

EGYEDI VÍZERÓZIÓS BERENDEZÉS TERVEZÉSE, FIZIKAI MEGVALÓSÍTÁSA ÉS TESZTEK KIVITELEZÉSE

TDK-DOLGOZAT

Írta:

Lőrincz Nikolett

(Járműmérnök BSc szakos hallgató, Járműfejlesztés és gyártás szakirány, IV. évfolyam)

Konzulens:

Takács Richárd

Egyetemi tanársegéd

Széchenyi István Egyetem

Győr

2024.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS	1
2.	TURBÓFELTÖLTŐK TÖRTÉNETE, ÁLTALÁNOS ISMERTETÉSE	2
2.1.	A feltöltés célja, előnyei, hátrányai	3
2.2.	Sűrítő járókerék gyártása, szerkezeti anyagai	4
2.2.1.	Molibdén, illetve molibdén-titán-nitrid bevonatok alkalmazása.....	5
2.2.2.	Speciális, polimerből készült kompresszorkerék vizsgálata	7
3.	KIPUFOGÓGÁZ VISSZAVEZETÉS – EGR-RENDSZEREK BEMUTATÁSA	10
3.1.	Magas nyomású kipufogógáz-visszavezetés (HP-EGR).....	11
3.2.	Alacsony nyomású kipufogógáz-visszavezetés (LP-EGR).....	12
4.	VÍZCSEPP-ERÓZIÓ, MINT JELENÉG	15
4.1.	Az erózió keletkezése és hatásai különböző keménységű anyagoknál	15
4.2.	Az eróziót befolyásoló tényezők	17
4.3.	Titán-alumínium ötvözetek vízeróziós vizsgálata	18
4.4.	A felületi érdesség és a vízcsepp-erózió kapcsolata.....	21
5.	ASTM G73-10-ES SZABVÁNY ELEMZÉSE.....	25
5.1.	A készülék paraméterei és beállítása	26
5.2.	Próbatestek előre meghatározott paraméterei és referenciaanyagok.....	26
5.3.	A fémek tesztelési eljárása	27
5.4.	Tisztítási eljárások korrodált minták esetében	29
5.5.	Az eróziós ellenállás kiszámításának elmélete.....	29
6.	EGYEDI VÍZCSEPP-ERÓZIÓS BERENDEZÉS BEMUTATÁSA	31
6.1.	Inspirációk gyűjtése a tervezéshez	31
6.2.	Tervezési folyamat, részegységek jellemzése	32
6.3.	Részegységek és a teljes egység felépülése	37
6.4.	Költségterv	40
7.	ÖSSZEGZÉS	42
	ÁBRAJEGYZÉK.....	43
	IRODALOMJEGYZÉK.....	44

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre fontosabb szerepet kap a károsanyag-kibocsátás a bolygónk és egészségünk védelme érdekében. Ennek tükrében az autógyártókra is szigorú előírások vonatkoznak és a járműipar hatalmas transzformáción megy keresztül.

Kezdetben a turbófeltöltőket csupán teljesítménynövelés céljából alkalmazták és kuriózumnak számított egy feltöltéses jármű, ami egyfajta státuszt jelentett a tulajdonosának. Manapság az EURO-előírások szigorodásával már a legtöbb, belsőégésű motorral hajtott, újonnan gyártott autóban van legalább egy feltöltő. A gyártók, ahogy próbálták megugrani az előírásokat rájöttek, hogy a turbófeltöltők többek között használhatók az emisszió csökkentésére is, amit a kipufogógáz-visszavezetéssel kombinálva tovább is fokoztak. Minden technológiának, így ennek is megvannak a hátrányai, ami közül a sűrítő járókeréken fellépő vízcsepp-eróziót emelném ki. A visszavezetett kipufogógázban lévő víz a hőmérséklet csökkenés hatására kondenzálódik, így a vízcseppek a jármű hidegindításakor és részterhelésein nagy sebességgel a járókerék lapatozásának csapódnak, ezzel károsítva annak geometriáját.

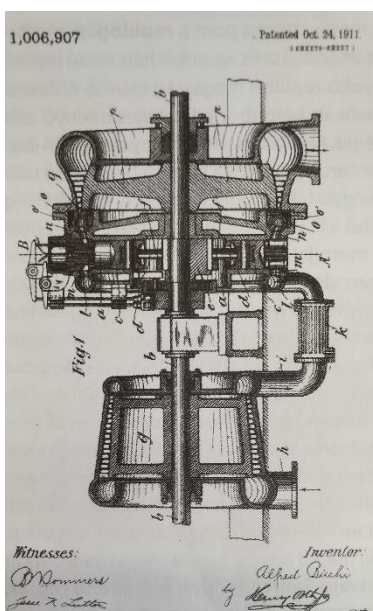
Dolgozatom célja egy olyan egyedi komponenspad megalkotása, amellyel a vízcsepp-erózió hatását tudjuk vizsgálni sűrítő járókerekeknél használt anyagminőségeken és bevonatokon az ASTM G73-10-es szabvány szerint és az abban leírt utasítások alapján. Maga a vizsgálóberendezés SolidWorks 3D modellező program segítségével készült úgy, hogy az megfeleljen az ASTM-szabványban rögzített paramétereknek, emellett külön cél a vizsgálatok idő-és költséghatékony elvégzése. A vízcseppek egy speciális vízcsepp generátor segítségével keletkeznek, amelynek különlegessége, hogy a cseppek átmérőjét és a folyadék térfogatárama szabályozható. A berendezésben egy kis méretű, nagy teljesítményű villanymotor kapott helyet, ez biztosítja a tárcsa forgását, amelyre a próbatestek rögzítve vannak.

A próbatesteken kialakult erózió mértékét mérőműszerek segítségével határozzuk meg, majd ezeket az eredményeket összevetjük egymással, hogy szélesebb képet kapjunk az anyagok és bevonatok viselkedésével kapcsolatban. Mindemellet a projekt fontos célja, hogy valamennyi, a kereskedelmi forgalomban kapható sűrítőkerék-anyagminőség eróziós rátáját és az alkatrészek élettartamát fel tudjuk térképezni, esetleg javaslatokat tenni fejlesztési irányokra.

2. TURBÓFELTÖLTŐK TÖRTÉNETE, ÁLTALÁNOS ISMERTETÉSE

A turbófeltöltés, mint teljesítménynövelési lehetőség már az 1880-as években is foglalkoztatta a tudósokat, feltalálókat. A motorok feltalálásával szinte azonos ütemben próbálkoztak a feltöltéssel, így tett Gottlieb Daimler és Rudolf Diesel is, ám mindkettőjük ötlete feledésbe merült, hiszen abban az időben a technológia még nem volt alkalmas megoldani minden felmerülő problémát. [1]

Rajtuk kívül még sokan próbálkoztak a teljesítménynöveléssel, viszont a ma is használatos feltöltők elődjét 1905-ben, Alfred Büchi tervei alapján szabadalmaztatták, amelynek rajza az 1. ábrán látható. Büchi rájött, hogy valamennyi kipufogógáz visszavezetésével, az ebben rejlő energiával elő lehet sűríteni a levegőt, így körülbelül 40 százalékos teljesítménynövekedést tudott elérni. [1]



1. ábra - Az első turbófeltöltő szabadalmi rajza [1]

Az 1920-as évek elején kezdték el hajómotoroknál alkalmazni, mivel itt igazán lényeges volt a súlysökkentés és a kedvezőbb tüzelőanyag-fogyasztás is. Ez feltöltéssel lehetséges volt, úgy tudtak teljesítményt növelni, hogy a motor méreteit lecsökkentették, ezáltal kevesebb tüzelőanyag volt szükséges a működéséhez. Az évtized közepe felé megjelent tengeralattjáróknál, mozdonyoknál, majd a második világháború idején a repülőgépeknél is. A személygépjárművek ilyen irányú fejlesztése elhanyagolható tényező volt, elsősorban a

háborúk miatt, de a versenysportokban ettől függetlenül folytak a kutatások és a feltöltés alkalmazása. [1]

A személyautóknál az Otto-motorok alkalmazása is nehezítette a technológia terjedését. Egyrészt méretbeli korlátokba ütköztek, másrészt ezen motortípusnak magasabb a kipufogógáz hőmérséklete, illetve a szabályozási rendszere is bonyolultabb, mint a haszongépjárművekben alkalmazott Diesel-motoroké. A fejlesztési folyamatokat nagyban segítette az informatika és a technológia fejlődése, a számítógépes tervezés és az újabb gyártástechnológiai megoldások egyre kisebb méretű és egyre nagyobb teljesítményű turbófeltöltők gyártását tették lehetővé, így beépíthetők lettek Otto-motoroknál is. Először Amerikában, az 1960-as években kezdték meg a feltöltött gépkocsik gyártását, ám ez nem hozott nagy áttörést. Diesel-motoroknál csak az 1970-es évek végén, a Mercedes és a BMW alkalmazta a turbófeltöltést, ami nagy népszerűségnek örvendett, ám a technológia nem volt arra képes, hogy a tényleges előnyeit ki tudják használni. [1]

A kilencvenes években került kidolgozásra a Diesel-motoroknál ma eléggé népszerű változtatható turbina-belépési geometria, amellyel sokkal szélesebb üzemi tartományban lehet használni a turbófeltöltőt, majd a technológia nagyon gyors ütemű fejlődésének következtében a rendszerek elektronikus vezérlésűek lettek. [1]

2.1. A feltöltés célja, előnyei, hátrányai

A feltöltés alapelmélete az, hogy a motorba bejuttatott levegőt, amely az égéshez szükséges, sűrítsék össze a hengereken kívül, annak érdekében, hogy a töltet tömege nagyobb legyen. Ehhez használják a kipufogógázból származó energiát és ezen megoldással meg lehet növelni a motor teljesítményét és nagyobb nyomatékot lehet elérni. Emellett emelni tudták a Diesel-motorok hatásfokát és hasonló teljesítményt tudtak belőle kihozni, mint egy Otto-motorból. Manapság az elterjedésének azonban összetettebb célja van: a teljesítménynövelés mellett csökkenteni a motor fajlagos fogyasztását és ezzel egyidejűleg a károsanyag-kibocsátást is. [1,2,3]

Teljesítménynövelési célból napjainkban a gyártók már nem csak egy, hanem akár négy feltöltőt is alkalmazhatnak egy autónál, így a teljesítményt szélesebb tartományokban tudják növelni. Ezen technológiával lehetőség van a motor méretét lecsökkenteni (downsizing), például egy négyhengeres motor helyett egy háromhengeres motort alkalmazni, miközben a teljesítmény azonos marad. A kisebb motorok megjelenésével nem csak tömegcsökkentés volt

elérhető, hanem az alacsonyabb sűrűláási veszteségek miatt csökkent a fajlagos üzemanyag-fogyasztás is. [2,3]

Károsanyag-kibocsátás szempontjából a feltöltésnek jelentős szerepe van, de ez a dízel- és benzinmotoroknál eltérően mutatkozik meg. Otto-motorok esetében a feltöltés alkalmazása elégetlen szénhidrogének (HC) csökkentését eredményezi emissziós szempontból. A Diesel-motoroknál már sokkal összetettebb a folyamat, hiszen itt a legnagyobb problémát a nitrogén-oxid (NOx) és a korom kibocsátása okozza. A nitrogén-oxid a magas égési csúshőmérsékletnek az eredménye. A töltőlevegő visszahűtésével csökken az égési hőmérséklet, ezáltal kisebb lesz a NOx-emisszió. A koromképződés mérsékelhető a levegő mennyiségének növelésével, az égés füsttár felett fog történni, így csökkenthető a korom emissziója is. [1,2,3]

Hátrányok közé sorolható az Otto-motoroknál a túl nagy töltési nyomás okozta kopogásos égés. Ennél a konstrukciónál a mérnököknek nagyon kellett ügyelniük a megfelelő kipufogógáz-visszavezetés kialakítására, ugyanis a kipufogógáz-vezeték kedvezőtlen kialakítása növeli a kopogás veszélyét. Ahhoz, hogy ezt a jelenséget csökkenteni lehessen, dúsabb keverékre van szükség és ezzel együtt lehet mérsékelni az égési hőmérsékletet, ám ez nagyobb fogyasztást is eredményez. [1]

2.2. Sűrítő járókerék gyártása, szerkezeti anyagai

A turbófeltöltők alapvetően két fő részből épülnek fel: egy turbinából, melyet a visszavezetett kipufogógáz hajt meg és egy sűrítőből, amelynek tengelye azonos a turbinával. Nagyon nagy előnyük, hogy kis méretűek, emellett jó hatásfokkal tudnak működni. Manapság a tervezés és a méretezés kizárólagosan számítógépes szoftverek segítségével történik, különböző végeselem szimulációkat végeznek, hogy a lehető legjobb darabok tudjanak végérvényesen gyártásba kerülni. A dolgozat alappillére a sűrítő járókerék, így a továbbiakban az erről gyűjtött irodalmak kerülnek kifejtésre. [1]

A levegő a járókerékbe axiális irányban érkezik és radiális irányban távozik. A kerék lapátozása lehet egyenes vagy ívelt. Régebben alkalmaztak egyenes lapátozásokat, mivel sokkal egyszerűbben elő lehetett állítani, de a sűrítés mértéke túl alacsony volt és áramlási veszteségek is tapasztalhatók voltak ennél a konstrukciónál, így ma már ezeket nem használják, csak az ívelt konstrukciót. A járókerék lapátjain a kilépő élnek két kialakítása van: a hátrahajló és a radiális. A hátrahajló lapátok gyártása nehezebb és üzem közben nagy a hajlító

igénybevétel, viszont egy szélesebb teljesítmény-tartományt lehet vele lefedni. Ennek ellenére a bonyolult gyártás és a szennyeződésekre való érzékenység miatt elvétve alkalmazzák. [1]

A sűrítőkereknek nagyon összetett feladatoknak, különféle követelményeknek kell megfelelniük. Fontos a nagy mechanikai szilárdság, a kedvező áramlástechnikai kialakítás és a gyártási lehetőségek összhangja, így a gyártóknak kompromisszumokat kellett kötni. Megbízható és pontos öntési technológia a nagy pontosságú nyomásos öntés, viszont ezzel nem lehet a lapátok geometriáját megvalósítani, ami áramlástechnikai szempontból igen fontos. A vékony, leélezett lapátok szilárdságtani szempontból nem kedvező, ennek ellenére a hatásfok és a nyomásviszony növelése ezt követeli meg. Minden lehetőséget figyelembe véve, az optimális gyártási megoldás a viaszmintás technológia, ahol úgynevezett gipszformával készítik a járókereket, ám gyakori, hogy gumimintákat alkalmaznak. Ezen módszer használatával finom felületű, nagy méretpontosságú lapátokat kapunk, ami segít a kiegyensúlyozásban és a légáramlás javításában is. Ilyen gumimintával készített járókerék látható a 2. ábrán. Anyaga általában, az esetek nagy többségében nagyszilárdságú alumínium-ötvözet, nagyobb terhelések esetén előfordulnak titánból vagy alumíniumból kovácsolt darabok is. [1,2,3]



2. ábra - Sűrítő járókerék gumimintás technológiával gyártva [1]

A turbinakerék és a tengely egyesítése dörzshegesztéssel történik, de vannak olyan megoldások, ahol egyben öntik ki a két alkatrészt. A járókereket a tengely végére átmeneti vagy szoros illesztéssel rögzítik és a biztonság érdekében egy önbiztosító anyát is használnak. [2]

2.2.1. Molibdén, illetve molibdén-titán-nitrid bevonatok alkalmazása

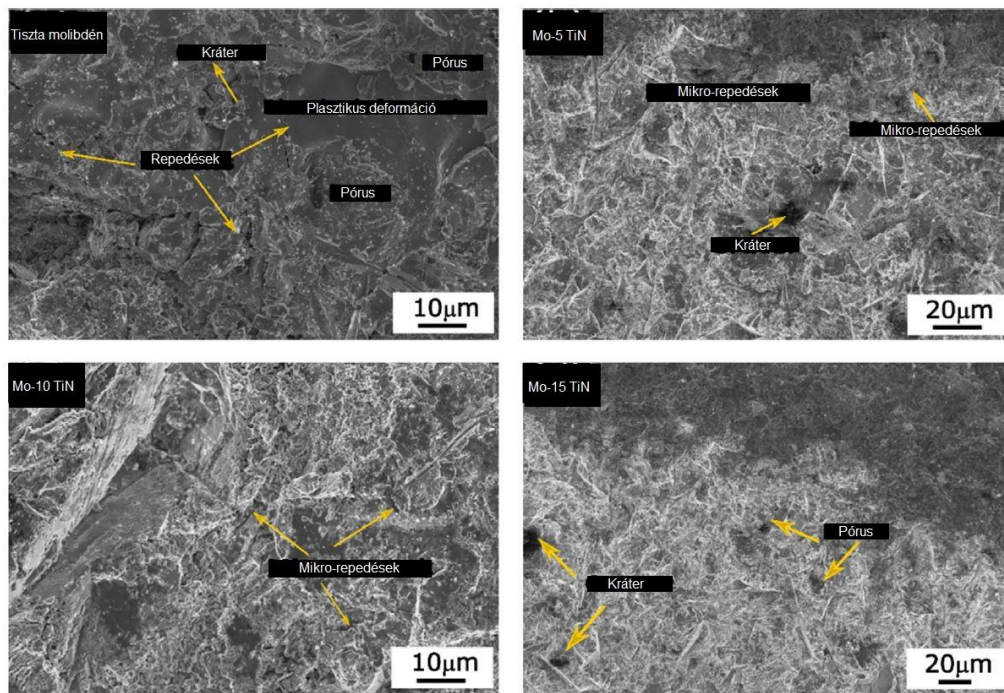
A kipufogógáz-visszavezetés által szilárd részecskék kerülnek a turbófeltöltő járókerékéhez, amelyek a rendkívül gyors, több, mint 150 000 fordulat/perces forgási sebesség mellett komoly károkat tehetnek a lapátokban. Éppen ebből kifolyólag szükség van olyan bevonatok

alkalmazására, amelyek a járókerekeket ellenállóbbá teszik a külső behatásokkal szemben és növeli annak élettartamát is. [4]

