



ROBERT BOSCH KFT.

ELEKTROMOS HAJTÁSLÁNCOK

VALIDÁCIÓS CSOPORT



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

ANYAGFIZIKAI TANSZÉK

Elektromos hajtásláncok konnektor validációja és tönkremeneteli jelenségek anyagtudományi vizsgálata

Szerző:

Lipcsei Sándor

Fizika MSc, II. év

Bosch mentor:

Luhály Ádám

Csoportvezető

ELTE témavezető:

Dr. Ispánovity Péter Dusán

Egyetemi docens

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

1. Kivonat	2
2. Általános bevezető	3
3. Megbízhatósági tervezés (Design for Reliability)	5
4. eAxle kompakt hajtáslánc csatlakozói és azok környezete	8
5. Csatlakozók tönkremenetele és validációja	13
6. Teszt eredmények	22
7. Kísérleti módszerek és eszközök	26
8. Anyagtudományi vizsgálatok eredményei	31
9. Összegzés, kitekintés	37
Irodalomjegyzék	39

1. fejezet

Kivonat

Ha nem is állíthatjuk biztosan, hogy a XXI. század az elektromos autók évszázada lesz, de mindenképp elmondható, hogy az elektromos hajtású gépjárművek hatalmas fejlődésen mentek és mennek keresztül. Ennek megfelelően a gépjármű gyártásban az elektromos csatlakozók szerepe is felértékelődött. A dolgozat két részre bontható: az első részben a Robert Bosch Kft.-nél végzett kutatás-fejlesztési projektünket érinti, amelyben megbízhatósági szempontból elemeztük a csatlakozókat és elkészítettük egy kurrens projekthez kapcsolódva a konnektorok validációs tervét. A dolgozat második fele egyrészt a csatlakozók anyagtudományi és mikromechanikai vizsgálatával foglalkozik, másrészt a dörzskorróziós jelenségekre koncentrálnak és egy új tesztmódszert javasolnak a dörzskorrózióval szembeni ellenállóképesség validálására.

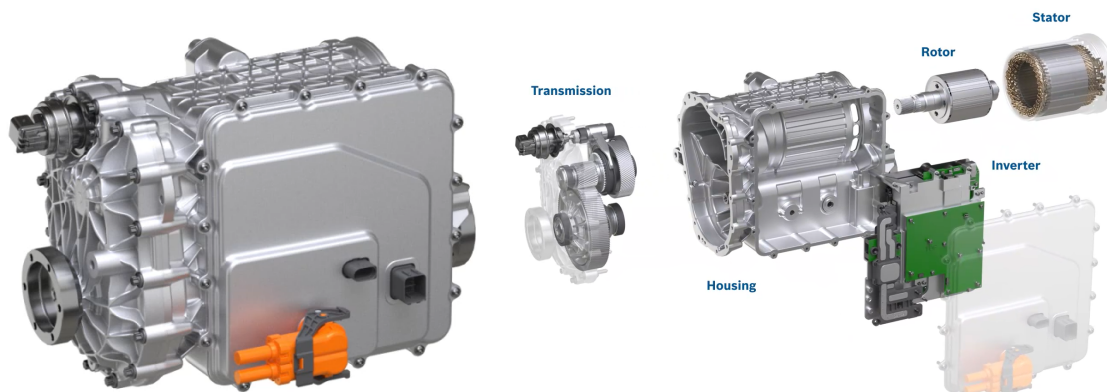
2. fejezet

Általános bevezető

Az első benzinmotoros autót Mannheimban, 1886-ban találta fel Karl Benz, míg az első igazi elektromos autót Andreas Flocken német feltaláló 1888-ban *Flocken Elektrowagen* néven. A századforduló idején az elektromos autót részesítették előnyben mivel kényelmesebbek és könnyebben használhatóak voltak, jóllehet mintegy 30 000 elektromos autó volt forgalomban akkoriban. Aztán a belső égésű motorok fejlődésével és az önindító megjelenésével a sorozat- és tömeggyártott benzin- és dieselmotoros autók teljesen dominálták a piacot a XXI. század elejéig. A fenntarthatóság és az ember okozta felfokozott környezeti hatások csökkentése érdekében az elektromos autókat újból fejlesztés céljává tették, azonban a száz évnyi elmaradt mérnöki munka olyan tapasztalati hiányosságokra világított rá, amely például az elektromos csatlakozók megbízhatóságát jelentősen érinti.

A belsőégésű motorral ellátott autókban is egyre nagyobb jelentőséget kapott az elektronika és az elektromos csatlakozók az automata váltók, optimalizációs szenzorok, sávtartó technológiák stb. fejlődésével. Ezek az elektromos rendszerek többnyire kis feszültségű és kis árammal terhelt konnektorokat igényeltek. Azonban az elektromos hajtásláncokkal ellátott autókban méginkább felértékelődik a csatlakozók szerepe, ugyanis pl. az akkumulátor és a hajtáslánc teljesítményelektronikája közti összeköttetés nagy feszültségű és nagy áramú konnektorokkal jöhet létre. Ez azt jelenti, hogy a nem megfelelő működés és meghibásodás közvetlen életveszélybe sodorhatja az utasokat. Mivel az elektromos hajtásláncok karakterisztikái jelentősen eltérhetnek a belsőégésű motorok karakterisztikáitól (rezgési, hőeloszlási, elektromágneses stb.), ezért elképzelhető, hogy azon standardok és normák, amelyeket a belsőégésű motorok csatlakozóinak tesztelésére lettek felállítva bő egy évtizeddel ezelőtt nem megfelelőek az elektromos hajtásláncokon használt csatlakozók validációjára. Ennek megfelelően a dolgozat első része a Robert Bosch Kft. által fejlesztett eAxe kompakt hajtáslánc (2.1 ábra) csatlakozóinak validációs tervével foglalkozik. A megbízha-

tósági tervezés során három fontos lépést különböztettünk meg, mégpedig a tönkremeneteli jelenségek elemzését, egy nemzetközi standardokon alapuló általános konnektor követelményrendszer létrehozását és magát a tervezést, amely során a tesztek karakterisztikáit és számosságát szabtuk meg. Végül a teszteredményeket statisztikai elemzésnek vetettük alá és összehasonlítottuk a várt értékekkel.



2.1. ábra. Az eAxle kompakt elektromos hajtáslánc (baloldali ábra) és főbb komponensei: áttétel, ház, inverter vagy teljesítmény elektronika, rotor és stator (jobboldali ábra).

Forrás: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/power-electronics/eaxle/>

A dolgozat második része a konnektorok tönkremeneteli jelenségeinek anyagtudományi vizsgálatával foglalkozik. A tanszéken épített pásztázó elektronmikroszkópba helyezhető nanoindentorunk és AFM segítségével vizsgáltuk a konnektor terminálok felületi tulajdonságait (adhéziós, abrázíós, felületi érdesség, súrlódási jellemzők). Ezekből kiváltképp az adhéziós erőkre kapott eredményeket vetettük össze, hogy kiderüljön a manapság használt mikro-nano karcolási eljárás pontossága. A felületi keménység eloszlását és a bevonatolás homogenitását vizsgáltuk nanoindentációs pásztázással. Végül nagy ciklusú nano-dörzskorróziós és szimultán akusztikus emissziós kísérletek során megpróbáltunk kapcsolatot találni a korróziós stádium és az akusztikus jelek statisztikai tulajdonságai között. Ezen vizsgálatok alapul szolgálhatnak egy state-of-the-art tesztnek, amely kimondottan a csatlakozók dörzskorróziós tulajdonságait vizsgálná.

3. fejezet

Megbízhatósági tervezés (Design for Reliability)

Meglehet, hogy aki ipari környezetben dolgozott az gyakran összefutott a megbízhatósági tervezés kifejezéssel, de hogy valójában mit jelent, miért kritikus a tervezési folyamat során, mikor használjuk és hogy pontosan kik vesznek részt ebben a folyamatban arra a következőkben adok választ. Ha egyszerűen akarjuk megfogalmazni, akkor a megbízhatóságra tervezés nem más, mint az a folyamat, amely garantálja, hogy egy termék vagy rendszer megfelelően képes ellátni a funkcióit adott környezetben, adott ideig (ez az idő legtöbbször a termék élettartama). A megbízhatósági tervezés legtöbbször a prototípus gyártást megelőzően kerül sorra és a jelentősége számos szempontból kiemelkedő: hasonló árral és teljesítménnyel rendelkező termékek differenciálására alkalmas, a legjobb módszer a megfelelő megbízhatóság biztosítására drága vagy kifinomult termékeknel, a termékek piacra dobása általában nem késleltetett, így a kereskedelmi mutatóknak kedvez, arról nem is beszélve, hogy sokkal olcsóbb, mint az egyéb tervezési módszerek, hiszen a nagy része a költségeknek (60%-70%) a tervezési folyamatra fordítódik. A valóságban szinte soha nem alkalmaznak tisztán megbízhatósági tervezést, mert egyszerűen a felmerülő problémák komplexitása, modellezhetetlensége nem teszi lehetővé ezt a fajta tervezést. Az egyéb tervezési stratégiák a következők lehetnek:

1. **Teszt alapú tervezés:** Az elsődleges hangsúly a funkciók megtervezésére van fektetve. A gyenge pontokat tesztek során szűrik ki és tervezéssel korrigálják.
2. **Tapasztalati tervezés:** A tervezés empirikus és kvalitatív tapasztalaton alapul. Ez a típusú tervezés csak akkor működhet, ha már jelentős tapasztalattal rendelkeznek az adott termékkel kapcsolatban.

3. **Túltervezés:** A termék szándékosan túlméretezett, hogy megfelelően átmenjen a megbízhatósági teszteken. Általában ott szükséges ez a tervezés, ahol magas biztonsági szintet kell biztosítani.

4. **Szabvány alapú tervezés:** A tervezés kizárólag szabályok és standardok alapján történik.

Ebből látható, hogy gyakran együttesen kell használni a tervezési eljárásokat, vagy akár idővel fel is válthatja egyiket a másik, pl. a tapasztalati vagy standard alapú tervezés az egyéb tervezési módokat. A megbízhatósági tervezés célja, hogy se alúl-, se túltervezett ne legyen egy termék, hanem magas pontossággal teljesítse a vevő által előírt követelményeket.

Tipikusan öt faktorról jellemezhető egy tervezési folyamat, mégpedig az innovációs szinttel, fejlesztési költségekkel, gyártási költségekkel, minőségromlási kockázattal és piacra kerülési idővel. A megbízhatósági tervezés főként az innovációs szint és a költséghatékonyság terén előnyös (3.1 táblázat), viszont hátrány a többi faktort illetően nem éri, ezért a modern tervezési folyamatokban leginkább ez a folyamat filozófia nyert teret.

Megközelítés	Innovációs szint	Fejlesztési költség	Gyártási költség	Minőségromlási kockázat	Piacra kerülési idő
Teszt alapú	0	-	0	0	-
Tapasztalati	-	+	0	-	+
Túltervezés	-	+	-	+	+
Szabvány alapú	-	+	-	+	+
Megbízhatósági	+	0	+	0	0

3.1. táblázat. A táblázatban a különböző tervezési megközelítések előnyei és hátrányai vannak bemutatva az öt faktor szerint. A '-' hátrányt, a '0' semlegességet és a '+' pedig előnyt jelent.

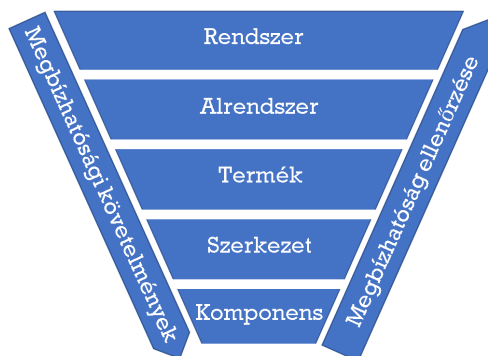
A megbízhatóságra tervezésnek négy fő alappillére van:

- **Meghibásodások elkerülése:** Úgy kell tervezni, hogy ne aktiválódjanak meghibásodási mechanizmusok a komponense teljes élettartama során. Ha elkerülhetetlen egy tönkremeneteli jelenség megjelenése, akkor úgy kell tervezni, hogy az előfordulási valószínűségét minimalizáljuk.
- **Modellekkel és ok-okozati összefüggésekkel történő tervezés:** A tervezés során figyelembe kell venni a terhelés/ellenállóképesség-terv, terhelés-tönkrementeli mechanizmusok, megbízhatóság-terhelés/ellenállóképesség kapcsolatokat.
- **Komponens szintű fókusz:** Mivel minden termék komponensekből áll, ezért a komponens szinten szükséges tervezni. Ehhez az ú.n. V-modelt használják (3.1), amely a termék, mint

rendszer struktúrálásával és particionálásával foglalkozik. A követelmények mindig a felsőbb szintből öröklődnek az alsóbb szintekre, ezzel biztosítva a megfelelő követelményrendszert a komponens szintű tervezés számára. A validáció vagy ellenőrzés ellenben pont fordítva, komponens szintről indul és a magasabb szintek felé halad.

- **Jól időzített tervezés:** Mivel a megbízhatóságra tervezés a terven, mint koncepción keresztül valósul meg, ezért azokban a termék készítési fázisokban kell alkalmazni ezt a tervezési filozófiát, amikor a termék koncepcionális megfogalmazása zajlik. Ezek a fázisok pl. a termék innovációs, projekt előkészítési vagy korai fejlesztési szakaszok lehetnek.

A megbízhatóság ellenőrzése (validálása) a termék fejlesztési fázisától a sorozatgyártás korai fázisáig tart. A fejlesztési szakaszban funkció, teljesítmény és élettartam teszteket hajtanak végre, majd statisztikai visszacsatolást összevetik a megbízhatósági jóslatokkal, amely egyértelmű képet ad a terv koncepcionális megbízhatóságáról. Amennyiben nem felel meg egy termék vagy komponens a validációs követelményeknek, abban az esetben a validációs mérnökök javaslatokat tesznek a terv vagy komponens definíció szintű megváltoztatására.



