



Mikrofogyasztású versenyautó dugattyú fejlesztése

Vaczkó Dániel

gépészmérnök, gyártásinformatika szak

nappali munkarend

Konzulens: Fodor Antal

Kecskeméti Főiskola

Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar

Kecskemét

2014

Tartalomjegyzék

BEVEZETŐ.....	3
1. A DUGATTYÚ GYÁRTÁSÁRÓL ÁLTALÁNOSAN	4
1.1. ELŐGYÁRTMÁNY KÉSZÍTÉSE.....	4
1.2. MEGMUNKÁLÁS.....	5
2. FEJLESZTÉSEK A VERSENYSPORTBAN.....	7
3. A DUGATTYÚ FELADATA, IGÉNYBEVÉTELEI	9
4. ÚJ DUGATTYÚ FEJLESZTÉSE.....	10
4.1. AZ ANYAGGAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK	10
4.2. ANYAGVÁLASZTÁS.....	11
4.3. DUGATTYÚANYAGOK HŐVEZETÉSÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA.....	13
4.4. HŐÁRAMLÁS A DUGATTYÚN KERESZTÜL.....	15
4.5. A KERÁMIA.....	16
4.6. TERVEZÉS.....	17
4.7. SZIMULÁCIÓ	19
5. GYÁRTÁS	22
5.1. SZERSZÁMKÉSZÍTÉS:	22
5.2. A DUGATTYÚ ELKÉSZÍTÉSE.....	23
6. TESZTELÉS, MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....	25
6.1. MÉRÉS.....	25
6.2. KIÉRTÉKELÉS.....	26
ÖSSZEGZÉS	28
FELHASZNÁLT IRODALOM, HIVATKOZÁSOK	29
MELLÉKLETEK	30

Bevezető

A mai, fejlődő világban egyre nagyobb teret hódítanak az elektromos meghajtású járművek. Az elektromos meghajtásnak számos előnye van. A hajtásnál felhasznált energia elektromos áram, melynek során a felhasználás helyén nincs káros anyag kibocsátás. Üzemeltetésük olcsó, de az egyes országoknak törekedniük kell a környezetbarát technológiák bevezetésére, így különböző adókedvezményekkel, ingyenes töltőállomások telepítésével próbálják ösztönözni az embereket ezek használatára. A sok előny mellett hátránya is van. Ezek a járművek jelenleg még túl sokba kerülnek ahhoz, hogy mindenki lecserélje jelenleg használt autóját. A nagy ár mellett az is hátránya, hogy korlátozott a hatótávolság. Az elektromos motorok nagyon jó hatásfokkal tudnak üzemelni, de az akkumulátorok pillanatnyilag még nem állnak olyan fejlettségi szinten, hogy nagy távolságok megtételére legyen képes az adott elektromos jármű. Az egyre szigorodó környezetvédelmi szabályozások miatt szinte biztosra vehető, hogy a jövőben eljön az idő, hogy az elektromos hajtás lesz a legelterjedtebb.

Manapság még mindig a gépjárművek, mezőgazdasági gépek, hajók, motorok és erőgépek leginkább használatos erőforrása a belsőégésű dugattyús motor. Ennek következtében a járműgyártók az elektromos hajtásrendszerek fejlesztése mellett jelenleg is rengeteg pénzt és időt áldoznak a belső égésű motorok fejlesztésére. A teljesítmény növelésének kettő fő irányvonala alakult ki. A káros anyag kibocsátás csökkentése, illetve a hatásfok javítása, amelyek akár egymás következményei is lehetnek.

A dolgozatomban a hatásfok javításával foglalkoztam, azon belül pedig egy, az égéssel közvetlen kapcsolatban álló alkatrész fejlesztésével, a dugattyúval.

A fejlesztés célja egy mikrofogasztású versenyautó Otto-motorjának hatásfok javítása. Ez a verseny az Eco-Marathon versenyen, ahol középiskolás diákokból és főiskolai hallgatókból álló csapatok mérik össze tudásukat. A verseny célja, egy olyan jármű építése, amivel 1 liter benzinnel minél több km-t lehet megtenni. Már az első évben egyszerű fékpadi méréseknek köszönhetően rájöttünk, hogy a sok csapat által használt gyári motor nem rendelkezik megfelelő hatásfokkal. Ennek okán saját motor tervezésébe kezdtünk, amivel már az első versenyen nagyon jó eredményeket értünk el. Minden évben, ahogy nőtt a tapasztalatunk és a tudásunk a motorépítés terén, új motor építését éreztük szükségesnek. Ezekben a 4-ütemű motorokban általánosan használatos kialakítású és anyagú dugattyúkat használtunk. Egy műszaki kerámiagyártó cég felajánlásának köszönhetően, a lehetőséget megragadva, belefogtunk egy új, eddig a járműgyártásban sem használatos dugattyú fejlesztésébe.

1. A dugattyú gyártásról általánosan

A belső égésű motorok megjelenésével a dugattyúk gyártásával, gyártásfejlesztésével már több, mint 100 éve elkezdtek foglalkozni. Ennyi idő alatt nagyon sok technológiát alkalmaztak, rengeteg tudás és tapasztalat született ezen a téren. Mostanra a gyártók már bevált, kialakult technikákat alkalmaznak a gyártás során, elmondható tehát, hogy ezek típustechnológiák. Mielőtt hozzákezdtém az új fejlesztése dugattyú tervezéséhez, majd megvalósításához, fontosnak tartottam, hogy megismerjem ezeket.

A következőkben bemutatom a dugattyú készítésének szokásos módját.

1.1. Előgyártmány készítése

A belső égésű motorokban használatos dugattyúk a megfelelő szerkezeti kialakítások miatt bonyolult geometriával rendelkeznek, így előgyártmány készítése szempontjából az öntési technológia a legmegfelelőbb, de a növekvő mechanikai igénybevételek miatt sajtolásos módszert is alkalmaznak. Kovácsolt dugattyúnak nevezik az ilyen eljárással készületeket. Régen sűrűn alkalmazott technológia volt, de manapság már csak egyedi gyártásban alkalmazzák a homokmagos öntést.

Az iparban használt technológiák:

- kézi kokillaöntés
- gépi kokillaöntés
- sajtolás
- homokmagos öntés (egyedi gyártás esetén)

A gyártás az alapanyag előállításával kezdik. Az alapanyag különféle ötvözetekből tevődik össze, amiket már az öntés előtt összeállítanak. Ezután megfelelő méretű tömböket készítenek az alapanyagokból. Ezeket nagyon szigorú laboratóriumi anyagvizsgálatok előzik meg.

A gyártó miután megbizonyosodott róla, hogy biztosan az általa meghatározott ötvözetű tömböket kapta meg, beolvasztja azokat. A hevítés során nagy energia bevitelére van szükség, a technológiát gazdaságossági tényezők és minőségi szempontok határozzák meg. Manapság már sehol sem találkozni koksztüzeléssel, ehelyett a gáz- és olajfűtésű, illetve ahol a minőség nagyon számít ott az elektromos fűtésű kemencék terjedtek el. Ezeknek az automatizálása könnyen megoldott.

A felhasznált energia szerint alkalmazunk:

- gázhevítést
- olajhevítést
- villamos hevítést.

Az olvasztás után kap legnagyobb szerepet az automatizálás. A fémolvadék minősége szempontjából nagyon fontos az olvasztás fokozatossága, illetve a hőntartás hőmérsékletének pontos megválasztása, szabályozása. Túlhevítés esetén az olvadék a környezetből hajlamos felvenni hidrogént. Helyi túlhevítés esetén oxidképződés lép fel, aminek következtében korundzárványok jöhetnek létre, amik a megmunkáláskor tönkreteszik a forgácsolószerszámok éleit.

Előolvasztásnál, illetve a hőntartás során különböző kezelési műveleteknek kell alávetni a megolvasztott fémeket. Ezután következik maga az öntés.

