

KERÁMIA DUGATTYÚ FEJLESZTÉSE

CERAMIC PISTON DEVELOPMENT

Vaczkó Dániel

Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola,
Magyarország

Kulcsszavak:

dugattyú fejlesztés
kerámia
Al₂O₃
belsőégésű motor

Keywords:

Piston development
Ceramic
Al₂O₃
Internal combustion engines

Cikktörténet:

Beérkezett 2015. október 10.
Átdolgozva 2015. október 31.
Elfogadva 2015. november 5.

Összefoglalás

A mai fejlődő világban egyre nagyobb teret hódítanak az elektromos járművek. Ezek korlátozott használhatósága, illetve magas áruk miatt elterjedésük lassan fog bekövetkezni. Manapság is a járművek nagy része belsőégésű motorokkal üzemel, fejlesztésükre sok időt és pénzt fordítanak. Az egyik legnagyobb fejlesztési irányvonal a hatásfok növelés. A kutatásom során a hatásfok javításával, azon belül az égéssel közvetlen kapcsolatban álló alkatrész fejlesztésével, a dugattyúval foglalkozok. Különböző anyagok összehasonlítása után, a kerámiát választottam megfelelő dugattyúanyagnak.

Abstract

In today's prospering world, electric vehicles broaden their horizons. Their presence will be just slightly noticeable in the future because of their high costs and restrained usability. Nowadays most vehicles operate with an internal combustion engine and their development takes a lot of money and effort. The biggest way in developing cars is the increase of efficiency. During my experiment, I did research on delivering a better efficiency, and within that the developments on parts having direct connection with the combustion chamber, namely the piston. After comparing different materials, I chose ceramics as the appropriate piston material.

1. Bevezetés

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.

Ebben a cikkben a hatásfok javításával foglalkozok, azon belül pedig egy, az égéssel közvetlen kapcsolatban álló alkatrész fejlesztésével, a dugattyúval.

A fejlesztés célja egy mikrofogyasztású versenyautó Otto-motorjának hatásfok javítása. Ez a verseny az Eco-Marathon verseny, 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, belefogtam egy új, eddig a járműgyártásban sem használatos dugattyú fejlesztésébe.

2. Anyagválasztás

Szívás ütemben az égéstérbe friss keverék áramlik, majd ezt a gyújtógyertya begyűjtja. A „robbanásakor” 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 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 [1].

2.1. Az anyaggal szemben támasztott követelmények

A keverék begyulladás után 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 [2].

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 a dugattyú anyagának 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 [2].

2.2. Anyagválasztás

A fejlesztés 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 legkisebb.

A következő, 1. táblázatban a jelenleg használt, illetve az új dugattyú fejlesztése során használható anyagokat mutatom be, a kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkező kerámia tulajdonságai az utolsó sorban láthatóak.

1. táblázat. *Anyagok tulajdonságai*

<i>Anyag</i>	<i>Sűrűség, g/cm³</i>	<i>Rug. eh., GPa</i>	<i>Hővezetési eh., W/(m K)</i>	<i>Lin. hőtágulási eh., 10⁻⁶ 1/K</i>
Öntöttvas	7,80	115	60	9
Al + 18% Si	2,70	69	140	17
Rozsdamentes acél, AISI 302	7,86	193	16	17,8
Titánötvözet Ti-6Al-4V	4,43	114	6,7	9
A-997 kerámia (Al ₂ O ₃)	3,90	380	24	5,4-8,4 ~ 7

A kerámia az az anyag, ami a járműgyártás terén még eléggé új anyag, ritkán, legfeljebb csak kísérleti fázisban használatosak. Az előgyártmány előállítás, 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 fejlesztésű dugattyú anyagául a kerámia bizonyul a legmegfelelőbbnek.