3.1. ábra. A híres V-model, a megbízhatósági tervezés alapköve. A megbízhatósági követelmények magasabb szintekről öröklődnek egészen a komponensekig, majd a megbízhatósági ellenőrzés a komponens nívóról indul a magasabb szintek irányába.

Forrás: Saját szerkesztés.

A V-modelnek megfelelően elsőként a validációs követelményrendszert kellett megszabnunk, majd az erre épített validációs tervnek megfelelően történt a megbízhatósági ellenőrzés (tesztelés). Azonban mielőtt rátérnénk a terv elkészítésének részleteire ismerjük meg az eAxle csatlakozóit és elhelyezkedésüket a hajtánláncon.

4. fejezet

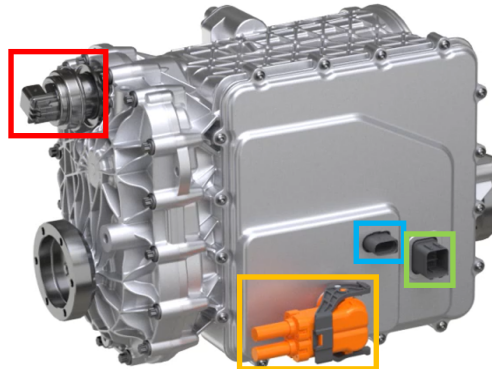
eAxle kompakt hajtáslánc csatlakozói és azok környezete

Az eAxle hajtásláncot típustól, teljesítménytől és fejlesztési fázistól függően különböző számú és típusú csatlakozóval látják el, azonban néhány csatlakozó elengedhetetlen a biztonságos és megfelelő üzemeltetéséhez. A validációs tervet erre a néhány csatlakozóra alapoztam, ezért most röviden ismertetem a komponenseket és azok környezetét.

A belső égésű motoroktól eltérően az energia nem a motorban keletkezik, hanem a meghajtó egység csupán az akkumulátorban eltárolt elektromos energiát alakítja mozgási energiává. Azonban ahhoz, hogy ez megtörténjen az akkumulátort és a kompakt hajtásláncot össze kell kötni egy magasfeszültségű és nagyáramú vezetékkel, konnektorokkal. Felmerülhet a kérdés, hogy miért nem a savas akkumulátorokból jól ismert sarus csatlakozást használják a hajtásláncban, amely sokkal egyszerűbb, mint egy bonyolult csatlakozó. Ahhoz, hogy a választ megtaláljuk először arra tényre világítanék rá, hogy az eAxle olyan hajtásláncként lett elképzelve, amely szabályozható teljesítményű (50 - 300 kW), kompakt és nagyon magas hatékonysággal bír (96%). Így módon a válasz a veszteségek elkerülésében rejlik, ugyanis ahhoz, hogy a 300 kW teljesítményt képesek legyünk tartani hosszú időn keresztül nagyon nagy áramra van szükség (mivel a sarus csatlakozás nem teszi lehetővé a magas feszültséget) és így a hőveszteség óriási lenne a csatlakozón és kábelben. Ez nagy mértékben rontaná a hajtáslánc össz hatékonyságát is. A nagy áramra csak a nagyon vastag csatlakozás és kábelezés lenne a megoldás, de az viszont kivitelezhetetlen, mivel a kompakt-ság kizárja. Erre az a megoldás született, hogy a tápkábel és csatlakozó legyen magasfeszültségű így kényelmesen szállítható az elektromos energia. A magasfeszültség viszont árnyékolást követel meg, amely egyértelműen kizárja a hagyományos saruval ellátott akkumulátor csatlakozót.

Az elmondottaknak megfelelően az első konnektor a listánkon a *"HV-DC"* (*High Voltage -*

Direct Current) jelölést kapja, amely a eAxle teljesítményelektronikáját köti össze az akkumulátorral (4.1 ábra - narancs négyzet). Ez az egyik legfontosabb csatlakozó, ugyanis ez felel a hajtáslánc tápellátásáért, éppen ezért meghibásodása életveszélybe is sodorhatja a gépjárműben utazókat.



4.1. ábra. Az eAxle csatlakozóit láthatjuk a különböző színű négyzetekben: HV-DC (narancs), LV-OEM-X1 (kék), PE-LV-X20 (zöld) és DCUA (piros). A TMR, SS és HVIL csatlakozók titoktartási okokból kifolyólag nem szerepelnek a rajzokon.

Forrás: Saját szerkesztés.

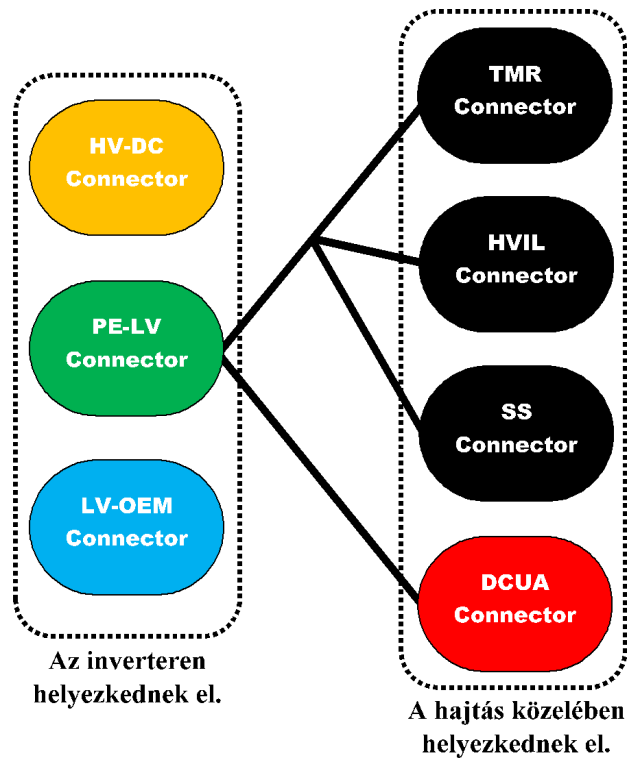
Fontossági sorrendben a következő csatlakozónk a "*PE-LV-X20*" (*Power Electronics - Low Voltage*), amely a teljesítmény elektronikát köti össze egy kábelkorbácson keresztül a többi pl. szerzorokhoz tartozó csatlakozóval (4.1 ábra - zöld). Tulajdonképpen a központosított információ-áramlás és vezérlés ezen a csatlakozón keresztül történik, ezért ez is kiemelt fontosságú.

A teljesítményelektronikán még megtalálható az ú.n. "*LV-OEM-X1*" (*Low Voltage - OEM*) csatlakozó, amely a hajtáslánc és a leendő gépjármű 12 V-os fedélzeti rendszerét köti össze (4.1 ábra - kék). Erről a csatlakozóról azt kell tudni, hogy nem a Robert Bosch Kft. hatáskörébe tartozik, ezért munkám során nem foglalkoztam vele.

A PE-LV csatlakozóból távozó kábelkorbács tipikusan két részre oszlik és egyik végén a "*DCUA*" (*Disconnect Unit Actuator*) csatlakozó található, amely az elektromotor és transzmisszió hajtótengely kapcsolatát szabályozza egy elektromechanikus kuplung közbenjárásával (4.1 ábra - vörös). Ennek megfelelően hatékonysági szempontból is fontos szerepe van ennek a konnektornak, ugyanis pl. amikor a hajtáslánc passzív állapotban működik, akkor a DCU képes kioldani a kuplungot, ezzel csökkentve a veszteségeket.

A kábelkorbács másik fele pedig egy hármas bontásban a "*TMR*" (*Tunnel Magneto-Resistance Sensor*) vagy "*RPS*" (*Rotor Position Sensor*) csatlakozóhoz, a "*SS*" (*Speed Sensor*) konnektorhoz és a "*HVIL*" (*High-Voltage Interlock*) csatlakozóhoz fut. Sajnos titoktartási okokra hivatkozva ezekről nem tudok ábrát mutatni, azonban szerepüket fontos tárgyalni. A TMR/RPS csatlakozó biztosítja a megfelelő kommunikációt azon szenzor, amely a rotor szöghelyzetét méri és a vezérlőegység

között, ebből kifolyólag kiemelt szerepe van a rotortengely nyomatékának szabályozásában. A SS csatlakozó a meghajtótengely forgási sebességére vonatkozó információt közvetíti a teljesítmény elektronika felé. Az utolsó a HVIL konnektor, amely érintésvédelmi feladatokat lát el és az elektromotor szervíze során védi a technikusokat az esetleges áramütésektől az elektromotor (rotor-stator) megbontása során.

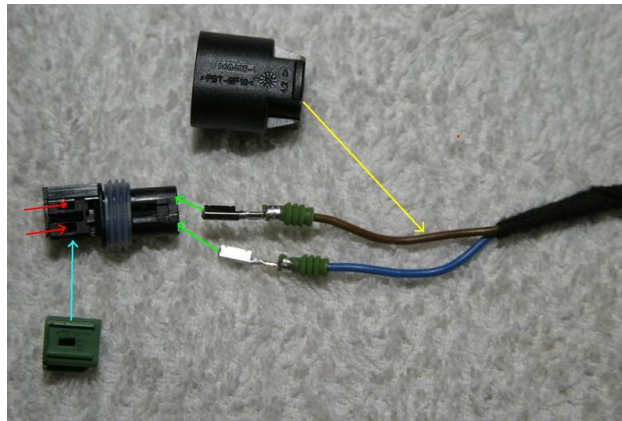


4.2. ábra. Elhelyezkedés szerint is csoportosíthatóak a csatlakozók: azok, amelyek a teljesítményelektronikán (inverteren) helyezkednek el és azok, amelyek a hajtás (elektromotor és áttétel) közelében.

Forrás: Saját szerkesztés.

A konnektorok elhelyezkedése nagy fontossággal bír, ugyanis a mechanikai tervezés döntően befolyásolni tudja a csatlakozók vibrációs karakterisztikáit. Erre kiváló példa, hogy Bosch által végzett vibrációs mérések azt mutatták, hogy az inverteren elhelyezett csatlakozók sokkal kevésbé vannak kitéve a rezgési igénybevételeknek, mint azok, amelyek a hajtás közelében helyezkednek el. Egy másik fontos aspektus amelyet a hajtáslánc nagyban befolyásolhat az a termikus igénybevétel. A szimulációs adatok és termikus mérések egyhangúan azt mutatták, hogy inkább azon csatlakozók melegednek, amelyek a hajtás közelében helyezkednek el, így a DCUA és SS csatlakozók melegednek nagy mértékben (70 - 80 °C), illetve a HVIL és TMR csatlakozók közepesen (60 - 70 °C), illetve a HV DC csatlakozó is magas hőfokot érhet el (80 - 90 °C) a nagy áramoknak köszönhetően.

A csatlakozók részletesebb felépítéséről azt kell tudni, hogy az SS, TMR és HVIL csatlakozók kétszeres rögzítéssel vannak ellátva, ú.n. CPA ("Connector Position Assurance") funkcióval. Ez az extra csatlakozás segít a nagyobb megtartóerő elérésében és a csatlakozási erők fluktuációit is csökkenti. A PE-LV, HV-DC és DCUA csatlakozók nem rendelkeznek másodlagos zárral a papa-mama csatlakozók között, ezért ott még kritikusabbnak számítanak a rezgési és statikus igénybevételek. Minden csatlakozó több szintű tömítéssel rendelkezik, rendszerint minden huzal külön tömítést kap ("Single Wire Seal" - SWS), illetve ezen kívül a csatlakozók is egyszeresen vagy duplán tömítettek. Ennek megfelelően a csatlakozók teljesítik az IPX9K és IP6X szabványokat, amelyek a nagy-nyomású gőzborotva elleni és a mikronos méretű ($\leq 75 \mu\text{m}$) por elleni védelmet jelentik.



4.3. ábra. Egy két pólusú Tyco csatlakozót láthatunk szétszedve, amely belső tömítéssel, terminál tömítésekkel (SWS-ekkel) volt ellátva.

Forrás: <http://forums.pelicanparts.com/bmw-r1100s-r1200s-tech-forum/404196-disassembling-molex-tyco-connector.html>

Az adott számú papa-mama terminált (tüske-hüvely párokat) krimpeléssel rögzítik az ónozott végű réz huzalokhoz a HV-DC csatlakozó kivételével, ahol a gyűjtősínekhez ultrahangos hegesztéssel rögzítik a vezetékeket. Az ultrahangos hegesztés azért nagyon előnyös, mivel a csatlakozást homogén módon, hőhatások nélkül tudjuk előállítani, ráadásul az eljárás is kimondottan olcsónak mondható. Általában a terminálok krimpelhető része CuSn4 (bronz) ötvözetből készül, mivel kiváló hidegalakítási tulajdonságokkal, nagy keménységgel, jó korrózióálló tulajdonságokkal és jó vezetőképességgel bír. A terminálok érintkezője CuNiSi (bronz-szilícium) ötvözetekből készül, amely nagyon jó hőálló tulajdonságokkal rendelkezik, vagyis magas hővezetési együtthatóval, magashőmérsékleti vezetési stabilitással és a termikus feszültség relaxációval szembeni magas ellenállóképességgel rendelkezik. De ez még nem minden, ugyanis az érintkezőket két réteggel is bevonják: egyrészt egy $0.8 \mu\text{m}$ -nél vastagabb Ni réteggel, amely diffúziós gátként szolgál és extra keménységet kölcsönöz a fő bevonatnak, amely egy $2 - 5 \mu\text{m}$ vastag Ag réteg. Az ezüst bevonatot

azért kedvelik pl. az arannyal vagy platínával szemben, mivel egyrészt nagyságrendekkel olcsóbb megfelelő minőségű ezüst bevonatot előállítani, a vezetőképessége jobb, mint az említett egyéb nemesfémeké és ráadásul a leginkább ellenálló a dörzskorrózióval szemben, amely az egyik legfontosabb tönkremeneteli mód az autóiipari konnektorok esetében.

