

**A Budapesti Műszaki Egyetem Doktori Tézisfüzetei
Közlekedésmérnöki Kar Doktori Tanácsa**

**Írta:
Hanula Barna**

**„Belsőégésű motor optimalizálása kerámiaszelepek
alkalmazásával” című témakörből,
amellyel a PhD fokozat elnyerésére pályázik**

2001

Tartalomjegyzék		Oldal
I. rész	A kitűzött tudományos feladat összefoglalása	3
II. rész	A vonatkozó szakirodalom kritikai elemzése	4
III. rész	A kutatás módszerei	5
IV. rész	Tézisek	6
V.a) rész	A témakörhöz legszorosabban kapcsolódó idegen publikációk	8
V.b) rész	A szerző értekezéshez kapcsolódó főbb publikációi	10

I. rész A kitűzött tudományos feladat összefoglalása

Ezen tanulmány célja a motor átfogó optimalizálása egy új szerkezeti anyag nyújtotta lehetőségek minden eddiginél teljesebb figyelembe vételével. A változtatások kiindulópontja a négyütemű Otto-motor hagyományos fémszelepeinek helyettesítése kerámiaszelepekkel (szilíciumnitrid, továbbiakban kerámia vagy SN). A tanulmány célja az elméleti megfontolásokon túlmenően egy valós motor átépítése és motorfékpadi vizsgálata. A vizsgálatok a következő témakörökre koncentrálnak:

- Tüzelőanyag fogyasztás
- Károsanyag kibocsátás
- Forgatónyomaték karakterisztika
- Zajkibocsátás
- Élettartam
- Gyártási költségek

A kerámiaszelepek mechanikai és termikus tulajdonságai a hagyományos szerkezeti anyagoktól annyira eltérőek, hogy a vezérmű szinte valamennyi elemének új kialakítását teszik lehetővé. Ezek a változtatások olyan összetett módon befolyásolják a motor működését, hogy csak egy átfogó optimalizálás képes választ adni a kerámiaszelepek alkalmazásának tényleges előnyeire és hátrányaira. Magának a kerámiaszelepnek a nagyszériában való előállíthatósága nem képezi a vizsgálat tárgyát.

A kerámiaszelepekben rejlő lehetőségek a szilíciumnitrid következő tulajdonságaira vezethetőek vissza:

- nagy szakítószilárdság
- alacsony sűrűség → kis tömeg
- sűrűséghez viszonyított magas E-Modul arány
- magas anyagkeménység → jó kopásállóság
- jó siklási tulajdonságok
- magas hőállóság
- korrózióval szembeni érzéketlenség, valamint vegyi és elektrokémiai semlegesség
- alacsony hőtágulási együttható (ez előnyökkel és hátrányokkal is jár)

Az itt felsorolt előnyökkel áll szemben a kerámiszelepek jelenlegi magas ára és a ridegsége, amely kisebb gyártási tűréseket és ezáltal másodlagos költségráfordítást igényel.

Munkám alapvető célkitűzése az volt, hogy az eddigi kutatásokkal szemben ne csak a kerámiaszelepek egyes izolált tulajdonságait vessem vizsgálat alá, hanem a legmodernebb tudományos eredmények és szimulációs módszerek átfogó felhasználásával a teljes motor „többdimenziós” optimalizálását érjem el. Ily módon a kerámiában rejlő lehetőségek lényegesen nagyobb mértékben használhatók ki, mint bármelyik eddigi tanulmány mutatta.

