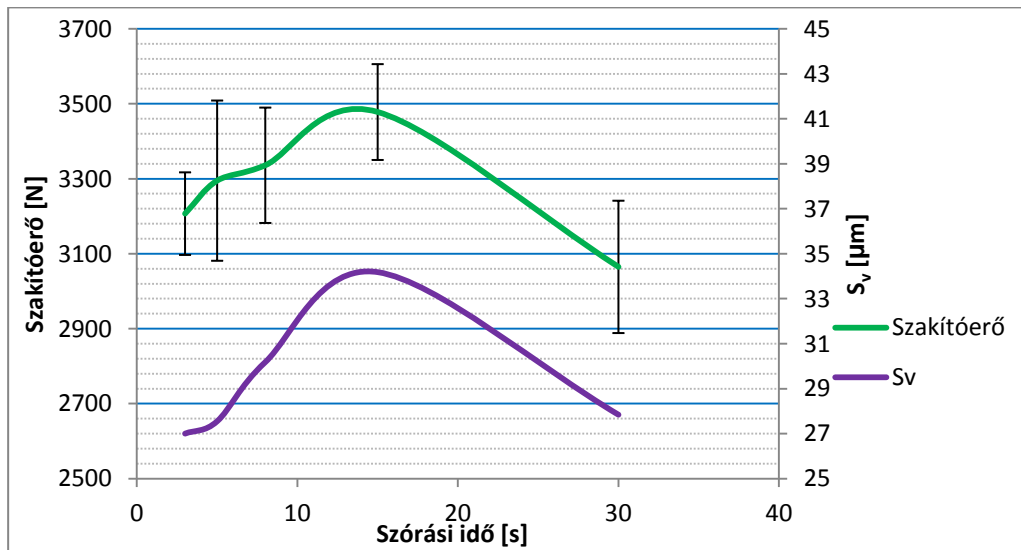


65. ábra. Szakítóerő és Ra érdesség a szórási idő függvényében korund szóróanyag esetében

Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az „ R_a ” átlagos felületi érdesség kevésbé jellemzi a gumi-fém kapcsolat szakítószilárdságra gyakorolt hatását, mint a mikrotopográfiai vizsgálat, ezért a továbbiakban szórt felület 3D-s felületi jellemzőit elemeztem, amelyek alakulása egyértelműen követi a szakítószilárdság változását (11. táblázat, 66. ábra). A vizsgálatokat Mahr Perthen Concept mérőgéppel, és a géphez fejlesztett kiértékelő szoftverrel végeztem. A mérési eredmények kiértékelésekor szűrést nem alkalmaztam.

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

Ssz	Szórás i 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	2σ
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



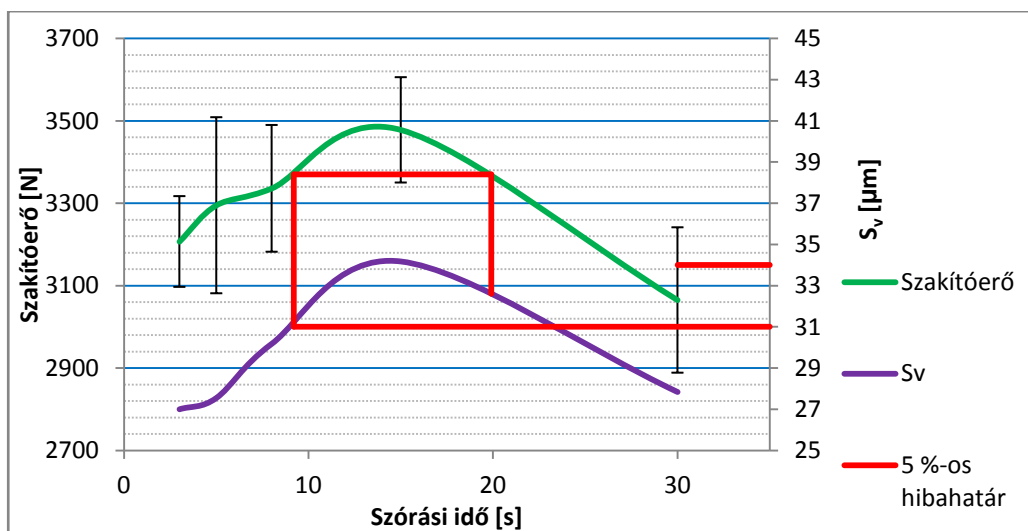
66. ábra. Szakítóerő és S_v érdesség a szórási idő függvényében korund szóróanyag esetében

Tekintettel arra, hogy a fémfegyverzetek gumival érintkező felülete egyszer lett előkészítve, de a vulkanizálás előtt két mérési módszerrel lett vizsgálva (2 D és

3D), ezért a 10. és 11. táblázatban mért szakítóerők (és természetesen ezzel együtt a szórások is) ugyanazon számszerű értéket képviselik. Fontos megjegyezni, hogy a mechanikus felület előkészítés után 1 órán belül a Chemosil 211+411 kombinációjú anyag rétegenként 15 μm vastagságban a felületre robotizált technológiával fel lett hordva. A ragasztóréteg jellemzői a kísérleti rendszerben független paraméterként kezelendők.

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 szakítóerőknek. Ezután a görbe 5%-os metszeteihez tartozó S_v metszeteket kivétítettem az S_v tengelyre, amelyről az optimált mikrotopográfia jelzőszámai közvetlenül leolvashatók. Így meghatároztam azt az területet leíró érdességi tartományt (31 $\mu\text{m} < S_v < 34 \mu\text{m}$), amelyet kialakítva a kötőerők 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.

A fröccsgép beállítási paramétereit a 9. táblázat (lásd 63. oldal) tartalmazza.



67. ábra. A hibahatárok értelmezése korund szóróanyag esetében

4.1.2. 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 12. táblázatban, a szakítóerővel bővített átlagolt eredményeket pedig a 13. táblázatban és a 70. ábrán szemléltetem.

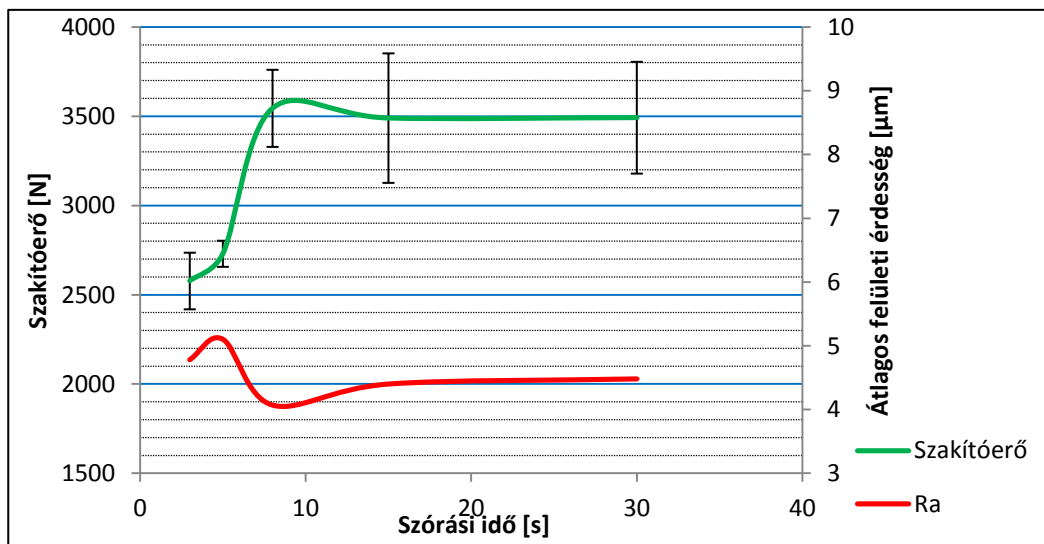
12. táblázat, a Mitutoyo 2D-s mérőgép beállítása és a mért eredmények

Beállítás: DIN Pc5 1990 0.8x5													
Ssz.		Ra [μm]			Ry [μm]			Rz [μm]			Rq [μm]		
		1	I.	4,58	6,82	6,07	34,73	46,91	47,44	29,97	38,32	38,33	5,78
	II.	5,46	5,44	5,05	44,25	54,79	45,49	36,14	37,18	33,95	7,15	7,17	6,58
2	I.	7,18	6,85	6,18	51,57	52,93	52,82	40,61	41,64	37,88	8,95	8,51	7,84
	II.	6,41	5,95	7,58	48,14	44,98	48,43	39,52	36,6	42,32	8,11	7,77	9,62
3	I.	5,86	8,05	9,2	48	56,2	56,2	39,7	43,5	48,09	7,66	9,94	11,17
	II.	6,71	7,02	8,35	59,09	55,11	78,43	43,43	39,64	48,6	8,42	8,69	10,53
4	I.	7,95	8,2	7,41	63,14	55,36	44,12	45,33	44,35	38,83	9,81	10,04	8,88
	II.	6,56	7,58	7,11	39,13	44,73	47,12	36,52	40,49	39,39	8,09	9,28	8,73
5	I.	5,51	6,36	5,44	41,75	42,26	34,16	36,05	37,3	30,68	7,08	8,08	6,64
	II.	6,59	5,14	6,99	49,82	41,6	45,9	37,88	28,94	39,58	8,12	6,29	8,64

13. táblázat, A 2D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő öf. acélsörét esetében

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

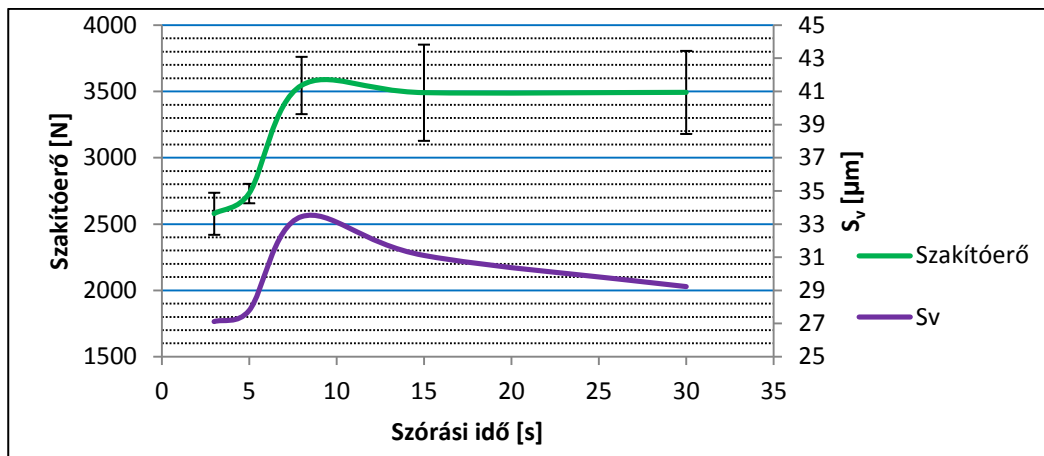


68. ábra. Szakítóerő és Ra érdesség a szórási idő függvényében acélszemcse szóróanyag esetében

14. táblázat, A 3D-s felületi érdesség, a szórási idő és a szakítóerő öf. acélsörét esetében

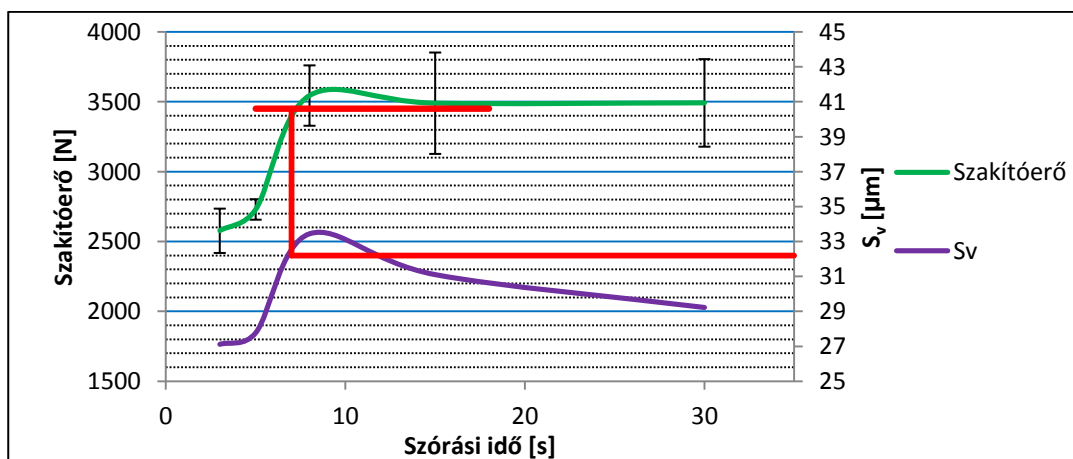
Ssz .	Szórási idő [s]	S _q [μm]	S _v [μm]	S _z [μm]	S _a [μm]	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	Szakítóerő átlag [N]	σ	2 σ
1	3	7,2	27,12	57	5,7	2500	2530	2670	2610	2450	2578	79	159
2	5	7,12	27,78	55	5,57	2750	2760	2700	2710	2800	2730	37	73
3	8	5,96	33,45	36,6	4,82	3550	3530	3400	3700	3670	3545	108	216
4	15	6,27	31,11	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

Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a 4.1.1. pontban megfogalmazottakhoz 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 (12. táblázat, 69. ábra).



69. ábra. Szakítóerő és S_v érdesség a szórási idő függvényében acélsörét szóróanyag esetében

Az eredmények kiértékelését az előző pontban leírtakhoz hasonlóan végeztem. A 69. ábrán megfigyelhető, hogy a szórási idő egy határon túli növelésével (9 s) a felületi mikrotopográfia S_v jelzőszámának mérőszáma csökken. A jelenség magyarázatára a 4.2. pontban bemutatandó profilométeres vizsgálatokat végeztem. A szakítóerő lefutását bemutató görbe 5%-os hibahatárához tartozó értékeket a 70. ábrán mutatom be.