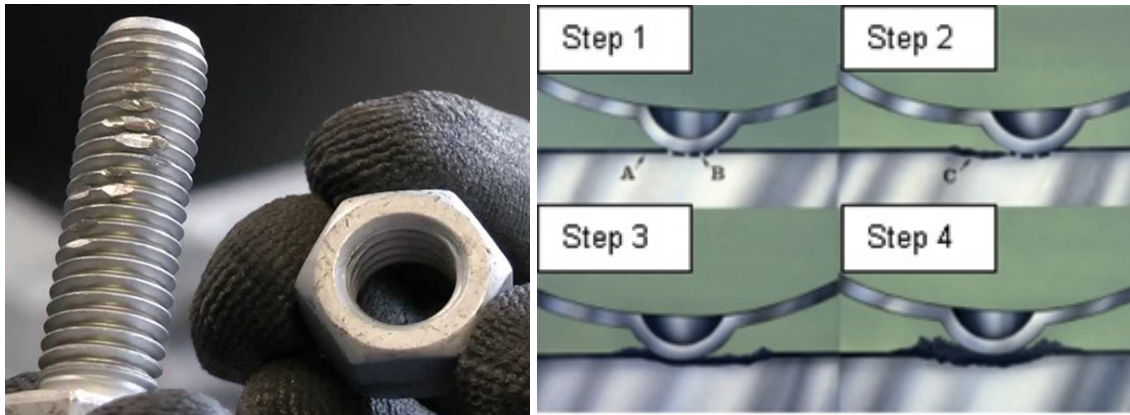
5. fejezet

Csatlakozók tönkremenetele és validációja

Tönkremeneteli jelenségek

Miután megismertük a csatlakozókat meg kell vizsgálnunk, hogy mik azok a lehetséges meghibásodási lehetőségek, amelyek érinthetik a konnektorokat. A meghibásodásokat eredetük szerint három nagy csoportba oszthatjuk: mechanikai, elektromágneses és környezeti. A **mechanikai** tönkremeneteli módokat tovább oszthatjuk statikus és mozgással kapcsolatos meghibásodásokra. A statikus jelenségek közé tartoznak azon terhelések, amelyek valamilyen rugalmas vagy rugalmatlan alakváltozást okoznak a konnektorban. A mozgási jelenségek közé tartoznak a csúszással kapcsolatos abrázió és adhézió (hideghegedési) kopási jelenségek, a vibráció következtében végbemenő dörzskorróziós és fáradási folyamatok, illetve a különböző tribokémiai hatások, mint a mechanikai felület aktiváció.

Az **elektromágneses** jelenségeket két csoportra osszuk, mégpedig az elektromos tér vagy feszültség okozta jelenségek és az áram okozta meghibásodások csoportjaira. Az elsőbe tartozik az ún. "fritting" (nem találtam magyar megfelelőt), amely az a jelenség, ami során egy csatlakozón lévő vékony szigetelő réteg adott küszöbfeszültség felett elbomlik, ezzel elszennyezve a csatlakozót. Az ehhez kapcsolódó második fontos jelenség az elektromigráció, amely azt az anyagtranszportot jelenti, amely az ionok fokozatos mozgásaként valósul meg az elektronokkal történő impulzuscseré során. Azért kapcsolódik a "fritting"-hez az elektromigráció, ugyanis a szétbontott oxid rétegből származó szennyeződések elektromigráció útján eljuthatnak a csatlakozás mélyebb rétegeibe is, ezzel jelentősen változtatva a csatlakozás ellenállását. Azért, hogy ez ne történhessen meg az előbbiekben említett nikkel bevonatot, mint diffúziós gátat viszik fel a terminál felületére. Egy harmadik meghibásodási mód, amely kimondottan a potenciálkülönbségnek köszönhető az pedig az ív- vagy szikraerőzió. Ez a jelenség a nagyfeszültségű csatlakozóknál jelenthetne problémát, ha



5.1. ábra. A bal oldali képen egy csavar-anyá pár hideghegedést követő szétválasztás utáni képe, amely egyértelműen mutatja a csavar meghibásodását. A jobb oldali képen a dörzskorrózió elvi kialakulásának lépéseit láthatjuk.

Forrás: Hideghegedés: <https://www.rg-group.com/resources/blog/what-is-stainless-steel-galling-and-what-causes-it>; Dörzskorrózió: <https://www.brakeandfrontend.com/tech-tip-so-what-s-this-fretting-corrosion-stuff-anyway/>

nem lennének megfelelően árnyékolva. A magas áram két féle meghibásodást okozhat, mégpedig termikus jellegű vagy elektromágneses vibrációs fáradást okozhat. Az utóbbi jelenséget főként hosszú párhuzamos gyűjtősínek esetén jelenkezik, ahol az elektromágneses erők öngerjesztő módon rezgésbe hozzák a csatlakozókat, akár csak a transzformátor lapkákat. Ezek a rezgések idővel a csatlakozók elfáradásához és tönkremeneteléhez vezetnek.

A **környezeti** hatások olyan magától értetődő faktorokat foglalnak magukban, mint a hőmérséklet, páratartalom, porkoncentráció, kémiai potenciál, kenés és elektromágneses-környezet. Ha fel szeretnénk sorolni, hogy hány féle korrózió mehet végbe és mik a pontos jelenségek, akkor nagyon hosszan lehetne ezekről írni, így összefoglalóként elmondható, hogy a környezeti jelenségek mind elkerülhetők megfelelő tömítéssel, szigeteléssel és tervezéssel. Tulajdonképpen csak néhány meghibásodási jelenség elkerülhetetlen, mint a hideghegedés és dörzskorrózió (5.1 ábra). Éppen ezért az általam végzett fizikai analízis során a csatlakozók dörzskorróziós tulajdonságainak vizsgálatára koncentráltam.

Figyelembe véve a bemutatott tönkrementeli módokat és az eAxle kompakt hajtáslánc vibrációs, illetve termikus profiljait a 5.1 táblázatban foglaltam össze a csatlakozók meghibásodási módjait és azok fontosságát előfordulási valószínűségük szerint. A további feladat a validációs terv megalkotása volt, ahol a meghibásodásokat figyelembe véve kellett megfelelő tesztteteket megfelelő sorrendben összeállítani, illetve a tesztparamétereket egy általunk felállított általános követelményrendszer szerint szabtam meg, amelyet a Robert Bosch Kft. által használt MBN ("Mercedes-

Benz Normen") és USCAR ("United States Council for Automotive Research") standardokra alapoztam. Habár ezek a standardok belsőégésű motorokra lettek felállítva, az előzetes tesztek alapján meglepően jól alkalmazhatóak elektromos hajtású gépjárművekre is. Az újdonság ebben az, hogy senki nem foglalkozott eddig azzal, hogy egy általános követelményrendszert felállítson, így viszont ezen tesztek elvégzése során biztosak lehetünk abban, hogy a teszt eredmények és metodikák megfelelnek több megrendelő számára is. Ez az eljárás az egyedi tesztek számát csökkenti, vagyis a termék és tesztelés árát is, illetve időben is sokkal kifizetődőbb. A tesztparaméterek úgy lettek kiválogatva, hogy azonos típusú tesztekhez mindig az erősebb paramétereket rendeltem a standardokból, így biztosítva, hogy az eredő követelmények biztosan megfeleljenek az MBN és USCAR standard használoinak is.

Csatlakozó	Rugalmas terhelés	Plasztikus terhelés	Abrázív kopás	Adhéziós kopás / Hideghegedés	Dörzskorrózió	Normál fátadás	Tribokémiai kopás	Mechanikai felületaktiváció	"Fritting"
PE-LV	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony
DCUA	Közepes	Közepes	Alacsony	Magas	Magas	Magas	Közepes	Közepes	Alacsony
SS	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony
TMR (RPS)	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Közepes	Közepes	Közepes	Közepes	Alacsony
HVIL	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes
HV-DC	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas
Csatlakozó	Elektromigráció	Íverózió	Elektromágneses rezgések (fátadás)	Hő disszipáció	Hőtágulás	Kémiai aktiváció (pára)	Pára korrózió	Kenőanyag korrózió	Részecske / por akkumuláció
PE-LV	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
DCUA	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
SS	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
TMR (RPS)	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
HVIL	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
HV-DC	Közepes	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes	Alacsony
Csatlakozó	Kavitáció	Beszáradás / lerakódás	Gödörösódásos korrózió	Réskorrózió	Pórus korrózió	Galvánkorrózió	Gáz / Szárazkorrózió	Por korrózió	EM interferencia
PE-LV	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony
DCUA	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony
SS	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes
TMR (RPS)	Közepes	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes
HVIL	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Közepes
HV-DC	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony

5.1. táblázat. Ebben a táblázatban láthatjuk összefoglalva a tönkrementeli módokat és azok előfordulási valószínűségének kvalitatív értékét (zöld - alacsony, narancs - közepes, piros - magas). A tönkrementeli effektusok három csoportba lettek foglalva a színkódoknak megfelelően: fekete - mechanikai, szürke - elektromágneses és kék - környezeti.

Validációs terv

A következőkben tekintsük a validációs terv lelkét, a tesztek és azok paramétereit. Az első teszt tömb az a mechanikai/dinamikai tesztekéből állnak. Ehhez tartoznak a mechanikai terhelési tesztek, amelyek során a konnektor statikai és dinamikai paramétereit vizsgálják, illetve a vibrációs tesztek, ahol rázópados vizsgálatokat végeznek. A mechanikai terhelési tesztek közé tartoznak a csatlakozási ciklusszám tesztek, csatlakozási erő tesztek, aljzat-csatlakozó ház megtartóerő tesztek, kábel-aljzat megtartóerő tesztek, aljzat hajlítási tesztek a csatlakozó házban, elsődleges és másodlagos zár megtartóerő tesztek. A csatlakozási ciklus tesztek elején és végén érdemes négy pontos

ellenállásmérést is végezni, de a többi teszt során ez szükségtelen. Minden teszt elején és végén szemrevételezéssel kell meggyőződni a konnektorok állapotáról. A vibrációs teszt előtt szemrevételezést és négy pontos ellenállásmérést kell végezni, majd a teszt után ugyanezeket, illetve funkció teszteket, ami lényegében a csatlakozó alapvető működési jellemzőinek kvalitatív tesztelését jelenti (csatlakozópár összedugását, kontaktus párok átvezetését, stb.). Habár azt írtam korábban, hogy a belsőégésű motorok csatlakozóira vonatkozó követelmény standardok meglepően jól alkalmazhatóak az elektromos hajtásláncokra is, ez csak részben igaz, ugyanis pont az öngerjesztéses vibrációs vizsgálatok esetén a rezonancia frekvenciákban meglepően nagy eltéréseket mértünk (400-500 Hz helyett 800-1000 Hz), míg az amplitúdók (gyorsulások) nagyjából hasonlóak maradtak. Továbbá a vibrációs teszteknel javasoljuk egy új mérés bevezetését, amivel in-situ (tesztpadon történő rázás vagy öngerjesztéses rázás közben) tudjuk mérni az elektromos kontaktusok kopási állapotát. Erről a 7-ik fejezetben tudhatunk meg többet. A 5.2 táblázatban láthatjuk az első teszt tömb részletes lebontását tesztszekvenciákra.

A második teszt tömb az a korróziós tesztek közül áll. Ez lényegében nem más, mint a konnektorok különböző anyagokkal, adott eljárással, adott ideig és adott hőfokon történő kezelése. Ezt úgy kell érteni, hogy pl. dízel üzemanyag esetén a csatlakozóra szobahőmérsékleten, 48 órán át szükséges felvinni az anyagot permet, beletörlés, belemártás és ráöntés formájában. Azonban mielőtt akár a tizenhat különböző anyagra végeznénk el ezeket a műveleteket szemrevételezni szükséges a csatlakozót, szükséges négy pontos ellenállásmérést végezni és magasfeszültségű szigetelés mérést is végezni. Ezeket a méréseket a kezelések után is el kell végezni, kiegészítve funkcionális tesztekkel, dimenzió mérésekkel és opcionálisan anyagvizsgálatokkal. A 5.3 táblázatban láthatjuk a második teszt tömb részletes lebontását tesztszekvenciákra.

A harmadik teszt tömb a klímateszteknek felel meg. Ebben olyan tesztek végzőnk el, amelyek az extrém környezeti hatásokat emulálják és a konnektorokat termikus és korróziós szempontból jellemzik. Olyak tesztek tartoznak ide, mint a ciklikus hőmérsékletű és relatív páratartalomú tesztek, a hosszútávú magashőmérsékletű és magas páratartalmú tesztek, a vízben és levegőben végzett termikus sokkolás, az ipari klíma (vagy kevert gázáram) teszt és a sópermet (sókamrás) teszt. Az előző tesztsorozatokhoz hasonlóan a klimatikus igénybevételek előtt szemrevételezést, négy pontos ellenállásmérést és szigetelő ellenállás mérést kell végezni. Majd utánuk néhány esetben extra dimenzió mérést és funkciós teszteket, illetve a hosszú távú teszt után töréstesztet is szükséges végezni. A 5.4 táblázatban láthatjuk a harmadik teszt tömb részletes lebontását tesztszekvenciákra.