A valós motor, egy Ford Zetec 2,0-16V átépítésével a következő eredményeket értem el:

- A vezérmű oszcilláló tömegeinek közel 50%-os csökkentése
- A teljes vezérmű súrlódási veszteségeinek 50%-os csökkentése az alacsony motorfordulatszám tartományban, ami a teljes motorra vonatkoztatva 14%-os csökkenésnek felel meg.
- A hengerfej zajszintjének csökkentése 4 dB-vel, illetve a testhang RMS gyorsulásának 50%-ig terjedő csökkentése
- A motor forgatónyomatékának 6%-os növelése az alacsony motorfordulatszám tartományban
- A tüzelőanyag fogyasztás 4-6%-os csökkenése
- A vezérmű meghajtásának elemei mintegy 30%-al kisebb szilárdságúra méretezhetőek

II. rész A vonatkozó szakirodalom kritikai elemzése, valamint a saját kutatás viszonya a nemzetközi kutatásokhoz

A kutatás területén sajnos hazai források nem találhatóak. A nemzetközi kutatási eredményeket két kategóriába osztottam. Az első, gyakorlatilag alapkutatás jellegű, és a szilíciumnitrid anyagszerkezeti tulajdonságaival és gyártásával foglalkozik. Ezen források [1],[2],[9],[10],[11], [12],[13],[14],[15],[16] a témát jól leírják és megbízható alapot szolgáltatnak a szelepek szilárdsági és élettartam méretezéséhez. Mind a saját, mind az idegen források megerősítik ezen források állításait, azaz a szelepek gyárthatósága, mechanikai és termikus tulajdonságai valamint élettartama megfelelt az elméleti megfontolásoknak.

A második kategóriába azokat a forrásokat sorolom, amelyek a kerámiaszelepek gyakorlati előnyeit és hátrányait vizsgálják [4],[5],[6],[7],[17], [18]. Ebben a kategóriában feltűnő, hogy lényegében valamennyi szerző csak a szelepek tömegének csökkenésére koncentrált és alapvetően csak az így lehetővé tett szeleprugóerő-csökkentés lehetőségeit aknázta ki. Csupán [5] és [7] említi a szelepvezérlés káros rezgéseinek csökkenését, azonban itt is konkrét hasznosítás vagy továbblépés nélkül. Ezzel szemben már korábbi munkáimban [19],[20],[22] is utaltam arra, hogy a legnagyobb potenciált éppen a szelepemelési görbék alapvetően új kialakításával tárhatjuk fel. A kerámiaszelepek alkalmazásával ugyanis olyan mértékben megnő a vezérmű sajátfrekvenciája, hogy pozitív szelepgyorsulás jelentősen emelhető. Ennek két fő pozitív eredménye van: az egyik, hogy javul a vezérlési időkeresztmetszet és a nyitvatartási szög aránya, ezzel pedig a motor nyomatéki jelleggörbéje. A másik, hogy a magasabb pozitív gyorsulási értékek rövidebb gyorsulási időt tesznek lehetővé, ami viszont növeli a negatív gyorsulás számára rendelkezésre álló időt és ezáltal a szeleprugó erejének további csökkentését teszi lehetővé. Említésre méltó az is, hogy az ílymódon optimalizált vezérmű súrlódási veszteségeinek csökkentése a teljes vezérműhajtás takarékosabb kialakítását engedi meg és ílymódon további tüzelőanyag-megtakarítást tesz lehetővé [20],[22].

Leglényegesebb azonban, hogy a javított nyomatéki karakterisztika a jármű dinamikájának romlása nélkül a lökettérfogat csökkentését és/vagy a jármű összátétel „megnyújtását“ engedi meg, ami ugyancsak további

tüzelőanyagfogyasztás-csökkenést eredményez. A dinamikai tulajdonságok jelentős javulását mutatja, hogy a [21] alatt leírt könnyű dízelmotorban a kerámiaszelepek segítségével olyan OHV-vezérlést sikerült kialakítanom, amelynek maximális fordulata meghaladja a 10000 1/perc-et.