Egy 2022-es, Indiában, a bhubaneswar-i Ásvány- és Anyagtechnológiai Intézetben készült kutatás vizsgálta a molibdén (Mo) illetve molibdén-titán-nitrid (Mo-TiN) bevonatokat, amelyeket alumínium-szilícium (Al-Si) hordozótestre vittek fel atmoszférikus plazmaszórással. A plazmaszórás egy modern, korszerű bevonatolási technológia kopás-, hő- és korrózióállóság szempontjából, nem csak fémeknél, hanem kerámiáknál is használják. Magát a felület keménységét, porozitását sok egyéb tényező is befolyásolja, mint például a por szemcsemérete, a fújás sebessége vagy a fúvóka átmérője. [4]

A molibdén bevonatnak számos előnyös tulajdonsága van, 2...18-szoros kopásállóságot biztosít egy bevonat nélküli edzett acélhoz képest. A motorteknikában sokfelé lehet találkozni molibdénnel bevont alkatrészekkel, ilyenek a hengerfuratok és a dugattyúgyűrűk. Gyakran szokták kerámia erősítőanyaggal és krómmal is keverni, így sokkal kopásállóbb, ellenállóbb lesz, mint a galvanizált króm vagy a molibdén-karbid bevonatok. Emellett a titán-nitrid bevonatoknak is különösen jó a kopás- és a korrózióálló képességük, illetve nagy keménységgel rendelkeznek. Hogyha ez kombinálva van molibdénnel, akkor a sima Mo-bevonatokkal szemben sokkal jobb a keménysége és a tapadási szilárdsága. [4]

A vizsgálat során a titán-nitrid port molibdén porral keverték, különböző tömegszázalékos arányokban (0, 5, 10 és 15), majd ezeket atmoszférikus plazmaszórással vitték fel a minél jobb tapadás érdekében előre felérdesített alumínium-szilícium lemezekre. A lemez átlagos felületi érdessége 6-8 μm volt. A tesztet egy lézersugaras eróziós berendezéssel, timföldpor bejuttatásával hajtották végre, mint erodáló szemcse. A kísérlet mikroszkopikus eredménye a 3. ábrán látható. [4]



3. ábra - AlSi hordozófelület mikroszkopikus képe különböző bevonatokkal [4]

Ahogy az ábrán is látható, a vizsgálat eredményeként megjelentek a felületeken kráterek, repedések és mikrorepedések, valamint pórusok és plasztikus deformáció is, melyek mind a bevonatok alumínium-oxiddal (timföld) való érintkezésének következményei. A tiszta molibdén bevonat áll a legkevésbé ellen az igénybevételeknek, azon a felületen látható a legtöbb repedés, kráter és még képlékeny alakváltozás is. A legjobban ellenálló bevonat a Mo-10TiN, melyen csak mikrorepedések keletkeztek a vizsgálat során. [4]

2.2.2. Speciális, polimerből készült kompresszorkerék vizsgálata

Manapság az ipar fejlődésével egyre inkább elterjedté vált a 3D nyomtatási technológia, melynek számos előnye van a hagyományos technológiákkal szemben. Költséghatékonyabb és sokkal kevesebb a gyártási idő, emellett bármilyen bonyolult geometriát ki lehet vele munkálni, illetve az anyagválaszték is sokszínű, az alkatrész készülhet polimerből, fémből, de akár kerámiából is. Az additív gyártás alkalmazása ma már számos iparban és tudományágban felfedezhető, mint például az orvostudomány vagy éppen a járműipar. A Lengyel Tudományos Akadémia 2020-ban egyedülállóan az iparágban alkalmazott polimer alkatrészeket turbófeltöltők vizsgálatánál, ahol az alkotóelemeknek nagy terheléseknek és különböző szennyeződéseknek kell ellenállniuk. [5]

Az alkatrész nyomtatása tintasugaras elven alapul és polimergyantával történik, egy úgynevezett multiJet nyomtatási technológiával, ami nagy pontosságú elemek létrehozására képes, illetve kellően sima felületet biztosít. A gyártási folyamata rétegenként történik, ha

készen van egy réteg és megfelelően lehűlt, azt felkeményítik UV fény segítségével, hogy elérje a megfelelő szilárdságot és mehet rá a következő réteg egészen addig, amíg a kész alkatrészt meg nem kapják. Ha vége van a gyártásnak, a kész geometriáról eltávolítják a felesleges anyagot/sorját egy ultrahangos fürdő segítségével. [5]

A kutatás tárgya a polimer kerék és egy alumíniumból készült referencia kerék eredményeinek összehasonlítása volt, melyeket körülbelül 100 000 fordulat/percig gyorsítottak egy kísérleti padon. A két járókerék modellje a 4. ábrán tekinthető meg. Ezeket a vizsgálatokat csak a turbófeltöltő kompresszor oldalán lehetett elvégezni, mivel a hőmérséklet a turbina oldalon olyan magas, hogy a nagy hőterhelés hatására megolvadna a műanyagból készült alkatrész. Az anyag hőállósága maximum 88°C, ezért a tesztek elvégzéséhez nem forró kipufogógázt használtak, mint azt hagyományos esetben szokták, hanem sűrített levegővel működtették a vizsgálópadot. A turbina épsége miatt teljesen hideg levegőt sem használhattak, ezért egy levegő előmelegítő berendezést alkalmaztak, amivel a levegő hőmérsékletét 50°C és 150°C között tudják szabályozni a bemenő oldalon. Emellett a tesztpadot felszerelték még különböző érzékelőkkel is, például a kompresszor bementi oldalára került egy forgási sebességmérő, a kimeneti oldalra pedig egy hőmérséklet, egy nyomás és egy tömegáram mérő. [5]



4. ábra - A vizsgált járókerekek fizikai modellje: polimer és alumínium [5]

A kísérlet során először az alumínium járókerékkel végeztek tesztek, aminek célja egy referencia felállítása volt. Miután ez lezajlott, ezután elkezdtek vizsgálni ugyan olyan üzemi körülmények között a polimer járókereket is. A kapott eredményeket ezután összehasonlították és azt lehetett tapasztalni, hogy a 3D nyomtatott kerék 90 000 fordulat/perces sebességig ugyan úgy viselkedett, mint az alumínium járókerék. Ennél nagyobb fordulatszám tartományban már a hőmérséklet növekedésével együtt lágyulni kezdett a polimergyanta, ami alkalmatlanná teszi

az alkatrészt a megfelelő, biztonságos működésre. Ennek ellenére összességében a tesztek azt mutatták, hogy a 3D nyomtatott polimer járókerék alkalmas lehet a hagyományos, fémből készült alkatrészeket kiváltani nagysebességű gépekben, természetesen a megfelelő üzemi körülmények között. [5]

3. KIPUFOGÓGÁZ VISSZAVEZETÉS – EGR-RENDSZEREK BEMUTATÁSA

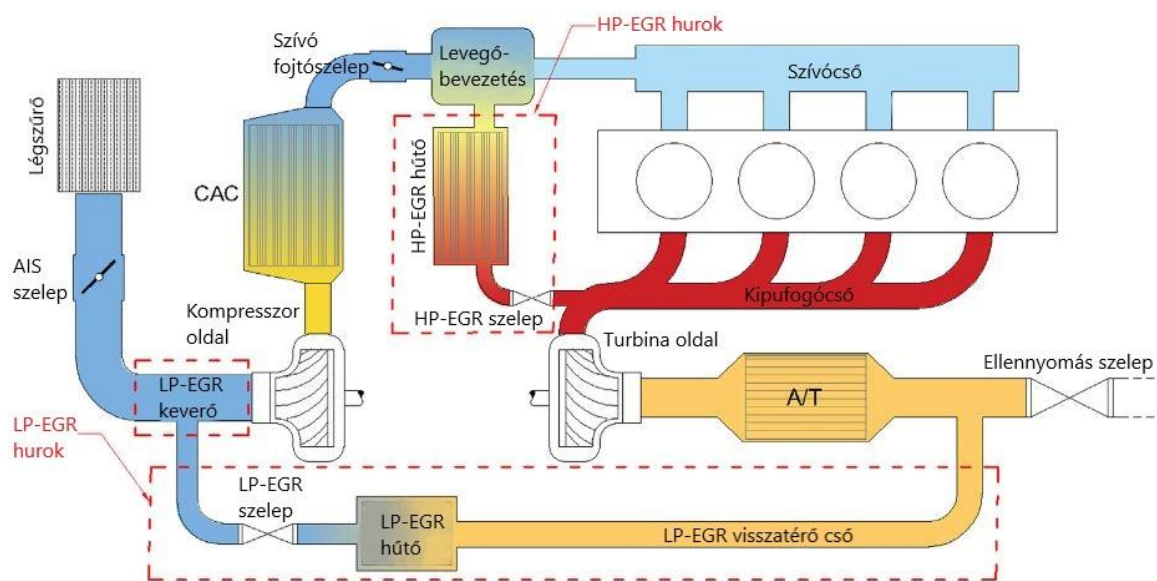
Mint ahogy a dolgozat korábbi szakaszában is említésre került, az utóbbi években nagyon nagy hangsúlyt fektetnek a világban mindenütt a károsanyag-kibocsátás és a tüzelőanyag-fogyasztás csökkentésére. Ezzel kapcsolatos előírások nem csak Európában, hanem Amerikában is születtek a CO₂-semlegesség jegyében, így a gyártók komoly kihívások elé lettek állítva a hajtáslánc-fejlesztés területén. Dízel üzemű haszongépjárművek esetén a NO_x-kibocsátást az Európai Unió által meghatározott EURO 6-os norma 180 mg/km-ről 80 mg/km-re csökkentette, a szilárd részecskék számát (PM) pedig 4,5-5 mg/km környékén tartja. Együtt nagyon nehéz a két kritikus paraméter redukálása, ugyanis az egyik csökkentésével a másik mennyisége nőni fog; ez egy úgynevezett kontraproduktív, ellentétes hatást kiváltó folyamat. [6,7,8]

A károsanyagok mennyiségének csökkentése kétféle módon történhet: motorikus úton és kipufogógáz utókezeléssel, ámbar manapság a két módszert egyszerre alkalmazzák a jobb eredmény elérése érdekében. Kipufogógáz utókezelés során különféle szűrőket és katalizátorokat alkalmaznak a károsanyagok csökkentése érdekében. A motorikus károsanyag csökkentésnél megváltozik az égésfolyamat és már a hengerből kiáramló kipufogógáz is kevesebb károsanyagot tartalmaz. Ezen utóbbi módszer egyik formája a kipufogógáz-visszavezetés (EGR), amivel csökkenthető a nitrogén-oxid, a fogyasztás és a szén-dioxid kibocsátás is. Az EGR segítségével javul az égési folyamat, kiszorítja a beszívott oxigént, ezáltal hígul a töltet, megváltoznak a termodinamikai tulajdonságai és a kémiai összetétele is. A tehetetlen, kémiai reakcióra képtelen kipufogógáz csökkenti az égési csúcshőmérsékletet, aminek következménye a NO_x csökkenése, de ezzel együtt nő az elégetlen szénhidrogén (HC), a szén-monoxid (CO) és a korom-képződés aránya. A dízelüzemű motorok akár 50 százalékos EGR-szinttel is működtethetők a nitrogén-oxid csökkentése érdekében, míg benzinüzemű erőforrások esetén ez az arány csak 20-25 százalék, a kopogás veszélyének elkerülése érdekében. [6,8]

A motorba történő kipufogógáz-visszavezetés két úton lehetséges: külső, illetve belső visszavezetéssel. A belső EGR-nél a szelepevezérlésen van a fókusz, ennek segítségével lehet vezérelni a kipufogógáz benntartását vagy hengerbe való visszaengedését. Nagy előnye, hogy egy rendkívül gyors folyamat, viszont nincs lehetőség a gáz hűtésére. Külső EGR-rendszer

esetében egy csővel vezetik vissza a kipufogógázt a szívócsatornába. Egy fojtószelep segítségével lehet a kipufogógáz mennyiségét szabályozni, de a maximális mennyiséget a szívó- és a kipufogó oldal közötti nyomáskülönbség határozza meg. Ha több fojtószelep van a rendszerben elhelyezve, akkor növelhető a visszavezetett gáz mennyisége. [8]

Kétféle külső EGR-rendszert lehet alkalmazni egy turbófeltöltéses erőforrásnál: a magas (HP-EGR) és az alacsony (LP-EGR) nyomású kipufogógáz-visszavezetést. A továbbiakban ezek kerülnek részletes bemutatásra. Az 5. ábra szemlélteti mind a magas, mind az alacsony nyomású EGR-rendszert vázlatos formában. A két architektúrát együttes néven kettős hurok EGR-rendszernek (DL-EGR) is nevezik. [6,8]



5. ábra - Az úgynevezett kettős hurok EGR (DL-EGR) sematikus ábrája [6]

3.1. Magas nyomású kipufogógáz-visszavezetés (HP-EGR)

Ez egy nagyon gyakori, általánosan használt műszaki megoldás járműmotoroknál, amelyet már több, mint 70 éve alkalmaznak. Ennél a megoldásnál tiszta levegő a kompresszor tömegárama és a kipufogógáz egy részét a turbina előtt vezetik vissza, majd egy EGR-hűtőn keresztül jut el közvetlenül a szívórendszerbe. Ez egy előny, ugyanis gyorsabb, kisebb a reakcióidő. Nagy teljesítmény elérésénél jobb lesz a kompresszor hatásfoka, ezáltal a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csökkenthető lesz. A kipufogógáz-visszavezetéssel szennyeződések is jutnak be a szívócsőbe, viszont ebben az esetben nem a komplett szívórendszer, csak a szívócsatorna eltömődésének veszélye állhat fent. [6,7,8,9,10]

Hátránya, hogy ezáltal csökken a kompresszor tömegárama, így a turbófeltöltő működése nem lesz egyenletes. Ebben az esetben az EGR nem tudja megfelelő módon kiegyensúlyozni a

teljes levegőmennyiséget, így a beszívott levegő tömegárama mindig alatta van egy referenciaszintnek. Mivel rövidebb a kipufogógáz útja az alacsony nyomású EGR-hez képest, ezért sokkal kevesebb ideje van a gáznak keveredni a beszívott levegővel, így nem lesz teljesen homogén a beszívott töltet. További hátránya ennek a konstrukciónak, hogy nagy motorterhelés mellett a maximális áramlási sebesség korlátozva van, ugyanis megnövekedik a szívócsatorna nyomása, illetve ellentétes nyomáskülönbség alakul ki a szívó- és a kipufogó csatorna között. Ezen probléma kiküszöbölése érdekében gyakran használnak változó geometriájú turbófeltöltőt (VTG) és emellé vagy ehelyett részlegesen zárják a szívószelepet, így el lehet érni a megfelelő nyomáskülönbséget és lehet szabályozni az áramlási sebességeket is. Ám ez a megoldás is hordoz magában hátrányokat: nőnek a szivattyúzási veszteségek és korlátozva van a beszívott levegő/kipufogógáz áramlása. Továbbá a forró kipufogógáz és a benne lévő apró szennyeződések károsíthatják a töltőlevegő-hűtőt. [6,7,8,11]

3.2. Alacsony nyomású kipufogógáz-visszavezetés (LP-EGR)

A konstrukció bevezetésének fő célja hatékonyságnövelés, mind a kompresszor, mind turbina oldalról, amelyet az áramlási sebesség növelésével lehet kivitelezni. Ahogyan az a 2. ábrán is látható, a kipufogógáz a turbina után egyből az utókezelő rendszerbe kerül (A/T), keresztülmegy egy hűtőn és egy EGR-szelepen, majd a kompresszor előtt egy intercooler-en át visszavezetik a szívóoldalra. A mai, modern járműveknél már részecskeszűrőt alkalmaznak a kipufogógáz utókezeléséhez (DPF), amely egy katalizált, szinterezett fémből készült speciális berendezés. Amikor a DPF regenerál, a kipufogógáz egy mellékágon, by-pass szelep segítségével tovább tud áramolni az EGR-hűtő felé. [6,7,10]