A terv utolsó része a mintaszámok meghatározása, a költségterv és időterv elkészítése volt. Ahhoz, hogy a szükséges minták számát meghatározzuk a statisztikai teszt tervezéshez kell vissza-

Mechanikai / Dinamikai tesztek					
Mechanikai terhelési teszt		Vibrációs teszt			
Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Kiegészítő teszt szekvencia	Teszt szekvencia		Fontossági jelleg
Szemrevételezés	Kötelező	-	Szemrevételezés		Kötelező
Kontaktus hajlítási teszt	Kötelező	-	Négy pontos ellenállásmérés		Kötelező
Elsődleges zár megtartóerő teszt	Kötelező	Ciklikusan változó hőmérséklet	Véletlen gerjesztés	Színuszos gerjesztés	-
Másodlagos zár megtartóerő teszt	Kötelező	$t = 0 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 60 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 90 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 240 \text{ min} / T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 420 \text{ min} / T = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 480 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v = 10 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ m}/(\text{m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 100 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 400 \text{ Hz} / \text{PSD} = 0.01 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 800 \text{ Hz} / \text{PSD} = 20 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 1200 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 1500 \text{ Hz} / \text{PSD} = 5 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $g \text{ (rms)} = 105.5 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	$v = 600 \text{ Hz} / A = 75 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 700 \text{ Hz} / A = 100 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 800 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 900 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1000 \text{ Hz} / A = 100 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1100 \text{ Hz} / A = 75 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	Kötelező (azon csatlakozók számára, amelyek az inverteren helyezkednek el)
Kábel - aljzat megtartóerő teszt	Kötelező	$t = 0 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 60 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 90 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 240 \text{ min} / T = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 420 \text{ min} / T = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 480 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v = 10 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ m}/(\text{m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 100 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 400 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 800 \text{ Hz} / \text{PSD} = 0.51 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 1200 \text{ Hz} / \text{PSD} = 20 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 2000 \text{ Hz} / \text{PSD} = 20 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $g \text{ (rms)} = 181 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	$v = 600 \text{ Hz} / A = 100 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 700 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 800 \text{ Hz} / A = 200 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 900 \text{ Hz} / A = 200 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1000 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1100 \text{ Hz} / A = 100 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	Kötelező (azon csatlakozók számára, amelyek a hajtóművön helyezkednek el)
Aljzat - csatlakozó ház megtartóerő teszt	Kötelező	$t = 0 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 60 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 90 \text{ min} / T = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 240 \text{ min} / T = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 420 \text{ min} / T = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 480 \text{ min} / T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$v = 10 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ m}/(\text{m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 100 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 400 \text{ Hz} / \text{PSD} = 10 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 800 \text{ Hz} / \text{PSD} = 0.51 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 1200 \text{ Hz} / \text{PSD} = 20 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $v = 2000 \text{ Hz} / \text{PSD} = 20 \text{ (m}/\text{s}^2)^2 / \text{Hz}$ $g \text{ (rms)} = 181 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	$v = 600 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 700 \text{ Hz} / A = 200 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 800 \text{ Hz} / A = 300 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 900 \text{ Hz} / A = 300 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1000 \text{ Hz} / A = 200 \text{ m}/\text{s}^2$ $v = 1100 \text{ Hz} / A = 150 \text{ m}/\text{s}^2$ $\Delta t = 22 \text{ óra} / \text{tengely}$	Opcionális
Csatlakozási ciklusszám tesztek	Kötelező	-	Szemrevételezés		Kötelező
Csatlakozási erő tesztek	Kötelező	-	Négy pontos ellenállásmérés		Kötelező
Szemrevételezés	Kötelező	-	Funkció tesztek		Kötelező
-	-	-	In-situ akusztikus emissziós dörzskorrózió teszt		Opcionális

5.2. táblázat. A mechanikai / dinamikai tesztek szekventálása és parametrizálása. A terhelési tesztek esetében nincsenek paraméterek megadva, ugyanis ott a mért erőknek kell konnektor specifikusan megfelelnie adott küszöbértéknek. A T jelöli a hőmérsékletet, a Δt a teszt időtartamát, v a rezgés frekvenciája, PSD a spektrális teljesítménysűrűség, A a színuszos rezgés amplitúdója (gyorsulása) és g az átlag gyorsulásnak felel meg, ahol az rms a négyzetes középnek felel meg.

nyúlunk. Ilyenkor olyan teszt stratégiákkal számolhatunk, mint a teljes tesztek (ahol a komponens tönkrementelég terhelünk), nem teljes (cenzúrázott) tesztek (ahol a tönkremenetel előtt megálunk), illetve olyan teszt stratégiák, amik a szükséges időt radikálisan csökkentik (ilyen például a túlterhelés). Többnyire két fontos kérdés merül fel a tervezés során, mégpedig a mintaszám és a szükséges tesztidő kérdése.

Korróziós tesztek					
Anyag	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Anyag	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg
-	Szemrevételezés	Kötelező	-	Szemrevételezés	Kötelező
-	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	-	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező
-	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	-	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező
Műszerfal tisztító	Permetezés + Beletörlés + Ráöntés + Belemártás + Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális	Penetráns olaj	Permetezés + Beletörlés + Belemártás $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális
Ablabmosószerbe való feloldatlan fagyálló	Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális	Zsír	Beletörlés $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális
Fékfolyadék	Beletörlés + Ráöntés + Belemártás + Alámerítés $T = RT; \Delta t = 48\text{h};$	Kötelező	FAM teszt folyadék	Beletörlés + Ráöntés + Belemártás + Alámerítés $T = RT; \Delta t = 48\text{h};$	Kötelező
Dízel	Permetezés + Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = RT$	Kötelező	Biodízel	Permetezés + Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = RT$	Opcionális
AdBlue dízel adalék	Permetezés + Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = RT$	Opcionális	Motorolaj	Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális
Szervokormány folyadék	Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t_1 = 30\text{ min};$ Tárolási idő: $\Delta t_2 = 7\text{ nap};$	Opcionális	Váltófolyadék (Bosch)	Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t_1 = 30\text{ min};$ Tárolási idő: $\Delta t_2 = 7\text{ nap};$	Kötelező
Fagyálló folyadék	Permetezés + Beletörlés + Ráöntés + Belemártás + Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Kötelező	Akkumulátor folyadék	Beletörlés + Belemártás + Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális
Útszóró sóoldat	Permetezés + Ráöntés + Alámerítés $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Opcionális	Hűtőfolyadék (Bosch)	Beletörlés + Ráöntés + Belemártás $T = 50\text{ °C}; \Delta t = 48\text{h};$	Kötelező
-	Szemrevételezés	Kötelező	-	Szemrevételezés	Kötelező
-	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	-	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező
-	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	-	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező
-	Funkció tesztek	Kötelező	-	Funkció tesztek	Kötelező
-	Dimenzió tesztek	Kötelező	-	Dimenzió tesztek	Kötelező
-	Anyagvizsgálati mérések	Opcionális	-	Anyagvizsgálati mérések	Opcionális

5.3. táblázat. A korróziós tesztek szekventálása és parametrizálása. A dimenzió tesztek tulajdonképpen a csatlakozóház méreteinek változására vonatkoznak. Az anyagvizsgálati módszerek nagyon változhatnak attól függően, hogy milyen tulajdonságban érdekeltek a mérnökök. A T jelöli a hőmérsékletet, az RH a relatív páratartalmat, a Δt a teszt időtartamát és az RT a szobahőmérsékletet.

Klimatikus tesztek									
Ciklikus klímateszt		Hosszútávú klímateszt		Termikus sokkolás		Ipari klímateszt		Sópermet teszt	
Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg	Teszt szekvencia	Fontossági jelleg
Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező
Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező
Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Kévert gázkeverék ($\text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{NO}_2, \text{Cl}_2$); $T = RT$; $RH = 75\%$; $\Delta t = 21\text{ nap}$; Gáz hozam $= 1\text{ m}^3/\text{h}$;	Kötelező	Parti / egyszerű sópermet teszt; Északi sópermet teszt	Kötelező
Ciklikus hőmérséklet: $T = -40\text{ °C} / 130\text{ °C}$; Ciklikus páratartalom: $RH =$ környezeti / $98\% - 100\%$; Akkl. idő: 8 óra; Transzfer idő $< 2\text{ óra}$; Ciklusszám: 40;	Kötelező	Öregítés nagy hőben: $T = 130\text{ °C}$; $RH = 95\%$; $\Delta t = 1000\text{ h}$; Öregítés alacsony hőmérsékleten: $T = -40\text{ °C}$; $\Delta t = 48\text{ h}$; Öregítés száraz hőben: $T = 130\text{ °C}$; $\Delta t = 48\text{ h}$; Visszaerősítés: $T = RT$; $\Delta t = 48\text{ h}$;	Kötelező	Termikus sokkolás levegőben: $T = -40\text{ °C} / 130\text{ °C}$; Akkl. idő: 30 perc; Transzfer idő $< 10\text{ mp}$; Ciklusszám: 144;	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező
Szemrevételezés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	Termikus sokkolás vízben (IP6X); Levegőben: $T = 130\text{ °C}$; Akkl. idő: 30 perc; Vízben: $T = 0-1\text{ °C}$; Ciklusszám: 5;	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező
Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	IPX9K teszt (nagy nyomású, nagy hőmérsékletű vizsgálat)	Opcionális	Funkció teszt	Kötelező	Funkció teszt	Kötelező
Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	Szemrevételezés	Kötelező	-	-	-	-
Dimenzió teszt	Kötelező	Dimenzió teszt	Kötelező	Szigetelési ellenállásmérés	Kötelező	-	-	-	-
Funkció teszt	Kötelező	Funkció teszt	Kötelező	Négy pontos ellenállásmérés	Kötelező	-	-	-	-
-	-	Törés teszt	Kötelező	Dimenzió teszt	Kötelező	-	-	-	-
-	-	Aljat - csatlakozó ház megtartó teszt	Kötelező	Funkció teszt	Kötelező	-	-	-	-

5.4. táblázat. A klímatesztek szekventálása és parametrizálása. A T jelöli a hőmérsékletet, az RH a relatív páratartalmat, a Δt a teszt időtartamát és az RT a szobahőmérsékletet.

Binomiális eloszlás alapú teszt tervezés

A mi esetünkben minden tesztelni kívánt n csatlakozó megközelítőleg egyforma a teszt elején, ezért minden t időpillanatban azonos $R_i(t) = R(t)$ megbízhatósággal (vagy túlélési függvénynel)

fognak rendelkezni. Abban az esetben ha t ideig nincs meghibásodás, akkor annak a valószínűsége, hogy mindegyik minta t ideig túlél $R(t)^n$. Másszóval annak a valószínűsége, hogy legalább egy meghibásodást megfigyelünk t ideig $P_A(t) = 1 - R(t)^n$. Ekkor azt mondhatjuk, hogy ha egy n darab minta közül t ideig egyetlen sem hibásodott meg, akkor a minimális túlélési ráta $R(t)$ P_A konfidencia szinttel, ugyanis

$$\begin{aligned} P_A &= 1 - R(t)^n \\ R(t) &= (1 - P_A)^{1/n} \end{aligned} \quad (5.1)$$

mivel általánosan a binomiális eloszlás esetén a

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot (1 - R(t))^i \cdot R(t)^{n-i} \quad (5.2)$$

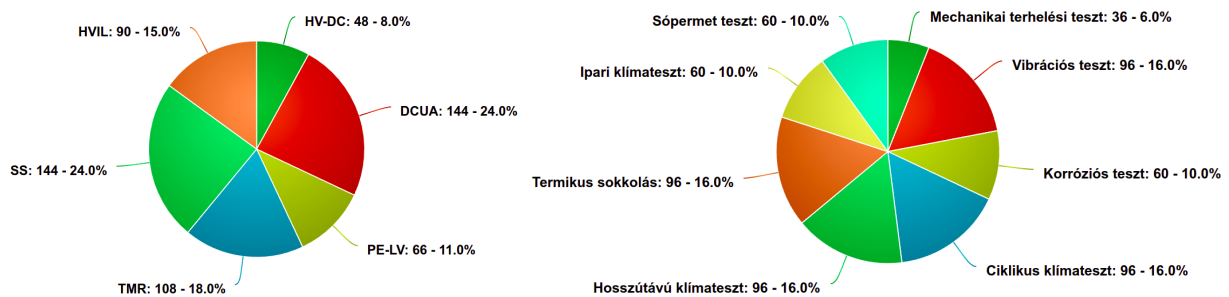
ahol x a meghibásodások száma. Az 5.1 egyenletet hívják a "success run" alapegyenletének. Annak érdekében, hogy megbecsüljem a megfelelő mintaszámokat jelen dolgozatban a legegyszerűbb esetet használtam, mégpedig a fentebb levezetett képletet. Természetesen nem a binomiális eloszlás az egyetlen amit használni lehet ezen számolásokra. Sok esetben Weibull-eloszlásból indulnak ki, ami kiváló a "leggyengébb láncszemű" rendszerek modellezésére, így arra is hogy a teszt minták meghibásodását jellemezze. Különösen kedvelik a három paraméterű Weibull-eloszlást, amely nagyon rugalmas és erős eszköznek számít a megbízhatósági statisztikában. De nem csak az eloszlást változtathatjuk meg, hanem mint mondtam a teszt jellegét, vagy akár felhasználva előzetes teszt eredményeket Bayes analízis segítségével pontosabbá tehetjük a becsléseinket. Egy harmadik lehetőség a különböző túlterhelési és tesztidő növelési faktorok bevezetése.

A követelményrendszer megkívánja, hogy komponens szinten a 99%-os megbízhatósági értékkel dolgozzunk, vagyis $R(t) = 0.99$. Az elvárt konfidencia szint az a legkevesebb $P_A = 0.95$. Ennek megfelelően egyetlen teszt szekvencia elvégzéséhez kb. $n \approx 299$ db. mintára van szükségünk. Mivel teszt szintű árazást tekintve nem rendelkezünk adatokkal, ezért csak a nagy számok törvényét követve tudtam megbecsülni, hogy egy teszt ára átlagosan mintánként durván 400 €. Feltételezve, hogy néhány százalékot lehet javítani a megbízhatóságon és konfidencia szinten az előbbiekben említett változtatásokkal, arra a következtetésre jutottam, hogy a magas minőséghez elegendő számunkra az $n = 30$ tesztenkénti mintaszám, amely a tisztán binomiális elmélet szerint $R(t) = 0.9$ megbízhatóságnak felel meg $P_A = 0.95$ konfidencia szint mellett. Ez a mintaszám tovább csökkenthető abban az esetben ha pl. a csatlakozókat gyártó beszállító már elvégzett jó néhány tesztet. Ekkora akár a tesztenkénti $n = 6$ darab minta is elég a biztos statisztika felállításához. A mintaszámok megállapításokat azt is figyelembe vettem, hogy konnektoronként mely tönkrementeli módok előfordulási valószínűsége a legnagyobb és annak megfelelően állapítottam meg a

mintaszámot $n_1 = 6$, $n_2 = 12$ vagy $n_3 = 30$ -ra. Az adatokat a 5.5 táblázatban és 5.2 ábrán foglaltam össze.