Legújabb munkáimban a kerámiaszelepek egy további előnyös tulajdonságát vizsgáltam. A legújabb, közvetlen befecskendezésű Otto-motorok közös problémája a szívószelepek fokozott kokszosodása. Mivel a jelenség legfőképpen a szívószelepek kedvezőtlen hőmérsékletén alapul [25],[26], ezért különböző eljárásokat próbáltam ki a kedvezőtlen hőmérséklet-tartomány elhagyására. Az egyik legkedvezőbb eredményt éppen a kerámiaszelepek szolgáltatták, mivel alkalmazásukkal a szívószelep hátoldalának hőmérséklete szinte a teljes üzemi tartományban a kritikus 200°C alatt tartható. [5].

Az egyik irodalmi forrás [17], a NO_x-emisszió jelentős csökkenéséről számol be a kerámiaszelepek alkalmazásával kapcsolatban, azonban az okozati összefüggések megnevezése nélkül. Ezt az állítást véleményem szerint semmilyen elméleti megfontolás nem támasztja alá, és ezirányú saját motorfékpadi vizsgálataim sem igazolták [20], [22].

III. rész A kutatás módszerei

Kutatásom első szakaszában irodalmi források alapján meggyőződtem arról, hogy a szilíciumnitrid kerámia anyagszerkezeti mutatói valamint technológiájának fejlettsége lehetővé teszik motorszelepként való alkalmazását. [1],[2],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15],[16].

A következő szakaszban kiértékeltem a kerámiaszelepekkel eddig elért eredményeket [4],[5],[6],[7],[17],[18] és saját megfontolások alapján meghatároztam azokat a területeket, ahol a kerámia további előnyöket biztosít. [19],[20],[22],[26][27]. Elsőorban a kerámia jó dinamikai tulajdonságai (a rugalmassági modulus és a sűrűség arányszáma a fémekénél jóval magasabb) nyitnak óriási lehetőségeket a szelepemelési görbék kialakításában. Ez elsősorban abban nyilvánul meg, hogy az elérhető nagyobb szelepgyorsulások segítségével a vezérlés időkeresztmetszete növelhető, illetve a szelepek nyitvatartási ideje csökkenthető. Ennek a feladatnak a megoldására két összehangolt szimulációs rendszert hoztam létre, illetve alkalmaztam. A szelepvezérlés dinamikáját egy soktömegű lengőrendszer segítségével írtam le, amellyel ellenőriztem a számítógéppel generált szelepemelési görbéket. Az ellenőrzés fő kritériuma a szelepek maximális zárási sebessége dinamikus körülmények között. Az így generált szelepemelési görbéket betápláltam a Linhoff professzor módszerei szerint felépített egydimenziós töltéscsere-szimulációs számításba. Ezzel a módszerrel többszörös iteráció segítségével kialakítottam egy optimális motorkonfigurációt.

Ezután a számítási eredmények alapján elkészítettem egy Ford Zetec 2,0-16V motor módosításához szükséges alkatrészeket, valamint a szükséges fékpadi vizsgálatok munkatervét. Ezek a vizsgálatok magukba foglalták az egyes részegységek méréseit egy külső hajtású próbapadon, mint például súrlódás, zaj, a szelepek zárási sebessége valamint a teljes motor fékpadi mérését az emisszió, a

tüzelőanyagfogyasztás és a forgatónyomatéki karakterisztika szempontjából. Ezzel párhuzamosan elméleti megfontolások alapján feltártam azokat a másodlagos lehetőségeket, amelyek révén a kerámia előnyei jobban kihasználhatóak, illetve az esetleges hátrányok kompenzálhatóak.

A kísérleti szakaszban a szimultán mérés technika következetes alkalmazásával végrehajtottam a tervezett mérési programot. Ez azt jelenti, hogy például a külső hajtású próbapadon egyidejűleg mértem a vezérmű súrlódását, a szelepek zárási sebességét, valamint a lég- és testzajt. Ily módon kizárható, hogy az alkatrészek kopása, a hűtő- és kenőrendszer kondicionálásának eltérései illetve a munkapont nem teljesen azonos beállítása az eredményeket befolyásolja.

A munka záró részében kiértékeltem a mérési eredményeket és összehasonlítottam azokat a szimulációs számítások eredményeivel.