Többféle kutatás és tanulmány is kimutatta, hogy az alacsony nyomású kipufogógáz-visszavezetésnek számos előnye van a magas nyomásúhoz képest. Mivel a kipufogógáz keresztül megy az utókezelő rendszeren, a korom- és egyéb károsító részecskék nagyrésze már nem jut tovább a folyamatba, ezért a motor tisztább kipufogógázt fog kapni, mint a magas nyomású visszavezetés által. Emellett alacsonyabb a szívócsatorna eltömődési arányának veszélye is, másrészt az EGR-hűtők sem károsodnak olyan nagy mértékben. A kompresszor bementénél alacsonyabb a belépési pont, így magasabb EGR-sebességet kaphatunk nagy fordulatszámok esetén. A kipufogógáz hosszabb úton jut el a szívócsatornáig, ennek következtében kisebb a hűtési igény. Ez azt eredményezi, hogy alacsonyabb lesz a beszívási hőmérséklet, megnövekedik a töltőnyomás és csökkennek a hőveszteségek, emellett csökken a nitrogén-oxidok és a szilárd részecskék keletkezési mennyisége is. Továbbá csökkenthetők a szivattyúzási- és nyomásveszteségek a nyitottabb VGT-állapot miatt, ami a megnövekedett

áramlási sebességnek köszönhető a turbina oldalon. Kompresszor oldalon is jelentős eredmények tapasztalhatók, mind teljesítmény, mind tüzelőanyag-fogyasztás szempontjából. A szilárd részecskék kibocsátását segítik továbbá az LP-ERG rendszer hosszabb csőszakaszai, melyekben jobban el tud keveredni a kipufogógáz a levegővel, mielőtt még a hengerbe áramlana, ezáltal egy homogénebb keveréket kapunk, ami szintén nagy előny a HP-EGR-hez képest. Nem csak dízelüzemű, hanem benzines motoroknál is előnyt jelent az LP-EGR rendszer, ahol a kopogás csökkentésében is fő szerepet játszik. [6,7,9,11,12]

Számos előnye mellett ezen konstrukciónak is vannak hátrányai. A kipufogógáznak lassabb a terjedése a hosszú csőszakasz miatt, ezért lassabb a reakcióidő, lassabban lehet a sebességet szabályozni és az EGR-szint becslése is nehezebb. Mindezek mellett a hosszabb csőszakasz abból a szempontból is hátrányos, hogy a rendszer átmeneti működése során nagyobb lesz a NOx aránya. Bár a kipufogógáz a részecskeszűrőn keresztülhaladva sokkal tisztább, mint a HP-EGR esetén, a járókerék élettartamát kompresszor oldalon jelentős mértékben csökkentik a közegben maradt finomabb részecskék, illetve erodálják a rendszer alkatrészeit, a sérülések következtében pedig korrózió lép fel, illetve ennél a konstrukciónál a teljes szakaszon előfordulhat eltömődés, főként a turbófeltöltő kompresszor oldalán és az intercooler előtt, amit 3. ábra is szemléltet. További károsító tényező a kipufogógáz savas hatása, amely szintén veszélyt jelent az alkatrészek időtállóságára. Maga az LP-EGR hűtője háromszor nagyobb, mint amit a HP-EGR-nél alkalmaznak, így ennek beépítése a motortérbe is kihívásokat eredményez. Mivel magának a rendszernek a felépítése sokkal több elemből áll és ezeknek az elemeknek összehangoltan kell működniük, ezért hardveresen és szoftveresen is összetettebb irányítást igényel. [6,7,9,10,11]



6. ábra - Lerakódott víz- és részecske szennyeződések az alkatrészek bejáratain [10]

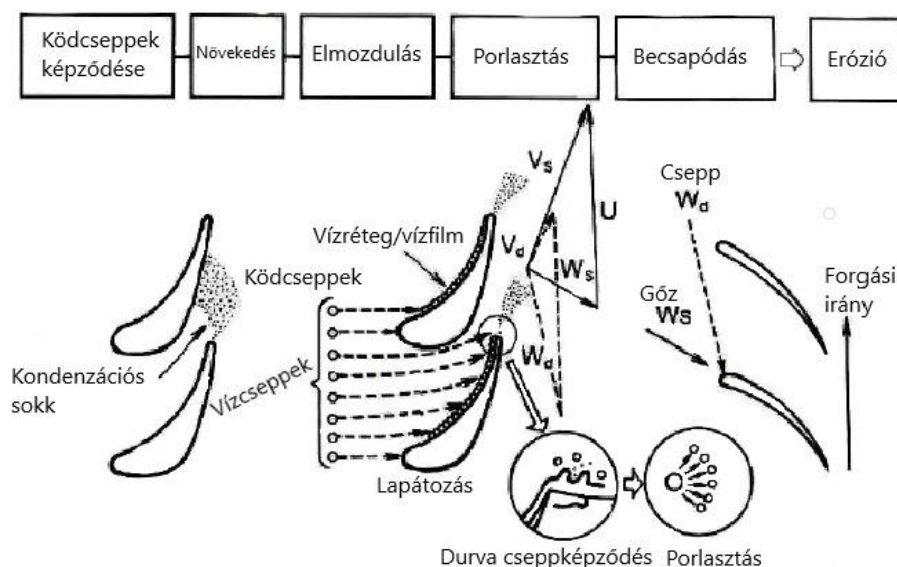
A legnagyobb problémát mégis a vízkondenzáció jelenti, ami káros minden rendszert felépítő komponensre: csővezetékek, EGR-hűtő, töltőlevegő-hűtő és nem utolsósorban a

turbófeltöltő sűrítő járókerekére is. A folyamat során a levegő és a kipufogógáz keverékének hőmérséklete harmatpont alá kerül, majd a kipufogógáz víztartalma a lehűlés során kondenzálódik. A jelenség nagyobb eséllyel kialakulhat akkor is, ha hideg a motor és megnövekedett állásidő után lesz elindítva a jármű. A hosszú útvonalú csővezeték miatt nagyobb kihívást jelent a teljes rendszer felmelegítése, ami szintén növeli a vízkondenzáció kockázatát. Ennek elkerülése érdekében egy hőmérséklet-szabályozó rendszer lenne szükséges. [6,9,10,12]

A következő fejezetben a vízkondenzáció által okozott vízcsepp-erózió keletkezése és károsító hatásai kerülnek bemutatásra.

4. VÍZCSEPP-ERÓZIÓ, MINT JELENÉG

A vízcseppek becsapódása által okozott felületkárosodás nem csak az autóiparban fordul elő, hanem repülőknél, gőz- és szélturbináknál, de még a mezőgazdaságban is. Maga az erózió akkor keletkezik, amikor szilárd anyag találkozik egy másik szilárd anyaggal vagy folyadékkal. A vízcsepp-erózió (WDE) egy olyan jelenség, ahol a vízcseppek nagy erővel, folyamatos ismétléssel csapódnak mozgó alkatrészeknek, melyek felületén fokozatos anyagvesztés lesz megfigyelhető. Tipikusan jellemző gőzturbinák esetében az alacsony nyomású ciklusoknál ez a károsodási folyamat. A turbófeltöltők sűrítő járókereke is tekinthető egy gőzturbinának, ahol az alacsony hőmérséklet és nyomás miatt a gőzből (ez esetben a gázból) nagyon kis méretű vízcseppek alakulnak ki, úgynevezett ködcseppek keletkeznek. Ezek a cseppek kis idő elteltével egy vízfilmet, egy vízréteget alkotnak a lapátok felületén, majd minél több vízcsepp ül meg a felületen, annál nagyobb lesz a cseppek mérete. Amint a lapátok elkezdnek forogni és megindul a légnemű közeg áramlása, a cseppek porlasztódnak és nekiütköznek az alkatrész élének. Ezen ütközés hatására jön létre a vízcsepp okozta erózió. Az eróziós folyamat a 7. ábrán látható. [13,14]

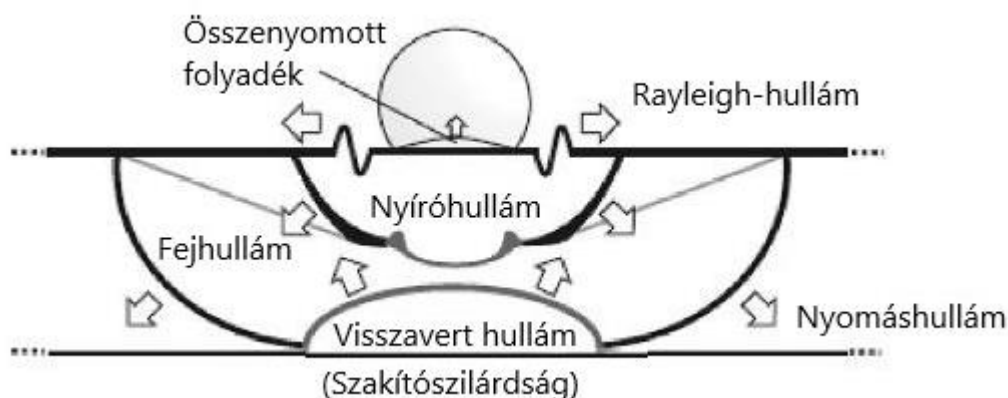


7. ábra - Gőzturbinán történő vízcseppképződés folyamata [13]

4.1. Az erózió keletkezése és hatásai különböző keménységű anyagoknál

Fontos megnézni és megismerni azt a fizikai hátteret, ami a vízcsepp-erózió mögött áll, illetve ennek ismeretében lehet a problémára megoldást találni a későbbiekben. [13,15]

Maga az erózió három szakaszra osztható fel. Az első egy inkubációs szakasz, amikor a felszínt még nem érinti semmi, így ennek függvényében nincs észrevehető tömegvesztés sem. A második szakaszt elérve megkezdődik a felületen az anyagleválás és felgyorsul a tömegvesztési folyamat. A harmadik, egyben utolsó szakaszban már nem az anyagleválás játszik szerepet. Itt megnő a felületi érdesség és az eddig keletkezett sérülésekben felhalmozódik a folyadék, ami tompítja a tovább érkező vízcseppek erejét, így ezek a cseppek sem szenvednek sérülést, csökken az erózió mértéke. Ebből az következik, hogy a felületi érdesség összefügg az erózió károsító hatásával, mindaddig, amíg nem keletkezik egy folyadékfilmréteg az erodált felületen. A vízcsepp megfelelő szögben való becsapódásakor egy lökeshullám jön létre, ami terjed az anyag felületén. Ahogyan egyre nagyobb felületen érintkezik a lapát anyaga és a vízcsepp, a nyomáshullámokból nyíróhullámok keletkeznek, amik a kiindulási helytől az anyagban terjednek tovább. Az, hogy mennyire gyorsan megy végbe a terjedés, az függ az anyag merevségétől, keménységétől és vastagságától. Egy anyag minél keményebb, a keletkezett hullámenergiát annál jobban el fogja nyelni, míg egy alacsonyabb keménységű, lágyabb anyag az energiákat továbbítja, kisebb részüket tudja csak elnyelni. Az sem feltétlenül jó, ha az anyag merev, mert a nagy nyíróhullámok az anyag belsejében szerkezeti változásokat okozhatnak, például kialakulhatnak repedések és egyéb eróziós károk. A nyomáshullám terjedését mutatja be a 8. ábra. [14,15]



8. ábra - Lökeshullámok terjedési folyamata a vízcseppek becsapódásakor [15]

A felületi keménységtől függ, hogy az ütközési energia milyen mértékben verődik vissza a folyadékcseppekbe. Keményebb anyagok esetén a nagyrésze visszaverődik, míg lágyabb anyagoknál deformáció lép fel, melynek hatására az ütközési energia elnyelődik és kevesebb verődik vissza a vízcseppekbe, emiatt gödrök keletkeznek a felületen. Azt, hogy egy lágyabb anyag milyen mértékben szenved alakváltozást, azt az anyag rugalmassága határozza meg. A sima felület, amíg nem sérül, gátolja feszültség-hullámok terjedését és ezáltal a közvetlen

deformációt is. Amint az anyag valamilyen behatástól érdessé válik, oldalirányban sebezhető lesz, aminek következtében nagy lesz a felületen a nyírófeszültség, ez pedig további károsodásokat okozhat az anyagban. [15]

4.2. Az eróziót befolyásoló tényezők

Maga a vízcsepp-erózió egy elég összetett jelenség, amely nagyon sok tényezőtől függ. Ezen tényezőket két fő csoportba lehet sorolni. Az egyik csoportba tartoznak a folyadékoknak és a szilárd anyagoknak a tulajdonságai, mint a folyadék sűrűsége vagy a szilárd test mechanikai tulajdonságai. A másik csoportba sorolhatók a becsapódási paraméterek, mint becsapódási szög, a cseppek mérete és alakja, illetve a becsapódási sebesség. [13]

A járókerék lapátozása mentén légörvények keletkeznek, amelyek befolyásolják a vízcseppek becsapódási szögét. Ez a jelenség szorosan összefügg a becsapódási sebességgel, ugyanis a légörvények sebességének változásával nőni fog a vízcseppek ütközési sebessége, illetve megváltozik ezzel együtt a becsapódás szöge is. A becsapódási szöget az inkubációs szakasz után, de még a kráterkialakulás előtt érdemes vizsgálni, hiszen így lehet pontos képet kapni, hogy milyen becsapódási szög milyen eróziós jelenségeket idéz elő. Különböző kutatók különböző kísérleteket végeztek, ami alapján eltérő megállapításra jutottak. Heymann szerint - aki a vízcsepp-eróziós vizsgálatok nagy úttörője volt, akitől rengeteg tézis és szakirodalom származik -, szinte lehetetlen pontos képet kapni a becsapódási szög jelentőségéről az eróziót tekintve, mivel a felületi érdesség folyamatosan változik már az inkubációs szakasz közben is, Lee és csapata arra jutottak, hogy elhanyagolható, Ahmad pedig úgy vélekedett, hogy nagyon is jelentős az erózió kapcsán a becsapódási szög szerepe. [13]

A becsapódó vízcseppek mérete szintén egy nagyon fontos paraméter a vizsgálatok során. A cseppméret sok tényezőt tud befolyásolni, ilyen például a becsapódási impulzusok ideje, a nyomáseloszlás vagy a becsapódási terület nagysága. Kutatások szerint, ha nagyobb a vízcseppek mérete, akkor nagyobb károkat tudnak okozni a felületen, mintha sok kisebb vízcsepp érintkezne az anyaggal. Heymann azt is kifejtette egy tanulmányában, hogy nem feltétlen a csepp tömege a meghatározó az erózió kialakulásában, hanem a cseppek formája. Egy kisebb, de lapított alakú vízcsepp viselkedése a lemez felületére érkezve hasonló, mint egy nagyobb, de gömb alakú vízcseppé, viszont ez a tézis csak a feszültségek eloszlásában játszik szerepet, a kinetikus energia mennyiségének szempontjából a csepptömeg/térfogat arány a mérvadó. [13]

A becsapódási sebesség is nagyon nagy szerepet játszik az erózió kialakulásában, mivel a sebesség függvénye az ütközés kinetikus energiája és az indukált nyomása. Ezen jelenség vizsgálatánál is több szemlélet és eredmény született. Coulon a folyadék szilárd anyaggal való találkozásának károsodásait négy csoportra osztotta: erózióra, erózió-korrózióra, korrózióra és korrózió-erózióra. Az elvégzett tesztjei során arra az eredményre jutott, hogyha a vizsgálat során az ütközési sebesség átlépi a kritikus határt, akkor előlött csak és kizárólag erózió fog jelentkezni, illetve azt is megfigyelte, hogy a kritikus határ alatt semmilyen mechanikai károsodás nem lép fel az anyag felületén. Heymann máshogy vélekedett az elvégzett vizsgálatokról, ő úgy vélte, hogy a mechanikai károsodás mindenképpen bekövetkezik, független az ütközési sebesség nagyságától, de a konkrét erózió kialakulásáig sok időre van szükség. [13]

4.3. Titán-alumínium ötvözetek vízeróziós vizsgálata

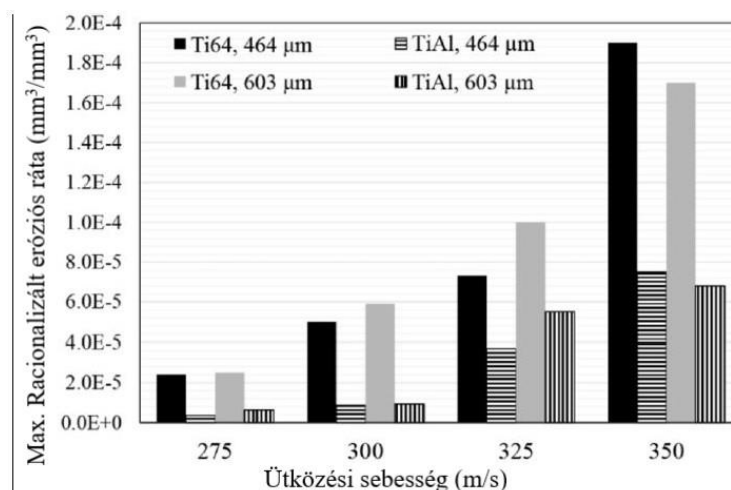
A titán-alumínium ötvözetnek rengeteg előnyös tulajdonsága van, így elég széles körben lehet alkalmazni, főként olyan területeken, ahol kritikus az erózió és a kopás. Mivel nagy a szilárdságuk, a keménységük és a rugalmassági modulusuk, így kiválóan alkalmasak repülőgépek hajtóműlapátjaihoz. Különböző vizsgálatokat végeztek az anyaggal, főként magas hőmérsékleten, de voltak olyanok is, akik szobahőmérsékleten tanulmányozták az ötvözet kavitációs eróziós viselkedését. Ezen teszten a TiAl-ötvözetet vizsgálták ausztenites rozsdamentes acéllal és tiszta titánnal összehasonlítva. Az eredmény rendkívül ígéretes volt, a titán-alumínium ötvözet 20-30-szor jobb eróziós tulajdonságokkal rendelkezett, mint a többi vizsgált ötvözet. [16]