Csatlakozó	Mechanikai terhelési teszt	Vibrációs teszt	Korróziós teszt	Ciklikus klímateszt	Hosszútávú klímateszt	Termikus sokkolás	Ipari klímateszt	Sópermet teszt
HV-DC	6	6	6	6	6	6	6	6
DCUA	6	30	6	30	30	30	6	6
PE-LV	6	6	12	6	6	6	12	12
TMR	6	30	12	12	12	12	12	12
SS	6	12	12	30	30	30	12	12
HVIL	6	12	12	12	12	12	12	12

5.5. táblázat. A teszteléshez szükséges mintaszámok konnektor típus és teszt szerinti lebontásokban.



5.2. ábra. A bal oldali ábrán a teljes mintaszám konnektor típusok szerinti felosztását, míg a jobb oldalon a tesztek szerinti felosztását láthatjuk;

Forrás: Saját szerkesztés.

A tesztekhez szükséges időt felülbecsültem, ugyanis a tesztek kiértékeléséhez és a szállításhoz szükséges extra időtartam ezt indokolja. A mechanikai tesztek esetében úgy számoltam, hogy átlagosan napi 6 mérést biztosan el tudnak végezni és kiértékelni, így az összesen 36 csatlakozóra 6 napot szántam. A vibrációs tesztek tekintetében említettem, hogy két csoportra oszthatóak a csatlakozók: azok amelyek az inverteren és azon amelyek a hajtás közelében helyezkednek el. Azzal a feltételezéssel is éltem, hogy egyetlen vibrációs tesztpadra (rázóra vagy "shakerre") rá tudnak tenni számos csatlakozópárt, ezért két tömbben letudható ezen csatlakozók mérése. Az tengelyenkénti 22 óra, az minimum három napnak felel meg tömbbönként, de felülbecsültem összesen 10 napra. A korróziós tesztek rendszerint úgy végzik, hogy minden kémiai anyagot teljesen új csatlakozókra visznek fel. A mi esetünkben ez azt jeletené, hogy mivel legalább hat anyagra kötelezően tesztelni kell a konnektorokat, ezért meghatszorozódna a konnektor minta igény ezen teszteknel. Azért, hogy ezt elkerüljük (habár több időt vesz igénybe), de úgy is el lehet végezni ezen tesztek, hogy egymás után tesszük a különböző vegyszerekbe a csatlakozókat, így egyrészt magasabb megbízhatóságot elérve (ha sikeresen teljesítik a tesztet), másrészt megspóroljuk a minták árát. Itt még felmerül a kérdés, hogy a hosszabb idő miatt (vagyis tárolási költségekkel együtt) nem kerül többre a tesztelés, mintha párhuzamosan tesztelnénk rövid idő alatt. Erre a kérdésre a további

munkám során fogom keresni a választ. Az elmondottaknak megfelelően mivel egy teszt két napot vesz igénybe két típusú anyag kivételével (ahol a tárolási idő hét nap), ezért összesen 50 napot szántam ezen tesztek elvégzésére és kiértékelésére. Mivel tudjuk a ciklusszámokat és az időtartamokat, ezért a többi tesztnél szintén egyszerű volt megbecsülni az időtartamokat, amelyeket a 5.6 táblázatban láthatunk. A becült értékek szerint ha párhuzamosan tesztekünk 50 munkanap alatt, azaz durván két és fél hónap alatt végezni lehet mindennel.

	Mechanikai terhelési teszt	Vibrációs teszt	Korróziós teszt	Cilikus klímateszt	Hosszútávú klímateszt	Termikus sokkolás	Ipari klímateszt	Sópermet teszt
Idő (nap)	10	10	50	20	50	10	25	10

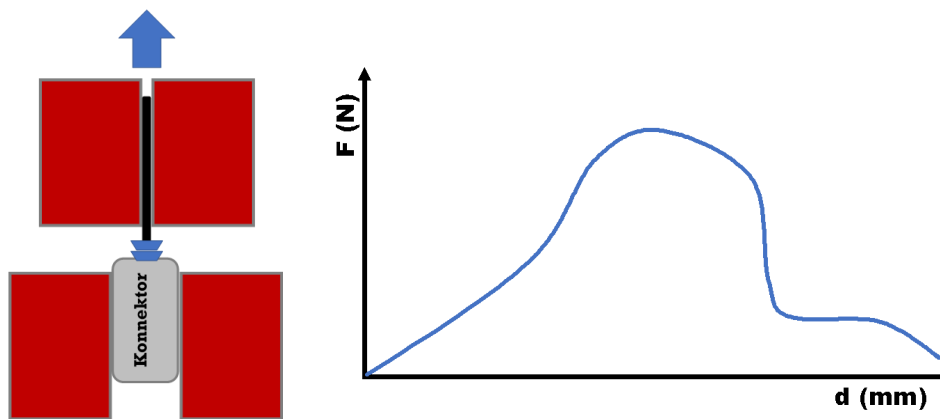
5.6. táblázat. A teszteléshez szükséges idő (napokban kifejezve) teszt szerinti lebontásokban.

További javaslatok merültek fel a validációs terv optimalizálására a munkám során. Mivel a Robert Bosch Kft. (vagy GmbH) műszerparkjában rendelkezünk olyan rázópaddal, amelyre egy teljes klímakamra rászerezhető, ezért adódik annak a lehetősége, hogy még inkább kompakttá tegyük a tervet. A vibrációs tesztek során amúgyis szükséges a hőmérséklet ciklikus változtatása (mint azt a tervekből láttuk), ezért összevonhatjuk a vibrációs tesztet, a cilikus klíma tesztet és a hosszútávú klímatesztet, ugyanis ezeket el lehetne végezni ugyanabban kamrában egymás után anélkül, hogy meg kellene állítani a tesztelés folyamatát, át kellene szállítani vagy helyezni másik kamrába a mintákat. Ez az eljárás amennyiben működik, sokkal hatékonyabbá teheti a tesztelési folyamatokat, arról nem is beszélve, hogy a többszörös terhelés extrém módon növelné a konfiden-
cia és megbízhatósági szintet, illetve ha úgy tetszik csökkentené a szükséges mintaszámot. Ezzel a kérdéskörrel is az elkövetkezendő időszakban fogok foglalkozni.

6. fejezet

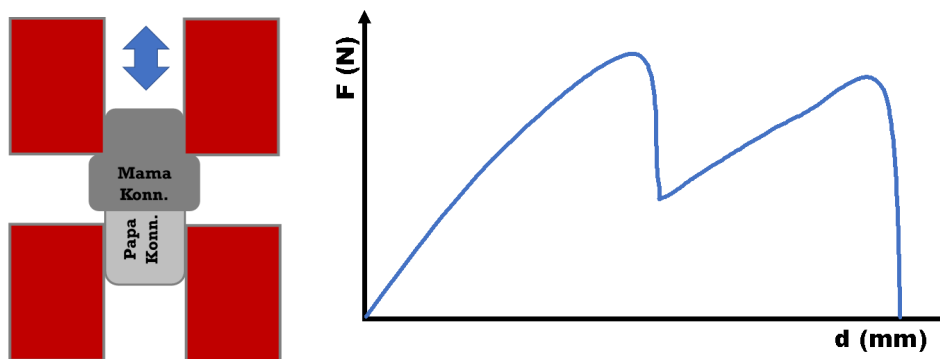
Teszt eredmények

Mivel az általam tervezet tesztek még kidolgozás alatt vannak, ezért korábbi eredményekre támaszkodhatok. Ezekből szeretném a validációs tervem szerint releváns teszt eredményeket bemutatni a DCUA csatlakozó tekintetében. Mivel a titoktartási szerződés értelmében nem mutathatok konkrét ábrákat és fényképeket a mérésekből ezért sematikus rajzok és görbék segítségével mutatom be a méréseket. Az 6.1, 6.2 és 6.3 ábrák bal oldalán a tesztberendezést, a jobb oldalon pedig a mérések tipikus erő-elmozdulás görbéit láthatjuk. A kábel-aljzat megtartóerejének mérése során a pár milliméteres elmozdulás alatt elérünk egy maximális erőértéket, amelynek meg kell felelnie az előírt standardnak. A görbében a meredek esés a kábelanyag vagy kábel-aljzat rendszer elfáradását jelzi, amíg a konstans plató a szakadás folyamatának felel meg, vagyis relatív kicsi konstans erővel húzható szét a komponens. A teljes csatlakozó megtartóerejének vizsgálata során az összetolt, többszörös zárral ellátott konnektorpárt széthúzzák. Ebben az esetben az elmozdulásspektrum közepénél látható esés az erőben az egyik zár meghibásodását jelzi. Az aljzat házba történő behelyezésénél pedig egy csúcsot láthatunk a helyes pozíció elérése során, amely az aljzat expanzióját jelzi. Ezek után további terhelés esetén az erő nagyon meredeken nő, mivel nem lehet tovább nyomni az aljzatot. A vibrációs teszt padot és a mért ellenállást az idő függvényében az 6.4 ábrán lehet látni, míg a vibráció következtében végbemenet dörzskorróziót optikai mikroszkópos vizsgálat során vizsgálják és tipikusan megfeketedett kontakt felületeket láthatunk, amely az oxidált fémtörmelék jelenlétét jelzi. Itt arra hívnám fel a figyelmet, hogy a dörzskorrózió során habár nem változik nagymértékben az ellenállás, de a felületi bevonat egy jó része lekophat, ami kellő környezeti elszigeteltség hiányában végzetes lehet egy konnektor számára. A korróziós tesztek során csupán beszáradások nyomait vehetjük észre a különböző anyagokkal kezelt konnektorokon (6.5 ábra). A környezeti tesztek közül megemlíthetjük a 6.6 ábrán szereplő öregítési (hosszútávú) klímatesztet, amelyet sikeresen teljesített a csatlakozó, csak úgy, ahogy a termikus sokk tesztet is



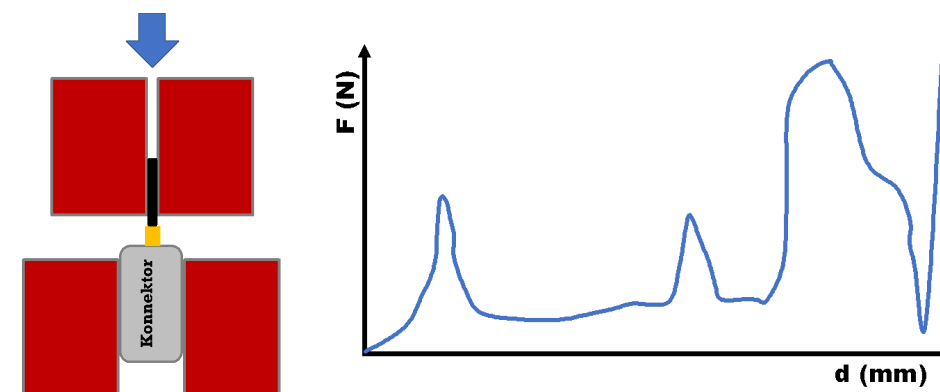
6.1. ábra. A kábel-aljzat megtartóerejének mérése. Az elvárás itt 60 N a DCUA csatlakozó tekintetében, amit szépen teljesített a csatlakozó a tesztek során.

Forrás: Saját szerkesztés.



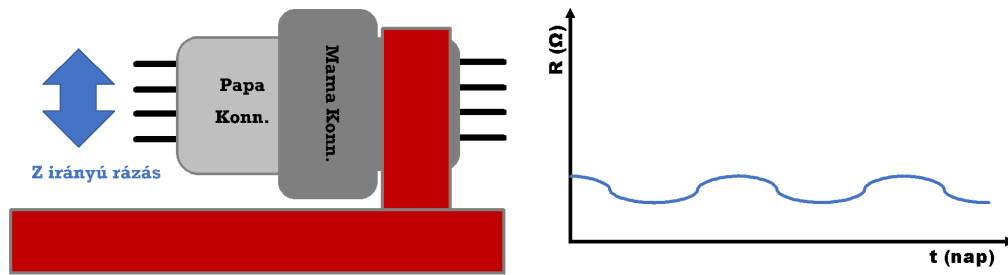
6.2. ábra. A teljes csatlakozás megtartóerejének vizsgálata. A követelmény 100 N volt a DCUA esetében, amit teljesítette a konnektorpár.

Forrás: Saját szerkesztés.



6.3. ábra. Az aljzat házba történő behelyezéséhez szükséges erő mérése. Itt nincs előírt standard a DCUA konnektor esetében.

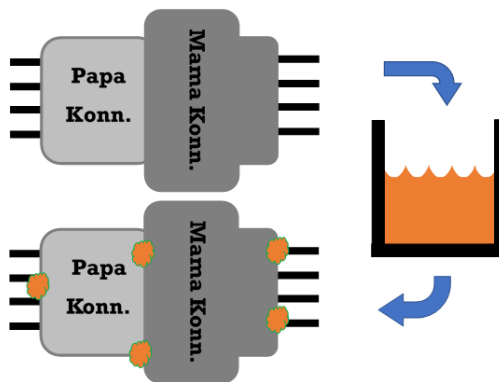
Forrás: Saját szerkesztés.



6.4. ábra. A bal oldali ábra a Z (normális) irányú rezgetési felállást ábrázolja, míg a jobb oldali ábra a teszt során mért ellenállást. Mivel nem tapasztaltunk nagy fluktuációt vagy változást az ellenállásban és értéke megfelelt a szabványokban előírtaknak, ezért a teszt sikeresnek mondható.