IV. rész Tézisek

1. A szilíciumnitrid kerámia szilárdsági mutatói a folyamatos fejlesztés eredményeképpen igen magas szintet értek el. Ezek az értékek lehetővé teszik a ma használatos acélbázisú szelepek helyettesítését hasonló geometriai kialakítás mellett. [1],[2],[9],[10],[11], [12],[13],[14],[15],[16]
2. A SN szerkezeti anyag alacsony sűrűsége a szelepek tömegének jelentős csökkentését teszi lehetővé. Ezáltal csökkenthető a szeleprugóerő, ez pedig a motor belső súrlódásának csökkenését eredményezi. A csökkentett súrlódás pedig alacsonyabb tüzelőanyagfogyasztás elérését teszi lehetővé. [4],[5],[6],[7],[17],[18] [19],[20],[21],[22],[32]
3. A SN sűrűséghez viszonyított magas E-Modul aránya a szelep sajátfrekvenciájának növekedését eredményezi. Ezáltal csökken a teljes vezérmű lengésekre való hajlama is. Ennek közvetlen kihatása a motorzaj csökkenése. [5], [20], [22]
4. A 3. pontban leírt pozitív hatás csökkenti a szükséges dinamikai rugóerő tartalék mértékét és ezáltal a 2. pontban leírt hatás további kiaknázását teszi lehetővé. [19], [20], [22]
5. A 2. és 3. pontban rejlő előnyök együttes eredményeképpen lehetséges a megengedett maximális szelepgyorsulás megnövelése. Ezt többféleképpen használhatjuk: azonos vezérlési szögek esetén növelhető az időkeresztmetszet, ami magasabb motorteljesítményt tesz lehetővé, vagy pedig azonos időkeresztmetszetet valósíthatunk meg csökkentett szelepnitvatartási idő mellett, ami a motor forgatónyomatéki karakterisztikájának kedvezőbb kialakítását engedi meg. A csökkentett vezérlési szög további előnye, hogy alátámasztja a változtatható vezérlési rendszerek hatékonyságát (minél rövidebb ugyanis a szelep nitvatartási ideje, annál nagyobb tartományban válik lehetségessé a vezérműtengely üzemi elállítása). [19], [20], [22], [31]
6. A pozitív szelepgyorsulás növelése kiaknázható a szeleprugóerő további csökkentésére (mivel hosszabb idő áll rendelkezésre a szelep lassítására a szeleprugó által). Így a 2., 4. és 6. pont figyelembevételével nemcsak a szeleprugó rugóállandója, hanem ezáltal beépítési mérete is jelentősen csökkenthető. Ez elősegíti a hengerfej magasságának a csökkentését, ami a teljes motor magasságát, súlyát és árát pozitívan befolyásolja. [19], [20], [22]
7. A tömeg és rugóerők együttes csökkentése a vezérmű és a vezérműhajtás szinte valamennyi elemének gyengébbre méretezését teszi lehetővé és ezáltal költség, valamint további súrlódáscsökkentést von maga után. [19], [20], [22]. Szélső esetben a kerámiaszelepek lehetővé teszik az OHV-vezérlés alkalmazását, anélkül, hogy az OHC-rendszerek dinamikus jellemzőit alulmúlnánk. Ezt [21]-ben bizonyítottam.