Ahhoz, hogy a dugattyú megbízhatóan működjön és képes legyen tartósan elviselni az üzem közben létrejövő mechanikai terheléseket, különböző hőkezelési eljárásoknak is alá kell vetni az öntött előgyártmányt. Hőkezelés alatt a dugattyún tervszerűen végzett melegítést és hűtést értjük, aminek következtében az ötvözet szerkezete a kívánt állapotban állandósul. [1]

Kétféle hőkezelési stratégia használatos:

- feszültségoldó hőkezelés: magas hőmérsékletre történő felmelegítés, majd hőntartás és ezt követő gyors hűtés
- öregbítés: alacsony hőmérsékletre történő felmelegítés, majd hőntartás és lassú, szabad levegőn történő hűtés

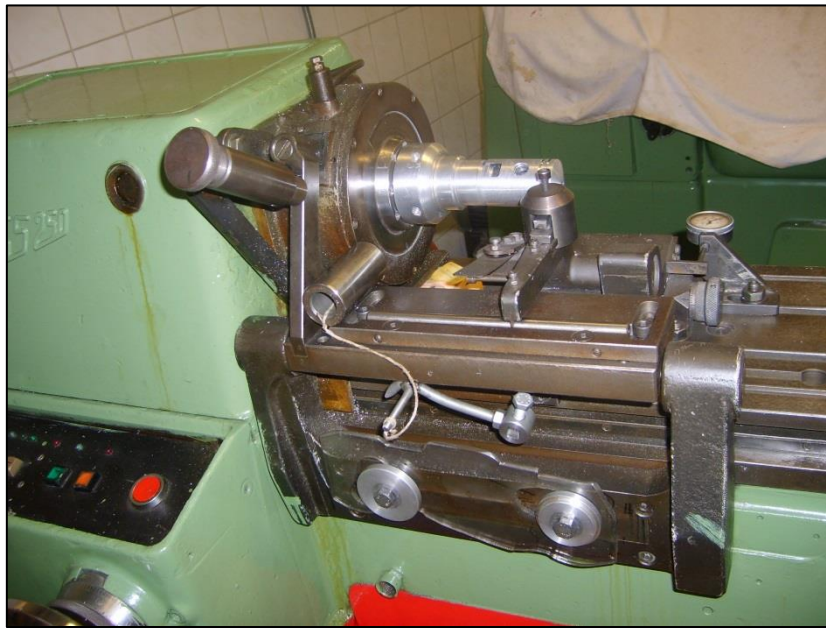
1.2. Megmunkálás

Az előgyártmány elkészülése után a frissen öntött dugattyú még nem alkalmas a beszerelésre, még azt utolsó fázisként készre kell munkálni. Az ötvözt alumínium jól forgácsolható megfelelő szerszám, illetve forgácsolási paraméterek megválasztása esetén. A készremunkálás több fázisból épül fel. Először a csapszeg furatát, majd a dugattyú szoknyán belül egy vállas részt alakítanak ki, ami későbbi megmunkálások során bázisként fog szolgálni.

A következő fázisban az előzőleg elkészített belső felületen megfogva a dugattyút a külső palástfelületet készítik el egy speciálisan erre a célra gyártott, vagy átalakított esztergán (1. ábra), ami képes kúp esztergálása mellett ovalitást is létrehozni a dugattyú palástfelületen. Legvégül a gyűrűhornyok beszúrása készítik el. Az elkészítés során több fontos szempontot is

szem előtt kell tartani. A csapszegfurat és a hossztengely merőlegessége miatt fontos, hogy a megmunkálás mindig egy bázisfelületből induljon ki. A külső palást felületi érdességi határozza meg a kopás mértékét és a kenési viszonyokat. A hőtágulás miatt ovális és egyben kúpos palást-alakot kell létrehozni, hogy üzem közben ne szoruljon meg a dugattyú.

Utolsó műveletben marógép segítségével készítik a könnyítéseket, illetve a tetőre a szelepek számára a zsebeket. [1]



1. ábra. Dugattyú esztergagép

A következőkben a versenysportban használatos megoldásokról kívánok néhány szót megemlíteni.

2. Fejlesztések a versenysportban

A járműgyártók számára a versenysport az a hely, ahol lehetőség van új fejlesztéseik tesztelésére, illetve ezek kerülnek át a hétköznapi megoldásokba. Ami új fejlesztések megtalálhatóak jelenleg a versenymotorokban, azok néhány éven belül a járműgyártásban is megtalálhatóak lesznek. Számos dolog elkerüli a figyelmünket e téren. Az 1920-30-es években lehetett nagy változást megfigyelni. A versenysportban az egyre növekvő teljesítmény, fordulat miatt egyre kevésbé voltak alkalmasak az eleinte használatos öntöttvas dugattyúk, így áttértek az alumínium ötvözetek használatára. Pár éven belül már ez az összes közúti járműnél is bekövetkezett.

A fejlesztés jelenleg is folyik. Fontos megjegyezni, hogy manapság a teljesítménysportban az egyes alkatrészeket terhelő erő sokszorosa is lehet egy normál használatú autóhoz képest. Ahhoz, hogy ezt mechanikai károsodás nélkül bírják az egyes komponensek a fejlesztés területén igénybe kell venni a modern technológia adta lehetőségeket. A fejlett szimulációs programok segítségével nagyon pontosan lehet optimalizálásokat végezni statikai, áramlástani, termikus és a kífáradásos igénybevételekre.

A jellemzően nagy fordulatszámok miatt a dugattyú súlya (tehetetlensége) nagyon fontos szerepet kap. Minél nehezebb, annál nagyobb inerciális erő hat a hajtásláncban résztvevő további alkatrészekre is. Az egyik fő fejlesztési irány ezért a súlycsökkentés, habár ezzel sem lehet a végletekig elmenni. Ha túlzásba viszik a könnyítést, akkor a megnövekedett rugalmasság mellett, jóval törékenyebbé, sérülékenyebbé válnak az alkatrészek.

A magasabb kompresszióviszony sokkal bonyolultabb tető geometriát igényel. Azonban a helyen még áramlási szempontokat is figyelembe kell venni, főleg közvetlen befecskendezés esetén. Az égési folyamatokat nagyban javítja a megfelelően kialakított tető. Ezen a részen a különböző CFD szimulációk nagy segítséget nyújtanak a mérnökök számára.

Az égés során keletkező hővel a tető érintkezik elsősorban. Az alumínium ötvözetek fontos tulajdonsága ezzel kapcsolatban, hogy jó hővezetők. Ennek csökkentése érdekében egy speciális technológia segítségével kerámia bevonattal látják el ezt a felületet, aminek vastagsága mindössze pár mikron.

A gyártáshoz használt anyagok terén is találni újításokat. A legelterjedtebb alumínium ötvözetek az Al2618 és az Al4032. Jelenleg fejlesztések folynak fém mátrixú kompozitokkal (metal matrix composite – MMC). A fém kompozitok nagy előnye, hogy két vagy több szerkezetükben eltérő anyagkombinációkból épülnek fel. Célja, hogy az egyes összetevők hasznos tulajdonságait kiemelje, a kevésbé jókat csökkentse. [2]

A motor üzemelése közben a dugattyú palástfelülete a henger hüvellyel súrlódik. Ennek redukálása érdekében a súrlódó felületeket is bevonatokkal láthatják el, manapság a leggyakrabban használt bevonat a teflon (2. ábra).



2. ábra. Versenydugattyú felületein különböző bevonatokkal

A következőkben a dugattyú igénybevételeivel kapcsolatos irodalmi kutatásokat mutatom be.

3. A dugattyú feladata, igénybevételei

A dugattyú az erőátviteli láncban jelentős helyet foglal el. Feladata, hogy a belső égésű motor hengerét egyik oldalon lezárja, és ezzel létrehozza a munkavégzéshez szükséges változó térfogatot. Az égéstérbe bejuttatott, a gyújtógyertya által begyújtott üzemanyag égése során keletkező hőenergia a dugattyú elmozdulásával mechanikai energiává alakul át. A felületére ható gázerők egyenes vonalú mozgásra készítetik. A létrejött alternáló mozgás a hajtókaron keresztül forgó mozgássá alakul át. [3]

A gáznyomásból származó erő a henger átmérőjéből és az égési csúcsnyomásból származtatható, ezzel szemben a dugattyút a csapszeg támasztja meg. A hajtókar pillanatnyi szögállásától függően ez a reakcióerő a dugattyút nekiszorítja a hengerfalnak. A holtpontokban hengerfalat vált a dugattyú, mindig az ellenkező oldali palástfelületével érinti a hengerfalat. A holtpontban az oldalirányú megtámasztás bizonytalanná válik, az illesztési hézagoknak megfelelő nagyságban mozgásokat tud végezni, mindaddig, míg létre nem jönnek újra azok az erők, amik a falnak szorítják. Ez a folyamat zajt, rezgéseket kelt az üzemelés során. Csökkentése céljából a dugattyú és a csapszeg tengelyvonalát egy-két mm-re eltolják egymástól, azaz dezaxiálják [3] a csapszeget. Ennek hatására a falváltás már a felső holtpont előtt megtörténik.