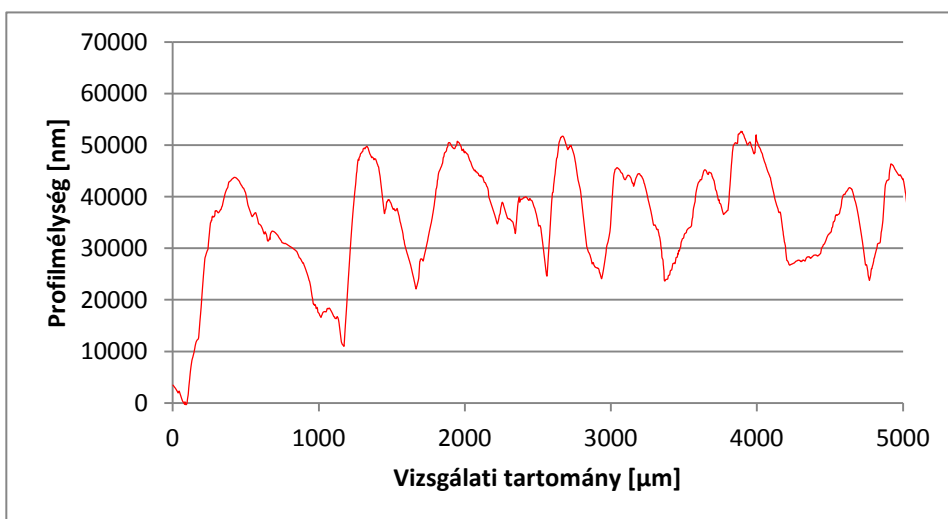
70. ábra. A mérési eredmények kiértékelése

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

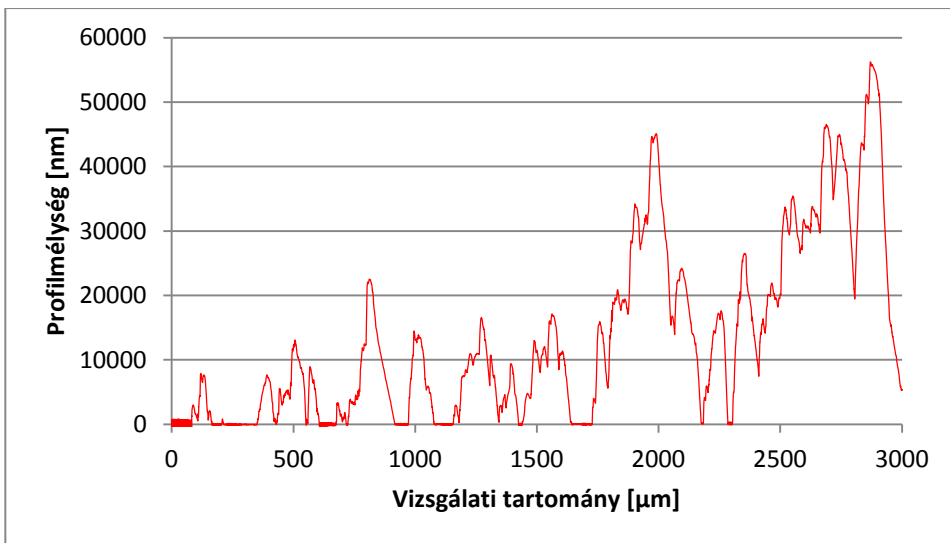
felületelőkészítés ugyanazt az eredményt adja. Ennek gyakorlati jelentősége az, hogy a gépek üzemeltetése során a megadott szórási időket alkalmazva jelentős termelékenység javulás érhető el emellett, hogy a ciklusidő rövidülésével az energia és bérköltések minimalizálhatók.

4.2. A profilométerrel végzett mélységi paraméterek meghatározása

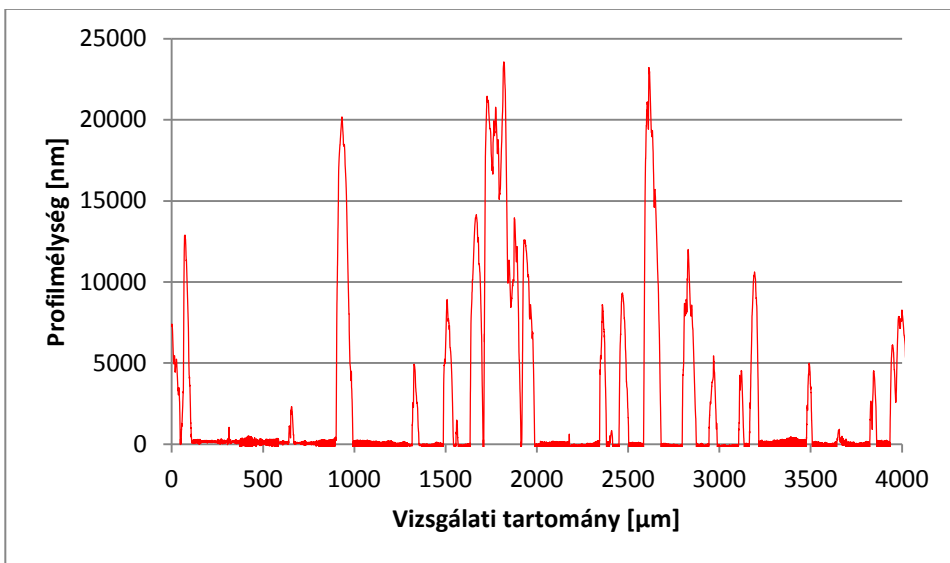
A profilométeres mérést laterális szken módszerrel, a mechanikusan előkezelt felületen, 3 és 5 mm hosszúságban, 1D mélységi paraméter meghatározására alkalmaztam. Az mérés jelentősége abban áll, hogy a szemcseszórás idő növelésével az Ra átlagos felületi érdesség állandósult annak ellenére, hogy a kezelést tovább folytattam. Megfigyelhető viszont, hogy a mikrotopográfia jellemző Sv 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 csökkenéshez 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. Az eredményeket az alábbi ábrason az alábbi ábrason foglalom össze.



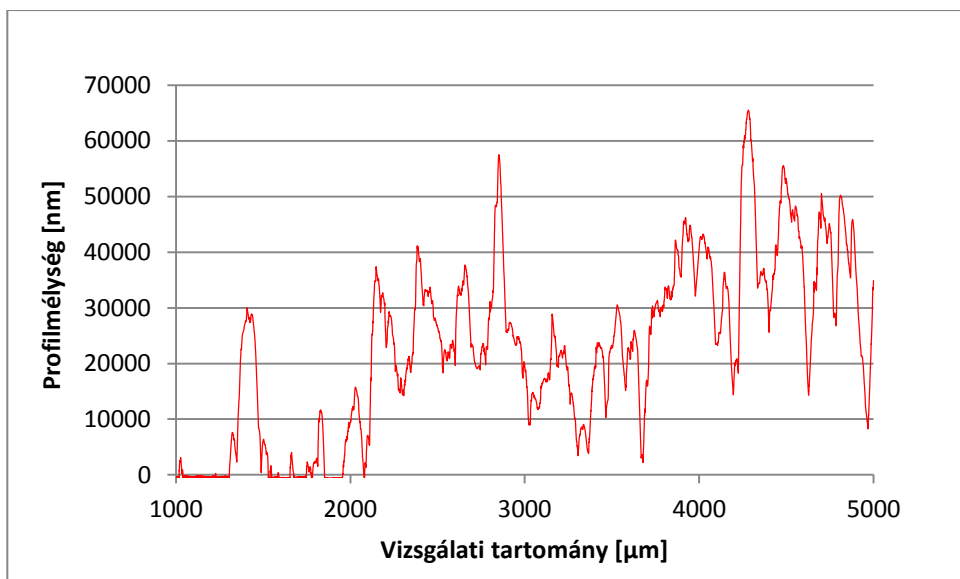
71. ábra. A mért 3 s-os profilkép



72. ábra. A mért 5 s-os profilkép

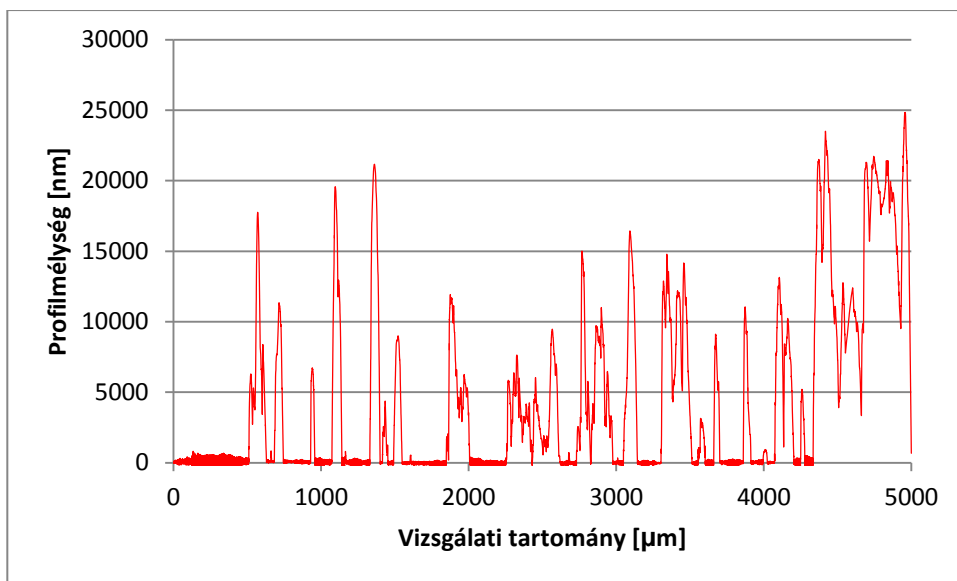


73. ábra. A mért 8 s-os profilkép



74. ábra. A mért 15 s-os profilkép

A profilométeres mérések az elektronmikroszkópos megfigyelésekkel konzisztensek, a szemcseszórasi idővel arányosan a laterális durvaság frekvenciája kis mértékben, bár nem szignifikánsan nő, a normális (felületre merőleges) rms durvaság tendenciája viszont nem egyértelmű. A 71.-75. ábrák a különböző időre kezelt minták szkennjének négyzetes eltérését mutatja egy tetszőlegesen kiválasztott tartományban. A fémfegyverzet ragasztóval történő kezelésének és a gumiréteg felvitelének technológiáját behatóan 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.



75. ábra. A mért 30 s-os profilkép

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), 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.

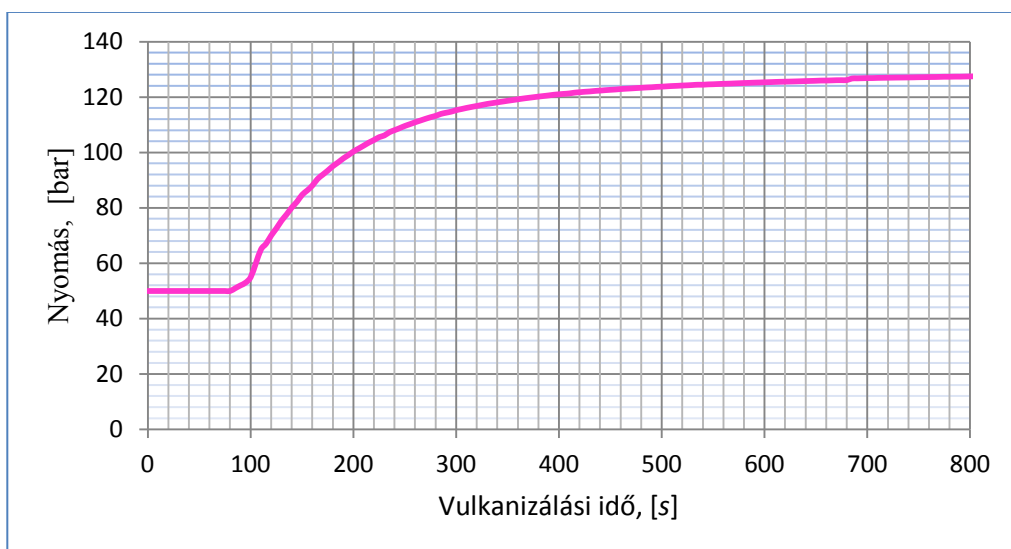
4.3. A szerszámüregi nyomás hatása a fémkötésre

4.3.1. A kompressziós technológiával végzett nyomásmérés eredményei

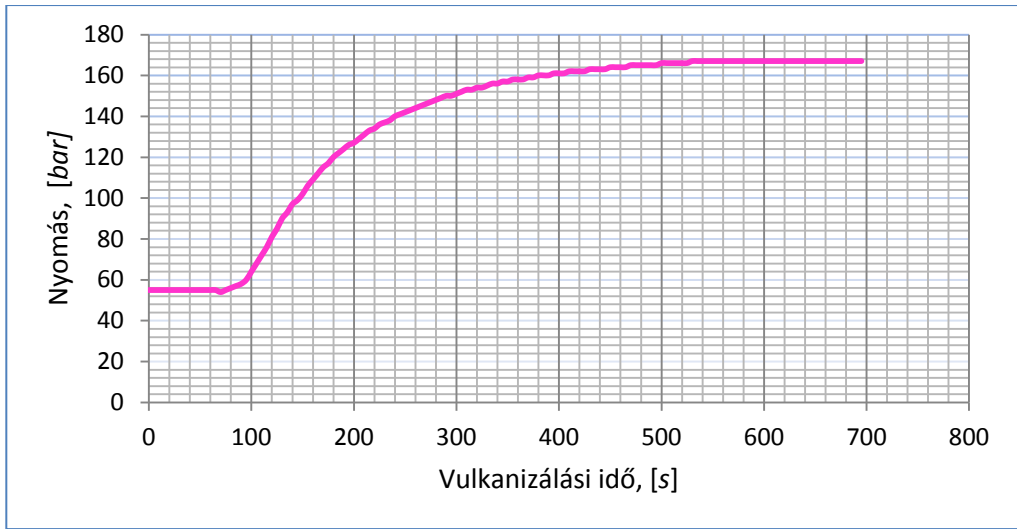
A kísérlet során a vizsgált gumikeverékből az optimált felületi érdességgel előkészített fegyverzetekre gumitesteket vulkanizáltam, majd mértem a kialakult szakítóerő nagyságát. A vulkanizáló szerszám fészekben különböző tömegű töltetekkel eltérő nyomásokat állítottam elő. A préselő erő hatására a fészekben kialakult nyomásokat különböző túltöltések esetén a 15. táblázat, a nyomás időbeli lefutását pedig a 76-79. ábrák szemléltetik.