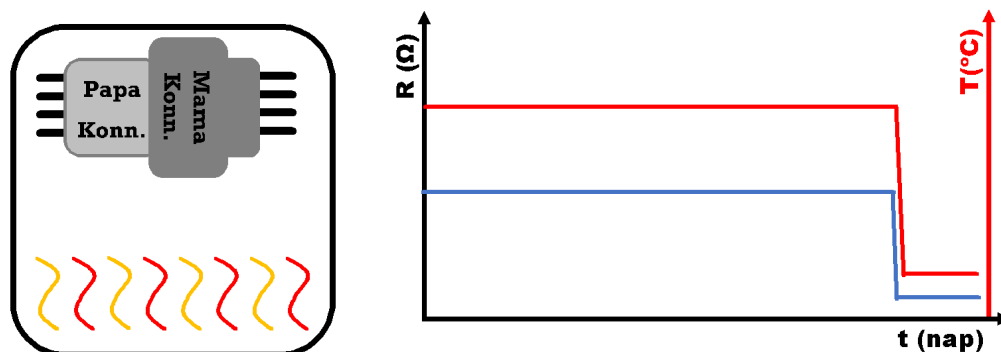
Forrás: Saját szerkesztés.

az 6.7 ábrán. A termikus sokkolás úgy történik, hogy két termikusan elszigetelt, nagyon különböző hőmérsékletű tér között liftezteti a konnektort a berendezés, így garantált a gyors hőmérséklet váltás.



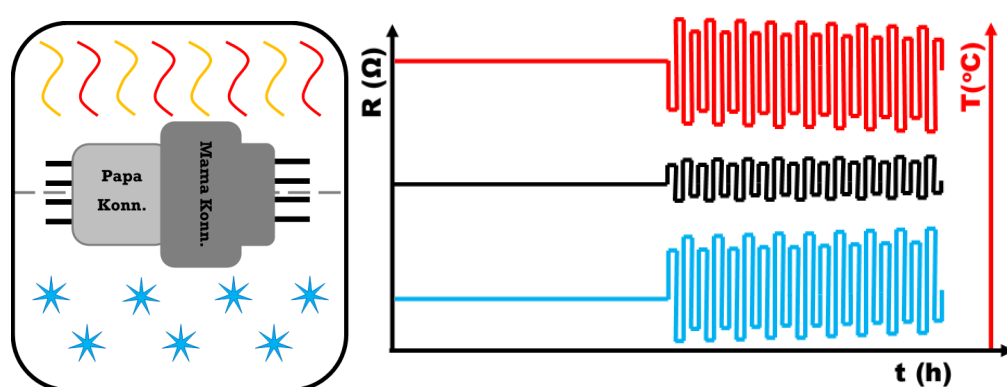
6.5. ábra. A korróziós teszt során leginkább beszáradások nyomait figyelhetjük meg a csatlakozókon, amennyiben sikerrel átmert a teszten.

Forrás: Saját szerkesztés.



6.6. ábra. A hosszú távú klímatesztet is sikeresen teljesítette a csatlakozó. Az ellenállás csak a legvégén változik értelemszerűen, amikor a visszaeresztés megtörténik.

Forrás: Saját szerkesztés.



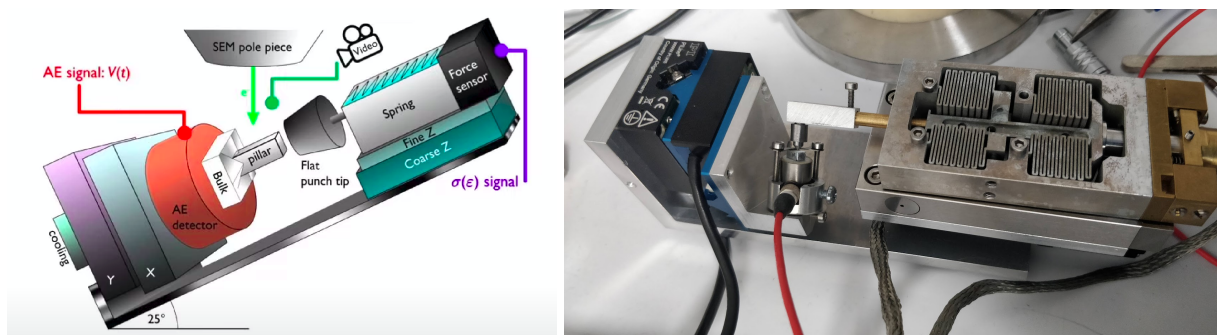
6.7. ábra. A ciklikus tesztelés végére is helytállt a csatlakozópár.

Forrás: Saját szerkesztés.

7. fejezet

Kísérleti módszerek és eszközök

Az előző fejezetben néhányszor említettem, hogy egy új tesztmódszert javasolunk a dörzskorrózió in-situ vizsgálatára. Az ötlet lényege az, hogy mivel a tesztpados rázások esetén általában a 0,1 - 10 kHz tartományba esnek a rezgések frekvenciái [1], ezért azok nagyon jól elkülöníthetőek lennének a diszlokációmozgások, repedések és törmelék képződés hangjaitól amelyek a 100 kHz - 1,5 MHz tartományba esnek [2, 3]. Mivel az eddigi dörzskorróziós kísérletek azt mutatták, hogy a súrlódási együttható időben változik merőleges nyomóerőtől és frekvenciától függően [4], ezért arra a következtetésre jutottunk, hogy a rendszer csak nagyon sok ciklus után érheti el a stationárius állapotát, vagyis a dörzskorrózió során a disszipált energia és mechanikai hullámok (akusztikus jelek) is minőségileg változhatnak. Ez lehetőséget ad a fretting időbeli követésére akusztikus emisszió segítségével, amennyiben fellelhető bármiféle korreláció a jelek és a deformációs állapot között. Mielőtt rátérünk az eredmények tárgyalására röviden bemutatom a kísérleti apparátust.



7.1. ábra. A bal oldali ábrán az indenter sematikus rajzát láthatjuk, míg a jobb oldalon az eszközről készült valós felvételt. A sematikus rajz egy korábbi kísérletből származik, ott az elrendezés kimondottan mikronos méretű oszlopok összenyomására volt kitalálva. Ezt módosítottuk úgy, hogy egy felületre merőlegesen tudjuk mozgatni a tűt.

Forrás: Dr. Ispánovity Péter Dusán: "Földrengések Zn egykristály mikrooszlopokban" (Atomcsill, 2021.03.11); Saját fotó;

A kísérleteim során az ELTE FEI QUANTA 3D FEG pásztázó elektronmikroszkópját használtam az in-situ kísérletek nyomonkövetésére. A tanszék által fejlesztett és a mikroszkópba helyezhető nanoindenterünk (7.1 ábra) segítségével végeztem el a dörzskorróziós kísérleteket a mikronos skálán. Az indenter egy x irányú és egy y irányú mozgatható tárgyasztalból áll, amire rá van helyezve az akusztikus detektor (gyártó: Physical Acoustic), arra pedig a mintát rögzítjük egy vékony fém szíjjal. A minta és detektor közé felviszünk egy akusztikai zsírréteget ami a mechanikai hullámok megfelelő közvetítéséért felel. Az akusztikus detektorból származó jelek először egy előerősítőn (Vallen Systeme AEP5H) haladnak át, majd a Vallen AMSY-6 erősítő és jelfeldolgozó egység továbbítja az adatokat a vezérlőszámítógép felé. A Vallen AMSY-6 mintavételezési sebessége 2 MHz, vagyis a tízed MHz-es tartomány elemzésére még épp alkalmas. Az eszköz további részei egy z irányú léptető motor, amely a durva mozgásokért felel, illetve a rászerelt piezoelektromos aktuátor, ami pedig a nm-es pontosságú több tízmikronos mozgásokat végzi. A piezoelektromos aktuátor tetején található az erőmérő egységünk ami lényegében egy rugóból és egy kapacitív elmozdulásmérőből áll. Tudva a pontos elmozdulást és a rugóállandót meghatározható minden időpillanatban az erő. Az x - y és durva z mozgatók $1\text{ }\mu\text{m}$ -es pontossággal képesek mozogni, amíg a piezoelektromos aktuátor felbontása 1 nm . A kapacitív szenzor egyik felén található erőmérő rugó rugóállandója kb. $10\text{ mN}/\mu\text{m}$ vagyis 10 kN/m , így a maximális erőfelbontásunk $10\text{ }\mu\text{N}$. Az új elrendezés következtében a merőleges nyomóerőt nem tudtuk közvetlen módon mérni, azonban mivel kis elmozdulásokról beszélünk (max. $30\text{ }\mu\text{m}$) úgy tekintettük, hogy a merőleges nyomóerő gyakorlatilag konstans maradt és csak a súrlódási együttható változott. Ezzel a feltételezéssel a szakirodalom is élnek, olyannyira hogy külön kutatások készültek arra, hogy mi történik ha változik dörzskorrózió közben a normális nyomóerő [5, 6]. Továbbá mivel olyan a kialakítása a kísérleti szerkezetnek, hogy nem tudjuk az oldalirányú rugóállandó értékét és nem tudtuk megmérni a pontos normális nyomóerőket, ezért az x - y motorok mozgásával állítottuk be a normális erőhatást. $10 - 30\text{ }\mu\text{m}$ -et léptünk ugyanolyan mértékben az x és y irányú motorokkal, így a minta és tű nem mozdult el egymáshoz képest, ellenben az erőhatás amennyire csak lehetett merőleges maradt a minta felületére. Tehát itt azt emelném ki, hogy más a felületre normális rugóállandó értéke, mint a z -irányú rugóállandójé, azonban nem tudjuk mennyi és ezért csak relatív értékekben számolhattunk a normális erővel (a viszonyítási érték a $10\text{ }\mu\text{m}$ -es elmozdulási értékeknek felel meg).

A második eszköz amelyet makroszkópikus minták elemzésére használtam az ELTE Anyagfizikai Tanszékén lévő Mechanikai Tulajdonságok Laboratórium összenyomó-berendezése (7.2 ábra). Az összenyomó alkalmazhatóságot egy léptetőmotor vezérli, melynek felbontása $2\text{ }\mu\text{m}$ körüli. Az erőmérő cella 1 N pontossággal képes széles tartományban ($10\text{ N} - 5\text{ kN}$) erőt mérni.



7.2. ábra. A Mechanikai Tulajdonságok Laboratórium összenyomó berendezéséről láthatunk felvételeket. Két alumínium lap van befogva a 3D nyomtatott pófák közé és összenyomva a dörzskorróziós kísérletek elvégzése céljából. A minták oldalára szerelt detektor rögzítette az akusztikus jeleket.

Forrás: Saját fotó; Saját fotó;

Mivel nem rendelkezünk megfelelő befogófejjel, ezért Dassault Systèmes - SolidWorks tervezőprogramban megterveztem elemenként egy egyszerű befogófejet, majd 3D nyomtatással PLA anyagból kinyomtattam. A PLA-ról azt kell tudni, hogy a műanyagok között olcsó és jó szerszámkészítési anyagnak számít, amennyiben nem nagyon nagy erővel dolgozunk, mivel relatív nagy Young-modulus-szal (4-5 GPa) rendelkezik. A másik előnye a műanyag befogófejnek az, hogy a gép rezgéseitől még jobban hangszigeteli a vizsgálni kívánt mintát, ezzel csökkentve a háttérzajt.

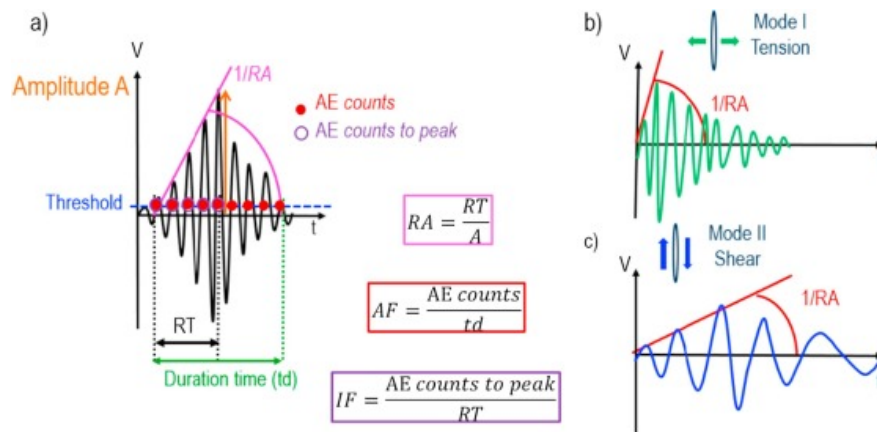
Kísérleteim során több mintát is használtam. A pásztázó elektronmikroszkópban végzett vizsgálatok során három mintát használtam, mégpedig egy cink egykristályt, amelyet D2 Struers elektrolitban elektropolíroztam 12 V feszültségen és 1 A áramerősségen fél percre; egy durva felületű polikristályos réz korongot és egy arany bevonattal ellátott csatlakozótüskét (7.3 ábra). A makroszkópikus kísérletekhez két durva felületű alumínium lapot használtam fel. Az in-situ kísérletek közül mivel a Zn minta az akusztikus emisszió szempontjából a legaktívabb (révén, hogy könnyen mikrorepedések jönnek létre az anyagban), illetve az aranyozott bevonatú csatlakozótüske és rézlapka kevésbé aktívak, ezért a Zn mintán mért jeleket használtam fel a dolgozatomhoz. Érdeemi statisztikát a másik két anyag esetén is el lehetne érni, csupán nagyságrendekkel több időbe telne,



7.3. ábra. Az in-situ kísérletek során használt minták makroszkópikus fényképe.

Forrás: Saját fotó;

mint a Zn esetében.



7.4. ábra. Az a) alábrán egy akusztikus jel és annak jellemzői láthatóak. Az átlagos frekvencia megegyezik a teljesbeütésszám és a jel időbeli hosszának hányadosával. Értelmszerűen a felfutási frekvencia a felfutási idő és az addig számolt beütések hányadosa. Az RA paraméter pedig a felfutási idő és az amplitudó hányadosa, amely kvázi az impulzus energiasűrűségét hivatott jellemezni.