Üzem közben a dugattyú nemcsak mechanikai, hanem jelentős termikus igénybevételnek is ki van téve. Az égéstér felől közvetlenül érintkezik a forró gázokkal és a lángfronttal. Égés során 1800-2600°C-os csúcshőmérséklet alakulhat ki, ami az expanzió végére lecsökken, míg végül a kipufogó ütem alatt 500-800°C-os égéstermék hagyja el az égésteret. A dugattyút érő hőterhelés nagy része hőátadás, kisebb részben hősugárzás formájában jön létre. [5]

A termikus terhelések nagysága nem konstans a munkaközeg gyors állapotváltozása miatt. Emiatt a dugattyútetőn mérhető hőmérsékletek változók, szíváskor a legalacsonyabb, expanziónál a legmagasabb. A különbség jellemzően 10°C körül szokott lenni, ez a hőlengés a dugattyú belseje felé haladva megszűnik. A gyakorlatban 1-2mm-el a tető alatt ez a jelenség már nem tapasztalható. [8]

4. Új dugattyú fejlesztése

Szívás ütemben az égéstérbe friss keverék áramlik, majd ezt a gyújtógyertya begyűjtja. A „robbanáskor” hőenergia jön létre, ami a dugattyút lefelé mozgásra készíti. Számunkra az lenne a legkedvezőbb, ha a hőből származó munka teljes egészében a dugattyútetőn át a forgattyúház felé, a jármű hajtására fordítódna. Ha ez létre tudna jönni, akkor 100%-os hatásfokkal üzemelhetne a motorunk, de ez nem a valóságban nem megvalósítható. Az égéskor keletkező hőnek egy része, legjobb esetben is csak a harmada végzi a hasznos munkát, a másik harmadát a kipufogógáz viszi el, a maradék rész a hűtésre megy el. A hűtésre fordított hőáram kétharmada a hengerfejen és a hengeren keresztül távozik hőátadással és hővezetéssel a környezetbe, egyharmada a dugattyútetőn keresztül a forgattyúház felé. Az új dugattyú fejlesztésével a célom az, hogy a dugattyún keresztül távozó hőmennyiség csökkenjen, ezáltal növelni lehessen a motor hatásfokát. [9]

4.1. Az anyaggal szemben támasztott követelmények

A keverék begyulladását követően létrejövő lángfronttal a dugattyútető közvetlenül érintkezik, ennek következtében a legnagyobb hőmérsékletek itt alakulnak ki. A szilárdsági méretezés során ez az érték elengedhetetlenül fontos a dugattyú anyagának melegszilárdsága miatt. A dugattyú anyagának mechanikai tulajdonságai (minden más anyaghoz hasonló módon) a hőmérséklet emelkedésével romlik. A megfelelő dugattyú anyag hővezetőképessége miatt az égéskor keletkező nagy hőterhelést képes olyan gyorsan elvezetni, hogy a felszín nem fog a kritikus olvadási hőmérséklet fölé emelkedni. [8]

Anyagválasztás szempontjából a legfontosabb tulajdonságok:

- hőtágulás
- szilárdság
- hővezető képesség
- kopásállóság, súrlódási tényező
- hőterhelhetőség
- anyagösszetétel
- megmunkálhatóság

Hőtágulás:

Döntő fontosságú, hogy használható-e dugattyú gyártására az adott alapanyag. Az illesztések megválasztásánál figyelembe kell venni, azt, hogy az üzemi hőmérsékletre felmelegedett dugattyú hőtágulása miatt akár bele is szorulhat a hüvelybe. Ennek nagyságát az ötvözet összetevőinek aránya, illetve a szennyező anyagok is befolyásolhatják.

Szilárdság:

A dugattyú egyes részeinek, főleg a tetőnek és a tűzgátnak nagyobb igénybevételeket kell elviselniük. Emiatt az alapanyag készítése során különböző alkotók hozzáadásával, illetve utólagos hőkezeléssel állíthatók be az előbb felsorolt kritikus igénybevételekhez a dugattyú anyagok szilárdsági értékei.

Hővezető képesség:

Az alapanyag mellett, a dugattyú szerkezeti kialakításától is függ a hővezető képesség. A nagyobb keresztmetszet gyorsabban vezeti a hőt. Hatásfok szempontjából annál jobb egy dugattyú, minél jobb hőszigetelő.

Kopásállóság, siklási tulajdonságok:

A motor hosszú élettartama megköveteli, hogy minél nagyobb a dugattyú anyag kopásállósága és a siklási tulajdonsága is jobb (a lehető legkisebb) legyen. Ezt a megfelelő szerkezeti kialakítással, illetve szövetszerkezettel lehet a megfelelő irányba befolyásolni.

Hőterhelhetőség:

Meghatározott az adott ötvözetnél, hogy hol található a kritikus hőmérséklet, amely fölé melegedve megkezdődnek a belső átalakulások, ezzel együtt a romló szilárdsági tulajdonságok.

Anyagösszetétel:

Itt adott alapanyag fizikai és kémiai tulajdonságát határozza meg.

Megmunkálhatóság:

A dugattyúk gyártása során figyelembe kell venni, hogy az adott anyag megmunkálása során teljesíteni lehet-e a szigorú méretpontossági és felületi érdességi követelményeket.

4.2. Anyagválasztás

A dolgozatomban célja, egy olyan dugattyú készítése, amivel a belsőégésű motor hatásfokát növelni lehet. Hatásfokot kétféle módszerrel lehet növelni, a súrlódások csökkentésével, illetve a hőátadás csökkentésével. A kettő közül, a súrlódási viszonyokat is szem előtt tartva,

elsősorban a hőátadás csökkentését tűztem ki célul. Ezt olyan anyag megválasztásával lehet elérni, amely hővezetési együtthatója a lehető kisebb.

A következő, 1. táblázatban a jelenleg használt, illetve az új dugattyú fejlesztése során használható anyagokat mutatom be, a dolgozatomban kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkező kerámia tulajdonságait vastag szedettel emeltem ki.

1. táblázat. Anyagok tulajdonságai

Anyag	Sűrűség, g/cm ³	Rug. eh., GPa	Hővezetési eh., W/(m K)	Lin. hőtágulási eh., 10 ⁻⁶ 1/K
Öntöttvas	7,8	115	60	9
Al + 18% Si	2,7	69	140	17
Rozsdamentes acél, AISI 302	7,86	193	16,2	17,8
Titán Ti-6Al-4V	4,43	114	6,7	9
A-997 kerámia (Al₂O₃)	3,90	380	24	5,4-8,4 ~ 7

A következők az egyes lehetséges dugattyú anyagok anyagtulajdonságait előnyeit és hátrányait vizsgálom a fejlesztés céljának megfelelően.

Öntöttvas:

A járműgyártás kezdetén öntöttvasból, azon belül is gömbgrafitos öntöttvasból készítették a dugattyúkat, aminek a sok előnye mellett hátrányai is vannak. Gyártás szempontjából nagyon jól önthető, megmunkálásnál nem igényel speciálisan kialakított szerszámokat. Súrlódási együtthatója nagyon alacsony, kedvező kopásállóságú. Szintén öntöttvas hüvelyben az egyforma hőtágulási együttható miatt nem hajlamos a megszorulásra. Hővezetési tényezője fele az alumíniumhoz képest. Hátránya, a nagy sűrűsége.

Alumínium:

Az 1920-30-as években kezdték el lecserélni a nehéz öntöttvasból készült dugattyúkat öntött, ötvözött alumíniumból készítenek. Manapság is a legelterjedtebben használatos anyag. A gyárthatóság szempontjából előnyös, hogy könnyen önthető és forgácsolható. Az ötvözők megválasztásával különböző tulajdonságait javítani lehet, mint például a szilárdságát, kopásállóságát és a súrlódási tényezőjét is. Sűrűsége ideális. Ezeket általában öntöttvas hüvelyekben használják rendkívül fontos a jó hővezető képességük, a táblázatban felsorolt anyagok közül ennek a legjobb a hővezetési együtthatója. Hátránya, hogy érzékeny a megfelelő illesztési hézag beállítására, mert öntöttvas hüvellyel párosítva hajlamos a megszorulásra.

Rozsdamentes acél, titán:

A két anyag között a dugattyú gyártás szempontjából csekély különbségek vannak, de nagyban hasonlítanak az általam felsorolt tulajdonságokban. Alapanyaguk drága, a pontos megmunkálás szempontjából nagy tapasztalatot és speciális szerszámokat igényelnek. Hővezetés szempontjából a legoptimálisabb, a legjobb értékekkel rendelkeznek a többi felsorolt anyaghoz képest. Hátránya, hogy kiugróan rossz súrlódási együttható jellemzi őket.