15. táblázat, A kompressziós technológia

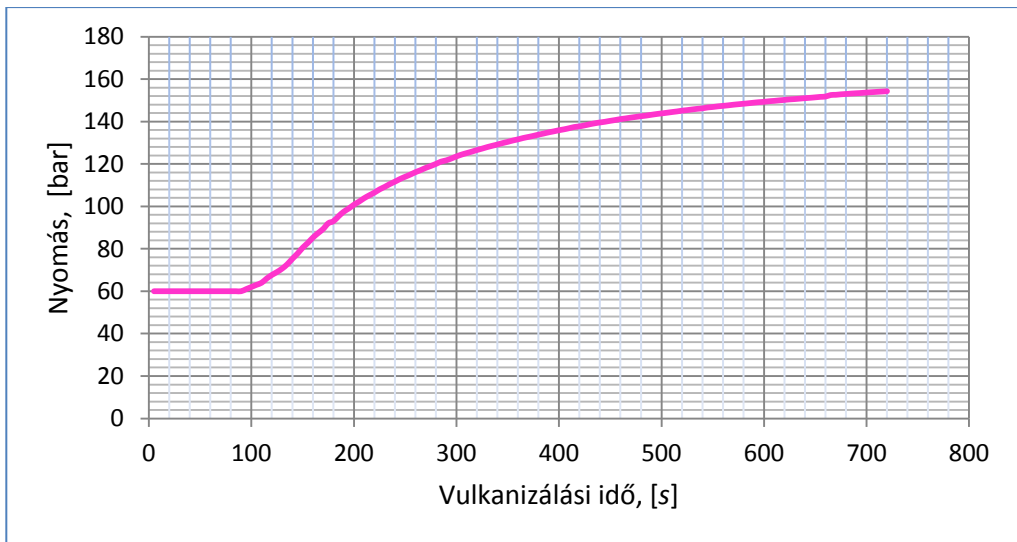
Sorszám	Túltöltés mértéke [%]	A kiindulási gumikeverék tömege [g]	A t_{02} -nél kialakult nyomás [bar]	Erő [N]
1	3	10,3	50	1100
2	10	11	55	1670
3	20	12	60	2080
4	35	13,5	55	1700



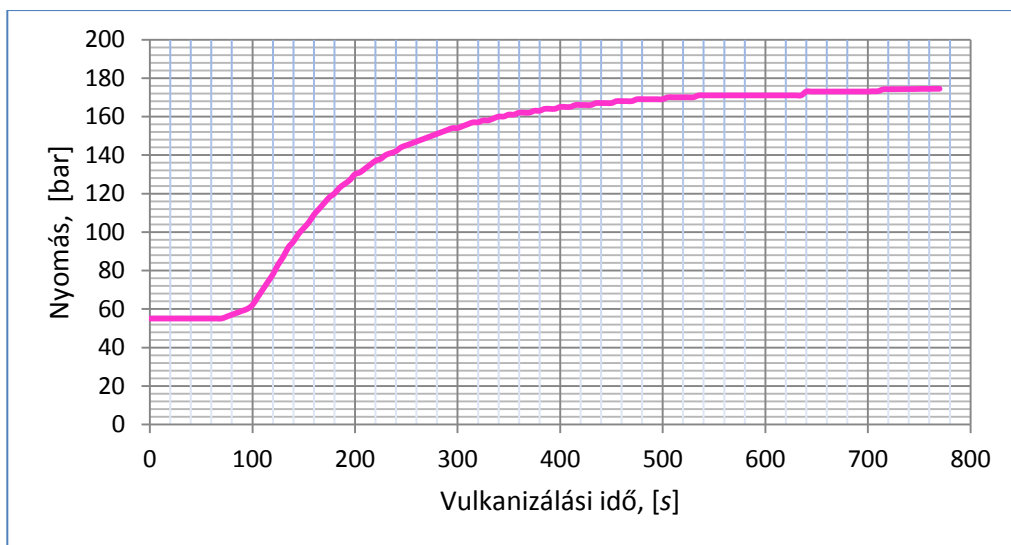
76. ábra. Nyomásviszonyok 3% túltöltés mellett



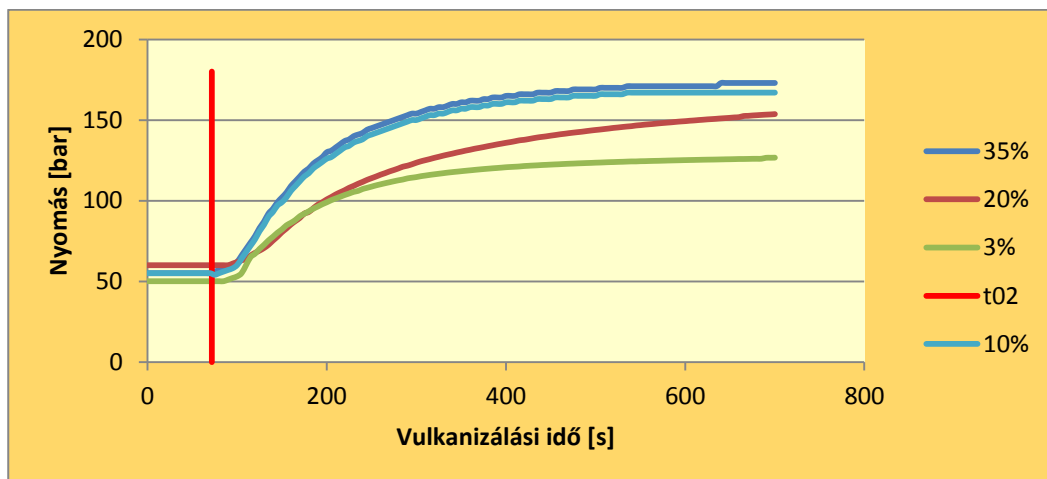
77. ábra. Nyomásviszonyok 10% túltöltés mellett



78. ábra. Nyomásviszonyok 20% túltöltés mellett



79. ábra. Nyomásviszonyok 35% túltöltés mellett

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

A vizsgált gumikeverék 50% kormot tartalmaz, amivel Springer utalása szerint az elérhető tapadási szilárdság 5 N/mm^2 . Ez az általam bemutatott kísérleti beállítás mellett is érvényes. A fémfegyverzet geometriáját figyelembe véve ez 2075 N-nak felel meg. A nyomás a szerszámüregben 20% túltöltésig növelhető gazdaságosan, mert amennyiben túllépjük ezt az értéket, úgy vastag sorja alakul ki, ami bizonytalanságot jelent a gyártásban. A probléma részben az, hogy az

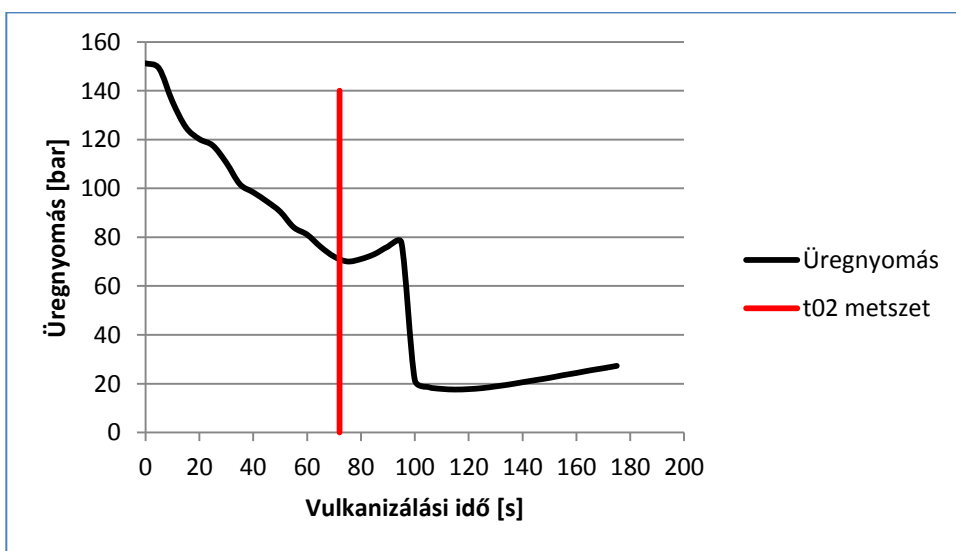
osztósíkra merőleges méret változó lesz, részben pedig az, hogy a fészekben a nyomás előre meghatározhatatlan módon változik, ami a gyártmányok szakítószilárdságának nem kívánt, jelentős szórásához vezet.

4.3.2. A fröccstechnológiával végzett nyomásmérés eredményei

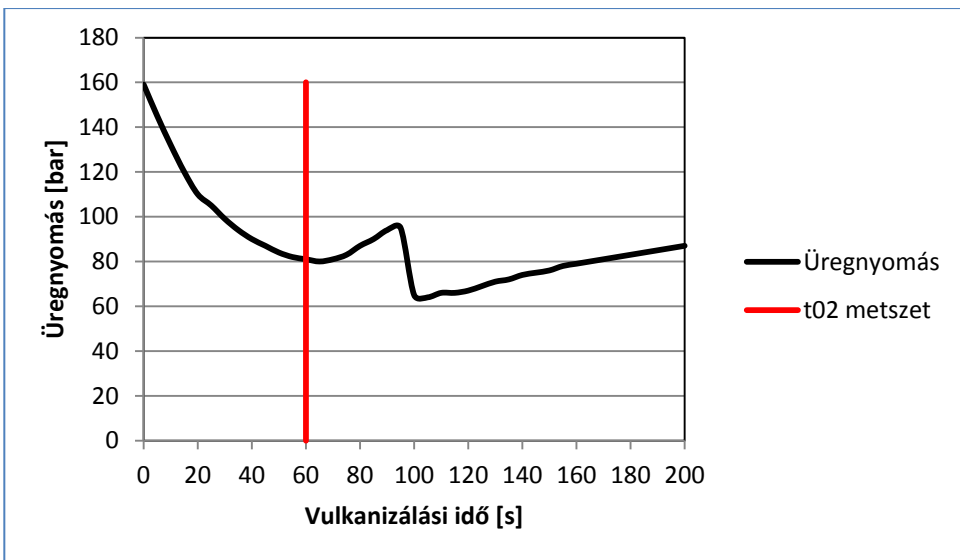
A vulkanizáló fröccsszerszámban kialakult nyomásokat különböző kísérleti beállításoknál a 16. táblázat tartalmazza.

16. táblázat, Az üregnyomás hatása a szakítóerőre

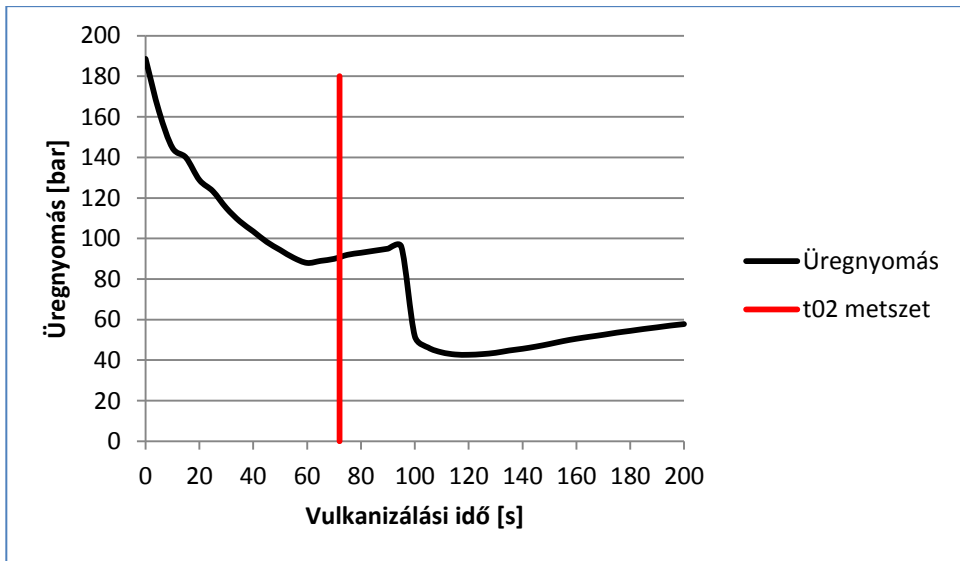
Üregnyomás [bar], (t_{02})	Szakítóerő [N]	Szakítóerő [N]	Szakítóerő [N]	Szakítóerő átlag [N]	σ	2σ	Szórásnégyzet
70	2650	2956	3250	2952	300,02	600,04	90012
80	4330	3327	3152	3603	635	1270	403225
90	4263	3555	4364	4061	440	880	193600
100	3731	3960	4249	3980	260	519,16	67381
110	3973	3901	4366	4080	250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