2.3. 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:

$$R_{\text{ker}} = \frac{\delta}{\lambda_{\text{ker}} A_D}, \quad R_{\text{ker}} = \frac{10^{-5}}{28 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,0005 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (2)$$

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

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

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

Ha a dugattyú titánból készülne, akkor a hőellenállás:

$$R_{\text{Ti}} = \frac{3 \times 10^{-3}}{6,7 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,574 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (4)$$

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:

$$R_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{3 \times 10^{-3}}{24 \times 7,8 \times 10^{-4}} \approx 0,160 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (5)$$

Kerámia esetén 5,3-szor jobb a hőellenállás az alumíniumhoz képest, így ez a számítás is azt bizonyítja, a kerámia megfelelő lesz [1].

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.

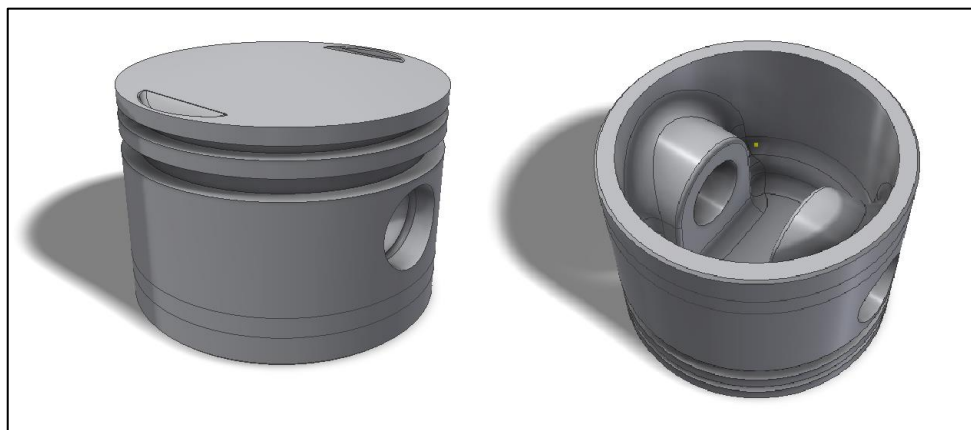
Az új fejlesztésű dugattyú anyagául a hőellenállás szempontjából a kerámia a jó választás.

3. A dugattyú geometria kialakítása

Miután kiválasztásra került az 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.

3.1. Tervezés

A méretek meghatározása során egy 3D-s tervező rendszert használtam. Autodesk Inventorral elkészítettem az új dugattyú virtuális prototípus modelljét. A gyárthatóság miatt a belső felületeken 2-3 fokos oldalferdéseket 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 olajlehúzó gyűrű. Az alsó-olajlehúzó gyűrűhoronyban körben 8 db áteresztő furat került kialakításra. Ezeken keresztül a lehúzó gyűrűk által lehúzott olaj távozni tud. A szoknyarész hagyományos, kör kialakítása a minél nagyobb merevséget szolgálja. A csapszemek erősítés alámetszés nélkül lett kialakítva a gyárthatóság figyelembevételével [3].