Kerámia:

A kerámia az az anyag, ami a járműgyártás terén még eléggé új anyag, ritkán, legfeljebb csak kísérleti fázisban használatosak. Az előgyártmány előállítása, majd a készremunkálás körülményes, különleges technológiát igényel, főképp az előző anyagokhoz képest. A fejlesztés céljai tekintetében rendkívül jó tulajdonságokkal rendelkezik. Hővezetése a rozsdamentes acéltól és a titántól csekély mértékben elmarad, de még így is az alumínium ötvözetekhez képest tényezője ötöde. Hőtágulási tényezője nagyon kicsi, így a legkedvezőbb. Súrlódási tényezője viszont rendkívül alacsony.

Az új dugattyú fejlesztési szempontjai alapján:

- öntöttvas: a nagy sűrűség miatt nem jó választás
- alumínium: a legjobb hővezető képessége miatt nem jó választás
- rozsdamentes acél, titán: a rossz súrlódási együtthatója miatt nem jó választás
- kerámia: jó súrlódási viszonya, hőellenállósága miatt optimális választás

Az új fejlesztésű dugattyú anyagául a kerámia bizonyul a legmegfelelőbbnek.

4.3. Dugattyúanyagok hővezetésének összehasonlítása

A következő számítások alapján tudjuk meghatározni, hogy melyik dugattyú hővezetése adja az ideális választást.

Az Eco-Marathon-os versenyautónkban az előző években olyan alumínium dugattyút használtunk, aminek a teteje kerámia bevonattal volt ellátva.

A dugattyú keresztmetszete:

$$A_D = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{3,15^2 \pi}{4} \approx 7,8 \text{ cm}^2 \quad (1)$$

A kb. 0,01mm vastag kerámiaréteg hőellenállása:

$$R_{\text{ker}} = \frac{\delta}{\lambda_{\text{ker}} A_D}, \quad R_{\text{ker}} = \frac{10^{-5}}{28 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 5 \times 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (2)$$

Az alatta levő kb. 3mm átlagvastagságú alumínium dugattyútető hőellenállása:

$$R_{Al} = \frac{0,003}{130 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,03 \frac{K}{W}. \quad (3)$$

A kerámia bevonat jó, de hőellenállása elhanyagolható az alumínium dugattyútetőé mellett, ezért nem sokkal csökkenti a dugattyútetőn átáramló hőveszteséget.

Ha a dugattyú titánból készülne, akkor a hőellenállás:

$$R_{Ti} = \frac{0,003}{6,7 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,574 \frac{K}{W} \quad (4)$$

Ez 19,4-szerese az alumínium hőellenállásának, viszont a rossz súrlódási viszonyok miatt nem megfelelő erre a célra. Megoldás lehet szerelt dugattyú alkalmazása, ahol a tetőre egy titánból készült kalap kerül rögzítésre. Ennek az előnye, hogy egy jó súrlódási viszonyokkal rendelkező anyagból készült dugattyúra fel lehet rögzíteni egy jó hőellenállással rendelkező anyagból készült kalapot, aminél a súrlódás nem számít. Hátránya, hogy a nem megfelelő rögzítés miatt problémák lehetnek.

A műszaki kerámiából készült dugattyú hőellenállása:

$$R_{Al_2O_3} = \frac{0,003}{24 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,160 \frac{K}{W} \quad (5)$$

Kerámia esetén 5,3-szor jobb a hőellenállás az alumíniumhoz képest, így ez a számítás is azt bizonyítja, a kerámia megfelelő lesz.

Az új dugattyú fejlesztési szempontjai alapján:

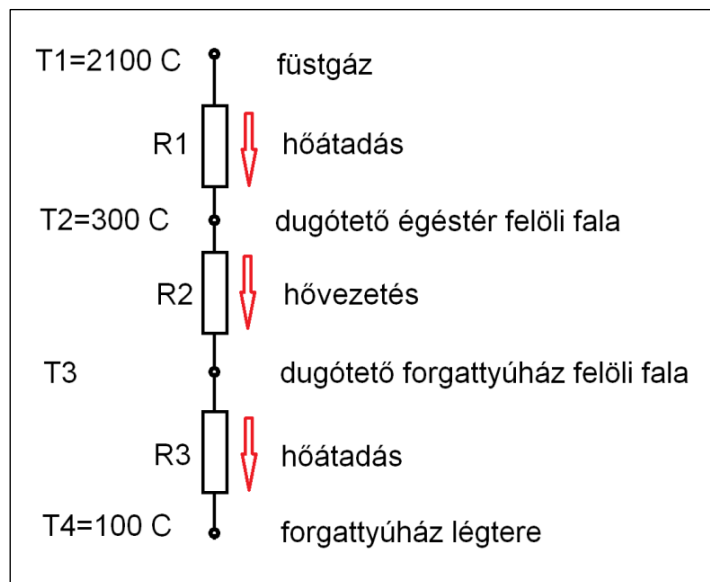
- öntöttvas: nem vizsgáltuk
- alumínium: a hővezető képessége miatt nem jó választás
- rozsdamentes acél, titán: jó hőellenállósága van, egyéb tulajdonságai miatt nem jó választás
- kerámia: jó súrlódási viszonya, hőellenállósága miatt optimális választás

Az új fejlesztésű dugattyú anyagául a hőellenállás szempontjából a kerámia a jó választás.

A következő fejezetben már az előbbieket alapján a járatos alumínium és az eddigi eredmények alapján kiválasztott kerámia anyag tekintetében végzek műszaki számításokat. [9]

4.4. Hőáramlás a dugattyún keresztül

Tegyük föl, hogy az égési csúcsnyomás közelében a hőmérsékletek a következő ábra szerint alakulnak, 3. ábra.



3. ábra. Hőáram a dugattyútetőn keresztül

Az Eco-Marathon versenyhez használt saját fejlesztésű mikrofogyasztású motorban a tüzelőanyag hőjének (ami körülbelül 1800W) a harmada végez hasznos munkát, harmadát a kipufogógáz viszi el és harmadát a hűtés. A motor teljesítménye körülbelül 600W. Ekkor a hűtéssel elvitt hőáram is körülbelül 600W. Ennek nagyjából a kétharmada (400W) távozik a hengerfejen és a hengeren át a környező légterbe, és egyharmada (200W) a dugattyútetőn át a forgattyúház felé.

A forgattyúház felé kialakuló átlagos hőellenállás:

$$R = \frac{T1 - T4}{\Phi}, \quad R = \frac{2100 - 100}{200} = 10 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (6)$$

A füstgáz és a dugattyútető közötti hőátadás hőellenállása:

$$R1 = \frac{T1 - T2}{\Phi}, \quad R1 = \frac{2100 - 300}{200} = 9 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (7)$$

Az **alumínium** dugattyútető hőellenállása:

$$R2 = \frac{\delta}{\lambda A}, \quad R2 = \frac{0,003}{130 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,03 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (8)$$

A dugattyútető és a forgattyúház közti hőátadás hőellenállása:

$$R_3 = R - R_1 - R_2, \quad R_3 = 10 - 9 - 0,03 \approx 0,97 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (9)$$

A dugattyútető forgattyúház felőli falának hőmérséklete:

$$\Phi = \frac{T_2 - T_3}{R_2}, \quad T_3 = T_2 - \Phi \times R_2, \quad T_3 = 300 - 200 \times 0,03 = 294^\circ\text{C}. \quad (10)$$

Tegyük föl, hogy

- az alumínium helyett **kerámia** dugattyút készítünk,
- a hőátadások hőellenállása nem változik,
- a füstgáz és a forgattyúház hőmérséklete nem változik.

Ekkor az eredő hőellenállás:

$$R' = R_1 + R_{2_{\text{Al}_2\text{O}_3}} + R_3, \quad R' = 9 + 0,160 + 0,97 = 10,13 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (11)$$

A hőáram kerámia dugattyú esetén:

$$\Phi' = \frac{T_1 - T_4}{R'} = \frac{2100 - 100}{10,13} \approx 197 \text{ W}. \quad (12)$$

A kerámia dugattyúval 3W-tal kisebb az égéstér és a forgattyúház közötti hővesztés, tehát ezzel is igazoltuk a kerámia, mint dugattyú alapanyagnak jóságát és a további fejlesztések tekintetében történő végleges kiválasztását.

A következőkben részletesen bemutatom a kerámia alapanyag tulajdonságait. [9]

4.5. A kerámia

A kerámia az emberiség életében már több ezer éve jelen van. A kerámia görög szóból ered, jelentése kiégetett. Régen az agyagból és kaolinból kiégetett porcelán tárgyakat nevezték kerámiáknak.

Mára a kerámia szó gyűjtőfogalommmá vált. Kerámiának nevezünk minden olyan mesterségesen előállított szervesetlen anyagot, amely nemfémesen viselkedik. Ezek az anyagok általában igen nagy villamos ellenállással rendelkeznek, mivel az ezeket lehetővé tevő szabad elektronok a szerkezetéből hiányoznak.