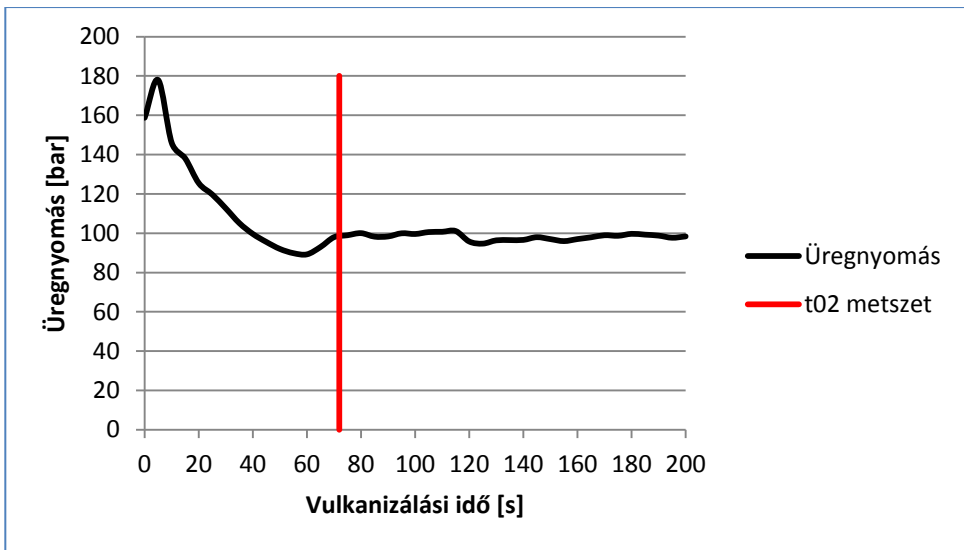
81. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 70$ bar esetében



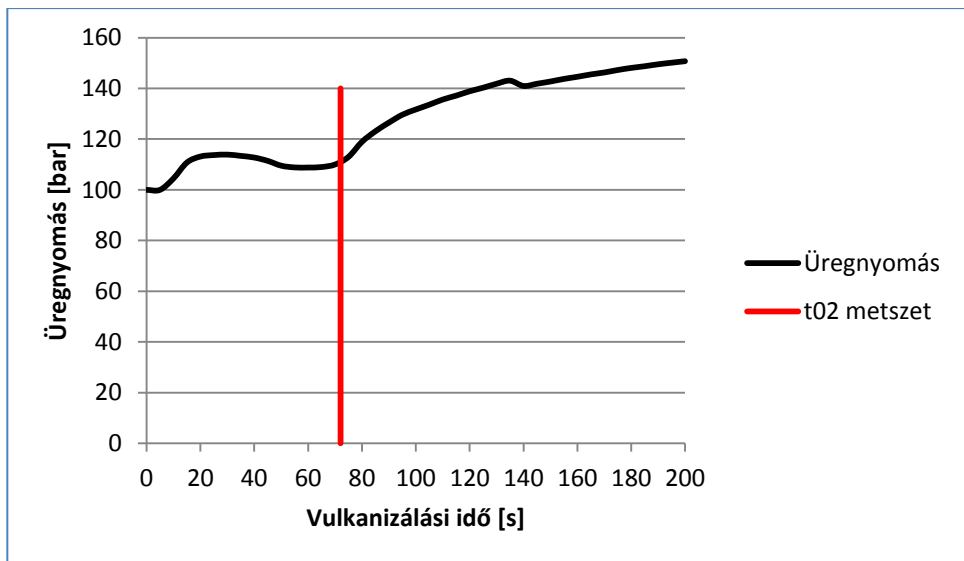
82. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 80$ bar esetében



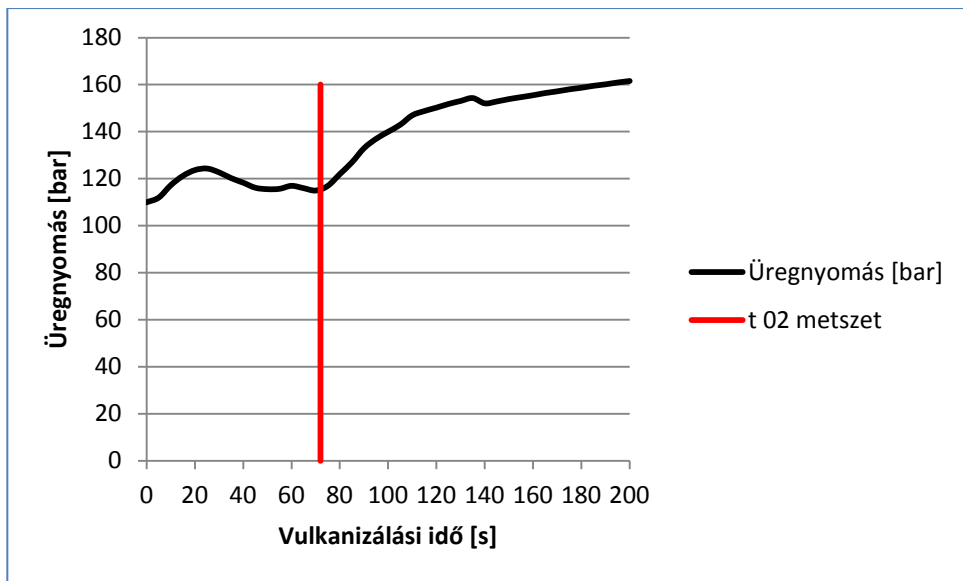
83. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 90$ bar esetében



84. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 100$ bar esetében

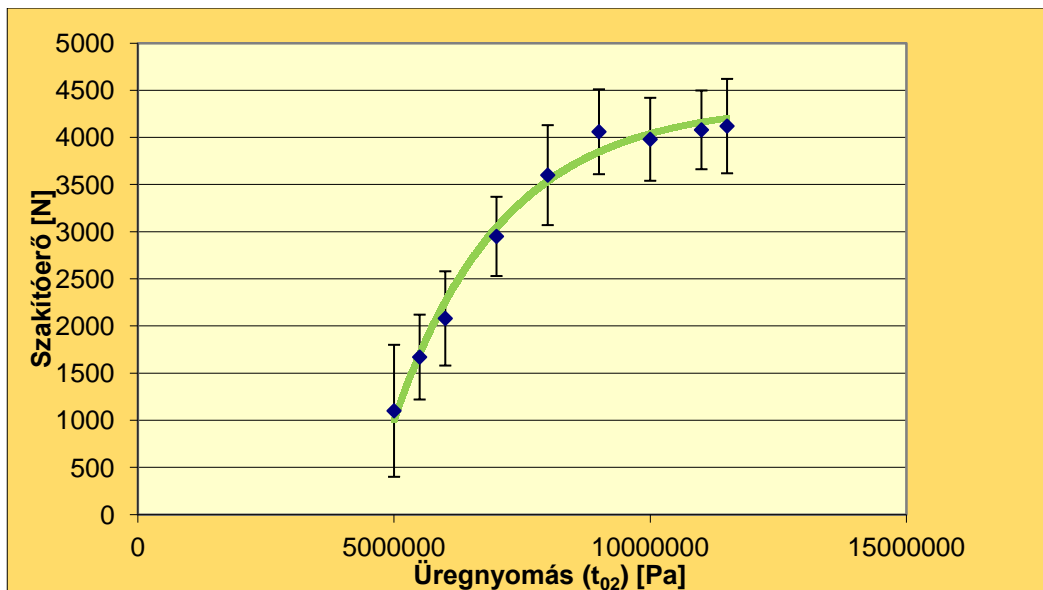


85. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 110$ bar esetében



86. ábra. Nyomásviszonyok $t_{02} \rightarrow 115$ bar esetében

A 87. ábra a t_{02} -nél mért üregnyomás és a kialakult szakítóerő összefüggését mutatja.



87. ábra. A kezdeti üregnyomás és a szakítóerő összefüggése

4.3.3. 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:

$$f(x) = a \cdot (1 - e^{-(c+bx)}) \quad (27)$$

ahol:

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

Fisher próbával ellenőriztem, hogy a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzetekhez tartoznak-e?

$$F_{kis} = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2} \leq F_{\text{tábl}} \quad (28)$$

$$F_{kis} = \frac{193660}{43264} = 4,47 < 9 \quad (29)$$

(Lásd 16. táblázat, 76. oldal, valamint M6 melléklet Fischer próba táblázati értékei)

A számláló és a nevező szabadsági foka 2, ugyanis az eredményeket 3 mérési ismétlési sorozatból határoztam meg ($n-1=2$)

Mivel az egyenlőtlenség fennáll, így a fenti állítás igaznak tekinthető.

A továbbiakban meghatároztam a függvény szórását,

$$S_{fv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s^2}{N}} \quad (30)$$

ahol N a kísérleti beállítások száma.

$$S_{fv} = 305,1$$

mivel,

17. táblázat, A mérési és számítási adatok összefoglalása

Üregnyomás [bar]	Szakítóerő átlag [N]	σ	2σ	σ^2
50	1100	360	720	129600
55	1670	217	434	47089
60	2080	252	504	63504
70	2950	300	600	90000
80	3600	375	750	140625
90	4060	440	880	193600
100	3980	260	520	67600
110	4080	250	500	62500
115	4120	208	416	43264

Ezt követően az illeszkedési szórást határoztam meg, és Fisher próbával ellenőriztem, hogy azonos elméleti szórásnégyzethez tartozik-e a függvény szórása, illetve az illeszkedési szórás. A második Fisher próbával azt vizsgálom tehát, hogy a két adatsor szórásnégyzetei szignifikánsan különböznek-e.

és az illeszkedési szórást.

$$S_{ill} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_{mért_i} - a(1 - e^{-c+b p_i}))^2}{N-3}} \quad (31)$$

mivel,

18. táblázat, Az illeszkedési szórás számítása

F_1 [N]	1100	$F_{1számított}$	2,30E+02	p_1 [Pa]	5000000
F_2 [N]	1670	$F_{2számított}$	6,64E+02	p_2 [Pa]	5500000
F_3 [N]	2080	$F_{3számított}$	1,17E+03	p_3 [Pa]	6000000
F_4 [N]	3600	$F_{4számított}$	2,12E+03	p_4 [Pa]	7000000
F_5 [N]	3600	$F_{5számított}$	2,87E+03	p_5 [Pa]	8000000
F_6 [N]	4060	$F_{6számított}$	3,39E+03	p_6 [Pa]	9000000
F_7 [N]	3980	$F_{7számított}$	3,74E+03	p_7 [Pa]	10000000
F_8 [N]	4080	$F_{8számított}$	3,97E+03	p_8 [Pa]	11000000
F_9 [N]	4120	$F_{9számított}$	2,13E+05	p_9 [Pa]	11500000

$$S_{ill}=31,4$$

Ezt követően Fisher próbával ismét megvizsgáltam, hogy a függvény szórása és az illeszkedési szórás azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e?

$$F_{kisill} = \frac{S_{ill}^2}{S_{fv}^2} \leq F_{tábl} \quad (32)$$

$$F_{kisill} = 1,06 \times 10^{-2} < 9$$

Mivel az egyenlőtlenség itt is fennáll, így megállapítható, hogy a nullhipotézis igaz, vagyis a választott függvény leírja a jelenséget.

Végül a közelítő függvény hibahatára meghatározható az illeszkedési szórásból az alábbi összefüggéssel:

$$\Delta = t \times S_{ill} \quad (33)$$

$$\Delta = 2,92 \cdot 31,4 = 91,688$$

ahol t értéke (student táblázatból) p=10%-os szignifikancia szinten FG=2 esetben 2,92

4.4. A reológiai jellemzők változásának hatása a kialakult 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 a más tényezők is befolyásolják. Ilyen például a gumikeverék kora is. Tekintettel arra, hogy a gyorsítókkal kevert kaucsukkeverék biológiai anyagnak tekinthető, ezért annak öregedése a reológiai jellemzők változásával, a feldolgozhatósági és köthetőségi minőségi jellemzők csökkenésével jár együtt. Kísérleteim során azt vizsgáltam, hogy a keverék korának előrehaladtával hogyan változnak bizonyos vizsgált reológiai jellemzői, és ezen értékek változása hogyan befolyásolja a kialakult szakítóerő (M1..M5) nagyságát.

A 19. táblázat a szakítóerő és a reológiai jellemzők változását mutatja a tárolási idő függvényében.

19. táblázat, Szakítóerő, reológiai jellemzők és a tárolási idő összefüggése

Tárolási idő [hét]	t_{02}	t_{05}	t_{90}	t_{52}	M 1 [N]	M 2 [N]	M 3 [N]	M 4 [N]	M 5 [N]	Átlag [N]	σ	2σ
1	1,2 3	1,69	2,02	1,4 1	3780	3892	3982	4010	3991	3931	96	192
2	1,2 4	1,8	1,42	1,4 2	4005	3890	4100	3976	3864	3967	95	189
3	1,2 2	1,78	2,13	1,4	4051	4250	3850	3820	3980	3990,2	173	346
4	1,2 1	1,78	2,14	1,4	4010	3991	3870	3990	4030	3978,2	63	125
5	1,1	1,61	1,93	1,2 6	4067	4200	3700	3940	4000	3981,4	185	369
8	1	1,4	1,69	1,1	3529	3631	3750	3260	3776	3589,2	209	418
10	0,9 9	1,4	1,7	1,0 5	3570	3560	3240	3120	3470	3392	202	404
12	0,9 7	1,45	1,73	0,9 7	2688	2590	2889	3017	3147	2866,2	229	458
14	0,7 8	1,23	1,6	0,8 7	2620	2670	2760	2888	2670	2721,6	106	212
16	0,6 8	1,14	1,52	0,7 9	2750	2540	2970	2550	2240	2610	271	543
17	0,6 7	1,16	1,57	0,7 9	2490	2480	2950	2530	2670	2624	197	395
18	0,6 6	1,15	1,58	0,7 7	2290	2890	2790	2490	2560	2604	240	479
19	0,6 8	1,13	1,52	0,7 8	2780	2490	2470	2690	2650	2616	133	266
20	0,6	1,08	1,49	0,7	2640	2400	2600	2380	2620	2528	127	254
21	0,5	1,06	1,5	0,6	2333	2060	2368	2111	2140	2202,4	139	277

4.4.1. DIXON próba alkalmazása

Mivel a mért adatok között előfordultak a többitől lényegesen kisebb vagy nagyobb mérési eredmények, ezért a kiugró érték kizárásának eldöntéséhez a Dixon próbát használtam, amely arra ad választ, hogy a kiugró adat származhat-e a vizsgált mintából. A próbát két mérési sorozatra végeztem, a 3. és 16. tárolási hét legnagyobb és legkisebb kiugró értékeinek vizsgálatára.