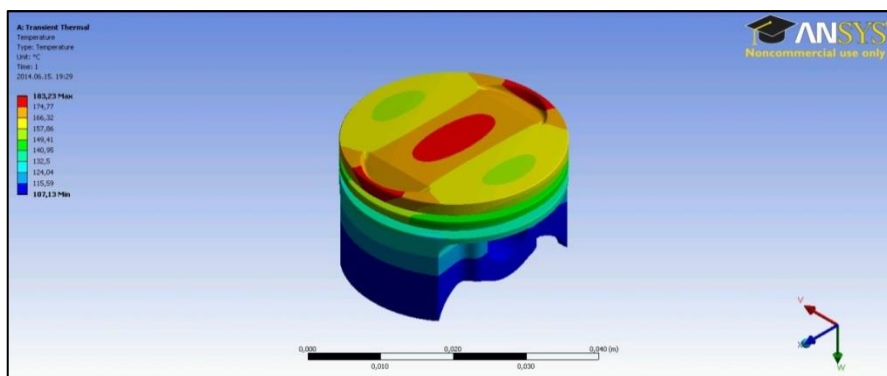
1. ábra. A dugattyú 3D modellje

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

3.2. Szimuláció

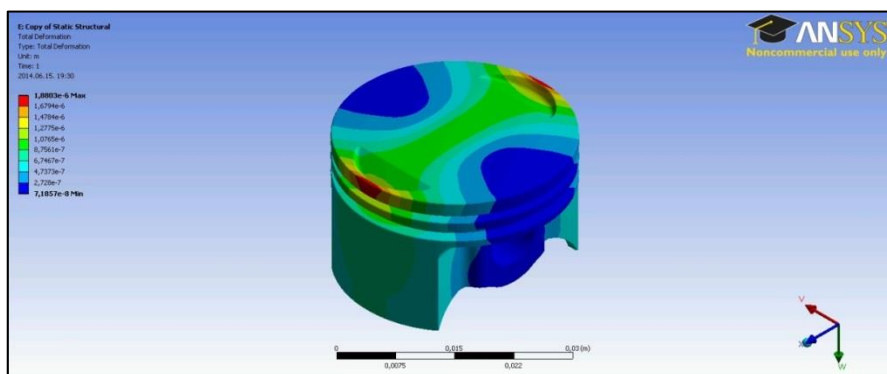
A pontos eredmények érdekében felhasználtam a Al_2O_3 kerámia adatait, amit a programba beírtam. A program a következő adatokat használja az analízis során: sűrűség, hajlító szilárdság, nyomó szilárdság, rugalmassági modulus, keménység, hővezetési tényező, lineáris hőtágulási együttható.

A termikus vizsgálatokkal kezdtem az ellenőrzést (2. ábra), ugyanis dugattyú az égéssel közvetlen kapcsolatban áll, az üzem során felmelegszik és elér egy üzemi hőmérsékletet. Az üzemanyag fűtőértékét megadva megkapjuk milyen ütemben, illetve mennyi idő alatt éri el az üzemi hőmérsékletét. Mivel a dugattyútétőt éri közvetlenül a hő, 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 kúposággal kell legyártani azt, hogy üzem közben ne szoruljon meg a hüvelyben. A kapott értékek alapján és az előzetes várakozásnak megegyezően, sokkal kisebb mértékű ovalitás és kúposág adódott egy alumíniumból készült dugattyúhoz képest [4].



2. ábra. Termikus analízis eredménye

A statikus vizsgálatok során tanulmányoztam, hogy szerkezetileg megfelelő-e a kialakítás (3. ábra). Különböző kényszerek alkalmazásával a programnak megmutattam, hogy a dugattyú a csapszegfuron 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. Erre három alkalommal került sor [4].



3. ábra Statikai analízis eredménye

A szimulációk elvégzése után befejeződött a dugattyú geometriának a végleges meghatározása. A következőekben a gyártás, majd a fékpadi mérések történtek, ezeket a következő cikkemben fogom bemutatni.

4. Összegzés

A fejlesztések elkezdésekor már a számítások során is ígéretesnek tűnt a kerámia dugattyú fejlesztése. A tervezési folyamat során megismerkedtem a műszaki kerámiával. A fejlesztési folyamat során több lehetséges anyagot megvizsgáltam, számítások segítségével összehasonlítottam ezeket, majd kiválasztásra került a legmegfelelőbb. 3D-s tervező rendszer segítségével elkészítettem több lehetséges geometriát. Új szimulációs eljárásokat megismerve egyre több jel mutatott arra, hogy a fejlesztés eredménye pozitív kimenetelű lesz. A termikus és statikus vizsgálatok alkalmazásával megállapítottam, hol lehetnek az üzemelő dugattyúnak a gyenge pontjai. A fejlesztés végére sikerült egy olyan dugattyú geometriát létrehozni, amit ha kerámiából készítenek el üzembiztosan használható lesz.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Bagány Mihály személyes közlés
- [2] Koltai Gy.: Közúti járműmotorok könnyűfém dugattyúi. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., 8-90. oldal
- [3] Khovakh, M.: Motor Vehicle Engines. MIR Publisher, Moszkva, 1979., 437-464. oldal
- [4] Fodor Antal személyes közlés