A kerámiák osztályozása több csoportra sorolható. A dugattyú fejlesztése során az oxidkerámiák csoportjában található műszaki kerámiák közül az Al_2O_3 -at fogjuk alkalmazni.

Az Al_2O_3 műszaki kerámiák fontosabb tulajdonságai a fejlesztés szempontjából:

- kis sűrűség
- magas olvadáspont
- nagy keménység
- nagy kopásállóság
- nagy melegszilárdság
- ridegség, törékenység
- nehézkes gyárthatóság

A nyersanyagból előállított porok alkalmazásának két lehetősége van, iszapöntés és sajtolás. Öntésre azok a kerámiák alkalmazhatók, amelyeknek a vízfelvétele széles határok között választható. Sajtolásnál a kerámiapor csak a kötést erősítő anyagokat tartalmaz. Az alakadást követően, a víz kiszárítása után (öntésnél), megfelelő követelményeknek megfelelően kiégetik a terméket.

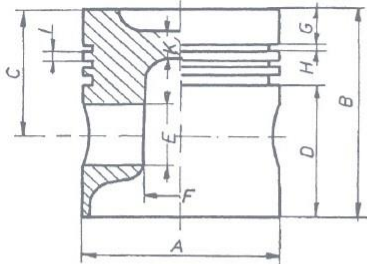
A dugattyú előgyártmányát sajtolásos módszerrel hozzuk létre, így a továbbiakban ezzel fogok foglalkozni. A sajtolás többféle módja ismert, ilyen a száraz, nedves, illetve hideg és meleg sajtolás.

Végső tulajdonságait kiégetéssel lehet elérni. A kiégetés nagy hőmérsékleten, általában 1300-1600°C-on történik, amelynek során új fázisok jönnek létre az adalékanyagok hasznosulásával. Hatására csökken a kerámia porozitása, törékenysége, javulnak a mechanikai tulajdonságai. Al_2O_3 kerámia esetén az elérhető sűrűség a kiégetés hőmérsékletétől is függ.

4.6. Tervezés

Miután kiválasztásra, megismerésre került a kiválasztott anyag elkezdtem a dugattyú geometria a tervezését. A tervezés során az egyik alapelv a súlycsökkentés szokott lenni, azonban a kerámia dugattyúk tervezése terén elég csekély a tapasztalat. Így inkább a megbízhatóság volt a fő cél, még ha az valamilyen szinten a súlycsökkentés kárára is ment.

Kiindulási alapként a következő táblázat szerinti méretezést vettem alapul (4. ábra).

	A	Átmérő $\emptyset$
	B	Teljes magasság
	C	Kompresszió magasság
	D	Szárhossz
	E	Csapszem furat $\emptyset$
	F	Csapszem távolság
	G	Tűzgát magasság
	H	1. gyűrűhorony magasság
	I	1. gyűrűgát vastagság
	K	Dugattyútető vastagság

	Otto-motor		Dízelmotor
	2 - ütemű	4 - ütemű	4 - ütemű
A	35 - 70	65 - 105	75 - 180
B / A	0,8 - 1,1	0,7 - 1,0	0,9 - 1,3
C / A	0,4 - 0,7	0,35 - 0,6	0,5 - 0,8
D / A	0,6 - 1,0	0,4 - 0,7	0,5 - 0,9
E / A	0,22 - 0,3	0,25 - 0,3	0,3 - 0,4
F / A	0,25 - 0,4	0,25 - 0,4	0,3 - 0,4
G / A	0,06 - 0,1	0,06 - 0,12	0,1 - 0,2
H	1,2 - 2,0	1,5 - 2,5	1,5 - 4,0
I / A	0,04 - 0,05	0,04 - 0,05	0,07 - 0,09
K / A	0,07 - 0,10	0,07 - 0,10	0,10 - 0,15

4. ábra. A dugattyú fő méretei [8] 142. oldal

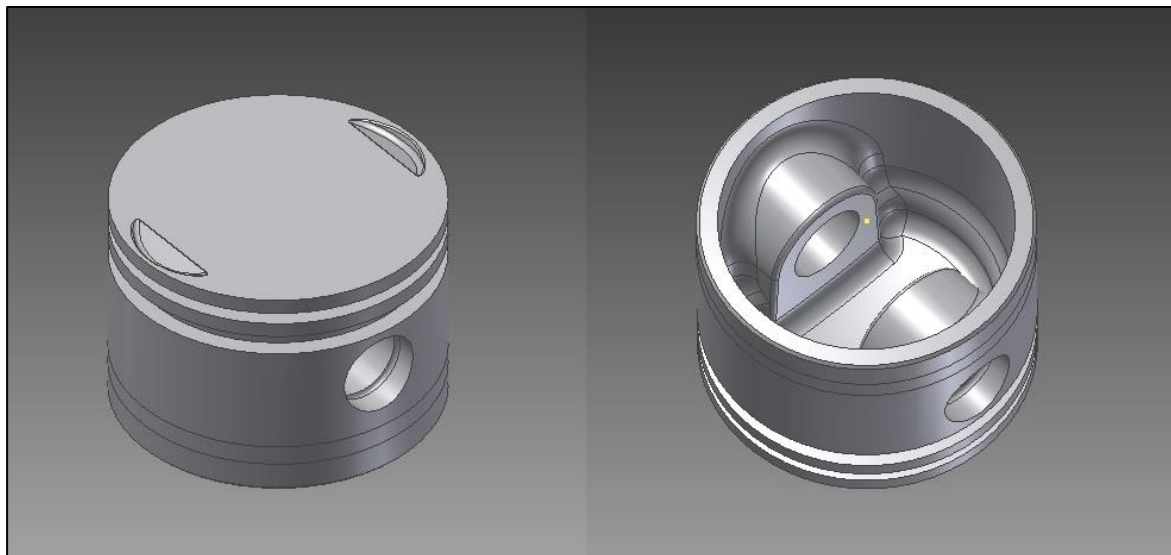
Az alábbi felsorolásban a következő méretek voltak adottak, illetve kerültek meghatározásra:

- átmérő: $\emptyset 31,5\text{mm}$
- teljes magasság: 22mm
- kompresszió magasság: 11mm
- szárhossz: 15.8mm
- csapszemfurat: $\emptyset 8\text{mm}$
- csapszemtávolság: 11mm
- tűzgát magassága: 1.5mm
- 1. gyűrűhorony magassága: 1.2mm
- 1. gyűrűgát magassága: 1.5mm
- 2. gyűrűhorony magassága: 2mm

A méretek meghatározásánál figyelembe kellett venni több olyan méretet, ami már a meglévő motor miatt adottak voltak. Az átmérő a henger furata miatt, a kompresszió magasság a hajtókarhossz miatt nem változhatott. A többi méretet a táblázat alapján, illetve a különböző anyagok hőtágulásait és a tapasztalatból vett értéket figyelembe véve határoztam meg.

A méretek meghatározása 3D-s tervező szoftver segítségével, Inventorral elkészítettem az új dugattyú virtuális prototípus modelljét. A gyárthatóság miatt a belső felületeken 2-3 fokok oldalferdeségeket kellett alkalmazni. A tetőn a szelepek számára kettő zseb került kialakításra, valamint az öngyulladás elkerülése érdekében az ezeken kialakult éleket lekerekítéssel láttam el. Kettő gyűrűhorony alkalmazása mellett döntöttünk a dugattyún, egy kompresszió gyűrű, és

egy olajlevezető gyűrű. Az alsó olajlevezető gyűrűhoronyban körben 8db áteresztő furat került kialakításra. Ezeken keresztül a levezető gyűrűk által levezetett olaj távozni tud. A szoknyarész hagyományos, kör kialakítása a minél nagyobb merevséget szolgálja. A csapszemek erősítés alámetszés nélkül lett kialakítva a gyárthatóság figyelembevételével.