3. tárolási hét adatai

$X_1=4250$ N, $X_2=4051$ N, $X_3=3980$ N, $X_4=3850$ N, $X_5=3820$ N

$$r_{10} = \frac{X_1 - X_2}{X_1 - X_5} = \frac{4250 - 4051}{4250 - 3820} = 0,4627 \quad (34)$$

Mivel $P=1\%$ szignifikancia szinten $n=5$ minta esetében a VIII. táblázat (Sváb, 1967) r értéke 0,78 ezért a mért érték származhat a vizsgált mintából, a számításban figyelembe vehető.

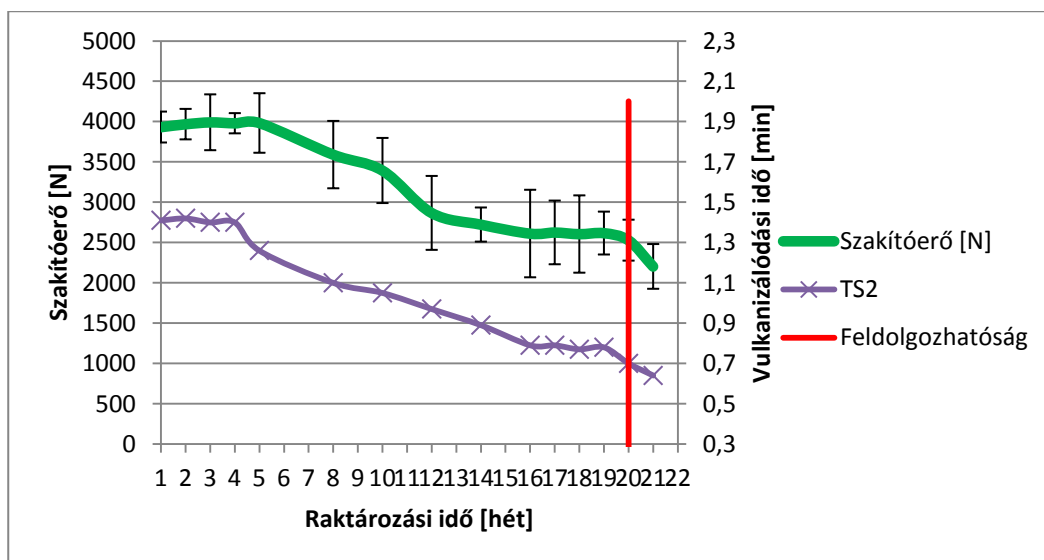
16. tárolási hét adatai

$X_1=2240$ N, $X_2=2540$ N, $X_3=2550$ N, $X_4=2750$ N, $X_5=2970$ N (35)

$$r_{10} = \frac{X_1 - X_2}{X_1 - X_5} = \frac{2240 - 2540}{2240 - 2970} = 0,41$$

Mivel $P=1\%$ szignifikancia szinten $n=5$ minta esetében a VIII. táblázat (Sváb, 1967) r értéke 0,78 ezért a mért érték származhat a vizsgált mintából, a számításban figyelembe vehető.

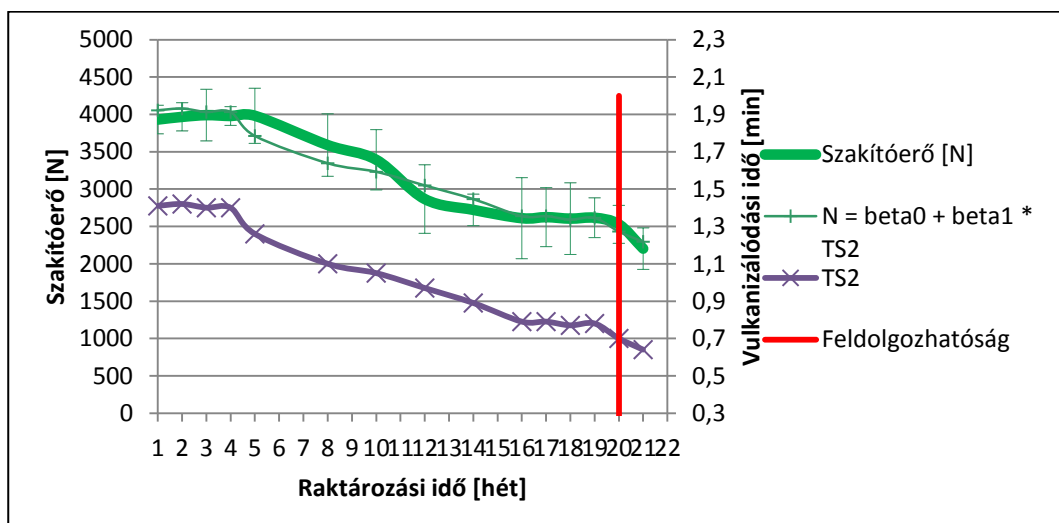
Az eredményeket grafikus formában a 88. ábrán mutatom be.



88. ábra. szakítóerő és a ts_2 változása a tárolási idő függvényében 20°C -on

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. A következőkben függvényvizsgálatot hajtok végre, amelynek célja annak megállapítása, hogy a vizsgált összefüggés valóban lineárisnak tekinthető-e, vagyis az alkalmazott keverék esetében található-e egy olyan arányossági tényező, amely alkalmazásával a ts_2 jellemző ismeretének birtokában előre kiszámítható a kialakult szakítási erő.

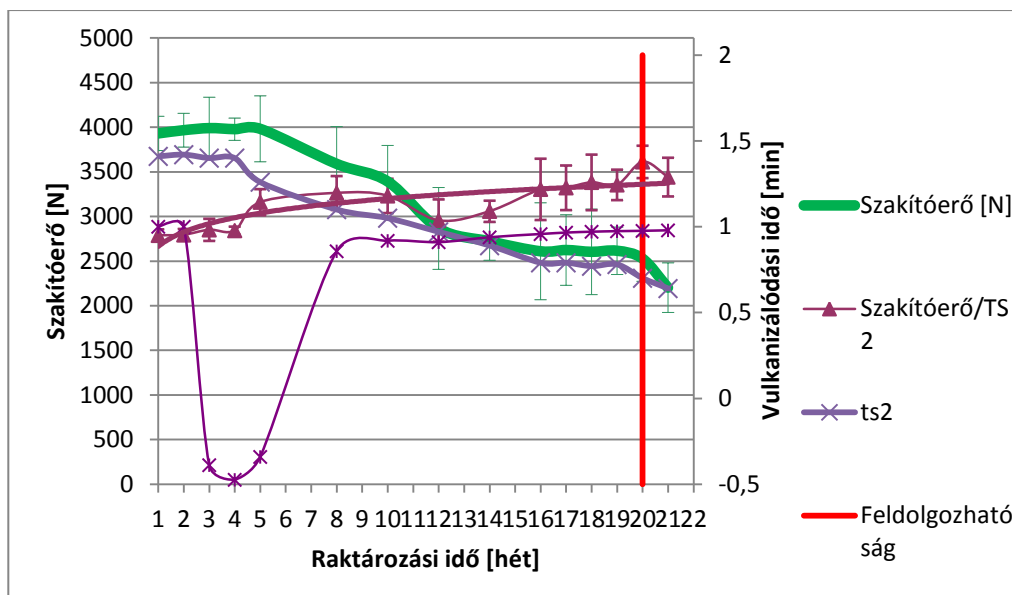
A két adatsor (ts_2 , szakítóerő) kapcsolatát vizsgáltam, korrelációval és lineáris regresszióval. Megállapítottam, hogy a két sor között, minél több elemét veszem a sorozatnak, annál határozottabb, erősebb a korreláció (97,89%). Mivel 0,9 fölötti érték már elég ahhoz, hogy kimondjam, van köztük összefüggés. Az összefüggés természetét lineáris regresszióval próbáltam meghatározni, ami két együtthatót ad meg, $N = \text{beta}0 + \text{beta}1 \cdot ts_2$. A két érték $\text{beta}0 = 832,5191481$ és $\text{beta}1 = 2284,542146$. Vagyis a képlet M (szakítóerő) = $832,5191481 + 2284,542146 \cdot ts_2$. Vékony zöld vonal jelzi a grafikonon, a görbe lefutását.



89. ábra. A lineáris regresszió értelmezése

Látszik, hogy a görbe mindenhol a szóráson belül van, és illeszkedik az átlagra. Az r^2 determinációs együttható 0,9583, ami azt jelenti, hogy a szakítóerő változásának 95,83%-a magyarázható a ts_2 változásával, a maradék kb. 3% véletlen hiba.

Táblázatban szemléltetem a $\text{beta}0$ és $\text{beta}1$ értékek reziduális szórását is (std. hiba), ez a tényleges és a becsült értékek átlagos eltérése.



90. ábra. A korreláció bemutatása
20. táblázat, A statisztikai vizsgálat értékei

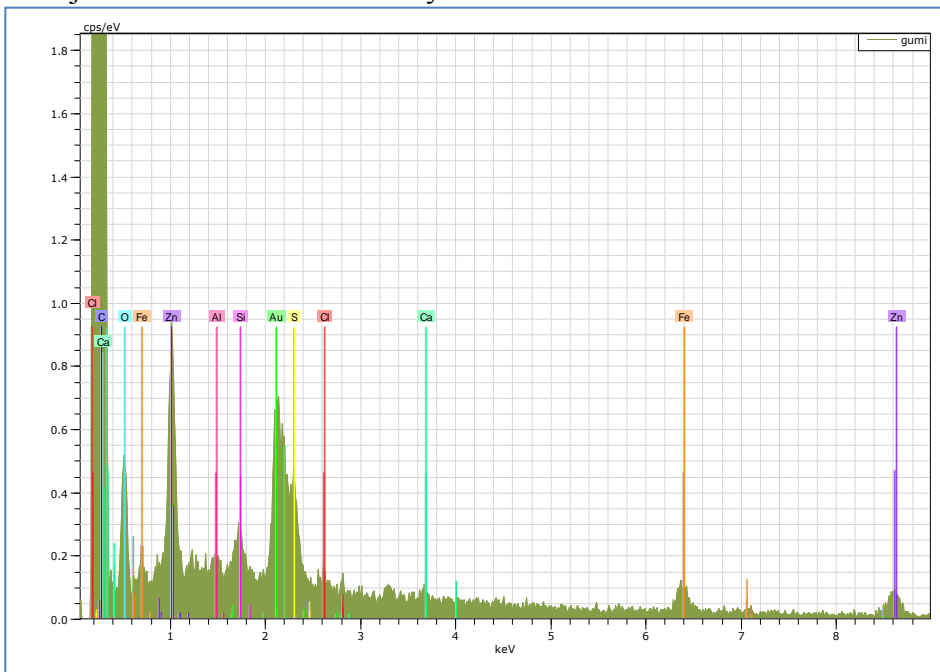
beta 1	beta 1 std. hiba	beta 0	beta 0 std. hiba	F-próba	N becslés std. hiba	r ² det.eh.
2284,5	132,12	832,52	140,26	298,99	142,14	0,9583

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kialakult szakítóerő és a ts_2 érték között lineáris kapcsolat van. Létezik tehát legalább egy olyan reológiai mérőszám, amely a gumikeverék felhasználhatóságának határát egyértelműen, számszerűen megadja, vagyis kijelenthető, hogy az alkalmazott kísérleti beállítások mellett a $ts_2 < 0,7$ min keverék gumi-fém kötés kialakítására alkalmatlan.