8. A SN jó melegszilárdsága elősegíti a $\lambda=1$ -es légviszony alkalmazását Otto-motorok teljes terhelési tartományában. A mai gyakorlatnak megfelelően ugyanis nemritkán éppen a kipufogószelepek hőterhelésének csökkentése érdekében szükséges a tüzelőanyag-levegő keverék dúsítása. [5], [19], [20], [22]
9. A SN hővezetési tulajdonságai bizonyos mértékben rosszabbak az acélbázisú szelepanyagoknál. Mivel azonban a különbség nem jelentős és a szelepek az égéstér felületének csak kis részét képviselik, nem várható a motor kipufogógáz emissziójának jelentős megváltozása vagy romlása. Inkább valószínű, hogy kerámia alkalmazása által lehetővé váló másodlagos konstrukciós változtatások összességükben az emissziós értékek javítását teszik lehetővé. [5],[17],[19],[20], [22], [23]
10. A kerámiaszelepek alkalmazása jelentősen alátámasztja a változtatható szelepvezérlési rendszerek fejlesztését, mivel a vezérlés működtetésének energiaigénye jelentősen csökken. [5],[19],[20], [22]

V. a) A témakörhöz legszorosabban kapcsolódó idegen publikációk

1. Ceramic Valve NGK – (MTZ 03/1993)
2. Advanced Ceramic Manufacturing of SiAlon Exhaust Valves (Preprint of the annual Automotive Technology Development 1994)
3. A Study of the Effects of Ceramic Valve Train Parts on Reduction of Engine Friction by Hiromu Izumida, Takao Nishioka, Akira Yamakawa and Masamichi Yamagiwa – (SAE Paper 970003)
4. A New Material Undergoes large-Scale Testing – Ceramic Valves (Mercedes-Benz, Research, Jun. 1997)
5. Untersuchung mit Ventilen aus Leichtbau-Werkstoffen (MTZ 09/1999)
6. Keramische Ventile im Automobil (Franz Magerl, Sigfried Lauf und Kemal Turan) MTZ 59 (1998) 10
7. Analyse und Optimierung von Ventil- und Steuertrieben in Verbrennungsmotoren (Manfred Arnold, Jörg Roß, Friedrich-Wilhelm Speckens) MTZ 54 (1993) 3
8. Hőátadás és hőterhelés belsőégésű motorokban - Sitkei György, Budapest, 1962
9. Siliciumnitrid-Keramik – ein bereits bewährter Werkstoff für Motorventile. Gugel, E.; Wötting, G.; Claeys, P.; Woditsch, P.: In: VDI-Ber. 1235 (1995), S. 209-219
10. NGK to Supply Ceramic Valves to Mercedes-Benz for Monitor Road Test – JATI Courier, Vol. 16, November 08, 1997
11. Application-Oriented Development of High-Performance Si₃N₄ Materials and Components. (Wötting, G.; Frassek, L.; Leimer, G.; Schönfelder, L.) In: DKG 70 (1993), S. 287-294

12. Some New Aspects of Microstructural Development during Sintering of Silicon Nitride: Silicon Nitride '93. (Feuer, H.; Wötting, G.; Gugel, E) In: Key Engineering Materials, 89-91 (1994), S. 123-128
13. Advanced Manufacturing Technology for a Ceramic Diesel Engine Valve – (Pujari, V.K.; Collins, W.T.; Lynch, L.D.; Burk, C.) In: Annual Automotive Technology Development Customers's Coordination Meeting – Dearborn, Michigan October 27 October 30, 1997
14. New Ceramic Engine Valves (Asia-Pacific Automotive Report – Volume 271, 20. Dezember, 1997, Page 39)
15. Life Prediction Analysis for a Ceramic Diesel Engine Valve (Wereszczak, Andrew, A.; Kirkland, T.P.; Ferber, M.K.) 1996 Automotive Technology Development Customers Coordination Meeting
16. Life Prediction Analysis of a Ceramic Diesel Engine Valve: Effects of a Changing Weibull Distribution (Wereszczak, Andrew, A.; Andrews, M.J.; Kirkland, T.P.; Ferber, M.K.) 1997 Automotive Technology Development Customers Coordination Meeting
17. Ceramic Valves Reduce NOx Emissions (Ward's Engine and Vehicle Technology Update – March 15, 1995)
18. Ceramic material reduces engine wear (Ward's Engine and Vehicle Technology Update – September 1, 1997)