5. ábra. A dugattyú 3D modellje

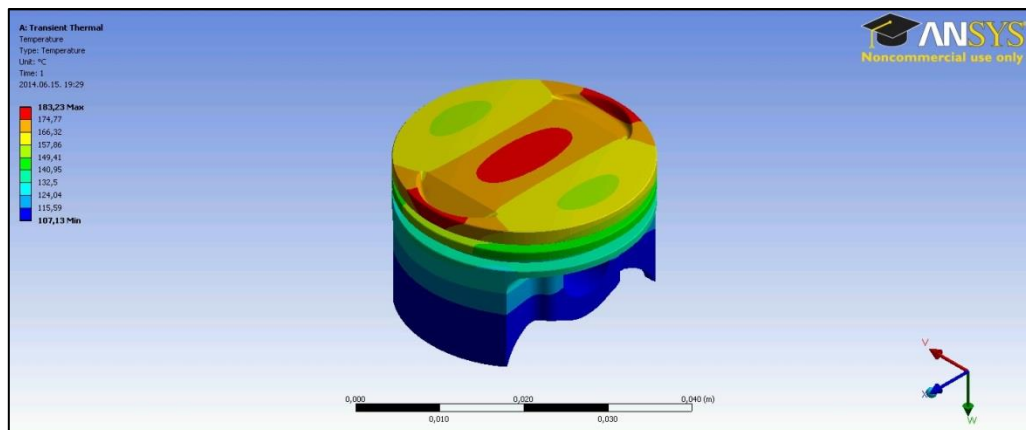
A modell elkészítése után számítások segítségével a lehetséges geometria (1. melléklet). Szimulációk segítségével az üzemi körülmények során fellépő statikai és termikus terhelések kerültek ellenőrzésre, tekintettel, hogy a dugattyú károsodás nélkül bírni fogja-e ezeket. Erre a célra az Ansys végelem szimulációs szoftver került felhasználásra.

4.7. Szimuláció

A pontos eredmények érdekében felhasználtam a Al_2O_3 kerámia adatait, amit a programba beírtam. A program a következő adatokat használja az analízis során: sűrűség, hajlítási szilárdság, nyomó szilárdság, rugalmassági modulus, keménység, hővezetési tényező, lineáris hőtágulási együttható.

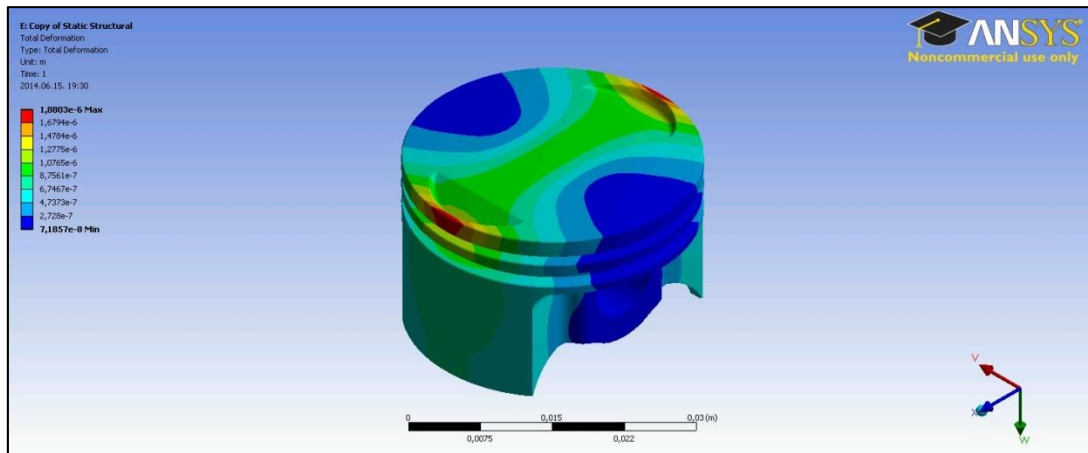
A termikus vizsgálatokkal kezdtem az ellenőrzést (6. ábra). Ugyanis a dugattyú az égéssel közvetlen kapcsolatban áll, az üzem során felmelegszik és eléri egy üzemi hőmérsékletet. Az üzemanyag fűtőértékét megadva megkapjuk milyen ütemben, illetve mennyi idő alatt éri el az üzemi hőmérsékletét. Mivel a dugattyút közvetlenül érinti a hőmérséklet, ezért az lesz a legmelegebb, lefelé haladva hőmérséklete egyre csökken. A hőtágulási együttható segítségével a program adatokat szolgáltat arról, hogy az egyes helyeken milyen mértékű a

hőtágulás. Ezeket az adatokat felhasználva pontosítani lehetett a dugattyú geometriáját, pl.: milyen ovalitással és kúpossággal kell legyártani azt, hogy üzem közben ne szoruljon meg a hüvelyben. A kapott értékek alapján, és az előzetes várakozásnak megegyezően sokkal kisebb mértékű az ovalitás és a kúposság adódott egy alumíniumból készült dugattyúhoz képest.



6. ábra. Termikus analízis

A statikus vizsgálatok során tanulmányoztam, hogy szerkezetileg megfelelő-e a kialakítás (7. ábra). Különböző kényszerek alkalmazásával a programnak megmutattam, hogy a dugattyú a csapszegfuraton keresztül támaszkodik fel a csapszeg segítségével a hajtókarra, illetve a külső palástfelület mentén érintkezik a hengerrel, ami meg is vezeti azt az alternáló mozgás közben. Ezután egy terhelést adtam a dugattyú tetőre, amely azonos mértékű az égési csúcsnyomás során keletkezett terheléssel. A szimulációt lefuttatva megvizsgáltam, hogy mik a tervezett geometria gyengepontjai, található-e rajta gyenge keresztmetszet, ahol plussz anyagot hozzáadva vagy egyszerűen csak nagyobb lekerekítést hozzáadva javítottam azt. A dugattyú tömegének az optimalizálása is itt történt meg. Olyan helyekről anyagot vettem el, amivel nem rontottam statikailag a szerkezetet. Az utolsó fázisban élettartam teszt elvégzésére került sor. Meghatározásra került egy kívánt üzemidő. Ezután tapasztalatokat felhasználva, többszöri iterációval módosításra került a geometria a végső megfelelőnek bizonyult kialakításig. Erre három alkalommal került sor. [10]



7. ábra Statikai analízis

A szimulációk elvégzése után befejeződött a dugattyú geometriának a végleges meghatározása. A következő fázis a gyártás bemutatásáról készült összefoglaló került a következő fejezetbe.

5. Gyártás

A gyártásban egy magyarországi cég, a MIKERON Nagypontosságú kerámia alkatrészeket gyártó és fejlesztő Kft. ajánlotta fel a segítségét. Vállalták azt, hogy legyártják a kerámiából készülő dugattyút. Az elkészítést konzultációk előzték meg. Több lehetőség is felmerült a gyártás megvalósíthatósága tekintetében. Az egyik lehetőség az volt, hogy tömör előgyártmányból forgácsolják ki a külső-belső felületeket. A másik, egyszerűbb megoldás az volt, hogy egy acélból készülő formszerszám elkészítésével, a dugattyú belső geometriájának negatívját munkáltuk ki előre és csak a külső felületek készültek forgácsolással. Az egyeztetések során ezt a második megoldást választottuk ki, ennek érdekében el kellett készíteni a negatív szerszámot.

5.1. Szerszámkészítés:

Az előzőleg kiválasztott megoldás nagy előnye, hogy rövidebb a dugattyúgyártásra fordított idő. A belső felület az előgyártmány elkészítése után már a kész alakkal rendelkezik, nem igényel későbbi megmunkálást. Pontosságát, felületi minőségét a szerszám fogja meghatározni.

A szerszám megtervezésénél több szempontra is figyelni kellett, a felületeket 2..3 fokos oldalferdeséggel kellett ellátni, hogy a szerszámra történő kerámiapor préselést követően kivehető legyen az, az előgyártmányból. A kiegészítést követően az alkatrész zsugorodik, emiatt a szerszámon található összes méretet a gyártó által megadott értékekkel fel kellett szorozni és ezekkel a megnövelt méretekkel kellett elkészíteni a belső felületek negatív szerszámát.

A szerszám előgyártmányául egy $\varnothing 55$ -ös C45-ös anyagú húzott acélrúd szolgált, a megfelelő nyomószilárdság elérése érdekében. A szerszám tervezése és gyártása során három műveletből állt az elkészítés. Első műveletben CNC esztergán készítettem el a szerszám forgásszimmetrikus geometriáját, majd ezután a csapszemek erősítésének helyét kellett kimarni CNC marógépen. Az utolsó fázisban a felületek polírozására került sor, ami elősegíti a szerszám kivételét az előgyártmányból. A szerszám elkészítése önmagában is egy érdekes, nehéz és bonyolult technológiai folyamat volt, aminek a részletezésére ebben a dolgozatban nem térek ki. A következő ábrán láthatjuk az elkészült szerszámot.