Kanadában, a Concordia Egyetem Gépészeti és Ipari Mérnöki Tanszékén TiAl és Ti6Al4V ötvözetű lemezekon végeztek vízcsepp-eróziós vizsgálatokat. Ezen anyagokból próbatesteket készítettek, amelyeknek mérete mindössze 23 mm × 8 mm × 3 mm volt. A lemezeket szilícium-karbid, 600-as szemcseméretű csiszolópapírral csiszolták és ügyeltek arra, hogy a próbatestek felületi érdessége mindig hasonló tartományban legyen a kisebb erózió bekövetkezési valószínűsége érdekében. Magát a vízcsepp-eróziós vizsgálatához alkalmazott berendezést az ASTM G73-as szabvány szerint tervezték. A vizsgálóberendezés célja, hogy egy zárt rendszerben szimulálni lehessen az ütközés körülményeit a folyadékcseppek és a nagysebességgel forgó, próbatesteket magába foglaló lapátok között. A teszt kivitelezéséhez egy vízcseppképző berendezést alkalmaztak, amely desztillált vizet használ és a keletkezett vízcseppek 90°-os szögben érik a vizsgálati tárgyakat. A készülék magába foglal egy olyan fúvókát, melynek segítségével szabályozni lehet a cseppek méretét, de a forgó tárcsa okozta

turbulencia miatt árnyékolást kell alkalmazni, hogy a vízcseppek egyenes vonalban, minél kisebb torzulással ériék el a célfelületet. A vizsgálat során két különböző cseppmérettel dolgoztak, 464 μm -rel és 603 μm -rel, az ütközési sebesség pedig 275 m/s, 300 m/s, 325 m/s és 350 m/s voltak. A mérések során folyamatosan monitorozták a próbatestek tömegét, úgy, hogy egy mérési ciklust több intervallumra osztottak fel és az intervallumok végén megmérték az éppen aktuális tömeget, melyhez egy nagy pontosságú mérleget használtak. A kapott értékeket feljegyzeték, így a vizsgálat végére meg lehetett határozni, hogy mekkora volt az összes tömegvesztés a teljes ciklus során. [16]

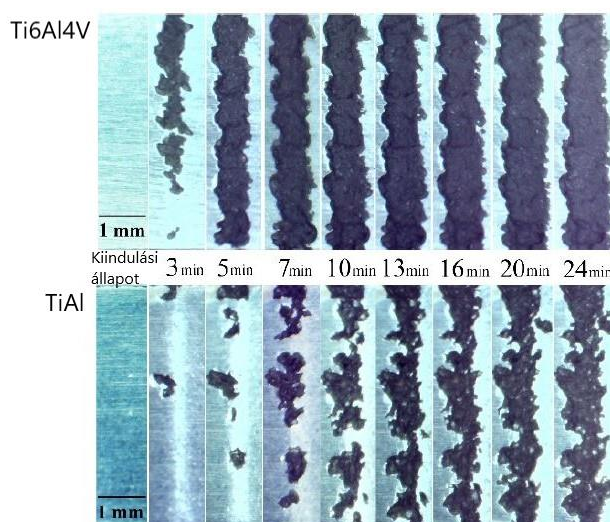
Fontos, hogy ezek a mérések megismételhetők legyenek, hiszen több mérési sorozatot kell elvégezni több anyagminőséggel, illetve az eredményekből egy szórást kell számolni a vizsgálatok végén. Éppen ennek következményeképpen a Ti6Al4V-ötvözetű anyagból három próbatest készült, amelyek vizsgálata azonos körülmények között történt. A cseppméretet 464 μm -re, az ütközési sebességet pedig 350 m/s-ra választották. A tesztek végén megfigyelhető volt, hogy az erózió az idővel növekszik, illetve az is bebizonyosodott ismét, hogy az erózió mértéke nagyban függ a próbatest felületi minőségétől és érdességétől is. Míg a kezdeti szakasznál nem figyelhető meg számottevő változás, a vizsgálat előrehaladtával elkezdődött a kráteresedés, amit anyagvesztés követett. A tömegvesztés minden intervallumban 1g volt, ami arra enged következtetni, hogy két szakasz között mindig egyenletes a próbatest kopása. [16]

A vizsgálatok végén a két ötvözetet összehasonlították és arra jutottak, hogy a becsapódási sebességet tekintve eltérő eredményeket kaptak eróziós szempontból. Itt is érvényesült az az elv, miszerint, ha nagyobb az ütközési sebesség, akkor nagyobb erózió fog keletkezni és az is, hogy a cseppek méretének milyen fontos szerepe van, jelentősen rövidíti az inkubációs időt. Ezek a tendenciák főként a Ti6Al4V-ötvözetnél voltak hangsúlyosak és megfigyelhetők. Ezen ötvözet maximális racionalizált eróziós rátája hatszor magasabb értéket mutatott, mint a sima TiAl-ötvözet, emellett az inkubációs szakasz háromszor rövidebb ideig tartott abban az állapotban, amikor nem voltak annyira súlyosak a vizsgálat paraméterei. A racionalizált eróziós ráta azt az anyagvesztést mutatja meg, amit a beömlő folyadék idéz elő egységnyi térfogaton. A legsúlyosabb eróziós tényezőt figyelembe véve is sokkal jobb eredményeket ért el a titán-alumínium ötvözet. Ennek a maximális racionalizált eróziós rátája két és félszer lett alacsonyabb és az inkubációs szakasz is csak kétszer lett hosszabb, mint a Ti6Al4V esetén. Ezen statisztikai adatokat mutatja be a 9. ábrán látható diagram különböző sebességtartományokban, a vizsgálatot mindkét cseppmérettel elvégezve. [16,17]



9. ábra - A maximális racionalizált eróziós ráta ábrázolása az ütközési sebesség függvényében [16]

Az összes vizsgálatot lefuttatva minden paraméteren megállapították, hogy a TiAl a vízcsepp-eróziós vizsgálatokon kiváló teljesítményt nyújtott. A különbség a Ti6Al4V-hez képest leginkább alacsonyabb ütközési sebességek és kisebb cseppméretek mellett domborodik ki a titán-alumínium ötvözet javára. Ez az eltérés nagyobb vízcseppek és nagyobb ütközési sebességek esetén is észrevehető, de ott már annyira nem kiemelkedő. A tesztek futását szakaszosan megszakították, hogy mindig az aktuális állapotot és az erózió hatását dokumentálni tudják. A dokumentáció során történt tömegmérés az anyagveszteség számszerű meghatározása érdekében, illetve az erodált próbatesteket optikai mikroszkóp alatt is, felvételeket készítve az aktuális eróziós állapotról. [16]



10. ábra - Mikroszkópikus felvétel a kráterek keletkezéséről meghatározott időintervallumokban [16]

A 10. ábra mutatja, hogy 325 m/s-os ütközési sebességnél és 603 μm-es cseppméretnél bizonyos időintervallumokban hogyan zajlott az eróziós folyamat mindkét anyag esetében. A

képen megfigyelhető, hogy a Ti6Al4V esetében már három perc elteltével gödrök kezdtek el kialakulni a próbatest felületén, majd egymással összeolvadva egy krátert alkottak, huszonnégy perc elteltével pedig összefüggő kráter keletkezett a vizsgált darabon, mondhatni a teljes felületen. TiAl ötvözetnél a gödrök először egyre mélyebbek lettek, majd az idő múlásával elkezdtek itt is összeolvadni. [16]

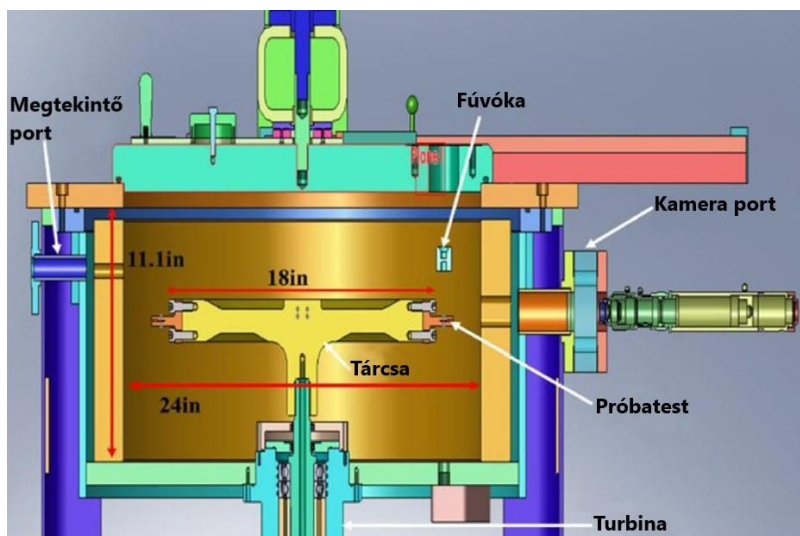
Ezek által egyértelműen meg lehet határozni, hogy a titán-alumínium ötvözet sokkal jobb erózióálló tulajdonságokkal bír, mint vizsgált társa, ez pedig azt jelenti, hogy sokkal jobb mechanikai tulajdonsággal és belső anyagszerkezettel rendelkezik. A szilárdsága és a keménysége nagyjából 20 százalékkal nagyobb, mint a Ti6Al4V-nek és teljesül a vízcsepp-eróziós elmélet, hogy a mechanikai tulajdonságok elengedhetetlen fontosságúak az erózióállósághoz. Egyes kutatók úgy vélték, hogyha egy anyagnak nagyobb az energiaelnyelő tulajdonsága, akkor az erózióval szemben is jobban elleáll. A Ti6Al4V nagyobb rugalmassági moduluszal rendelkezik, mint a TiAl, de az eróziós vizsgálatok során rosszabb eredményeket produkált, így kijelenthető, hogy egy anyag rugalmassága nem függ össze az erózióállósággal. A következő a szívósság elemzése volt. A Ti6Al4V $30\ 000\ \text{kJ/m}^3$ -mal nagyobb energiasűrűséggel rendelkezik a TiAl-hoz képest, mégis rosszabban reagált a vízcseppek erodáló hatására, így a kutatók megállapították, hogy az anyagok szívóssága nincs hatással a vízerózióra. Hogyha lamellás szerkezetű titán-alumínium ötvözetet alkalmazunk, sokkal lassabb lesz a felületi repedések képződése és terjedése, ami nagyban hozzájárul az erózióállósághoz és dinamikus terhelésnél nagyjából 600MPa-lal nagyobb lesz a szilárdsága, mint a Ti6Al4V-nek. Továbbá a TiAl-ötvözetnek magas az alakváltozási edzhetősége, ami azt jelenti, hogy az anyag minden bekövetkezett ütközésnél felkeményedik, így a tönkremenetelhez vagy deformációhoz az eredetinel nagyobb feszültségek kellenének. Többek között ez az anyagtulajdonság is egy nagyon jó ok a vízcsepp-erózióval szembeni ellenállásra, főként akkor, hogyha az inkubációs szakasz hosszúra nyúlik és a maximális eróziós sebesség is alacsony. Heymann azt is megállapította, hogy az erózióállóság legfontosabb tulajdonságai a nyúláskeményedési együttható, a keménység és a szakítószilárdság. [16]

4.4. A felületi érdesség és a vízcsepp-erózió kapcsolata

Ahogy az előző fejezetben is említésre került, a felületi érdességnek szoros kapcsolata van a vízcseppek eróziós hatásaival. Egy következő tanulmányban a gőzturbinák lapátozásánál általánosan alkalmazott martenzites, rozsdamentes, 12 százalékos Cr-acél, illetve az előző tétisből is ismert lágyított Ti6Al4V-ötvözetet kiinduló felületi érdességét vizsgálják, mennyire van hatással a vízcsepp-erózió kimenetére. [14]

Legelőször az acélminták felületeit kezelték, amelyhez két módszert alkalmaztak. Erre azért van szükség, hogy a kapott eredmények jól szemléltethetők legyenek. Az egyik módszer manuálisan, 180-as szemcseméretű szilícium-karbid csiszolópapírral történik, a másik pedig egy polírozógép segítségével, ahol a csiszolás 24 órán keresztül folyik, 1 μm -es gyémántpaszta használatával. Ezekkel az eljárásokkal a kapott átlagos felületi érdesség (R_a) 0,2 μm és 0,035 μm lett. Továbbá vizsgálták még az edzett Ti6Al4V-t is, szintén a fentebb említett két eljárással. A különbség annyi volt, hogy a 180-as szemcseméretű csiszolópapír mellett alkalmaztak egy 600-as szemcseméretűt is, illetve a polírozógépnél 3 μm -es gyémántpasztát használtak az 1 μm -es helyett, így a kapott átlagos felületi érdességek a következők voltak: 0,3 μm , 0,12 μm és 0,04 μm . A kialakított átlagos felületi érdességek közül a 0,2 μm és a 0,3 μm az, amelyek a valós turbinalapoótokhoz a legközelebb állnak, a többi kapott eredmény csak összehasonlításként szolgál. [14]

A vizsgálatokhoz a kanadai Concordia Egyetem által, vízcsepp-eróziós vizsgálatokra készített berendezést használták, aminek a vázlata a 11. ábrán látható. Ez a vizsgálóberendezés egy forgó tárcsából és egy speciális vízcsepegtető eszközből áll. [14]



11. ábra - A Concordia Egyetem által tervezett vizsgálóberendezés vázlata [14]

Külön érdekessége, hogy a tesztek egy vákuumkamrában végzik, így tudják csökkenteni a súrlódási veszteségeket és a súrlódás okozta hőmérsékletnövekedést. Ebben az esetben 2 mm-rel nagyobb, négyzet alakú, 25 mm $\times$ 8 mm $\times$ 3 mm-es mintadarabokat alkalmaztak az eredeti próbadarab méretéhez képest, ehhez pedig speciálisan erre a célra kialakított mintatartókat gyártottak. A forgó korongra két kar került felhelyezésre olyan célból, hogy egyszerre két mintát is lehessen vizsgálni és a tárcsa is egyensúlyban legyen. A berendezés maximum 20 000 fordulat/perces sebességen képes működni és egy teljes kísérlet elvégzéséhez legalább két napra

van szükség. A teszteiklusok 15-20 perces intervallumokból állnak, amibe beletartozik a vákuum létrehozása és a tárcsa lelassítása is, emellett minden ciklus után mérlegelés és dokumentálás történt. Ezen berendezésnél az ütközési sebesség 100 m/s és 500 m/s között szabadon választható. Ebben a kísérletben két sebességet választottak ki, ezek pedig a 300 m/s és a 350 m/s, illetve két cseppátmérőt, ami 460 μm és 603 μm voltak. [14]

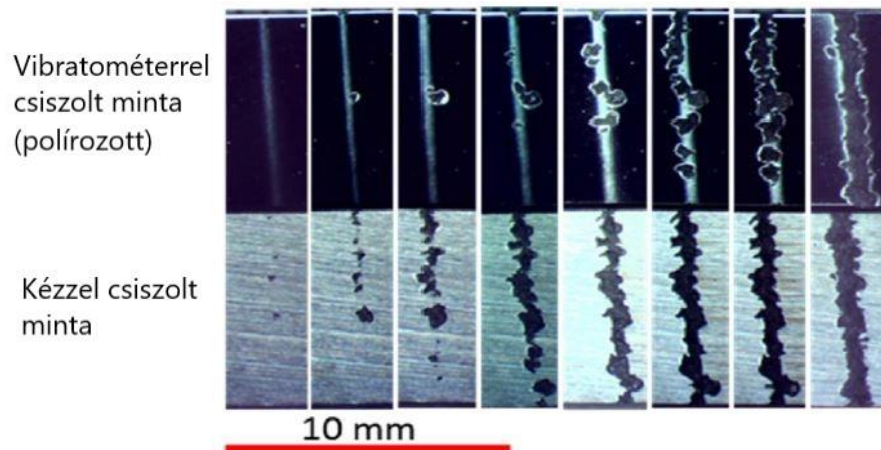
A kísérlet elvégzésénél egy nagysebességű kamera segítségével képeket készítettek, amellyel a vízcseppek tulajdonságait ki tudták elemezni. Egy sorozat körülbelül 200 cseppből állt és a cél annak a meghatározása volt, hogy fordulatonként hány csepp ütközik a próbatesttel. Ezzel kapcsolatban különböző számításokat végeztek, melyek segítségével megállapították, hogy 460 μm -es cseppátmérő esetén 7 csepp ütközik egy próbatesttel, míg 603 μm -es átmérőnél ez a szám 3-ra csökkent. További számítások útján a képkockákat elemezve a cseppek sebességét is meg tudták határozni, ami 460 μm -nél 8,7 m/s, 603 μm esetében 13,5 m/s volt. [14]