V. b) A szerző értekezéséhez kapcsolódó főbb publikációi

19. Einsatz von Keramikventilen in Verbrennungsmotoren (Barna Hanula MTZ 1995 „Engineering Partners“ Sonderausgabe)

20. Einsatz von Keramikventilen der HOECHST AG (Barna Hanula Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1995) Tanulmány a szilíciumnitrid-szelepek mechanikai és termodinamikai alkalmazhatóságáról belsőégésű Otto-motorokban. A szelepvezérlés dinamikai számítása, dinamikai, akusztikus és tribológiai mérése, valamint a módosított és a szériamotor fékpadi elemzése emisszió, tüzelőanyagfogyasztás és teljesítmény szempontjából. A technikai és gazdasági hatások átfogó elemzése.
21. Ultralight very high speed diesel engine for unmanned airplanes (Barna Hanula, Steve Weinzierl SAE-paper 2002 előkészületben). Ezenkívül azonos című előadás 2002 márciusban a detroiti SAE-Show keretében
22. The potential of the ceramic valve in IC engines (Barna Hanula, Steve Weinzierl, Dr. Roland Ernst SAE-paper 2002 előkészületben).
23. Glühzündungsuntersuchungen an dem Ford 1,0 L SC –Motor (Barna Hanula, Thomas Schnitzler, Dr. Roland Ernst MTZ publikáció előkészületben)
24. Tear-down friction analysis of the 4,0 SOHC engine (Barna Hanula Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1994)
Egy V6-hengeres motor súrlódási veszteségeinek elemzése elektromos hajtással, a különböző alkatrészcsoportok egyenkénti és összetett mérésével.
25. Ford I3 DISI Valve seat temperature measurement Report No. FO/2000/101 (Barna Hanula, Frank Becker, Henning Hoff, Alexander Krause-Heringer Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 2000)
26. Ford I3 DISI Valve temperature measurement Report No. FO/2000/107 (Barna Hanula, Frank Becker, Henning Hoff, Alexander Krause-Heringer Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 2000)
27. Ford I3 DISI Intake valve deposit formation Final report No. FO/2000/119 (Barna Hanula, Henning Hoff Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 2000)
28. Személygépkocsik tüzelőanyagfogyasztása hidegüzemi körülmények között. Hanula Barna (Autó-Motor 1985)
29. Entwicklungsbericht Opel-DTM Rennmotor (Phase 3) (Barna Hanula Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1991)
Egy soros 6 hengeres 3,0l hengerűrtartalmú versenymotor teljesítményének növelése 283-ról 310 kW-ra. Áramlástan mérések, fékpadi mérések, töltéscsere optimalizálás.
30. FORD DOHC 16V Power-recovery (Barna Hanula Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1992)
Tanulmány és gyakorlati megoldások a szériagyártásban a névlegesnél kisebb teljesítményű motorok elkerülésére. A kompresszióviszony optimalizálása a kopogási határ pontos mérés-technikai meghatározásával, valamint a

töltéscserét befolyásoló alkatrészek változtatása a költség/haszon-arány figyelembevételével.

31. VW VR6 2,9l-Motor Leistungssteigerung (Barna Hanula, Dr. Heino Beermann Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1993)
Kísérleti munka és töltéscsere-számítások a VW VR6-os motorjának teljesítménynövelésére. A szívó- és kipufogórendszer, a hengerfej és szelepvezérlés valamint a motorvezérlő elektronika átdolgozása. A teljesítmény megnövelése 128-ról mintegy 157 kW-ra a közúti alkalmazhatóság megtartása mellett.
32. Dynamic torque investigations on the camshafts via strain gauge measurements (Barna Hanula, Dr. Heino Beermann Entwicklungsbericht Dr. SCHRICK GmbH 1994) V-motor komplex vezérmű-lánchajtásának dinamikus vizsgálata. A lánckereket terhelő nyomaték mérése nyúlásmérő bélyegekkel és nagyfrekvenciás telemetrikus rendszerrel.