4.5. A gumi-fém határréteg elemanalitikai vizsgálata

A gumi-fém kapcsolatrendszer több paraméter egyidejű megfeleléségén 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 (93. ábra). 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

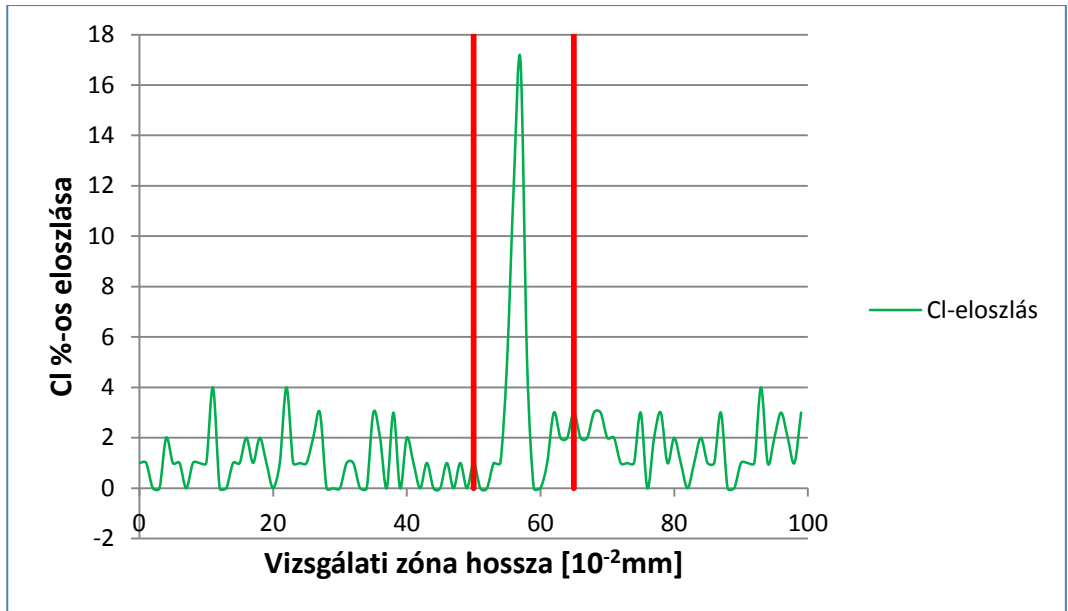
anyagkompozíciós módosulatok nem jönnek létre, ezért a nanoszálakkal végzett továbbfejlesztési kísérletek eredményesek lehetnek.



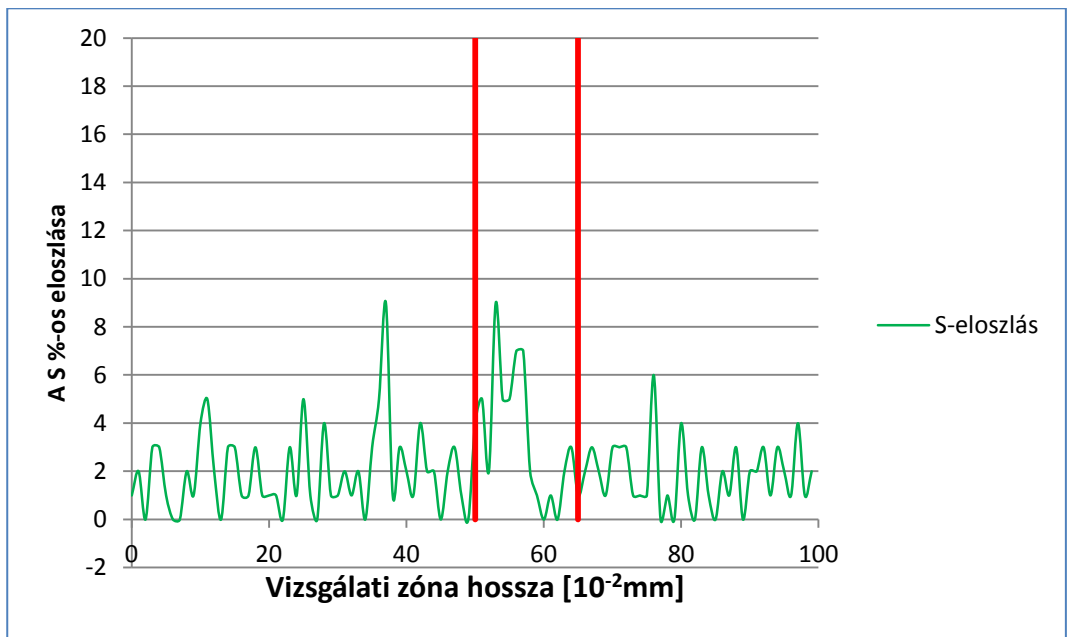
91. ábra. A Röntgen vizsgálat normált összetételei

21. táblázat, A Röntgen vizsgálat %-os összetételei

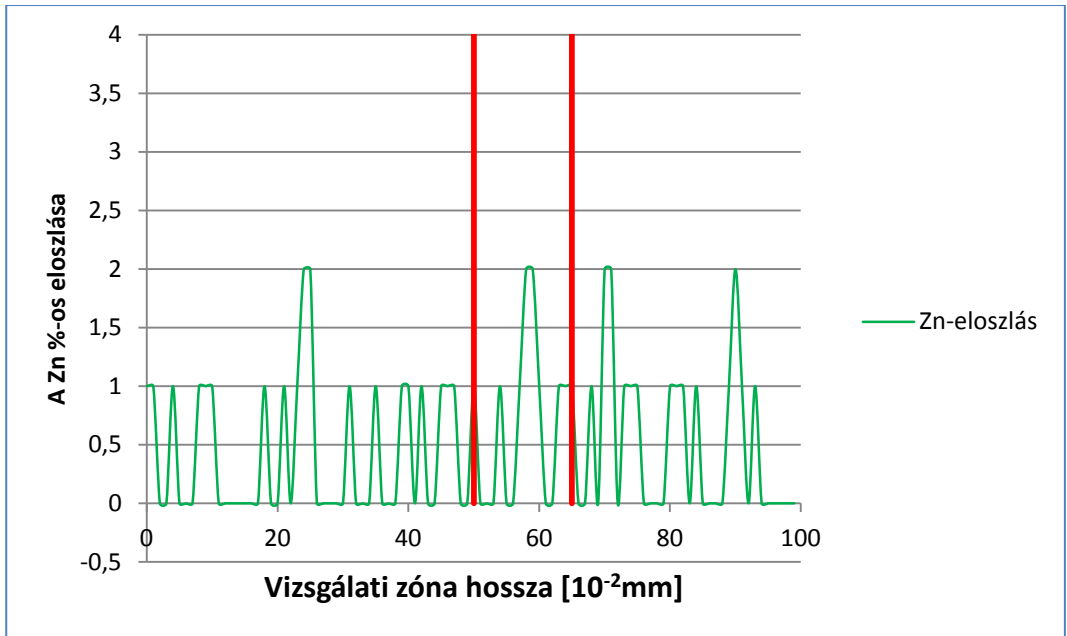
Elem vegyjele	Elem rendszáma	Koncentráció [%]
C	6	69,53
O	8	14,88
Al	13	0,09
Si	14	0,35
S	16	1,09
Cl	17	0,17
Ca	20	0,16
Fe	26	2,09
Zn	30	6,28
Au	79	5,35



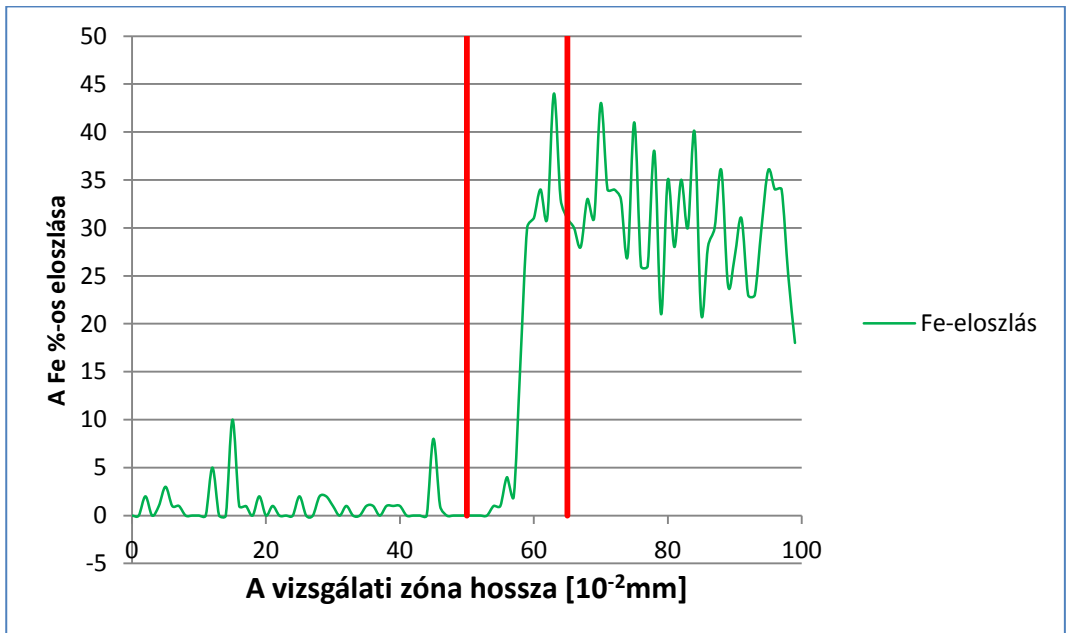
92. ábra. A Cl eloszlás a kötő zónában



93. ábra. A S eloszlás a kötő zónában



94. ábra. A Zn eloszlás a kötő zónában

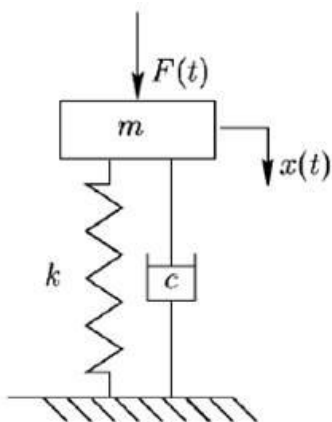


95. ábra. A Fe eloszlás a kötő zónában

A 92.-95. ábrák néhány fontosabb elem eloszlását szemléltetik a kötőanyag zónában. A függőleges piros vonalak az átmeneti zóna határait jelölik. Az elemeloszlás vizsgálati eredményeiből látszik, hogy a klór feldúsul a határréteg két oldalán, a vas és a szén mennyisége nem változik a határrétegben. A klór mennyisége a kötőanyag jelenléte miatt növekszik meg, amelynek ismerete a továbbiakban gyártástechnológiai szempontból lesz fontos.

4.6. A gumirugók vizsgálata

A gumi, mint szerkezeti anyag modellezése és vizsgálata igen összetett matematikai problémát jelent. A gyakorlatban ezért két féle egyszerűsített modell terjedt el. A nyerskeverékek a Maxwell-moddal (egy rugó és egy lökésálló sorba kapcsolva), a vulkanizált gumi pedig a Voigt-moddal (egy rugó és egy lökésálló párhuzamosan kapcsolva, 96. ábra) írható le.



96. ábra. A Voigt-modell

A gumiipari 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 húzófeszültség-nyúlás vizsgálatra a DIN 53504 illetve az ISO 37 szabvány utalásai vonatkoznak. Munkám során két berendezést használtam. Statikus vizsgálatokra LLYOD LR30K gépet (97. ábra), dinamikus hőkamrás vizsgálatra pedig INSTRON berendezést használtam (98. ábra). 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.

22. táblázat, A statikus szakítógép beállítási paramétere

Vizsgálati paraméterek	Késztermék szakító vizsgálat
A szakítógép típusa	Lloyd LR 30K
A szakítás sebessége v [mm/min]	500 mm/min
A próbatest jele	25/20-1 M6x18
Vizsgálati időtartam, t [ciklus], [h]	5 db/ciklus
Környezeti hőmérséklet, T [°C]	25 °C
Relatív páratartalom, RH [%]	40 %

A dinamikus vizsgálatok elvégzésre a Debreceni Atommag Kutató Intézetben nyílt lehetőségem, a statikus vizsgálatokat üzemi körülmények között végeztem.



97. ábra. Statikus szakítógép

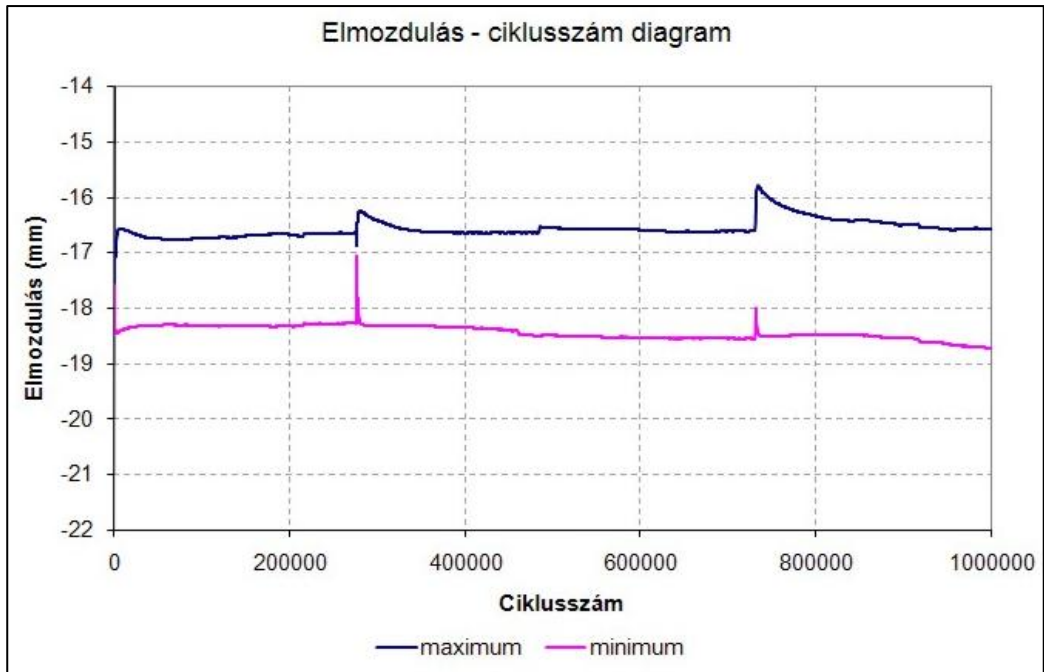


98. ábra. Dinamikus, hőkamrás szakító gép

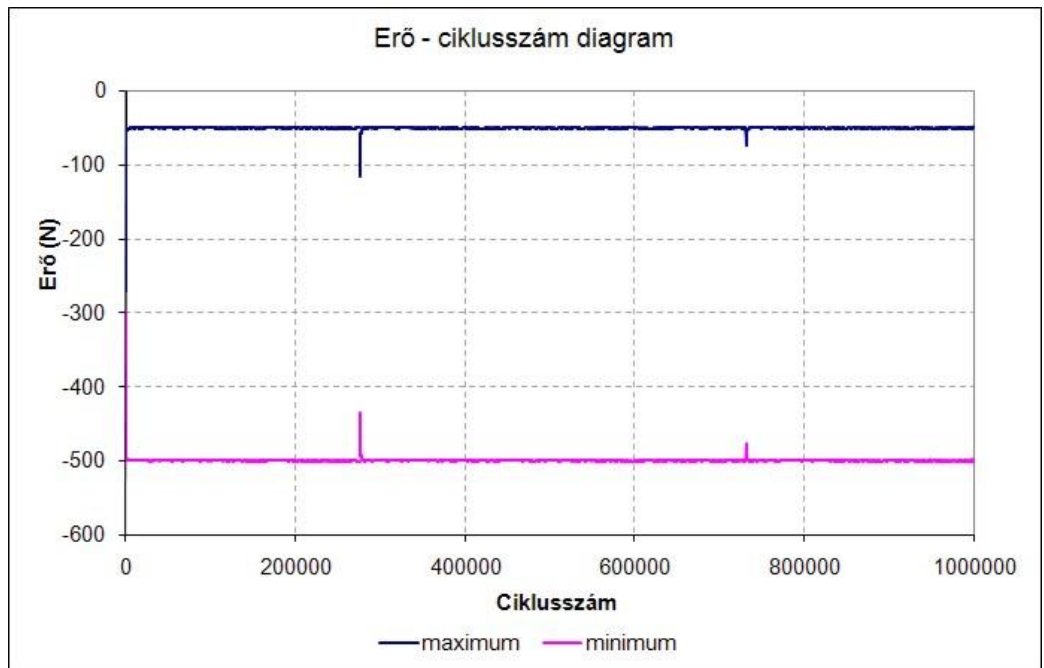
23. táblázat, A dinamikus szakító gép beállítási paramétere