8. ábra. Az elkészült szerszám

5.2. A dugattyú elkészítése

Az elkészült szerszámmal a gyártónál folytatódott a dugattyú elkészítése. A szerszámot egy speciális gumicsőbe helyezték bele, majd feltöltötték a 95% tisztaságú, $1\text{ }\mu\text{m}$ -nél kisebb szemcsenagyságú kerámia porral. A gumicsövet felülről lezárták, ezután behelyezték a présgépbe. A préselést a gépben lévő szobahőmérsékletű víz fogja elvégezni 1000 bar-os (!) nyomással. A présgép ezt a nagy nyomást hidraulikus áttételeken keresztül valósítja meg. A préselés közben a porszemcsék között maradt levegő gyors nyomáscsökkenés esetén képes szétrepeszteni a préselt darabot, ezért a nyomás leengedése elég kényes művelet. Az utolsó fázisban a szerszámot ki kell venni az elkészült előgyártmányból. Ez nagy tapasztalatot és ügyességet igényel.

Az első préselést követően a szerszámot kivéve a préselt előgyártmányból a csapszemből sajnos le is tört egy kisebb darab. Ezt a problémát szerszám felületén utólag megtalált kisebb hiba okozta. A felületi hibát speciális polírozó szerrel, (disznózsírba kevert gyémántporral) a szerszámon kijavításra került, így a további előgyártmányok sikeresen elkészültek.

A következő lépésben esztergálással és marással készült el a külső geometria. Ennél a folyamatnál is minden méret tekintetében a megadott értékkel felszorozva kell elkészíteni. A forgácsolás során a préselt előgyártmány kréta állagú anyagával kell dolgozni, ami a megfogásoknál igen nagy odafigyelést igényel, ugyanis csekély erő alkalmazása esetén az előgyártmány összeroppan. Az előgyártmány kréta állaga ellenére is csak

gyémántszerszámokkal munkálható meg. Ez a préselt, kréta állagú anyag rendkívüli módon képes koptatni a gyémánt anyagú, illetve a gyémánt bevonatú szerszámokat is.

A forgácsolás után a darabok kiégetése következett. Ezt 1300-1600 fokon több napon keresztül, fontos és titkos technológiai folyamatok betartásával végezték. Eközben a szerves kötőanyagok kiégnek és végül a kréta állagból egy igen kemény, most már kerámia anyag lesz. A kiégetés után művelet a köszörülés, a 2. mellékletben található méretek szerint. A kiégetett kerámia olyan kemény anyaggá válik, amit tisztán csak kötőanyagba ágyazott gyémántszemcsés koronggal lehet köszörülni. Ebben a műveletben készült el a műszaki számítások és a szimuláció segítségével meghatározott kúposág, illetve a csapszemfuratok túrésezett méretei. A technikai adottságok, illetve a csekély hőalakváltozási tulajdonságok miatt ovalítás nem került kialakításra a dugattyún. A következő ábrán láthatjuk az elkészült kész kerámia dugattyút.



9. ábra. A kész kerámia dugattyú

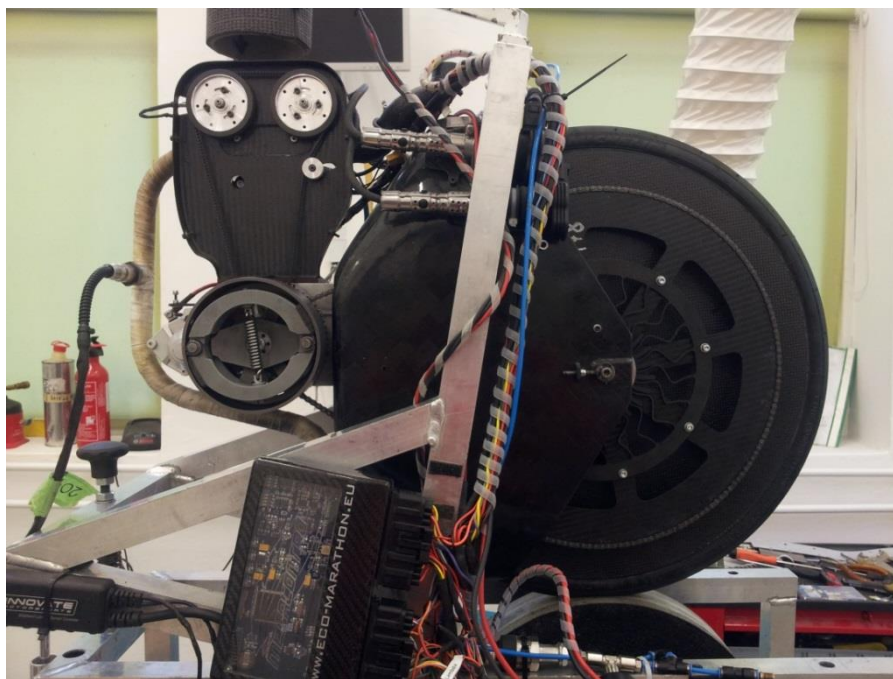
A gyártás után a szokásos méretellenőrzések kerültek elvégzésre, amely során meggyőződtem arról, hogy a meghatározott méretek, túrések pontosan kerültek legyártásra.

6. Tesztelés, mérési eredmények kiértékelése

Ezt követően egy méréssorozatot kellett megtervezni, amely során a főiskola Eco-Marathon csapat (amelynek magam is tagja vagyok) műhelyében található szintén a csapat saját fejlesztéseként elkészült motorparaméter mérő fékpad felhasználásával végeztem a méréseket. A mérések segítségével összehasonlításra kerültek az alumínium és a kerámia anyagból készült dugattyúkkal szerelt motor paraméterei. Ahhoz, hogy a méréseket össze lehessen hasonlítani, megpróbáltam közel azonos környezeti körülményeket létrehozni klimatizált viszonyok biztosításával. A kétféle dugattyú ugyanazon motorban, átszerelés után, ugyanazon a fékpadon kerültek tesztelésre. A szintén az Eco-Marathon csapat által tervezett, fejlesztett és készített motorvezérlő elektronika által mentett adatokból dolgoztam. Rendelkezésemre állt a főtengely-fordulat, a keréksebesség, a befecskendezési idő, az előgyújtási szög, a motorhőmérséklet, a nyomaték, illetve az ebből számítható értékek. [6]

6.1. Mérés

A méréseknél a motorvezérlő paraméterei változatlanul maradtak, csak a dugattyú lett átszerelve. A kiértékelésnél elsősorban a főtengely mért nyomaték-idő diagramból származó következtetéseket vettem figyelembe.



10. ábra. Fékpad

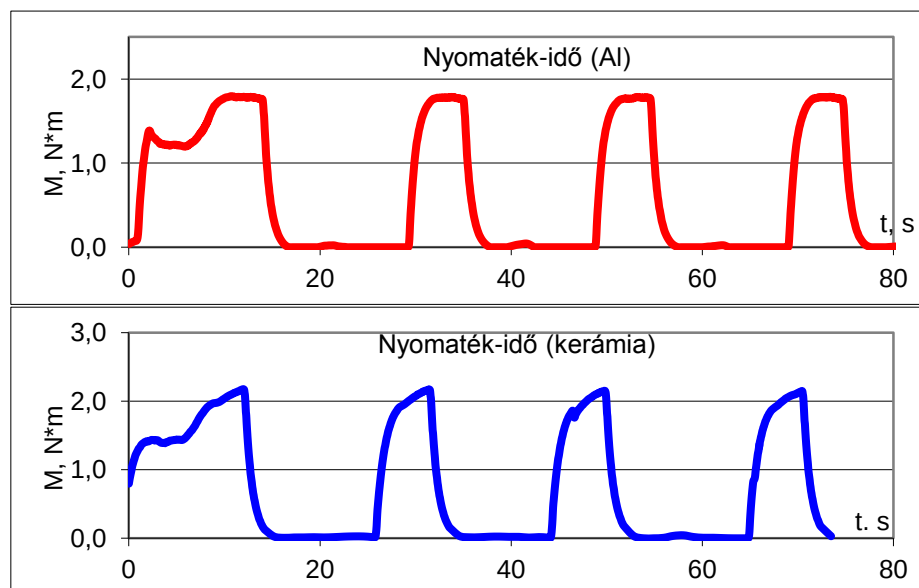
A méréssorozat összeállításánál ügyelni kellett arra, hogy a motoron a nyomatékot egy röpsúlyos kuplung viszi át a hajtásláncon a keréknek, így a pontos kuplungbeállításra is

kiemelt figyelmet kellett fordítani. Az első indításnál 0-ról 3600-as főtengely-fordulatra, majd a következő 10 indításban a kuplung betapadási fordulattól, tehát 1800-tól 3600-as főtengely-fordulatig végeztem a mérést. Ezzel kiküszöbölhető volt a kuplungcsúszásból származó pontatlan eredmény.