Forrás: Rodríguez, P., Celestino, T. B. (2019). Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks. Engineering Fracture Mechanics, 210, 54-69. [7]

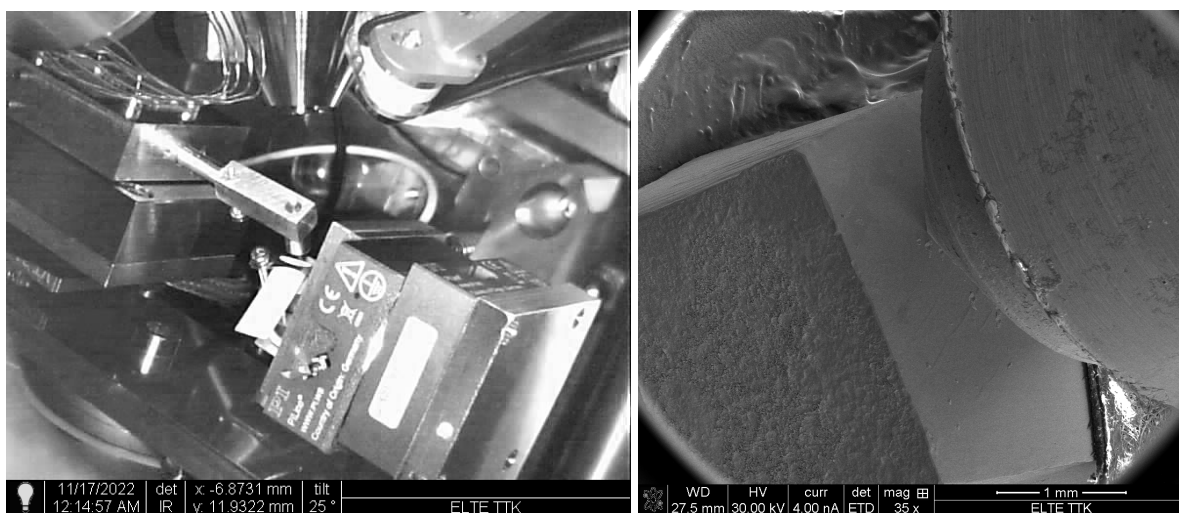
Az akusztikus jelek több jellemzőjét is figyelembe vettem azok elemzése során, úgy mint a jel kezdetének időpontját, az amplitudóját, a beütésszámát, az energiáját, a négyzetes középértékét, a felfutási idejét, az átlagos és felfutási frekvenciáját, a jel időtartamát és végül a jel ú.n. RA paraméterét amelyre a következőkben kitérek. Először tekintsük egy akusztikus jel 7.4 ábrán látható vázlatát. Az akusztikus jel akkor válik igazán jellé, amikor ki tud magaslani a háttérzajból. A küszöbérték beállítása ezért fontos, hogy a háttérrel előzetes mérések alapján le tudjuk majd vonni. Egy jel akkor detektálódik ha megüti a küszöböt és innentől számoljuk a jel kezdetét is. A felfutási

idő az a kezdeti idő és azon időpont közti különbség amikor a jel a legnagyobb amplitudót produkálja. A jel időtartama (vagy időbeli hossza) az első beütéstől az utolsóig tart. A dolgozat további részében a mérések statisztikai elemzésére térek át.

8. fejezet

Anyagtudományi vizsgálatok eredményei

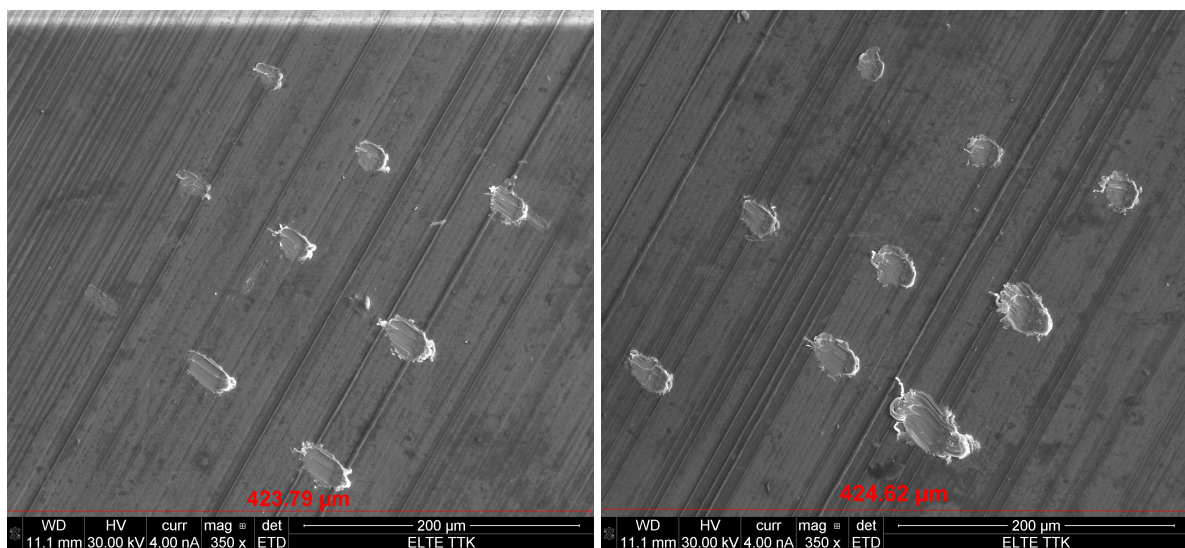
Az in-situ kísérleteim során (8.1 ábra) a fő változtatható paramétereket vizsgáltam elsőként, mint normális nyomóerő, dörzsölési frekvencia és amplitudó. Négyzettrácsokba rendezve 27 féle mérést készítettem el és fotóztam le (8.2 ábra), annak érdekében, hogy megbizonyosodjak a paraméterek hatásáról. A felvételeken képfeldolgozó algoritmusokat használva kiválasztottam a lekoptatott területeket, majd kiszámoltam nagyságukat és ezt vetettem össze a beállított kísérleti paraméterekkel. Az eredményt a 8.3 ábrán láthatjuk. Ahogy korábban is mondtam, itt a nyomóerő csak egy relatív érték, mert nem tudtuk kellőképpen kalibrálni, de az erős korreláció a kopás mértéke és a növekedő merőleges nyomóerő között így is látható. Mindhárom paraméter pozitívan korrelált a kopás mértékével.



8.1. ábra. A pásztázó elektronmikroszkópban a mikroszkóp kameraképe mutatja a berendezést mérés közben. A jobb oldalon pedig a felhasznált vídia (volfrám-karbid) tű hegyét láthatjuk, amivel a mintát dörzs-korrodáltuk.

Forrás: Saját fotók;

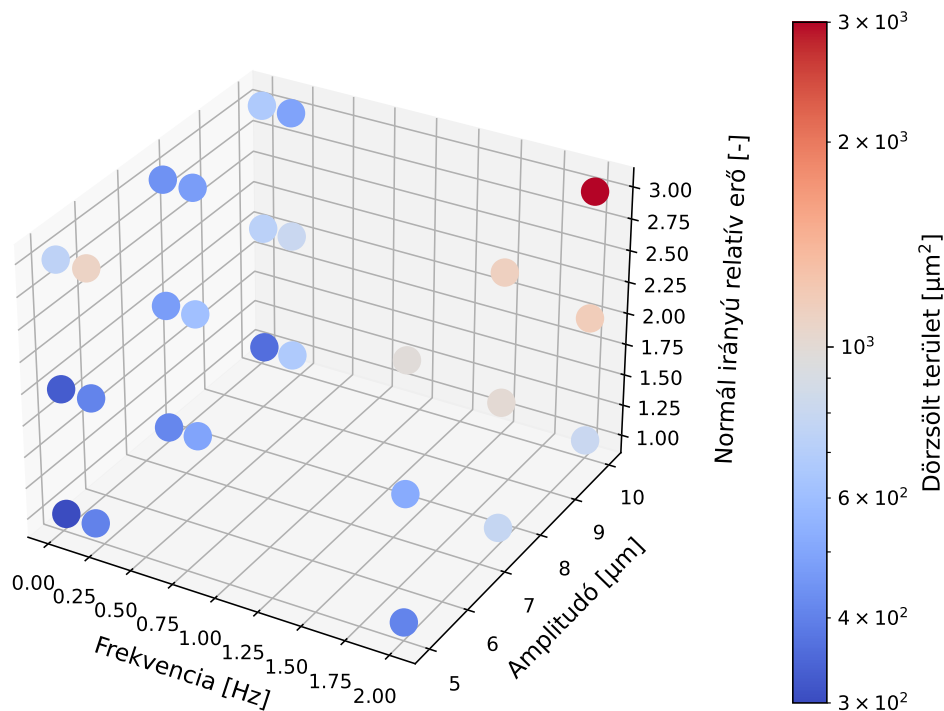
Mostmár, hogy ismerjük a kísérleti paraméterek hatását, elmezzük az akusztikus adatokat is. Az akusztikus jelek elemzésekor az energiák szerinti eloszlást és a visszatérési idők eloszlását vizsgáltam. Az akusztikus jellekre jellemző korrelációs mátrixot is felállítottam, hogy a különböző jelparaméterek közti összefüggéseket szemléltethessem. A 8.4-es ábrán láthatjuk a mikro-dörzskorrozio és a tömbi mintán történt koptatásból származó energiaeloszlásokat. Habár nem teljesen egyeznek meg elég közeli értékeket kapunk a két különböző kísérletre. Azt is fontos kiemelni, hogy ezek hatványfüggvény trendet követő eloszlások, vagyis skálafüggetlenek, minden méretű energia előfordulhat bizonyos valószínűséggel, amelyet az eloszlásnak megfelelő túlélési függvény adna meg. A kitevő alacsony értéke arra utal, hogy a mérések során nagy energiájú jeleket detektáltunk. Ha megvizsgáljuk a visszatérési idők, azaz két detektált jel kezdete között eltelt idők eloszlását akkor is azt tapasztaljuk, hogy habár nem megegyező értékeket kapunk, de nagyságrendileg megegyeznek (8.5). Ráadásul a visszatérési idők esetében pozitív a kitevő, vagyis úgy értelmezhetjük, hogy ez a rendszer a klasztereződést részesíti előnyben, mivel kétszer akkora eltelt idő a kettő a hatványadikonszor több jelet fog produkálni. Továbbá egy levágást figyelhetünk meg a 1-10 másodpercnek megfelelő intervallumban amely egy karakterisztikus skálaméretet jelent, vagyis a legtöbb jel ilyen időközökkel jelentkezik.



8.2. ábra. Ezen a két kísérlet tömbön kívül még egy ugyanilyen készült a kísérleti paraméterek vizsgálatának céljából.

Forrás: Saját fotók;

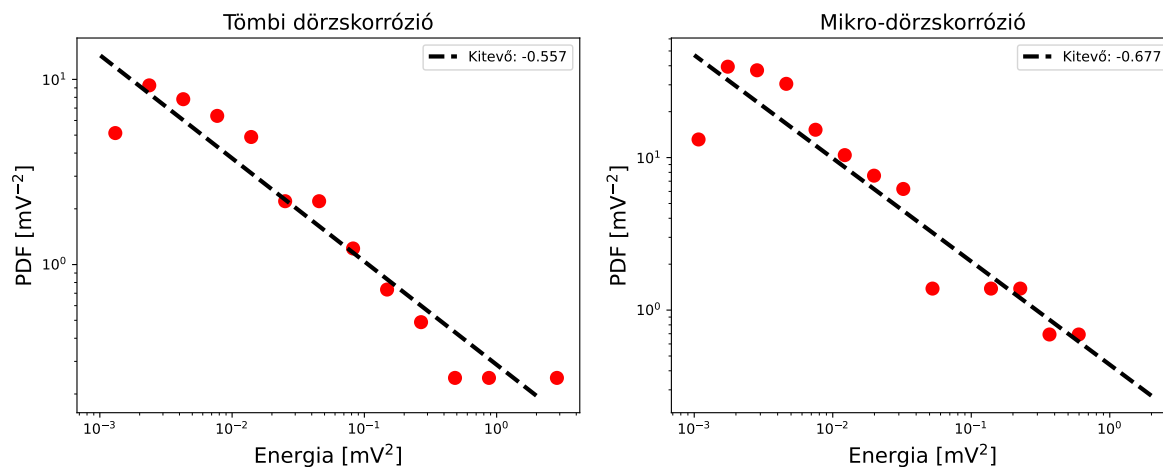
Továbbá a jelek paraméterezést vizsgáltam és elkészítettem a korreláció mátrixaikat ugyanúgy tömbi és mikromechanikai adatokra is (8.6 ábra). Erős korreláció olvasható le az amplitúdó, az energia és a jel intenzitás gyökös középértéke között. A beütésszám természetesen a jel hosszával korrelál és a felfutási frekvenciával, érdekes módon az átlag frekvenciával viszont nem.



8.3. ábra. Négy dimenziós térben foglaltam össze a paraméterek dörzskorróziós hatását. A paraméterek pozitív korrelációt mutatnak a kopás mértékével.