Vizsgálati paraméterek	Késztermék szakító vizsgálat
A szakító gép típusa	Instron 8874
A vizsgáló görbe	Sinus 50N-500N
A vezérlés módja	Erővezérlés
Vizsgálati időtartam t [ciklus], [h]	1 millió ciklus
Vizsgálati hőmérséklet T [°C]	-40°C

A 99. és 100. ábrák a gumirugó vizsgálatát mutatják. A vizsgálat az általam bemutatott kísérleti rendszerben ismertetett anyagminőségekre és geometriára vonatkozik.

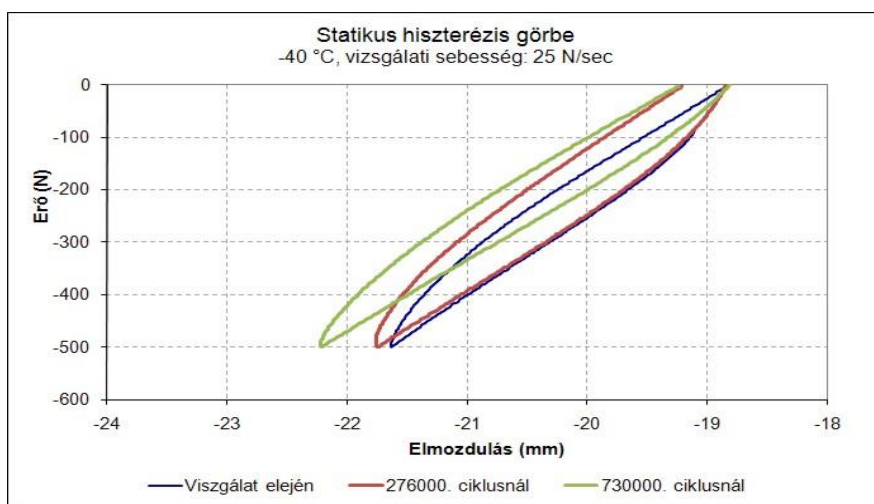


99. ábra. Elmozdulás-ciklusszám diagram



100. ábra. Erő-elmozdulás diagram

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 °C -os környezetben is károsodás nélkül elviseltek. A 101. ábra a dinamikus fárasztás közbeni statikus hiszterézis hurkokat mutatja különböző fárasztási ciklusnál.



101. 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 kereszt-kötések 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.

4.7. 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 kötésszilárdság szempontjából a $31 \mu\text{m} < S_v < 34 \mu\text{m}$ az optimális érdesség tartomány.

Kísérleteim alapján megállapítottam, hogy EN10263 acél fegyverzet esetén a gumi-fém kötésszilárdság nem hozható összefüggésbe a szemcseszóró anyag típusával. A kötésszilárdságot csak a kialakított felület térbeli morfológiája befolyásolja.

2. Olyan komplex mérőrendszert dolgoztam ki fém-gumi kapcsolat kötésszilárdságának 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 bizonytalanná válik, szórása megnő.

3. Vulkanizálási kísérletekkel kimutattam, hogy különböző térhálósodási sebességű keverékek esetében a szakítóerő $0,7 \text{ min} < t_{s2} < 1,4 \text{ min}$ 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 kötőszilárdságra. 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 nyomkövetésére 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 gumi réteg 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. Vizsgálataim síklapú fegyverzetekre vonatkoznak, azonban jelentős eredményeket értem el cső jellegű alkatrészek (silent block) kötésszilárdság növelésének vonatkozásában is. 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. Megállapítottam, hogy a zónában káros anyagmódosulások (anyagtranszport) nem történnek, illetve melyek azok az elemek, amelyek koncentrációja megváltozik. 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 szénanocsövek kémiai kötést kialakítani, ezáltal a szakítószilárdságra gyakorolt növelő hatás sem érvényesül. Eredményeim alapján további biztató kutatásokat végzek azonban arra vonatkozóan, hogy melyek azok a nanoszálak, amelyek kémiai kötést tudnak kialakítani az ismertett térhálós szerkezet valamely elemével. Amennyiben ezt sikerül az ipari gyakorlatba is bevezetni, úgy egy igen jelentős innovációs eredmény megalkotása valósulhat meg.

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 techikusok 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.

Véleményem szerint a napjainkban zajló gazdasági válság és ennek hatására rendkívüli módon erősödő piaci verseny minden vállalatot arra kényszerít, hogy a gyártási folyamatait optimalja, a selejtgyártást 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.

„Ami mérhető mérd meg, ami nem mérhető, tedd mérhetővé!” (Galileo Galilei)

Munkám során meghatározott új tudományos eredmények ennek a törekvésnek kívánnak elméleti alapot adni.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

ELASZTOMER-FÉM KÖTÉS KIALAKÍTÁSÁNAK FELTÉTELEI

GÉPIPARI HIBRID ALKATRÉSZEK GYÁRTÁSÁNÁL

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 Qst-37 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 mikro topográfiát. Ezt követően a próbatesteket két rétegű

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 prés technológiánál, és fröccs technológiánál 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 határrétegére 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 határretegének környezetében az elemeloszlások korlátozott információt szolgáltatnak a gyártástechnológia és/vagy öregedési folyamatokra (pl. transzport-jelenségek), amelynek elsődleges oka a határreteg 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 (Sv), 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 kötést. 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. SUMMARY

THE CONDITIONS OF ELASTOMER BONDING DURING MANUFACTURING HYBRID PARTS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

At the start of my studies I wanted to answer the following question: How can the manufacturing safety of parts with metal-rubber bond used in the aviation industry be increased? To achieve this, I had designed experiments and measurements to examine the boundary surface between the rubber and metal components which are very different from each other in terms of physical features. I collected the data and then I evaluated them respecting the rules of mathematical statistics. During my work I used some operational measurement units; and I relied on not only the measurements of university institutions but also those of research institutes. For the measurement of mold cavity pressure, I developed a variable volume measurement tool. I connected a GEFTRAN pressure sensor to this tool so that I could manage and process the results with the help of computer software.

When manufacturing rubber vibration absorbers or other rubber-metal parts in an industrial environment, rubber blend is bound to the metal part via applying a layer of chemically produced binding material. The process starts with degreasing the metal parts, followed by the mechanical preparation of the metal. This can be done using corundum or steel grits; depending on the material. Apart from coating the adhesives according to the correct technology, the strength of the binding is also dependent on the rubber blend being used. The binding abilities of the mixture are also determined by the hardness of the mixture as well as the type of elastomer used.

I analyzed the extent of mechanical preparation regarding metal parts with the help of spraying trials. I created different surface roughness values by using different spraying materials and different spraying times; calculating an average surface roughness; and then treating the metal parts with adhesives and vulcanizing the samples. Then I carried out a tensile test and measured the tear strengths. At the set-up of the experiment, I observed the references available from the literature (Pék, 2000).

I used the Kelvin model to model the rubber vibration absorber. During the measurements of the surface preparation, I sprayed the surface of the 23 mm

diameter cold-formed Qst-37 metal parts (with M6x18 mm threaded rod) with corundum, and then I measured 2D and 3D surface properties on the samples and analyzed the micro-topography. Then I treated the samples with two-layered adhesive, and then I carried out trial vulcanization using an R155OF1 natural caoutchouc based rubber blend. After manufacturing, the samples were put through a static tear test, and then I showed the results in tables and charts.

The pressure measuring tool to be used for the measurements was planned to suit my purposes; so that it could be applied both at the traditional press technology and at injection molding, while making it possible that useful volume can be adjusted within the 13.5% range any time during the vulcanization cycle. First I used press technology, applying different volume overcharges at trial vulcanizations, while measuring changes of the pressure during the whole process. Then I started using injection molding with varying injection pressure, and then I evaluated the samples according to their tear strength. After evaluating the results I observed that although the final pressure is similar at both technologies, a remarkable difference can be seen at the beginning of the process. Finally, I wanted to find an answer to the following question (examining the technologies one by one now to make comparisons): How does the pressure at the cavity influence the strength of the bond at t_{02} which is considered the fundamental rheological property?

With the help of modified injection doses and injection pressures the mold cavity pressure also changed – by measuring this pressure I observed that tear strength is independent from the extent of overcharge; it is only dependent on the initial cavity pressure. The initial cavity pressure measured at t_{02} as typical rheological parameter and the resulting tear strength change according to the $p_{fv}=a \cdot (1 - e^{-(c+b \cdot x)})$ 3-parameter saturation function.

Rubber-to-metal bonding is dependent on the appropriateness of several parameters at the same time- This is why processes at the boundary layers (between the metal and the adhesive as well as between the adhesive and the rubber) also had to be observed. This was analytically clarified by observing one dimension element distribution perpendicularly recorded at the rubber-to-metal boundary layer.

The sample was a 25 mm diameter cylindrical rubber-metal part halved lengthwise. I took a sample with 60 mm² area with 2 mm thickness for examination. To prepare the sample, I removed the sawdust via washing the piece with analytically clean (96%) ethanol. The method of examination also

involved coating the surface of the sample with a layer of about 10 nm thick gold.

It was determined that element distributions at the environment between rubber and metal parts disclose limited information regarding manufacturing technology and/or aging processes (such as transport phenomena) – the primary reason for this is the roughness of the boundary environment at the cutting surface. This is also essential from a measurement technology point of view, as the scanning electron beam is statistically affected at the tear which leads to broader element distribution, so I examined two dimension element distributions in the environment between the rubber and metal part with the help of an electron microscope. Profilometer measurements supporting further surface analysis are consistent with electron microscope observations; the frequency of lateral roughness increases (although not significantly) together with spraying time. The tendency of normal (perpendicular) roughness, however, is not unequivocal.

The changes of surface morphology occurring because of spraying in relation to tensile strength can be linked to the forces and structural changes by the tensile strength on the rubber layer. It can be observed that at optimized manufacturing technology, the surface of tear is not the boundary between the metal and the rubber part which leads to the consequence that the attributes of tear are determined by macroscopic (0.1-1 mm) correlation distances. These are likely to be of thermodynamic nature and are related to the effects of heat dissipated due to significant mechanical stresses on mechanical properties. Tensile strength is highly dependent on which might also be influenced by good thermal conductivity of the metal part. The metal part might stabilize the environment of the changing thickness of the conductive boundary which means that the dissipated heat is conducted and tear takes place within the rubber layer. The way surface roughness determines the thermodynamic attributes (thermal dissipation, thermal conductivity, and tensile strength-temperature function) of the boundary and its environment is still not clear; and potential structural changes occurring when applying the rubber layer should also be examined. In addition both the external physical parameters of tear (such as temperature or the incremental speed of the tensile strength) and the stability are also very important factors of the measurement.

During the rheological examinations, I used the Monsanto S100 measuring tool at the rubber blend. I prepared a 40 kg sample of the blend, and I stored it in a 20 °C warehouse. The first measurement took place on 6 March 2012 and then I cut out 1.6 kg of the sample every week, and I carried out rheological

examinations and tear tests at the vulcanized samples. With the help of rheological and vulcanization measurements, I pointed out that when using blends of different curing speeds, the tear strength measured is not independent from the vulcanization speed of the blend in the $t_{s2} = 0.7-1.4$ min range, in case of the R1550F1 blend.

The results of experiments carried out on preparation of the metal parts clearly show that the Ra average surface roughness is not suitable for describing the strength of the rubber-to-metal bond. This is because no clear relation between the spraying time (and thus the variable surface roughness) and the strength of the bond can be shown. However, it is an important measurement result that there is a measurable parameter typical for the 3 dimension surface (S_v) whose changes can be related to the changes of the tear strength.

The curve observed in the mold cavity is similar to the Monsanto curves; the maximum pressure can be observed at full curing. In the light of the results, the strength scaling of the vulcanizing tools can be carried out safely. Pressure values are valid at pressings with 50 kN closing force and max. 5 min closing time.