Először a 12 %-os Cr-acélt tesztelték. A vizsgálat során három paraméteren változtattak: a cseppek méretén, az ütközési sebességen és a kiinduló átlagos felületi érdességen, így összesen nyolc vizsgálati végeredményt kaptak, plusz egyet, amit a megismételhetőség jegyében abszolvááltak. A rozsdamentes Cr-acélnál megfigyelhető volt, hogy a minél finomabb felületi érdesség, főként az inkubációs szakaszban sokkal jobb eredményeket mutatott, kisebb volt az erózióra való hajlam, de a vizsgálat előrehaladásával láthatóvá vált, hogy a kezdeti felületi érdességnek egy bizonyos pont után már nincs túl nagy előnye. Azt is megállapították, hogy 350 m/s-os ütközési sebességnél a cseppméretek eróziós hatása már nem jelentős a rozsdamentes acél esetében, ám ezek a megállapítások további kutatásokat igényelnek. [14]

A Ti6Al4V esetén csak két paramétert változtattak, az átlagos felületi érdességet a kiinduló próbadarabnál, illetve az ütközési sebességet, a cseppméret minden esetben 460 μm volt. Ebben az esetben is kijelenthető, hogy az inkubációs szakaszban a finomabb felületi érdességű próbatest jobb eróziós tulajdonságokkal bírt, a kézzel csiszolt darabok eredményeihez képest. [14]

Ezen kutatás is alátámasztotta azt, amit a Concordia Egyetem is megállapított a felületi érdesség és a vízcsepp-erózió kapcsolatáról. Kezdeti szakaszban gödrök keletkeznek, egymástól elszórtan, majd az erózió előrehaladtával ezeknek a gödröknek a mérete is növekszik, majd végül teljesen összeolvadnak és egy krátert alkotnak. Ezt a jelenséget mutatja be a 12. ábra a 12 % Cr-acél időszakos eróziójáról a polírozott és a kézzel érdesített felületeknél. A polírozott mintáknál a gödrök nem egyenletesen alakulnak ki, csak fokozatosan. Például

előfordulhat, hogy az egyik gödör már kialakult az inkubációs szakasz alatt, a másik pedig csak akkor fog, amikor az első már egy előrehaladottabb állapotban van, így kisebb lesz a tömegveszteség és erózióállóbb lesz az anyag. Ezzel ellentétben a csiszolt mintáknál a gödrök egymás után keletkeznek és viszonylag rövid idő alatt egyesülnek, ezért nagy lesz a tömegveszteség és kevésbé fog ellenállni az erózióknak. [14]



12. ábra - a 12 % Cr rozsdamentes acél eróziós előrehaladása különböző érdesítési eljárások mellett [14]

A kutatás összegzése fényt derít arra, hogy nagyon fontos a felületek és a bevonatok kezdeti felületi érdességének a meghatározása, hiszen előfordulnak olyan esetek, amikor a kezdeti felületi érdesség határozza meg az inkubációs időszak hosszát vagy éppen az ütközési sebességet. Emellett fontos, hogy az erózió nagyban függ az anyagtól, mind az eróziós körülményektől. Az ASTM G73-10-es szabvány szerint a bevonatok és a felületek szempontjából az inkubációs szakasz az, ami az eróziót tekintve a legfontosabb, ám ezen tanulmányban a kutatók rácsáfoltak erre, ugyanis nagyon fontos a felületi érdesség és minél finomabb egy anyag felülete, minél simább, annál hosszabb ideig fog tartani az inkubációs szakasz és annál jobban nő az adott alkatrész élettartama. [14]

5. ASTM G73-10-ES SZABVÁNY ELEMZÉSE

Az előző fejezetben a feldolgozott tanulmányok során is már felmerült az ASTM G73-10-es szabvány és ennek pár alkotóeleme. Ezen dokumentum ad egyfajta útmutatást, hogy magát az eróziós berendezést a vizsgálatok elvégzéséhez hogyan kell beállítani, illetve az elemzési, valamint vizsgálati eljárásokat meghatározni, viszont magára a szerkezet felépítésére nem terjed ki, hiszen minden vizsgálatához más és más körülmények szükségesek, ezeket nem lehet egységesíteni. Magát a módszert olyan eseteknél alkalmazzák, ahol szilárd testeket vízcseppek ütköztetésével erodálnak. A vizsgálatoknak több céljuk lehet, például bevonatok vagy anyagok ellenállása az erózióval vagy bármilyen károsító hatással szemben. [17]

Nagy általánosságban a folyadékütközéses vizsgálatokat úgy kivitelezik, hogy egy forgó testhez (ez lehet egy kar vagy egy tárcsa) rögzítik a próbatesteket, illetve fontos, hogy szabványos anyagú próbatestekkel minden vizsgálat előtt végezni kell egy kalibrációs mérést, aminek szerepelnie kell a komplett vizsgálati sorozatban. Adatelemzéshez egy kumulatív eróziós görbét kell készíteni, amely a tömegveszteségeket ábrázolja, amit olyan paraméterekkel lehet jellemezni, mint az erózió maximális sebessége és a névleges inkubációs idő, melyek dimenzió nélküli értékek lesznek. A kumulatív erózió-idő görbét úgy lehet megkapni, hogy a vizsgálatot meghatározott időközönként megszakítják és a próbatest tömegét lemérik, majd feljegyzik. Ez egy nagyon fontos, alap része az eredmények kiértékelésének, mint ahogy az is, hogy nem lehet minden anyagminőséget ugyan annyi ideig vizsgálni, valamelyik hamarabb eléri a végső eróziót, de vannak olyanok, amelyek nem. Ebből következik, hogy az anyagok erózióállósága egy fiktív dolog, ezt nem lehet előre pontosan meghatározni. Hogyha két vizsgált anyag között mindössze 20 százalék a különbség, az eróziós szempontból nem annyira tekinthető relevánsnak. Az erózió sebessége nem lesz időben állandó. Megállapították, hogy az úgynevezett lappangási időszakban van a legkevesebb anyagveszteség, ezután felgyorsul az eróziós sebesség egy maximális értékig, ami után egy csökkenő sebességű szakasz következik [17]

A szabvány alkalmazhatóságát tekintve 60 m/s és 600 m/s ütközési sebességekre használható. Ha túl alacsony az ütközési sebesség, akkor felerősödik a korróziós hatás, nagy sebességeknél pedig megnő a próbatestek hőmérséklete, illetve nagyobb lesz a felületi anyagleválás. Az ütközési sebesség, illetve a cseppméret megválaszthatóságával szélesebb spektrumú eredményeket lehet kapni és lehetőség van közel üzemi környezetben szimulálni az

adott problémát. További előnye, hogy széles skálán lehet vizsgálni bevonatokat, rideg anyagokat, sőt, még elasztomereket is. [17]

5.1. A készülék paraméterei és beállítása

A vízcsepp-eróziós vizsgálatot olyan berendezéseken szokták elvégezni, ahol egy tárcsa vagy kar forgó mozgást végez és erre egy vagy több próbatest van rögzítve vizsgálati célból. A vizsgálatoknak két kategóriája van: vannak az ismétlődő ütésvizsgálatok és az elosztott ütésvizsgálatok. Általában a vízszugárral működőket sorolják az első csoportba, amelyek pedig valamilyen esős körülményt szimulálnak, azokat a második csoportba. [17]

A vízcseppek átmérője egy nagyon fontos adat a vizsgálatok pontos elvégzése szempontjából, amely 0,1 mm és 5 mm között mozog. Ezek mikrométerben meghatározva a következő értékek: 100 μm és 5000 μm . A cseppek előállítása forgó korongok vagy rezgő üreges tűk segítségével történik. Fúvókáknál fontos figyelni, nehogy instabil eredményeket mutasson. A vibrálótű például egyenletes cseppméretet tud biztosítani a permetekhez képest. Ismétlődő ütésvizsgálat végzésekor figyelni kell, hogy a vízszugár a próbatest közepére essen, így nem fog bekövetkezni indokolatlan élerózió a mintadarabok szélein. Elosztott és ismétlődő teszteknel arra is ügyelni kell, hogy úgy legyen beállítva a permet vagy a vízszugár, hogy ezek ne tudjanak a próbatestek forgása közben egyik mintadarabról átadódni a másikra, mert akkor hamis eredmények keletkezhetnek. [17]

5.2. Próbatestek előre meghatározott paraméterei és referenciaanyagok

A próbatestek lehetnek sík vagy valamilyen görbe felületűek, például hengeres vagy szárnyas, melynek a vizsgálat céljaitól függenek. A mintadarabok kimunkálása történhet tömör rúdból és síklemezből, emellett lehetőség van szabványosított felületre felvitt bevonatok vizsgálatára is. A próbadarabok rögzítésének biztosítani kell a könnyű eltávolítást a vizsgálat közbeni mérlegeléshez és a gyors tisztíthatóságot. Fontos arra ügyelni, hogy a minta pontosan, csak egyféleképpen illeszkedhet a befogó szerkezetbe és a rögzítését úgy kell biztosítani, hogy minél kevesebb erőhatás terhelje a darabot. [17]

Mint az előző fejezetben is bizonyításra került, a kezdeti átlagos felületi érdességnek igen nagy hatása van a vizsgálat kimenetelére. A szabvány meghatározza ennek értékét ömlesztett vagy rúdanyagból munkált mintadarab esetében, ami 0,4 μm és 1,6 μm közötti tartományban van. Ezeket az érdességeket közepes csiszolással vagy finom megmunkálással lehet megkapni. Hogyha a próbatest lemezből vagy bevonatos anyagból készül ügyelni kell a felületek

hullámosságára, mert ez befolyásolhatja a vizsgálati eredményt. Bevonatolt lemezek esetében a bevonat vastagságának tükröznie kell a valóságos állapotokat, amiket üzemi körülmények között alkalmaznak. [17]

Minden olyan vizsgálatához, ami erózióállósággal foglalkozik, szükség van legalább kettő referenciaanyag használatára. Ezen anyagoknak két funkciójuk van. Az egyik, hogy egy referenciát állítson fel a többi próbadarab vizsgálatához, a másik pedig segítséget nyújt az úgynevezett súlyossági tényező meghatározásához, amihez mindig fémből készült referenciaanyagokat használnak. Ezeket az anyagokat úgy kell kiválasztani, hogy minél közelebb legyen a várható erózióállósága a vizsgált próbatesthez. Hogyha ez nem teljesül és túl nagy lesz a különbség a két anyag eredményei között, akkor ott nem fog pontos eredményt mutatni a vizsgálat. A szabvány a referenciaanyagoknak több csoportját is megemlíti, annak függvényében, hogy milyen anyagot vizsgálnak. Jelen esetben a szakdolgozat szempontjából releváns referenciaanyagok az Al 6061-T6, az Al 1100-0, a 99,98 %-os tisztaságú, lágyított nikkel és az AISI 316 típusú, rozsdamentes acél, melynek keménysége 155-170 HV. A 13. ábrán ezen anyagok tulajdonságai láthatók. [17]

A referenciaanyagok tulajdonságai ¹ (A1.1-es táblázat)				
Anyag	Aluminum 110 0-0	Aluminum 6061-T6	Nikkel ² 99.98 %	Rozsdamentes acél AISI 316
Keménység ,HV	24–29	95–115	68–82	155–175
Szakítószilárdság, MPa (ksi)	90 (13)	310–330 (45–48)	340–370 (49–53)	550–600 (80–87)
Nyúlás, %	39–46	12–20	50–62	49–63
Területcsökkenés, %	50–80	27–35	60–90	56–77
Fajlagos tömeg	2.7	2.7	8.9	7.8
"Referencia-erózióállóság" (S) _{er}	0.04	0.08	0.5	1.0 ³
"Referencia inkubációs ellenállás" (S) _{er}	0.005	0.05	0.2	1.0

¹ Ezek a X1. függelékben leírt, laboratóriumi vizsgálati programban használt anyagok mért tulajdonságai.

² A laboratóriumi vizsgálat során az INCO "Nikkel 270"-et használták.

³ Tetszőlegesen kijelölt hivatkozási alap.

13. ábra - A vizsgálatokhoz használt referenciaanyagok tulajdonságai [17]

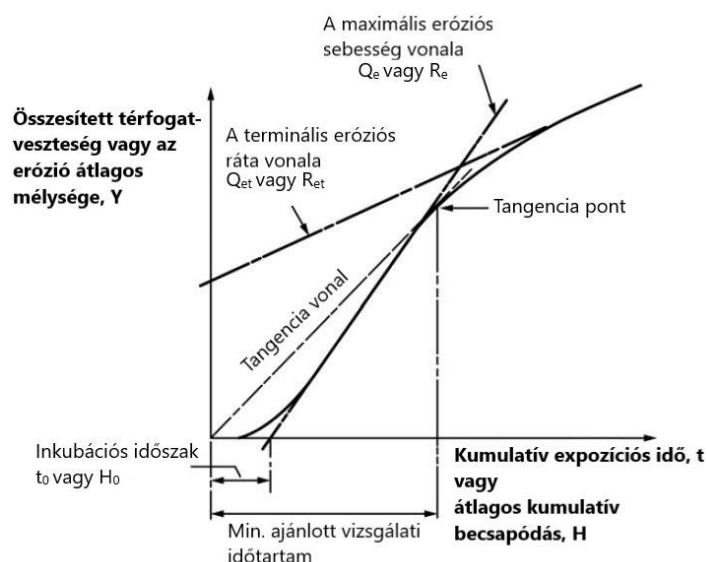
5.3. A fémek tesztelési eljárása

Minden egyes vizsgálati eljárásnál, ha nincs külön meghatározva valami egyedi kritérium, akkor mérésenként legalább három próbatestet kell vizsgálni. Fontos, hogy a vizsgálatokat időközönként meg lehessen szakítani a minták tisztítása és mérlegelése céljából. Az elasztomer bevonatoknál és különböző nemfém mintáknál elfogadható a teljes vizsgálati ciklus megszakítás nélküli elvégzése, mivel ezekben az esetekben több időt vesz igénybe a megszakítás és a vele járó lépések, mint maga a vizsgálat. Tömegveszteség megállapítása céljából végzett vizsgálatok esetén nagyon fontos a próbadarabok tisztítása és szárítása, amit addig kell ismételni, amíg az egymást követő mérések ugyan azt, vagy közel azonos értékeket nem mutatnak. [17]

Szerkezeti anyagok és bevonatok vizsgálatánál a legfontosabb és a legelső lépés egy kumulatív erózió-idő görbe megállapítása, melyet a vizsgálat bizonyos időszakonkénti megállítással, a mintadarab kiszerezésével és tömegének lemérésével lehet megkapni és emellett rögzíteni kell az összes tömegvesztést és a térfogatvesztés együttes expozíciós idejét. [17]

A vizsgálati folyamat egy keménységméréssel kezdődik egy olyan felületen, ami a lehető legközelebb van az erodálni kívánt területhez és meg kell határozni egy Vickers-keménységszámot a további folyamatok könnyítése érdekében. Következő lépés a próbatest megtisztítása és megszáritása, majd ezek után egy nagy pontosságú mérleg segítségével le kell mérni a kiinduló tömegét. A mérleg pontossága 1gm, vagy annál kisebb legyen. A tisztítás illékony oldószerrel történik egy nem koptató hatású eszközzel, mint például egy ruha vagy egy sörtés kefe. [17]

Miután ez megtörtént, a próbatestet bele kell helyezni a vizsgálóberendezésbe és beállítani a stabil üzemi sebességet, ezután történhetnek meg a környezeti paraméterek optimalizálásai, majd legutoljára a vízcsepp generátor bekapcsolása és a vizsgálat kezdeti idejének feljegyzése. Következő lépésként meg kell határozni egy bizonyos időintervallumot, az aktuális időt feljegyezni, ami után a víz áramlását meg lehet szüntetni. Ennek az időnek viszonylag rövidnek kell lennie, hogy pontosabb grafikont lehessen belőre készíteni. A mintát ki kell venni a készülékből, meg kell tisztítani és száritani a felületet, majd a mérleg segítségével megmérni ismét a tömegét. Tisztítás esetén, ha korrózió nyomai láthatók a darabon, akkor speciális tisztítást kell alkalmazni. Ezután ki kell számítani a kumulatív expozíciós időt, illetve az összesített tömegvesztést. Ezeket el kell osztani az anyag sűrűségével, így meg lehet kapni az összesített térfogatvesztést. Ez alapján a térfogatvesztés ábrázolható lesz az expozíciós idő függvényében. Az egész folyamatot addig kell ismételni, amíg a maximális eróziós sebesség és a lappangási idő megállapítható, az eróziós sebesség csökkenéséig. Magát a vizsgálatot addig kell folytatni, amíg az összesített erózió-idő görbénél az érintő nem megy át az origón. Ez a görbe a 14. ábrán megtekinthető. Természetesen lehet tovább folytatni a vizsgálatokat, ha az anyagok/bevonatok hosszabb távú eróziós viselkedését akarjuk megkapni. Legutolsó lépésként a teljes erózió fényképekkel dokumentálható. További előírás, hogy minden vizsgálathoz legalább 4, de lehetőség szerint 6 bevonatos próbatest legyen tesztelve. [17]