Az alumínium dugattyúval szerelt motorral kezdtem a teszt sorozatot, majd ezt követően a motorblokkot szétszerelve kicseréltem a dugattyút a kerámiából készültre, ezt követően ismét elvégeztem a tesztet. A mérés-próbajáratás során kerámia dugattyú használatakor nem észleltem semmi zavaró körülményt, a motor szépen, rajzmentesen, hangjából ítélve nagy nyomatékkal dolgozott. Természetesen az ilyen új fejlesztések során tapasztalható izgalmainkat csökkentette, egyúttal igazolta azt, hogy a műszaki számítások és a szimulációk megfelelőek voltak.

6.2. Kiértékelés

A motorvezérlő elektronikáról letöltve a mérés során rögzített „log” fájlokat elemeztem ki az eredményeket.



11. ábra Alumínium és kerámia dugattyú nyomaték-idő diagram

A fenti diagramon piros színnel került bemutatásra az alumínium dugattyúval történő mérések során kapott nyomatéki értékek az idő függvényében. Az alsó diagramon kék színnel ábrázolt kerámia dugattyúval szerelt motor értékeit láthatjuk. Az látszik egyértelműen a két diagram összevetésében, hogy a kerámia dugattyúval szerelt motor jobb hőhasznosulása, hatásfoka

miatt azonos beállítási paraméterek mellett is magasabb csúcsnyomaték értékek olvashatók le. Ez azt jelenti, hogy ugyanannyi üzemanyag befecskendezése mellett, változatlan környezeti körülmények között nagyobb főtengeyen mért nyomatékot adott le a motor. Így azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az előzetes számítások helyesek voltak, beigazolódtak, a kerámia dugattyú alkalmazásával nőtt a motor hatásfoka. A következő táblázatban foglaltam össze a nyomatéki adatokat, illetve azok különbségét.

2. táblázat. Mért nyomaték

	Alumínium	Kerámia	Különbség (%)
Max. nyomaték	1.82Nm	2,15Nm	+18%
Átlagos nyomaték	1,62Nm	1,83Nm	+12%

Összegzés

A fejlesztések elkezdésekor már a számítások során is ígéretesnek tűnt a kerámia dugattyú fejlesztése. A tervezési folyamat során megismerkedtem a műszaki kerámiák tulajdonságaival, gyártási módszereivel. A fejlesztési folyamat során új számítási módszereket kidolgozva, új szimulációs eljárásokat megismerve egyre több jel mutatott arra, hogy a fejlesztés eredménye pozitív kimenetelű lesz. Az első kísérleti kerámia dugattyú elkészülése után a teszteket elvégezve beigazolódtak a számítások. A mérési eredmények alapján kijelenthetjük, hogy azonos beállítások mellett jobb lett a motor hatásfoka.

Szerettem volna a dolgozatot teljesebbé tenni, bemutatni az előgyártmányt készítő szerszám gyártásának miértjeit, hogyanjait, valamint a kerámia dugattyú gyártástechnológiájának részleteit, de ebben az esetben titkosítani kellett volna a dolgozatot. Ezt mindenképpen szerettem volna elkerülni, mert elsősorban a célom az, hogy az Eco-Marathon csapatban a későbbiekben az utánam következő csapattagok rendelkezésére álljon egy olyan alapvető információ halmaz, amely elősegíti a megszerzett tudás és tapasztalat továbbadását.

A további fejlesztési lehetőségek:

További kísérleteket tervezek végezni abban a tekintetben, hogy a kerámia dugattyú alkalmazása mellett a motor paramétereinek beállítását tovább lehessen optimalizálni és így végül meghatározható váljon a kerámia dugattyúval szerelt motor ténylegesen legjobb beállítások szerinti paraméterei valójában mennyivel lesznek jobbak, mint a legjobb beállítások szerinti alumínium dugattyúval szerelt motor adatai.

Az Eco-Marathon csapatban végzett kerámia dugattyúval kapcsolatos kísérleteink és fejlesztéseink nagyban felkeltették az ausztriai, Gratz-i székhelyű világhírű AVL motor és járműfejlesztő cég érdeklődését, akik Formula 1-es motor fejlesztésével is foglalkoznak. Eredményeink megismerése után meghívták csapatunk tagjait a cégükhöz látogatásra és felajánlották segítségüket kerámia dugattyúval kapcsolatos kísérletek eggyel talán magasabb szintű folytatására, illetve az ezzel kapcsolatos együttműködésre.

Jelenleg, úgy gondolom nem kivitelezhető még, hogy a kerámia dugattyú használata széles körben elterjedjen a hétköznapi autógyártásban, mivel az ilyen anyagú dugattyúk egyelőre csak egyedi gyártásban készülhetnek, így az előállításuk költséges. Azonban, mint azt a bevezetőben is írtam a versenysportban nagy lehetőséget látok a használatára. Ha megoldják a versenysportban a sorozatgyártásra alkalmas technológia fejlesztését, akkor a gyártási költségek nagymértékben csökkennének és ezután bízhatunk benne, hogy hamarosan megjelenhet a hétköznapi járműgyártásban is.

Felhasznált irodalom, hivatkozások

- [1] Koltai Gy.: Közúti járműmotorok könnyűfém dugattyúi. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., 8-90. oldal
- [2] Wayne W.: State of the art pistons. Race Engine Technology, Issue 13 – March/April 2006., 24-35. oldal
- [3] Dr. Dezőnyi Gy. – Dr. Emőd I. – Dr. Finichiu L.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999., 344-365. oldal
- [4] Dr. Vas A.: Belsőégésű motorok szerkezete és működése. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2005., 221-231. oldal
- [5] Grohe, H.: Otto- és Diesel-motorok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., 174-182. oldal
- [6] Grohe, H.: Belsőégésű motorok mérési módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [7] Khovakh, M.: Motor Vehicle Engines. MIR Publisher, Moszkva, 1979., 437-464. oldal
- [8] Gál P. – Csizmadia J.: Gépjárműmotorok II. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1983., 129-177. oldal
- [9] Dr. Bagány Mihály személyes közlés
- [10] Fodor Antal személyes közlés

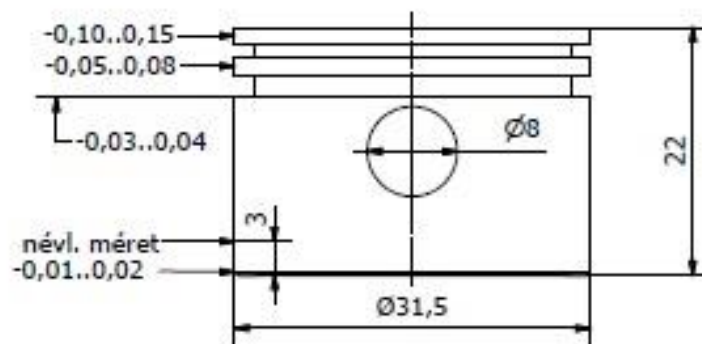
1. ábra: <http://www.dugattyubolt.hu/kepek/15.jpg>

2. ábra: <http://www.diamondracing.net/img/news/NewLightweightPistons-web1.jpg>

Mellékletek

Alapadatok		Dugó/hüvely	
		Al/Fe	kerámia/kerámia
névleges hüvelyátmérő 20 C-on	D, mm	31,48	31,48
névleges dugóátmérő 20 C-on	d, mm	31,46	31,47
átmérőkülönbség 20 C-on	D-d, mm	0,02	0,01
hüvely hőtágulási együtthatója	α_h , 1/C	1,0E-05	0,000007
dugó hőtágulási együtthatója	α_d , 1/C	1,7E-05	0,000007
hüvely üzemi hőfoka	T _h , C	90	90
megmunkálási hőmérséklet	T ₀ , C	20	20
hüvely üzemi átmérője	D, mm	31,50	31,50
Dugattyú tető			
hőmérséklet	T ₁ , C	220	220
eltérés a névleges átmérőtől 20 C-on	$\Delta 1$, mm	-0,11	-0,04
Kompressziógyűrű alatt			
hőmérséklet	T ₂ , C	140	140
eltérés a névleges átmérőtől 20 C-on	$\Delta 2$, mm	-0,06	-0,03
Dugattyúszoknya alja			
hőmérséklet	T ₃ , C	60	60
eltérés a névleges átmérőtől 20 C-on	$\Delta 3$, mm	-0,02	-0,01

1. melléklet. A számításokkal meghatározott dugattyú geometriai méretek



Ellenőr	Megnevezés:	Méret:	Gamf
	Kerámia dugattyú	2:1 Anyag: Al203	
Dátum:	Név:	Tömeg:	Rajzszám:
	Vaczko Dániel		

2. melléklet. A kerámia dugattyú geometriájának méretezése