The results of the element distribution analysis show that the chlorine is enriching on both sides of the border layer, and the quantity of the iron and carbon don't change significantly. The chlorine is enriching due to the evaporation of the binding material which is worth knowing so that we can specify the maximum permitted tool-opening timeframe, since if it is too long, then the evaporation goes into the atmosphere instead of the border layer, which is also weakening the bond. It would also be useful to examine the sulfur, silicon and sodium ratios in the future so that it could be determined whether further sulfur bridges form in the boundary layer, and how much polluting and additional materials will accumulate in the examined zone.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. Anthoine, G. (1984 May 8-11): Rubber Div. Meeting, Indianapolis
2. Arning, M. (2009 May): Gummiindustrie, Kautschuk UndKunststoff, Deutschland
3. Arning, M. (2009): LWB Steinl, Kautschuk Gummi Kunststoffe, pp. 91-96
4. ASTM: D429-64, Method B and ASTM: D429-64, Method C.
5. ASTM: D429-81. Annual book of ASTM standards, Vol. 09.01, 1993.
6. Báder I. (2007): Felületi feszültség képek, www.uni-miskolc.hu/~fkmbader/
7. Balázs, Gy. (1982): Ragasztás technika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
8. Bartha, Z. (1988): Gumiipari kézikönyv, TAURUS-OMIKK, Budapest
9. Beckman, J. A., Crane, G.; Kay, E. L.; Laman, J. R. (1974): Rubber Chem. Technologie, pp. 47-597
10. Berecz E (1991): Kémia Műszakiaknak, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 199-211 pp.
11. Besdo, D.; Ihlemann, J.; Kingston, J.,G., R.;Muhr, A., H: in Busfield, J., J., C.; Muhr, A., H. (Ed.) (2003): Constitutive models for rubber III, Balkema, Lisse, pp. 309.
12. Billigmann-Feldmann (1977): Sajtolás és Zömítés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 427 p.
13. Böhler gyártmányismertető (2010), szerszámacélok, nemesacélok, www.boehler.hu, letöltve: 2012. 01.25.
14. British Standard, BS 903, Part A21, 1989.
15. Cole, G.; Golovoy, A.; Jeryan, R.; Davies, G. (1997): Lightweight materials for automotive application,. Steel World; 2/1,75 pp. 83
16. Czvikovszky, T. Nagy, P.; Gaál J. (2000): A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest
17. Csizmadia B.-Nándori E. (szerk.) (1997): Mechanika Mérnököknek, Mozgástan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
18. Csizmadia B.-Nándori E. (szerk.) (1999): Mechanika Mérnököknek, Szilárdságtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
19. Csizmadia B.-Nándori E. (szerk.) (2003): Mechanika Mérnököknek, Modellalkotás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 78-79 o.
20. Datta, R. N., Ivany, M. S., (1995): Rubber World, 24/5, p. 212
21. Datta, R., N.; Talma, A., G. (1998): Rubber Chem. and Technologie p. 71

22. Datta, R., N.; Wagenmakers, J., C.(1996): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 49, p. 671
23. Datta, R., N.; Wagenmakers. J.. C.(1996): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 49, p. 671
24. Datta, R., N.; Wilbrink, J., H.; Ingham, F., A., A.(1994): Indian Rubber J., 8, p. 52
25. Diani, J.; Fayolle, B.; Gillormini, P.(2009): A review on the Mullins effect, European Polymer Journal 45, p. 601
26. DIN 53283 vizsgálati szabvány: Gumi-fém kötés, próbatestek kialakítása
27. Diószegi, Gy. (1984): Gépszerkezetek Méretezési Zsebkönyve, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
28. Dorfmann, A.; Ogden, R.,W. (2005): A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber, Int. J. Solids Struct. 42, p. 3967
29. Draexler, A. (1983): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 36, p. 1037
30. Eholzer, U.; Kempermann, T. (1985): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 38, p. 710
31. Endlich, W. (1981): Kleb- und Dichtstoffe in Modern Technik, Verlag W. Girardet, Essen
32. Fém-Gumi tapadás vizsgálati szabvány, DIN 53531
33. Frenkel, R.; Duchacek, V.: J. Pol. Sci. (1982): Pol. Chem. Ed. 20, p. 3005
34. Garreta, E.; Agullo, N.; Borros, S. (2002): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 55, p. 82
35. Gent, A., N. (2001): Engineering with Rubber. How to Designe Rubber Components 2nd Edition. Carl Hanser Verlag, München
36. Göbel, E., F. (1969): Gummifedern, Berechnung und Gestalting, Springer, Berlin
37. Hann, C., J. (1994): Rubber Chem. Technol. 67, p. 76
38. Henkel Herstellung Info, Bindemittel zur Bindung von Gummi an Metall oder andere Substrate 2002
39. Hofmann, W. (1980): Kautschuk-Technologie, Gentner Verlag, Stuttgart
40. Hoover, F. I. et al. (1999): Rubber Chem. Technologie 72, p. 319
41. Huhn, G. (2000): Kunststoff-Gummi-Verbundteile- Rationelle Herstellungsverfahren, GAK 53/10, pp. 720-721
42. Ihlemann, J. (2005): Richtungsabhängigkeiten beim Mullins-Effekt, Kautschuk Gummi Kunststoffe 58, pp. 438

43. International Standard, ISO 37, 2004.
44. ISO 37 International Standard, Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties
45. Itskov, M.; Haberstroh, E.; Ehret, A., E.; Vöhringer, M., C. (2006): Experimental observation of the deformation induced anisotropy of the Mullins effect in rubber, *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 59, p. 93
46. J. I. Goldstein et al. (1992): *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (A Text for Biologists, Materials Scientists and Geologists)*, Plenum Press, New York
47. Julius, P. (2009): *100.000 Stunden Gummiindustrie*, Dr. Gupta Verlag, Ratingen
48. Keller, R., C. (1988): *Rubber Chemistry and Technology*, 61, p. 240
49. Kempermann, T.; Eholzer, E. (1981): *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 34, p. 722
50. Kleemann, W.; Moewes, R. (1983): *Plaste und Kautschuk*, Band 30, p. 24
51. Kosar, K. (2001 April 26-28): *Kautschuk-Symposium der Donauländer*, Budapest
52. Kovacic, P.; Hein, R., H. (1962): *Rubber Chem. and Technol.* 35, p. 520
53. Kovacic, P.; Hein, R., H. (1962): *Rubber Chem. and Technol.* 35, p. 528
54. Lautenschlaeger, F., K.; Edwards, K. (1979): *Rubber Chem. Technol.* 52, p. 1050
55. Lautenschlager, F., K.; Edwards, K. (1980): *Rubber Chem. and Technol.* 53, p. 37
56. Ludvig, Gy. (1983): *Gépek dinamikája, Műszaki Könyvkiadó*, Budapest
57. Makhult, M. (1963): *Gumirugók, Műszaki Könyvkiadó*, Budapest
58. Martin, J. (2004): *The Romance of Rubber*, Kessinger Publishing
59. Masberg, U. (2007): *Die Bedeutung der Freigabekriterien für die Weiterverarbeitung von Kautschukmischungen* Fachbeitrag zur 91. Zusammenkunft und Mitgliederversammlung der DKG-Bezirksgruppe Rheinland-Westfalen, Bad Neuenahr
60. Masberg, U. (2005); Potthoff, A.: *Quickvulkanisation die Formel 1 bei der Herstellung von Kautschukformteilen*, *Gummi Fasern Kunststoffe*, 58/8, pp. 499-504
61. Masberg, U.; Potthoff, A.; Eisenhuber, R.; Kain, G. (2006): *Die selbstoptimierende Spritzgießmaschine*, *KGK* 2006/8, pp. 372-376
62. Morlin, B. (2006): *Polimerfeldolgozás és gépei*, *Műegyetemi dolgozat*, Budapest
63. Mosch, A.; Giese, U.; Schuster, R., H. (2003): *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 56, p. 184

64. Muttnyánszky, Á. (1981): Szilárdságtan, Műszaki könyvkiadó, Budapest, ISBN 963-10-3591-3
65. N. N. JIDOKA (2005): Das Prozessoptimierungssystem für Gummispritzgießmaschinen mit Komfort und großer Transparenz. Firmenprospekt der CAS Computerunterstützte Automatisierungssysteme V. Groth KG, D-21465 Reinbek, www.cas-jidoka.de, letöltve: 2011.02.23.
66. Nádudvari, J. (2005): Gumiipari Kutatóintézet, Recepturális Jegyzetek, Budapest
67. Nagdi, K. (1981): Gummi-Werkstoff, Vogel-Verlag, Würzburg
68. Naskar K.; Noordermeer, J., W., M. (2003): Kautschuk Gummi Kunststoffe, 57, p. 235
69. Niewenhuizen, P J., Haasnoot, J. G. Reedijk, J. (2000): Kautschuk Gummi Kunststoffe, Band 53, p. 144
70. Nitzsche, C., H. (1983): Kautschuk und Gummi-Kunststoffe, Haftung von Kautschuk an Metalle, Deutschland
71. Nordsiek, K., H. (1988): Kautschuk Gummi Kunststoffe, 41, p. 327
72. Nordsiek, K., H.; Wolpers, J. (1992): Kautschuk Gummi Kunststoffe, 45, p. 791
73. Nordsiek, K., H.; Wolpers, J. (1994): Kautschuk Gummi Kunststoffe, 47, p. 319
74. Ogden, R., W. (1983): Non-Linear Elastic Deformations, Brunel University
75. Okamoto, H.; Fukumori, K.; Matsushita, M.; Sato, N.; Tanaka, Y.; Okita, T., Takeuchi, K.; Suzuki, N.; Suzuki, Y. (2002, Dec.2-5, 2002): Prepr. of IUPAC-PC, pp. 638.
76. Pattantyús (1961): Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve, 2. kötet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
77. Pattantyús (1961): Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve 3. kötet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
78. Pék, L. (2000): Anyagszerkezettan és anyagismeret, Dinasztia Kiadó, Budapest
79. Pozsgai I. (1995): A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest
80. Rooke, M., B.; Schurmann, K. (2000 May): Rubber Bonding Conference, Amsterdam, p. 7
81. Rooke, M., B.; Schurmann, K. (1988): Rubber Bonding Conference, Frankfurt, p. 5.
82. Röders, J. (2008): Plastverarbeiter, Band 11, p. 48

83. Röthemeyer, F.; Sommer, F. (2001): Kautschuktechnologie, Carl Hanser Verlag, München- Wien
84. S. J. B. Reed (1993): Electron Microprobe Analysis, Cambridge University Press
85. Sárközy, Z. (1977): Műszaki táblázatok és képletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, ISBN 963-10-1241-7
86. Schuster, R. (2009): Geschäftsführer des Deutschen Instituts für Kautschuktechnologie, Kautschuk Gummi Kunststoffe
87. Springer, A. (1957): Gumi technológia, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
88. Szendrő, P. (1997): Gépelemek II. Támasztások, Gödöllő
89. Takáts L. (1953): Csavargyártás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest p. 25
90. Tochtermann-Bodenstein (1986): Gépelemek 1, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
91. Tóth, S.; Molnár, L.; Bisztray, S.; Marosfalvi, J. (2006): Gépelemek 1. Műegyetemi Kiadó, Budapest
92. V. D. Scott, G. Love and S. J. B. Reed (1995): Quantitative Electron-Probe Microanalysis, Ellis Horwood Ltd., New York
93. Varga, B. (1968): Könnyű műszaki gumicikkek gyártása, Tankönyvkiadó, Budapest
94. Wolff S. (1981): Kautschuk Gummi Kunststoffe 34, p. 280
95. Zellner, A.(1997): Rubber Technology International, p. 100
96. Zott, P. (2008): Plastverarbeiter, Band 12, p. 72
97. Zsáry, Á. (szerk.) (1989): Gépelemek I. kötet, Tankönyvkiadó, Budapest

M2: A témakörhöz kapcsolódó saját irodalom**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

Nemzetközi konferencia kiadvány:

7. **Renner T.**- Pék L. (2011): The impacts of mechanical pre-treatment of metal armatures on the strength of the rubber-to-metal bonding, Proceedings of the 1st Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education (MECH-CONF 2011), pp. 321-325
ISBN 978-86-85409-67-7

Magyar nyelvű konferencia kiadvány:

- 8. Renner T.-** Barányi I.- Pék L. (2011): Sörétezett és korund szórással felületkezelt acél alkatrészek mikro-topográfiai vizsgálata, Fialal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, XVI. Kolozsvári Nemzetközi Tudományos Konferencia, 2011. március 24-25, 257-260 o. ISSN 2067-6 808

Egyéb:

- 9. Renner T. -** (2010): Rezgésdiagnosztika II., Gumirugók alkalmazása, Főiskolai Kiadó, Könyv, Dunaújváros, 302-304 o. ISBN 978-963-9915-43-5

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek Dr. Pék Lajos főiskolai tanárnak, aki tudományos és szakmai elkötelezettséggel állt mellettem munkám során. Disszertációm elkészítésére a Szent István Egyetem Gépipari Technológiai Intézetében nyílt lehetőség, amiért külön köszönöm Prof. Dr. Kalácska Gábornak és a tanszék oktatóinak a szakmai támogatást és a munkámhoz nyújtott segítséget.

Köszönetemet fejezem ki opponenseimnek a szakmai segítségért és az építő jellegű kritikáért, amelyek értekezésemet nagymértékben előremozdították. Köszönöm családomnak, barátaimnak, kollégáimnak, kiemelten Gyuris Gábornak és Csima Norbertnek, hogy észrevételeikkel, hasznos tanácsaikkal folyamatosan segítettek.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm feleségemnek, hogy mindvégig mellettem állt és támogatott.

Nagyapám Renner Márton (1934-2008) emlékének.