14. ábra - Összesített erózió-idő grafikon a legfontosabb paraméterekkel [17]

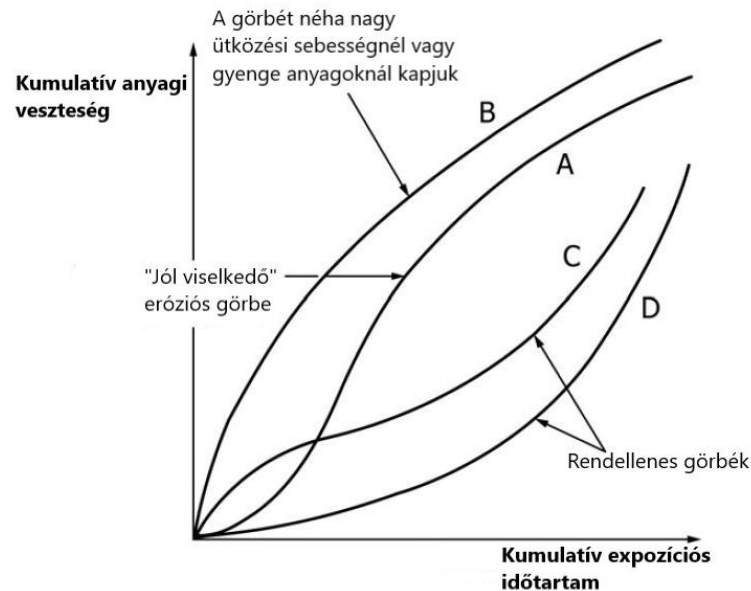
5.4. Tisztítási eljárások korrodált minták esetében

A korróziós jelenség a vizsgálat során főként kompozitoknál, műanyagoknál és kis sűrűségű anyagoknál jellemző, amely létrejöhet az ásványi anyagoktól, amik a vízben megtalálhatók, illetve a felületen megmaradó folyadékfilmtől is. A próbadarbot a vizsgálóberendezésből kivéve óvatos tisztítás után egy ultrahangos fürdőbe kell tenni, feltéve, ha az anyag állapota és tulajdonságai erre képesek és nem történik a felületen nagyobb károsodás. Ezután, lágyabb anyagok, mint például kompozitok és egyéb műanyagok esetében 50°C-os hőmérsékletű, speciális sütőbe kell rakni a darabokat, hogy a bennük maradt víz megfelelő módon el tudjon párologni. Átlagosan a szárítási idő 16 óra. Azt, hogy a próbatest megfelelően kiszáradt-e, egy nagy pontosságú mérleg (0,01mg) segítségével lehet meghatározni. A mintadarab a rátételt követően, többszöri ismétlés alkalmával is ugyan olyan tömegű, akkor megfelelő volt a szárítási eljárás és kellően kiszáradt a munkadarab. [17]

5.5. Az eróziós ellenállás kiszámításának elmélete

A folyadék ütközéséből adódó károsodás nem egyenesen arányos a vizsgálat eltelt idejével, ezért ebből nem lehet hosszútávú következtetéseket levonni. Mivel a lappangási idő, az eróziós- és ütközési sebességek nagyon változók, így szórás és átlagszámolás helyett logaritmikusan lehet kiértékelni az eredményeket. Az erózióállásági értékek a referenciaanyagokhoz képest egy egyszerű arányként kifejezhetők: a vizsgált próbatest meghibásodásáig eltelt időt arányosítják a referenciaanyag meghibásodásáig eltelt idővel. Ez egy nagyon egyszerű módszer, ám nem mindig tud adni pontos és konkrét értékeket, éppen ezért léteznek ennél információdúsabb megközelítések is.[17]

A következő, 15. ábrán látható grafikon minden eróziós vizsgálat egyik, ha nem a legfontosabb grafikonja, ugyanis ezen ábrázolják az eróziós idő és sebesség kapcsolatát. Ezt kumulatív erózió-idő görbének nevezik. A következő pontokban ismertetésre kerülnek a görbék jellemzői. [17]



15. ábra - A kumulatív erózió-idő görbe típusai [17]

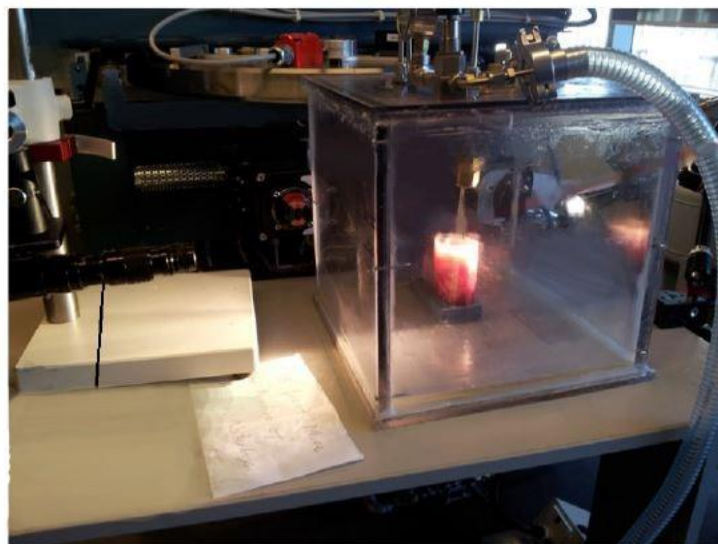
Az A-görbét gyakran nevezik „jól viselkedő” eróziós görbének is, általában ez a leggyakoribb a vizsgálatok eredményeinek kiértékelésénél. Hogyha nagyon nagyok az eróziós sebességek, akkor a görbének nincs inkubációs szakasz. A B-görbe esetében valamelyik paraméter rosszul lett kiválasztva, például túl sok idő telt el 1-1 köztes vizsgálat között, túl nagy ütközési sebesség, így egyszerre hirtelen nagyon sok anyag kerül eltávolításra a felületből, így kimarad az inkubációs szakasz. A C és D-görbék rendellenes viselkedésre utalnak, ami adódhat készülékkal kapcsolatos problémából, esetleg túl törekeny anyagokból, amelyeknek rossz az eróziós viselkedésük. Ha ilyen eredmények jönnek ki a vizsgálat során, akkor célszerű az aránypáros módszert alkalmazni. [17]

6. EGYEDI VÍZCSEPP-ERÓZIÓS BERENDEZÉS BEMUTATÁSA

Dolgozatom fő alkotóeleme egy általam tervezett vízcsepp-eróziós vizsgáloberendezés, amellyel célom, hogy az ASTM G73-10-es szabvány kritériumainak megfelelő vizsgálatokat végezhessenek olyan próbatesten, melyek anyagminősége és bevonatai megegyeznek a turbófeltöltő sűrítő járókerekének anyagminőségével és bevonataival. A 3D modell elkészítése SolidWorks tervezőprogram segítségével valósult meg. A tervezés során fontos volt számomra, hogy egy kis méretű, viszonylag könnyű, mobilis, kompakt szerkezetet építsek fel virtuálisan, amivel idő- és költséghatékonyan el tudom végezni a tesztek. Nem volt elhanyagolható tényező az sem, hogy lehetőleg minél kevesebb egyedi alkatrészből épüljön fel a könnyű szervizelhetőség és javítás érdekében amellet, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható alkotóelemek sokkal költséghatékonyabbak, mint az egyedi gyártásúak.

6.1. Inspirációk gyűjtése a tervezéshez

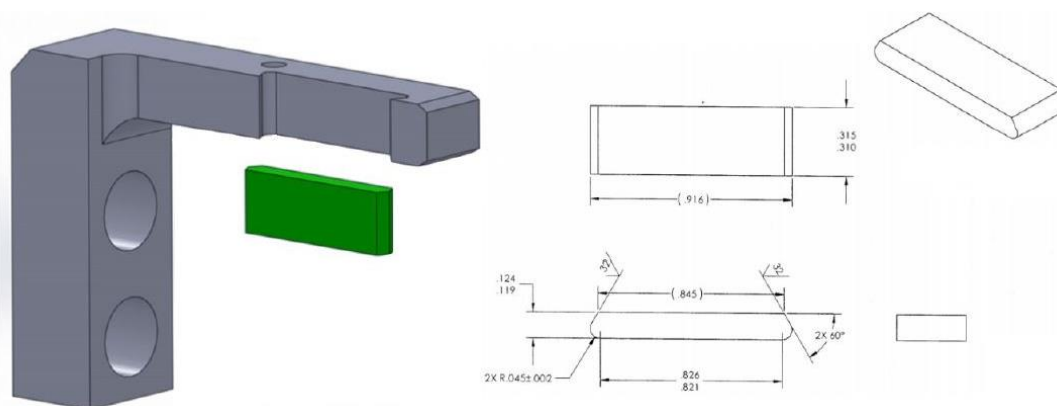
Az irodalomkutatások során nagyon sok inspirációt találtam a komponenspadom megtervezéséhez, akár más iparágakból is. A legnagyobb részben a kanadai Concordia Egyetem által felépített, direkt vízcsepp-eróziós célra kifejlesztett berendezése nyújtotta számomra a legnagyobb alapot. Nagyon sok szakirodalomban fellelhető az általuk épített tesztpad, ugyanis a piacon szinte egyedülállónak számít. Maga a vizsgáloberendezés a 16. ábrán látható.



16. ábra - A kanadai Concordia Egyetem által tervezett vízcsepp-eróziós vizsgálo berendezés [13]

Igaz, a próbatesteket tartó forgó tárcsa meghajtása nem látszik, viszont egy elég kis méretű berendezésről van szó és elfér egy asztalon is. Ami még számomra alapot nyújtott, az szintén

az általuk elkészített és lemodellezett próbatest tartó kar és a hozzá tartozó kis méretű próbatestek. Ezeknek a CAD modellje a 17. ábrán tekinthető meg. A próbatest méretei ezen az ábrán vélhetően inchben vannak megadva.



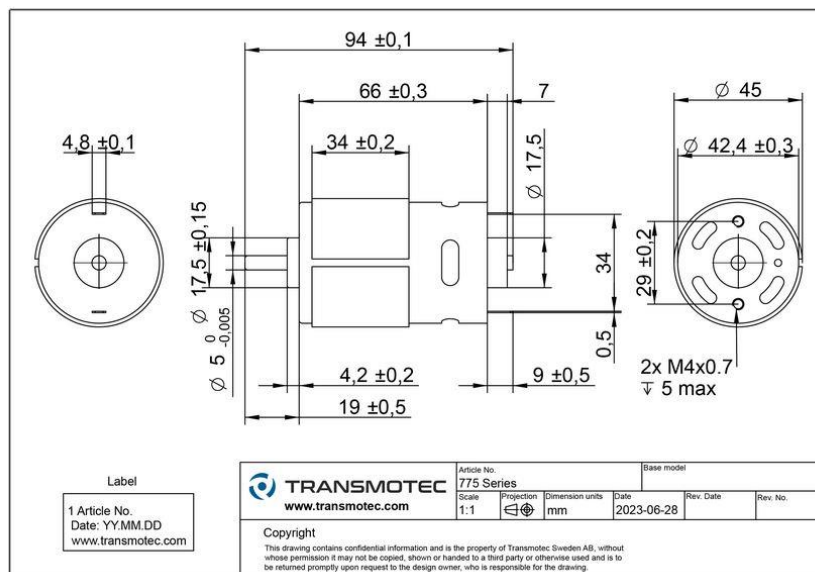
17. ábra - Szintén a Concordia Egyetemen készült próbatest tartó kar és a próbatest rajza [13]

6.2. Tervezési folyamat, részegységek jellemzése

Kezdetben nagyon sok opció született az általam megtervezendő berendezésre. Első körben egy hagyományos, 3000 fordulat/perces névleges teljesítményű villanymotorral szerelt tesztpadot gondoltam ki, mivel a Járműhajtás Technológia Tanszéken ez állt rendelkezésre és kézenfekvő gondolat volt ezt beépíteni. A tervezések közepette azonban problémákba ütköztem és rájöttem, hogy megannyi hátránnyal és költséggel járna a vizsgálopád. Többek között a kis méretű próbatestekhez indokolatlanul nagy lett volna a szerkezet, nagyon erős és mennyiségileg sok anyag kellett volna a burkolat elkészítéséhez. Másrészt a forgó tárcsa annyira kis átmérővel rendelkezik, hogy a szabvány által meghatározott sebességtartományhoz mindenféleképpen áttételezésre lett volna szükség, viszont a villanymotor tengelyére nem található kereskedelmi forgalomban kapható ékszíjtárcsa, csak egyedileg lehetett volna legyártatni, ami megemelte volna a költségvetést, plusz még nagyobb házat kellett volna tervezni hozzá, ami ugyan csak nem költséghatékony. Emellett biztonsági problémák is felmerültek volna, hiszen egy 300-400 mm átmérőjű szíjtárcsával egy 50 mm átmérőjű szíjtárcsát ilyen sebességek és fordulatszámok mellett életveszélyes lett volna meghajtani, nem is beszélve a szíjakról, minimum dupla ékszíjat kellett volna alkalmazni. A fogaskerék kapcsolat kialakítása is szóba jött, de ahhoz még több helyre és bonyolultabb megoldásokra lett volna szükség.

Ezután az ötlet után egy másmilyen megoldásra esett a döntésem, így elkezdtem keresni nagy teljesítmény gépeket. A kutatásom eredménye sikeresnek bizonyult és egy külföldi oldalon rábukkantam egy 200W-os, 19 000 fordulat/perces, nagysebességű, kis méretű DC-

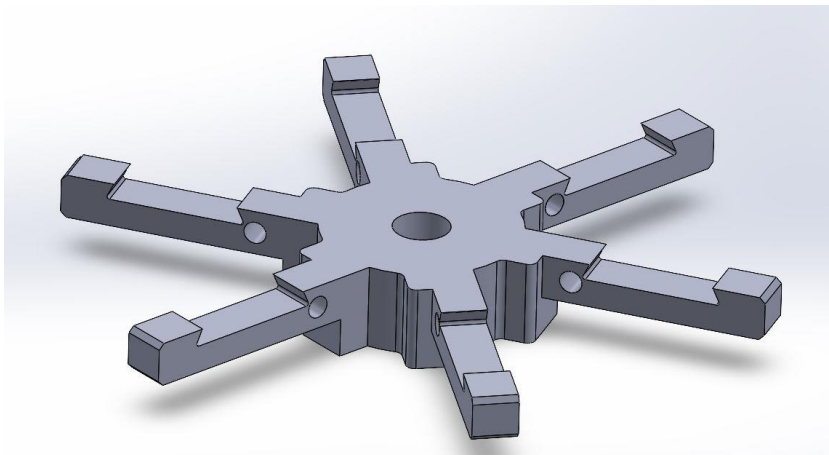
motorra. Ez a tesztpadhoz tökéletesen passzolt, hiszen a teljes hossza nincs 100 mm és a tömege sem haladja meg a 480 grammot. Emellett nagy előnye, hogy a weboldalon nyilvánosan elérhető hozzá a CAD-modell, ami megkönnyítette a szerkezettel való összeépítést, minden egyes paramétere és mérete megtekinthető. A nagysebességű DC-motor műszaki rajzát a 18. ábra tartalmazza. A bekötése is sokkal egyszerűbb, nem igényel nagyon sok és nagyon nagy alkatrészeket, kis méretű házban is elfér, így sokkal költséghatékonyabbá tette a gyártást. Ezzel a megoldással körülbelül a felére sikerült csökkenteni a komplett tesztpadot. [18]



18. ábra - A komponentesztpadhoz használt villanymotor műszaki rajza, méretezése [18]

Következő nagy kihívást a forgó tárcsa és a próbatest tartó karok okozták. A cél itt is az volt, hogy minél kisebb és könnyebb legyen, a villanymotornak ne kelljen nagy erőket kifejteni a megmozdításához. Kezdetben egy alkatrészként, egy anyagból gondoltam a kimunkálást, mert így sokkal kisebb és vékonyabb geometriát tudtam létrehozni, ami a tömegcsökkentés szempontjából előnyös. Első ötlet az volt, hogy a tengelyre, ami összekapcsolja a villanymotort és a tárcsát, egy reteszkötés segítségével illeszttem rá és pluszban a tengelybe és a tárcsába egyaránt kimunkálok egy menetet, így a két alkatrészt egy hosszabb szárú csavar segítségével rögzíteni lehet, megakadályozva az elmozdulást. Azonban ez az ötlet is elvetésre került, mivel a biztonság itt is kérdéses volt a nagy sebességek miatt. Ezután jött egy másik ötlet, hogy a tengelyre is metszek egy menetet, illetve teljesen átfúrom a tengely átmérőjével azonos nagyságúra a tárcsát és arra is vágok egy menetet, majd a kilógó menetes tengelyvégre egy önbiztosító anyát teszek, hogy axiálisan se tudjon a két alkatrész egymáson elmozdulni. Ezzel a módszerrel könnyen szerelhető lett a szerkezet, akár cserélni is lehet a tárcsákat. Ez a megoldás minden szempontból költséges, mivel az alkatrészek egyedi gyártására van szükség.