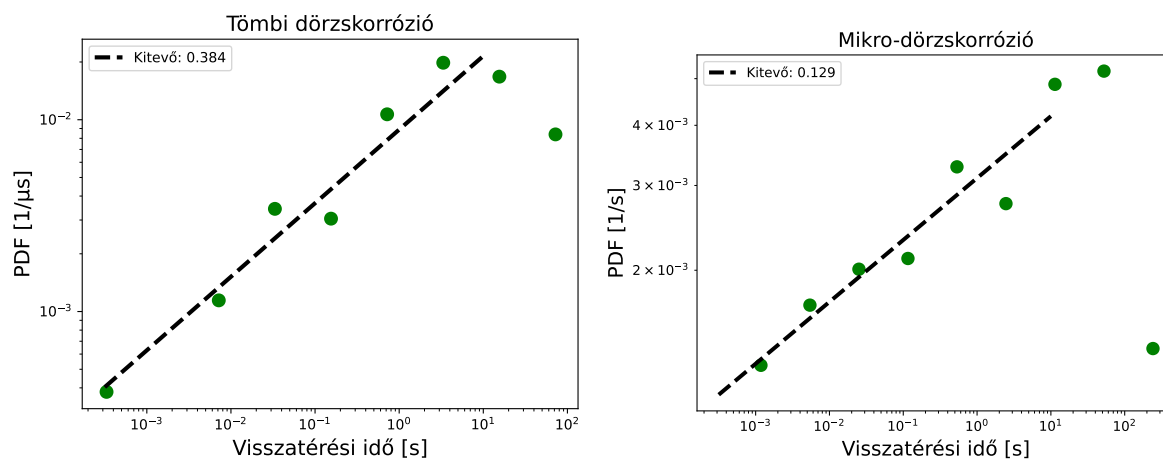
Forrás: Saját ábra;

Végezetül azt vizsgáltam, hogy a feszültség-deformációs görbék jellege a ciklusszám növelésével változik-e vagy sem. Tekintsük a 8.7 ábrát. A tömbi mérések esetén mivel viszonylag nagy volt a pontatlanság az erőmérésben, ezért fluktuáló görbéket kapunk, viszont így is jól behatárolhatóak a ciklus szakaszai. A felfutási szakaszokban majdnem áll a két lemez egymáshoz képest, majd elmozdulnak és konstans erővel súrlódnak adott elmozdulásig, majd ismét újramezdődik az egész. Az ábrákon amit érdemes megfigyelni az a kvalitatív tény, hogy ha különböző számú ciklus után ránézünk a feszültség-deformációs görbékra akkor jelentős változást tapasztalhatunk, mégpedig az erők nőnek már kisszámú ciklus után is. A súrlódási együtthatók esetében egy relatív változást tudunk csak megadni, de ebből is látszik, hogy akár 40%-al is nőhet már kis számú ciklus esetén is. Azt is megfigyelhetjük, hogy a relatív súrlódási együttható - ciklus görbék egy tranzienssel szakasszal kezdődnek, vagyis egy nagy fluktuációval az erőkben. Ez a kopás kezdeti állapotát jelzi, amikor az oxid vagy felületi réteg elsőként reped meg és valamiért néhány ciklusig leesik a súrlódási együttható.



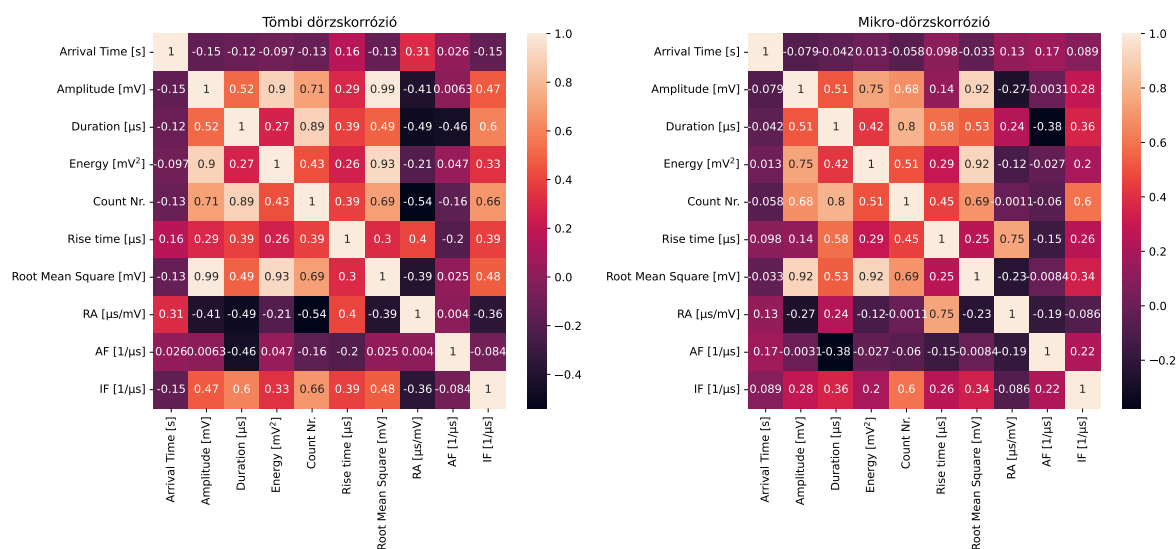
8.4. ábra. A tömbi dörzskorróziós kísérletek és a mikro skálás kísérletek során kapott energia eloszlások.

Forrás: Saját ábrák;



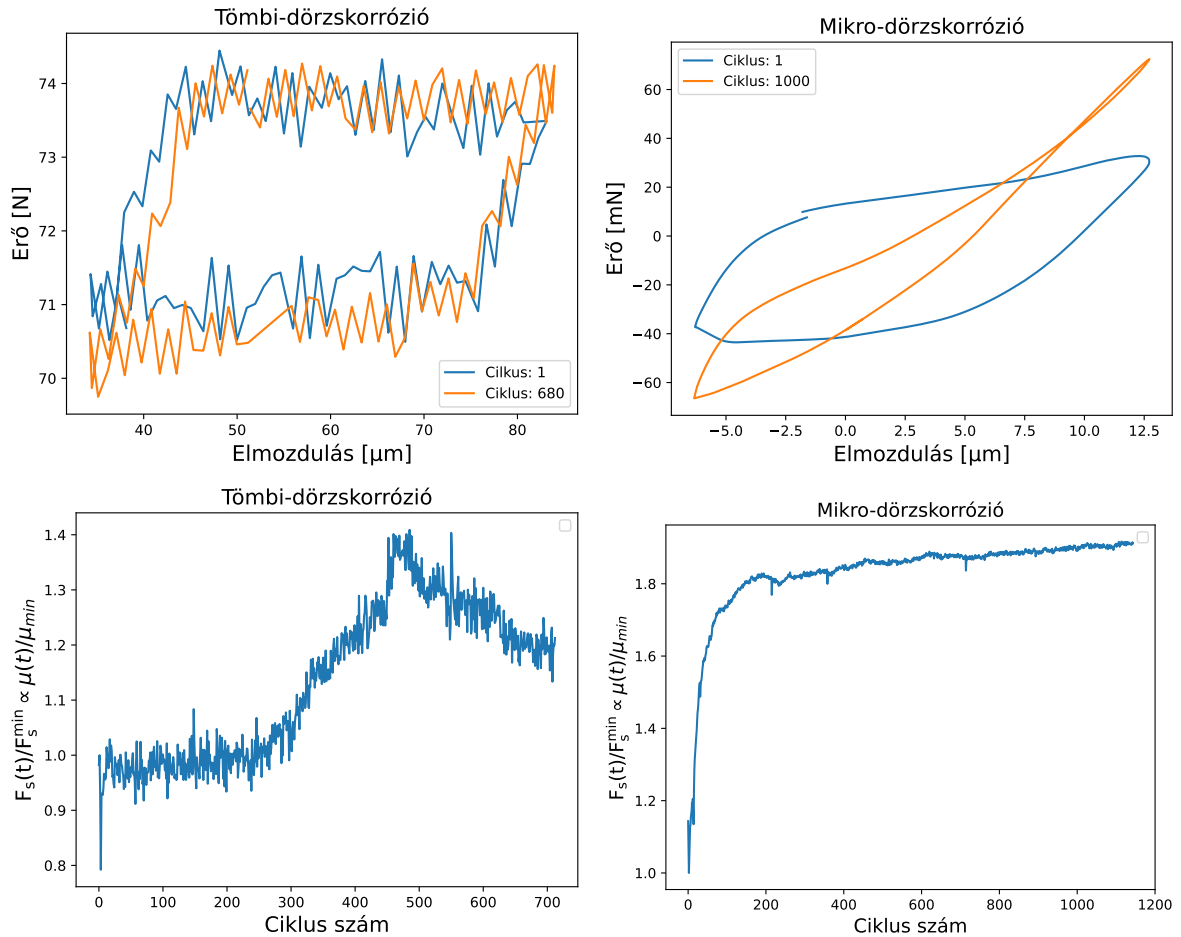
8.5. ábra. A tömbi dörzskorróziós kísérletek és a mikroskálás kísérletek során kapott visszatérési idő eloszlások. Tíz másodperc körül figyelhető meg a levágás.

Forrás: Saját ábrák;



8.6. ábra. A tömbi alumínium minták jeleinek és a cink minta jeleinek korreláció mátrixa.

Forrás: Saját ábrák;



8.7. ábra. A felső két ábra a különböző ciklusok után ábrázolt feszültség-deformációs görbéket hivatott bemutatni. Észlelhető egy jelentős változás az alakjukban. Az alsó két ábra a relatív súrlódási együttható változását mutatja. Ahogy telik az idő (vagy ciklusok), úgy egyre jobban halmozódik fel a finom anyag a két kontaktus között és ez folyamatos változást okoz.

Forrás: Saját ábrák;

9. fejezet

Összegzés, kitekintés

A dolgozatom első felében bemutattam a megbízhatósági tervezés alapjait és hogy miért terjedhetett el mint tervezési filozófia a mérnökök körében. Bemutattam az eAxle komapkt hajtáslánc csatlakozóit és azok felépítését, elhelyezkedését a hajtóművön és inverteren. Megismerkedtünk a tönkrementeli jelenségekkel és kiválasztottuk azokat a legfontosabbakat, amelyek kulcsszerepet játszottak a validációs terv elkészítésénél. A validációs terv esetében bemutattam az általam összeállított tesztsomagot és a hozzájuk tartozó paraméterezést, amit egy általam készített általánosított szabványrendszerre alapoztam. Végezetül a terv tekintetében meghatároztuk a mintaszámokat és a szükséges időtartamot a tesztek elvégzéséhez. Továbbá javasoltam néhány teszt összevonását és a dörzskorróziós vizsgálatok bevezetését. A terv bemutatását követte egy általunk is használt konnektor néhány teszteredményének bemutatása, ahol szemléltettem, hogy milyen viszontagságot kell kibírnia a komponenseknek.

A dolgozat második felében az általam javasolt kiegészítő teszt fizikai alapjait vizsgáltam meglepően jó eredményekkel. A dörzskorróziós statisztikai eloszlások merőben eltérnek pl. a plasztikus deformáció (diszlokáció lavinák) következtében felszabaduló zajok statisztikáitól, így jól elkülöníthetőek az eddig tapasztalt plasztikus jelenségektől. Azt is bemutattam, hogy melyek azok a kísérleti faktorok amelyek igazán befolyásolják a dörzskorróziós kopást és hogy a kopás során a feszültség deformációs görbék hogyan változnak, hogyan látható ez a változás a relatív súrlódási együtthatóban is. Végezetül az akusztikus jelek paramétereinek korrelációs mátrixait is meghatároztam, amelyek hasonló eredményeket mutattak úgy a makroszkópikus vizsgálatok esetében, mint a mikroszkópikus vizsgálatok esetében is. Itt bízakodásra ad okot az a tény, hogy az ún. RA paraméter, vagyis a felfutási idő és az amplitudó hányadosa, 0.31 és 0.13 korrelációt mutat az érkezési idővel. Ez azt jelenti, hogy az RA paraméter segítségével ha nem is a jelek teljes spektruma, de egy részük akár sokkal nagyobb korrelációval, pontossággal is előrejelezhető lehet

időben.

Rengeteg kérdés merül még fel úgy a mérnöki munka, mint a dörzskorróziós kutatások terén, azonban az eredmények biztatóak, ezért mindenképp szeretném a jövőben folytatni ezirányú munkámat és kidolgozni az összefüggéseket az akusztikus emisszió és a dörzskorrózió között. Ahhoz, hogy erős korrelációkat és sokkal jobb statisztikákat fel tudjunk állítani azt kell kitalálnunk, hogy hogyan tudunk akusztikailag nagyon aktív anyagon mérni, amiben ugyanakkor a deformációs mechanizmusokat is nyomon tudjuk követni. A mérnöki szempontokat figyelembe véve pedig az a kérdés, hogy a kidolgozott mérést hogyan tudjuk integrálni a bemutatott vibrációs vizsgálatokba és milyen költségekkel járna az.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat megírása és a kutatásaim során a Robert Bosch Kft. és az ELTE Anyagfizikai Intézet munkatársai hatalmas segítségemre voltak úgy közvetlen, mint közvetett módon. Köszönetet mondok a befektetett munkáért, hasznos beszélgetésekért és támogatásért a következő személyeknek:

- **Luhály Ádám:** Robert Bosch Kft., Validációs csoport, Csoportvezető, "BEST" mentor
- **Kovács Gábor:** Robert Bosch Kft., Rendszertervezési csoport, Rendszermérnök
- **Ács Dániel:** Robert Bosch Kft., Validációs csoport, Validációs mérnök
- **Matók Zsanett:** Robert Bosch Kft., Validációs csoport, Analízis mérnök
- **Ispánovity Péter Dusán:** ELTE, Egyetemi Docens, M^4 kutatócsoport vezető, témavezető
- **Groma István:** ELTE, Professzor, M^4 kutatócsoport vezető
- **Ugi Dávid:** ELTE, Doktorjelölt, M^4 kutatócsoport tag

Illetve külön köszönetet mondanék az M^4 diszlokáció kutatócsoport minden tagjának és az egyetemi műszerészeinknek a minőségi kollaborációért.

Irodalomjegyzék

- [1] Kevin Krüger, Haomiao Yuan és Jian Song. “The influence of the vibration test mode on the failure rate of electrical connectors”. *Microelectronics Reliability* 135 (2022), 114567. old.
- [2] Péter Dusán Ispánovity és tsai. “Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale”. *Nature communications* 13.1 (2022), 1–10. old.
- [3] Zeina Hamam és tsai. “Transverse cracking induced acoustic emission in carbon fiber-epoxy matrix composite laminates”. *Materials* 15.1 (2022), 394. old.
- [4] Arpith Siddaiah és tsai. “In-situ fretting wear analysis of electrical connectors for real system applications”. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3.2 (2019), 47. old.
- [5] B Van Peteghem, S Fouvry és J Petit. “Effect of variable normal force and frequency on fretting wear response of Ti–6Al–4V contact”. *Wear* 271.9-10 (2011), 1535–1542. old.
- [6] Hongliang Ming és tsai. “Effect of normal force on the fretting wear behavior of Inconel 690 TT against 304 stainless steel in simulated secondary water of pressurized water reactor”. *Tribology International* 126 (2018), 133–143. old.
- [7] Patricia Rodríguez és Tarcisio B Celestino. “Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks”. *Engineering Fracture Mechanics* 210 (2019), 54–69. old.