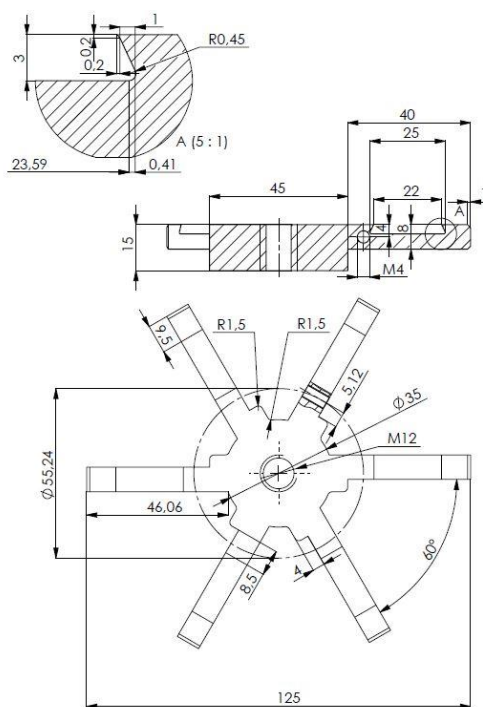
A következő 19-es ábrán látszik, hogy a karok geometriája hasonló módon lett kialakítva, mint a tanulmányokban látott és fentebb, a 17. ábrán bemutatott próbatesttartó. A mintadarabok egy csavar és alátétek segítségével lettek rögzítve az elmozdulással szemben.



19. ábra - A tárcsa és a karok egy alkatrészként

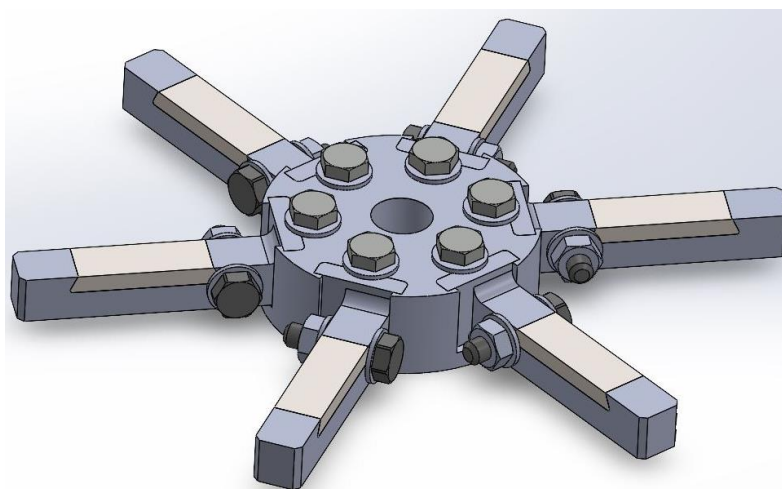
Mint ahogyan az ábrán is látszik, a próbatesteknek elég egyedi a geometriája annak érdekében, hogy minél szorosabban illeszkedjenek a helyükre. Magáról a próbatestről majd részletesebben a dolgozatom egy későbbi szakaszában teszek említést.

Az egyedi alkatrészekről készültek műszaki rajzok is, amik szemléltetik a pontos méretüket a daraboknak. A 20. ábrán jól megmutatkozik, hogy mennyire kis méretekről van is szó valójában.



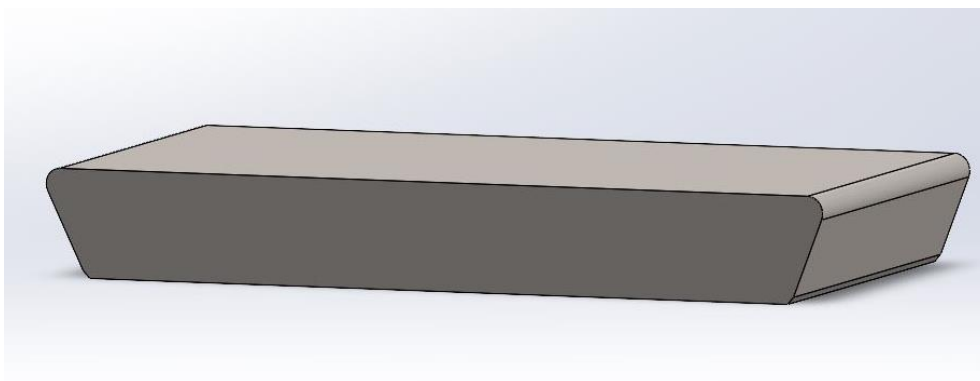
20. ábra - Az egy anyagból kimunkált tárcsa és kar mérethálózata

Ennél a tárcsa kialakításnál az a probléma merült fel, hogy a lemezeket biztosító csavarok furatai nem voltak megmunkálhatók, így ez az egység is ismételten tervezést igényelt. A gyártó javaslatára a tárcsa és a karok szerelhető kivitelben készültek el, hasonlóan, mint a 17. ábrán látott megoldás, csak nem felcsavarozható formában, hanem úgy, mintha egy sínben lennének a karok, csavarokkal rögzítve az axiális elmozdulás elkerülése érdekében. A következő, 20. ábra a szerelt kivitelű tárcsát és karokat ábrázolja, teljesen összeszerelt állapotban a csavarokkal és a próbalemezekkel együtt. Fontos volt, hogy 6 karja legyen, ugyanis ezzel időt lehet megtakarítani, egyszerre nem csak 2 vagy 3, hanem 6 próbatest vizsgálata lehetséges.



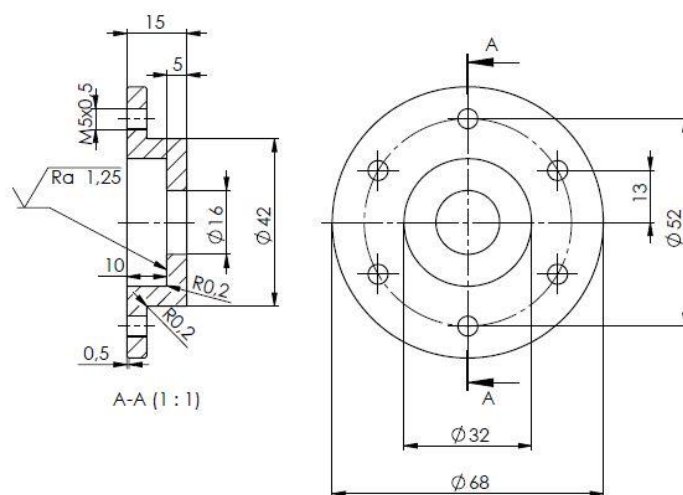
21. ábra - Kompletten összeszerelt, szerelhető kivitelű forgó tárcsa a karokkal

Ahogy fentebb említettem, a próbatestek egy elég egyedi geometriát kaptak annak érdekében, hogy minél kisebb legyen az elmozdulás és minél jobban illeszkedjenek a lemeztartó karokhoz. A befoglaló felületi méretei többségében megegyeznek a Concordia Egyetem publikációjában is említett méretekkel. A különlegessége az, hogy egy 0,2 mm-es letörést alkalmaztam az élénél, ahol illeszkedik a kar felső részéhez, hogy biztosítsam a stabilitását axiális irányban. Befoglaló méreteit tekintve a mintadarab $25\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, ám látható, hogy a jobb illeszkedés megvalósítása érdekében kialakítottam egy 0,45 mm sugarú lekerekítés is. A próbadarab kissé kúpos felületű, ez a megoldás is a stabilitást segíti, hogy minél jobban meg tudjam akadályozni forgás közben az elmozdulást. A 21. ábrán látszik, ahogyan a tartó karba illeszkedik, illetve a radiális irányban való rögzítésének módja is, amely csavarok és alátétek segítségével valósult meg. A próbatest önálló modellje tekinthető meg a 22. ábrán.



22. ábra - Az eróziós próbatest 3D geometriája

A nagyobb stabilitás és biztonság érdekében, hogy a nagy fordulatszámok ne terheljék a tengelyt, amin keresztül a meghajtás történik, egy speciálisan nagy sebességekhez alkalmazható, maximálisan 26 000 fordulat/perces sebességig terhelhető, 6201-2Z típusú mélyhornyú golyóscsapágyat integráltam a komponenspadomba. Ennek segítségével sokkal stabilabban fog állni a tengely és a hozzá egyedileg kialakított csapágyházzal le is tudom venni a terhet a villanymotor tengelyéről. A következő, 23-as ábra az egyedi csapágyház geometriai méreteit és kialakítását mutatja be. A csapágyház 6 darab csavar segítségével van felfogatva az 5 mm vastag, köztes tartólemezre, ami tömítőpaszta segítségével kerül letömítésre, nehogy víz kerüljön a motortérbe. [19]

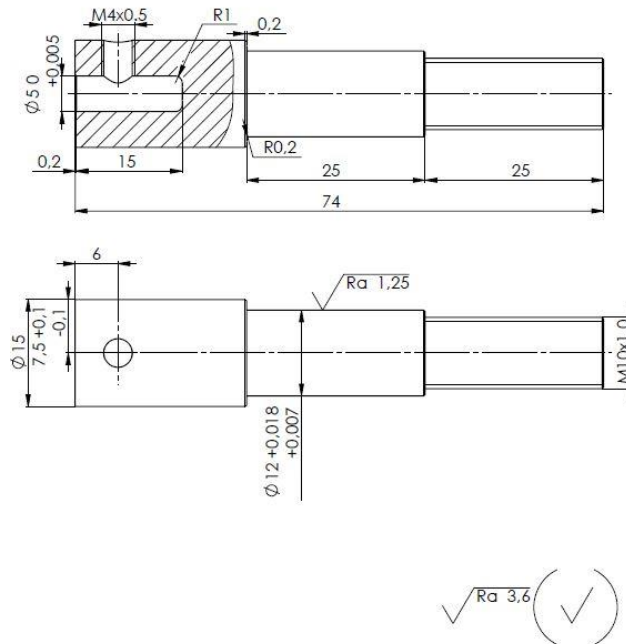


$\sqrt{Ra\ 3,2}$ (✓)

23. ábra - Csapágyház ábrázolása nézetben és metszetben, a geometriai méretekkel

A tengelyről már nagyon sokszor tettem említést az előző bekezdésekben. Ennek leginkább összeköttető és hajtásátadó szerepe van a villanymotor és a forgó tárcsa között. Itt sem

beszélhetünk túl nagy méretekről, a maximális átmérője mindössze 15 mm és összesen 74 mm hosszú, ami a 24. ábrán megfigyelhető. A metszeti rész ábrázolja a villanymotor csatlakozásának helyét, az utána következő lépcsőn a csapágy kap szerepet és a menetes részen a tárcsa helyezkedik el. Emellett a csapágy felett még kap helyet egy 12 mm × 20 mm × 5 mm-es szimmering is, amelynek tömítő szerepe van a víztér és a motortér között.

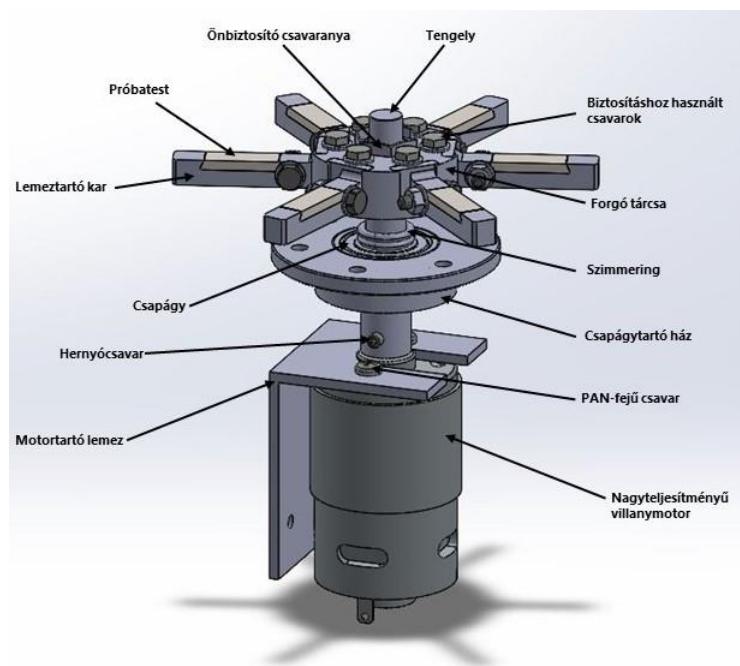


24. ábra - Egyedi tengely geometriai méretezése

6.3. Részegységek és a teljes egység felépülése

Ebben a fejezetben bemutatásra kerül a teljes modell és egyéb kisebb részegységek. Először a tesztberendezés egyik fő elemét mutatom be, aminek összeszerelt modellje és az alkatrészek megnevezése a 25. ábrán figyelhető meg.

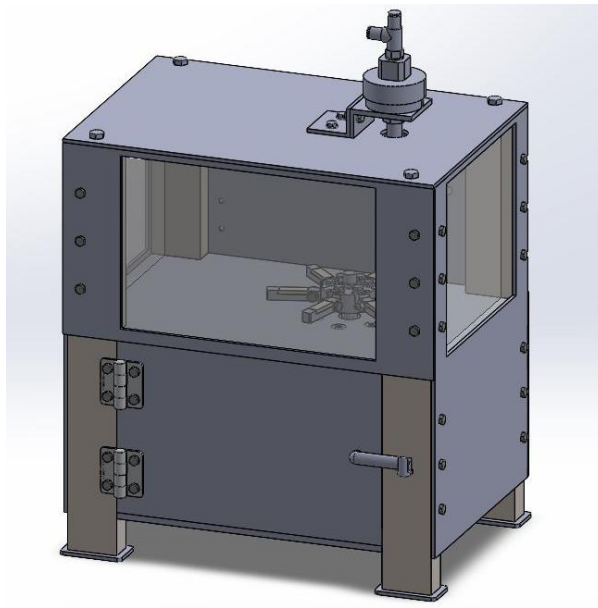
A képen jól látható minden egyes alkatrész, amire a működéshez szükség van és a villanymotor rögzítése a hozzá speciálisan kialakított tartólemezhez is. A tengelyben, a villanymotor tengelyénél található egy hernyócsavar, amelynek kúpos a vége, ezzel lehet biztosítani a motor tengelyét.



25. ábra - Összeszerelt részegység 3D modellje

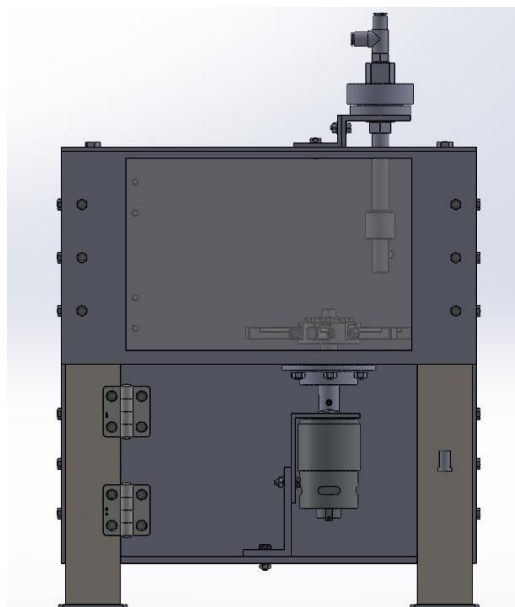
A következő, 26. ábrán már a teljes szerkezet modellje látható. Befoglaló méretei a következők: 302 mm × 202 mm × 336 mm. Ehhez a magassághoz hozzájön még a vízcsepp generátor magassága is, ami 98 mm, így a berendezés teljes magassága 434 mm. A komponenspad kompakt, könnyen szállítható, az elemek 90 százaléka oldható kötással van összeállítva, hogy a szerelés és az esetleges szállítás egyaránt könnyebb legyen. A burkolat a lábakhoz 36 darab lapos fejű önfúró csavarral van rögzítve, plusz a zsanérokhöz is fel lett használva 16 darab, hogy minél kevesebb hegesztési munka legyen a tesztpadon. A lábai egyenként 330 mm hosszúak és 40 mm × 20 mm × 2,5 mm-es zártszelvényből készültek, hogy kellően biztos lábakon álljon a vizsgálatok során is.

Annak érdekében, hogy nagysebességű kamera segítségével a vizsgálatok végzése közben felvételeket lehessen készíteni, három oldalát a vizsgálóternek beláthatóvá kellett tenni. A biztonságosság érdekében egyszerű műanyag plexi helyett 11 mm vastag dobásálló üveget alkalmaztam, hogy semmilyen esetben se történjen személyi sérülés. A hátoldalon a vizsgálóternél szintén egy ugyan olyan ajtó van, mint az elején, illetve a teteje is levehető a több oldalról történő, könnyebb szerelhetőség céljából, emellett ez a megoldás a vizsgálandó próbatestek cserélhetőségét is megkönnyíti. A stabilitás és a teherbírás érdekében a legalsó, illetve a középső lemez 5 mm vastag, míg a tetőlemez 3 mm és az oldalát borító lemezek 2 mm vastagok. [20]



26. ábra - A komponentesztőpad 3D modellje

A vízcsepp generátor egy állítható tartót kapott, amellyel lehet módosítani a fűvóka távolságát a próbatesthez képest. A vízellátás egy 24 literes VAO 024-es típusú, 305 mm × 485 mm-es, nyomás alatt lévő tartályból történik egy szelep segítségével, amely nyitja, illetve zárja a befecskendező csatornát. Ez egy állványra lesz felszerelve, így nem kell egybeépíteni a vizsgálóberendezéssel. A víztérben a már felhasznált víz egy cső alkalmazásával lesz kivezetve egy másik tartályba, ahonnan újra felhasználásra kerül a nyomás alatt lévő tartály kiürülését követően. A vizsgálati berendezés előlnézetből a motorral együtt a 27. ábrán látható. [21]



27. ábra - Vizsgálati berendezés előlnézetből

6.4. Költségterv

A vizsgálóberendezés megépítéséhez használt alkatrészek árai és felsorolásai a 28. ábrán olvashatók. Ezek az adatok csak tájékoztató jellegűek és csak egy körülbelüli, jelenlegi állapotot tükröznek. Nagyon nehéz mindennek az árát pontosan meghatározni, ugyanis minden bolt eltérő árakkal dolgozik, illetve van olyan elem, aminél a kereskedelmi forgalomban kapható kiserelés egyáltalán nem gazdaságos, mint például a tetőlemeznel, illetve az alsó és középső lemeznél sem, de ide vehetjük a talpnak szánt lemezt, a tető lefogató lemezeket és a motort és a vízcsepp-generátort tartó lemezeket is. Ezen anyagok költséghatékonyabb beszerzéséhez még utánajárás szükséges.

Alkatrészlista										
Alkatrész neve	Mérete	Egység	Mennyiség	Ár	Alkatrész neve	Mérete	Egység	Mennyiség	Ár	
6201 C3 22 csapágó	12x32x5	db	1	1 287 Ft	Alja + közepe	296x200x5	db	2	egyedi árajánlat	
Belső kulcsnyílású, kúpos végű hermócsavar	M4x8	db	1	163 Ft	Üveg	216x150x11	db	1	egyedi árajánlat	
Szímering	12x20x5	db	1	334 Ft	Üveg	160x150x11	db	2	egyedi árajánlat	
Tengely	egyedi gyártás	db	1	egyedi árajánlat	Talpak	50x30x3	db	4	egyedi árajánlat	
Hatlapfejű tövigmenetes csavar	M4x16	db	10	440 Ft	Tető lefogató lemezek	35x15x5	db	4	egyedi árajánlat	
Lapos alátét	Ø4	db	34	306 Ft	Önmetsző (opelfejű) csavar	4,2x9,5	db	8	43 Ft	
Propeller	egyedi gyártás	db	1	egyedi árajánlat	Önmetsző (opelfejű) csavar	4,2x13	db	44	440 Ft	
Csapágház	egyedi gyártás	db	1	egyedi árajánlat	Hatlapfejű tövigmenetes csavar	M4x10	db	6	36 Ft	
Zártszelvény	40x20x2,5	m	1,32	7 112 Ft	Belső kulcsnyílású csavar	M5x16	db	6	198 Ft	
Hatlapfejű anya	M4	db	14	266 Ft	Lapos alátét	Ø5	db	6	18 Ft	
Önbiztosító anya	M10	db	1	16Ft	Hatlapfejű anya	Ø5	db	6	12 Ft	
Alumínium zsanér	36,8x26,4	db	4	22 144 Ft	Hatlapfejű tövigmenetes csavar	M4x12	db	4	28 Ft	
Hatlapfejű tövigmenetes csavar	M6x14	db	4	4 Ft	Pan-fejű csavar	M4x6	db	2	26 Ft	
Lapos alátét	Ø6	db	4	36Ft	Kilincs	-	db	2	-	
Hatlapfejű tövigmenetes csavar	M3x4	db	2	36Ft	Kilincs támasztó	-	db	2	-	
Oldal lemez	300x200x2	db	2	25 472 Ft	Motortartó1	50x50x65	db	1	egyedi árajánlat	
Első ablakkeret	302x155x2	db	1		Motortartó2	30x50x65	db	1	egyedi árajánlat	
Hátsó lemez	302x150x2	db	1		WDG felfogatása1	50x44x23,23	db	1	egyedi árajánlat	
Első ajtó	216x140x2	db	1		WDG felfogatása2	32x44x23,23	db	1	egyedi árajánlat	
Hátsó ajtó	216x150x2	db	1		Vízráró tömítőpaszta	-	db	1	2 110Ft	
Tető	302x203x3	db	1	egyedi árajánlat	Villanymotor	-	db	1	21 815 Ft	
					Összesen:					82 342 Ft

28. ábra - A felhasznált alkatrészek listája és árai

A tengely, a szerelt kivitelű tárcsa és kar (ami az ábrán propellerként szerepel egyszerűsített gyűjtőnéven), és a csapágó felfogató ház árait a gyártó még nem határozta meg, a próbatestek pedig nem szerepelnek a költségtervben, ugyanis még nem tudom pontosan meghatározni, hogy a vizsgálatokhoz mennyi és milyen anyagú/bevonatú mintadarabokra lesz szükség. Az üvegezés a szerkezet oldalára szintén teljesen egyedi méret és egyedi szabást igényel, amelyhez még nem sikerült árajánlatot szerezni.

A vizsgálóberendezés külső borítása horganyzott lemezből kerül kialakításra. Az alumínium nem elég masszív, viszont a rozsdamentes lemez ára a horganyzottéval szemben minimum duplaennyi, emiatt a költségcsökkentés jegyében esett a választásom a horganyzott lemezre. A kilincs és a kilincs támasztó bármilyen lemezből kialakítható, éppen ezért nincs feltüntetve

hozzá semmilyen ár a táblázatban. Ami még nagyobb költséget jelent a burkolat anyaga mellett az a 4 darab alumínium zsanér, ami a teljes kiadás körülbelül 27 százalékát teszi ki.

Úgy értékelem, hogy egyelőre a 82 342 Ft egy nagyon jó ár azt tekintve, hogy a villanymotor, a burkolólemezek és a zsanérok adják az egésznek a 84 százalékát. Természetesen ez sokkal több lesz, hiszen az egyedileg gyártandó alkatrészek ára meg fogja emelni a költséget, de még azokkal együtt is pozitívrá értékelem.

7. ÖSSZEGZÉS

Az autóipar nagy kihívásokkal néz szembe és óriási átalakuláson megy keresztül. Az irodalomkutatás során egy tágabb képet nyújthattam a turbófeltöltés történetéről, tovább haladva a magas és az alacsony nyomású EGR-rendszerekhez, majd megérkezve magához a fő problémához, a kicsapódott kondenzvíz okozta vízcsepp-erózióhoz. Ennek következtében nagyon sok érdekes kutatást és szakirodalmat dolgozhattam fel, amellyel bővíthettem az ismereteimet. Megbizonyosodtam róla, hogy a kezdeti felületi érdeességnek nagy szerepe van a vízcseppek által okozott károsodásban és arról is tágabb képet kaptam, hogy minden anyag máshogy viselkedik a terhelések hatására.

A dolgozatom célja egy olyan vizsgálóberendezés kitalálása, lemodellezése és megépítése, amely segítségével az ASTM G73-10-es szabvány által meghatározott paraméterek alapján vízcsepp-eróziós vizsgálatokat tudok végezni olyan anyagminőségű és bevonatú próbatesteken, melyeket turbófeltöltők sűrítő járókerekénél alkalmaznak. A továbbiakban, hosszútávon célom az eddig említett tesztek kivitelezése és kiértékelése, valamint az eredmények feldolgozása, prezentálása és publikálása.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a segítséget és a szakmai támogatást a konzulensemnek, Takács Richárdnak, illetve édesapámnak, akinek az ötletei nélkül a modellem megtervezése nem jöhetett volna létre.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra - Az első turbófeltöltő szabadalmi rajza [1]	2
2. ábra - Sűrítő járókerék gumimintás technológiával gyártva [1]	5
3. ábra - AlSi hordozófelület mikroszkopikus képe különböző bevonatokkal [4]	7
4. ábra - A vizsgált járókerekek fizikai modellje: polimer és alumínium [5]	8
5. ábra - Az úgynevezett kettős hurok EGR (DL-EGR) sematikus ábrája [6]	11
6. ábra - Lerakódott víz- és részecske szennyeződések az alkatrészek bejáratain [10]	13
7. ábra - Gőzturbinán történő vízcseppképződés folyamata [13]	15
8. ábra - Lökéshullámok terjedési folyamata a vízcseppek becsapódásakor [15]	16
9. ábra - A maximális racionalizált eróziós ráta ábrázolása az ütközési sebesség függvényében [16]	20
10. ábra - Mikroszkopikus felvétel a kráterek keletkezéséről meghatározott időintervallumokban [16]	20
11. ábra - A Concordia Egyetem által tervezett vizsgálóberendezés vázlata [14]	22
12. ábra - a 12 % Cr rozsdamentes acél eróziós előrehaladása különböző érdesítési eljárások mellett [14]	24
13. ábra - A vizsgálatokhoz használt referenciaanyagok tulajdonságai [17]	27
14. ábra - Összesített erózió-idő grafikon a legfontosabb paraméterekkel [17]	29
15. ábra - A kumulatív erózió-idő görbe típusai [17]	30
16. ábra - A kanadai Concordia Egyetem által tervezett vízcsepp-eróziós vizsgáló berendezés [13]	31
17. ábra - Szintén a Concordia Egyetemen készült próbatest tartó kar és a próbatest rajza [13]	32
18. ábra - A komponenstesztpadhoz használt villanymotor műszaki rajza, méretezése [18]	33
19. ábra - A tárcsa és a karok egy alkatrészként	34
20. ábra - Az egy anyagból kimunkált tárcsa és kar mérethálózata	34
21. ábra - Kompletten összeszerelt, szerelhető kiviteli forgó tárcsa a karokkal	35
22. ábra - Az eróziós próbatest 3D geometriája	36
23. ábra - Csapágyház ábrázolása nézetben és metszetben, a geometriai méretekkel	36
24. ábra - Egyedi tengely geometriai méretezése	37
25. ábra - Összeszerelt részegység 3D modellje	38
26. ábra - A komponenstesztpad 3D modellje	39
27. ábra - Vizsgálati berendezés előlnézetből	39
28. ábra - A felhasznált alkatrészek listája és árai	40

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dr. Kováts M.: *'Turbófeltöltés alkalmazása járműmotoroknál'*, Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., Budapest, Magyarország, 2006., 9-20; 31; 107-110; 117-119;
- [2] Dr. Kalmár – Dr. Kováts – Dr. Stukovszky: *'Turbómotorok és más feltöltő rendszerek'*, K&Z motor bt., Budapest, Magyarország, 1994., 59-62.; 164-165.;
- [3] *STK Turbo Technik*, 2024.03.14., <<https://www.turbolader.net/versand.html>>
- [4] Debasish, D., Panigrahi, A., Sengupta, P., Bajpai, S.: *'Erosive wear characteristic of Mo-TiN composite coatings on turbocharger compressor wheel using Taguchi experimental design'*, Materials Today: Proceedings 66 (2022) 534–539, Advanced Materials Technology Department, CSIR–Institute of Minerals and Materials Technology, Bhubaneswar-751013, Odisha, India, 16 June 2022, <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.114> (2024. 03. 16.)>
- [5] Andrearczyk, A., Bagiński, P., Klonowicz, P.: *'Numerical and experimental investigations of a turbocharger with a compressor wheel made of additively manufactured plastic'*, International Journal of Mechanical Sciences 178 (2020) 105613, Institute of Fluid Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Fiszer 14 Str., Gdansk 80-231, Poland, 13 March 2020, <<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105613> (2024. 03. 16.)>
- [6] Reihani, A., Hoard, J., Klinkert, S., Chih-Kuang, K., Styles, D.: *'Experimental response surface study of the effects of low-pressure exhaust gas recirculation mixing on turbocharger compressor performance'*, Applied Energy 261 (2020) 114349, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, United States, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Michigan, Ann Arbor, MI, United States, Ford Research and Innovation Center, Dearborn, MI, United States, 21 December 2019, <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114349> (2024.03.23.)>
- [7] Zamboni, G., Capobianco, M.: *'Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine'*, Applied Energy 94 (2012) 117–128, Internal Combustion Engines Group (ICEG), Department of Thermal Machines, Energy Systems and Transportation (DIMSET), University of Genoa, via Montallegro 1, 16145 Genoa, Italy, 11 February 2012, <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.046> (2024. 03. 23.)>

- [8] Nyerges Á., Dr. Zöldy M.: *'Alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés hatásvizsgálata haszonjármű dízelmotoron'*, Műszaki Szemle 71, 31-44, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék, Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6., 3 August 2018, <https://epa.oszk.hu/00000/00028/00063/pdf/EPA00028_msz_2018_71_031-044.pdf, (2024. 03. 23.)>
- [9] Park, Y., Bae, C.: *'Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine'*, Applied Energy 133 (2014) 308–316, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Republic of Korea, 20 August 2014, <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.003> (2024. 03. 23.)>
- [10] van Aken, M., Willems, F., de Jong, D.: *'Appliance of high EGR rates with a short and long route EGR system on a Heavy Duty diesel engine'*, Compression Ignition Combustion Processes, 2007 (SP-2076), 2007 World Congress, Detroit, Michigan April 16-19, 2007, <<https://doi.org/10.4271/2007-01-0906> (2024. 03. 23.)>
- [11] Heuwerker, D., Glewen, W., Meyer, C., Foster, D., Andrie, M., Krieger, R.: *'Effects of Low Pressure EGR on Transient Air System Performance and Emissions for Low Temperature Diesel Combustion'*, SAE Technical Paper 2011-24-0062, 2011, University of Wisconsin, Madison, WI, United States, 09 November 2011, <<https://doi.org/10.4271/2011-24-0062> (2024. 03. 23.)>
- [12] Luján, J. M., Climent, H., Novella, R., Rivas-Perea, M. E.: *'Influence of a low pressure EGR loop on a gasoline turbocharged direct injection engine'*, Applied Thermal Engineering 89 (2015) 432e443, CMT Motores Térmicos, Universitat Politècnica de Valencia, Spain, 23 June 2015 <<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.039> (2024. 03. 23.)>
- [13] Mahdipoor, S., M.: *'Water Droplet Erosion Resistant Materials and Surface Treatments'*, Doctor of Philosophy, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2016 <<https://core.ac.uk/download/pdf/211518797.pdf> (2024.03.25.)>
- [14] Kirols, H., S., Kevorkov, D., Uihlein, A., Medraj, M.: *'The effect of initial surface roughness on water droplet erosion behaviour'*, Wear 342-343 (2015) 198–209, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 1455 de Maisonneuve Boulevard West, Montreal, QC, Canada H3G 1M8, Thermal Power Transverse Technologies, Materials and Component Testing, ALSTOM Power, Brown

- Boveri Strasse 7, 5401 Baden, Switzerland, Department of Mechanical and Materials Engineering, Masdar Institute, Masdar City P.O. Box 54224, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 1 September 2015, <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.019> (2024.03.25.)>
- [15] Herring, R., Dyer, K., Martin, F., Ward, C.: *'The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions'*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 115 (2019) 109382, Department of Aerospace Engineering, Queen's Building, University of Bristol, Bristol, BS8 1TR, UK, Offshore Renewable Energy Catapult, Offshore House, Albert Street, Blyth, NE24 1LZ, UK, National Composites Centre, Bristol & Bath Science Park, Emersons Green, Bristol, BS16 7FS, UK, 13 September 2019, <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109382> (2024.03.25.)>
- [16] Mahdipoor, S., M., Kirols, H., S., Kevorkov, D., Jedrzejowski, P., Medraj, M.: *'Influence of impact speed on water droplet erosion of TiAl compared with Ti6Al4V'*, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 1455 de Maisonneuve Boulevard West, QC, Montreal, Canada H3G 1M8, Rolls-Royce Canada Ltd. Energy, 9545 Cote-de-Liesse, Dorval, QC, Canada H9P 1A5, Department of Mechanical and Materials Engineering, Masdar Institute, Masdar City, Abu Dhabi, UAE, P.O. Box 54224, 22 September 2015, <<https://doi.org/10.1038/srep14182> (2024.03.26.)>
- [17] ASTM International: *'Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus'*, ASTM G73-10 (2021), 19.060; 77.060, 2021, <<https://doi.org/10.1520/G0073-10R21> (2024. 03. 27.)>
- [18] Transmotec, 2024. 03. 27., <<https://www.transmotec.com/product/775-8013F-C-CC/>>
- [19] SKF, 2024.03.27., <<https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6201-2Z>>
- [20] Ritveisz R., Trans-Glass Kft., 2024.03.27., <<https://transglass.hu/szolgalatas/45/biztonsagi-golyoallo-uveg>>
- [21] Aquasystem Watertech, 2024. 04. 01., <http://www.aquasystem.co.uk/book/horizontal_pressure_tanks/vao_18-300/>